

**Untersuchungen am stabilisierten
elektrischen Lichtbogen (Wälzbogen)
in Stickstoff und Kohlensäure
bei Drücken von 1 bis 40 at.**

Dissertation
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs.

Der Technischen Hochschule Berlin

vorgelegt am 11. Oktober 1937

von

Dipl.-Ing. Rudolf Foitzik
aus Myslowitz

Genehmigt am 10. Dezember 1938

Berichter: Prof. A. Matthias
Mitberichter: Prof. Dr. phil. G. Mierdel

ISBN 978-3-662-28037-9 ISBN 978-3-662-29545-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-29545-8

Sonderdruck aus
„Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken“
XIX. Band, 1. Heft, 1940

Meinen verehrten Eltern
in dankbarer Liebe
zugeeignet

Inhaltsübersicht.

- I. Einleitung.
- II. Versuchsanordnung.
- III. Prüfung der Meßapparatur.
 - a) Einfluß der Drehzahl des Stabilisierungsrohres auf die Stabilisierung der Säule.
 - b) Einfluß der Temperatur des Stabilisierungsrohres auf die Bogenspannung.
 - c) Einfluß einer optischen Verzerrung des Glasrohres auf die photographisch bestimmten Bogendurchmesser.
- IV. Meßergebnisse.
 - 1. Messungen in Stickstoff.
 - a) Stromspannungs-Charakteristiken bei verschiedenen Drücken.
 - b) Bestimmung der Längsfeldstärke aus den Stromspannungs-Charakteristiken.
 - c) Messung der Säulendurchmesser zur Bestimmung der Stromdichte.
 - d) Abhängigkeit der Stromdichte von Stromstärke, Druck und Längsfeldstärke.
 - 2. Messungen in Kohlensäure.
 - a) Stromspannungs-Charakteristiken und Längsfeldstärke.
 - b) Säulendurchmesser und Stromdichte.
- V. Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie.
 - a) Leitfähigkeit der Bogensäule in Stickstoff.
 - b) Energie der Bogensäule in Stickstoff.
 - c) Strom- und Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke nach dem Minimumprinzip.
 - d) Druckabhängigkeit von Säulendurchmesser und Säulentemperatur nach dem Minimumprinzip.
- VI. Schluß.
Zusammenfassung.

I. Einleitung.

Über den elektrischen Lichtbogen unter erhöhtem Druck liegen bereits eine Reihe von Veröffentlichungen vor. L. Duncan, A. J. Rowland und R. J. Todd [1]¹⁾ haben den Bogen bei Drücken bis 10 at untersucht, O. Lummer [2] bis 25 at, G. P. Luckey [3] bis 35, W. Mathiesen [4] bis 6 at.

Während die Versuche der ersten Autoren zur Prüfung der damals bestehenden Lichtbogentheorie durchgeführt wurden, verfolgten die nächsten Untersuchungen einen besonderen technischen Zweck: O. Lummer versuchte durch die Drucksteigerung möglichst hohe Temperaturen und eine Erhöhung der Lichtausbeute zu erreichen. Ebenso hatte W. Mathiesen das Ziel, bei erhöhtem Druck eine Steigerung der Intensität und Wirtschaftlichkeit des Bogenlichtes für beleuchtungstechnische Zwecke herbeizuführen, während G. P. Luckeys Bestreben dahin ging, für die Glühlampenfabrikation Wolfram zum Schmelzen zu bringen.

¹⁾ Die eingeklammerten schrägen Zahlen beziehen sich auf das Schrifttum am Schluß der Arbeit.

Wenn auch diese Versuche teilweise von Erfolg begleitet waren, so haben sie doch über das eigentliche Verhalten des Lichtbogens, d. h. über die Abhängigkeit der physikalischen Daten der Bogenentladung vom Druck wenig brauchbare Aussagen machen können.

Das erklärt sich daraus, daß die in den genannten Veröffentlichungen untersuchten Lichtbögen unter unbefriedigenden Bedingungen für eine einwandfreie Messung brannten. Es handelte sich durchweg um kurze Bögen, bei denen u. a. gegenseitige Störungen der einzelnen Abschnitte der Entladung auftraten.

Erst die Anwendung einer wirksamen Stabilisierungsmethode [5, 6] ermöglichte es, lange Bogenentladungen bei definierten sauberen Verhältnissen zu erzeugen und zu studieren, wie die ersten Messungen von W. Grotrian [7] und weitere, z. B. von A. v. Engel [8, 9, 10], zeigten. Die Versuche von W. Grotrian ergaben vor allem, daß das Trägergas von entscheidender Bedeutung für den Lichtbogen ist und daß die Beschaffenheit der Elektroden demgegenüber zurücktritt. Da die Säule stabilisierter Bögen den ausgeprägtesten Teil der Entladung darstellt, rückte das Interesse für experimentelle und theoretische Untersuchungen daran in den Vordergrund.

Neben den Versuchen am luftwirbelstabilisierten Lichtbogen wurden auch Bögen großer Stromstärke bei extrem hohen Stromdichten in der Säule eingehenden Untersuchungen unterzogen [12, 13, 14, 15, 18]. Versuche über die Druckabhängigkeit der einzelnen Meßgrößen der stabilisierten Säule oberhalb einer Atmosphäre sind jedoch bis jetzt nicht veröffentlicht.

Eine strenge Theorie, die die Einzelheiten der Bogenentladung unter den verschiedensten Bedingungen wiedergibt, existiert zwar noch nicht, jedoch führen die theoretischen Ansätze über die physikalischen Grundvorgänge in der Bogenentladung zu Gleichungen, die die unter sorgfältigen Versuchsbedingungen aufgenommenen Meßgrößen der Bogensäule im großen ganzen befriedigend wiedergeben. Fruchtbar hat sich in diesem Zusammenhang vor allem die Minimumtheorie erwiesen, die erstmalig von M. Steenbeck [16] auf den Lichtbogen angewandt wurde. Sie besagt, daß ein Lichtbogen bei bestimmten vorgegebenen Daten seine veränderlichen Größen so einstellt, daß seine Elektrodenspannung den kleinstmöglichen Betrag annimmt.

Obleich ein strenger Beweis für die Gültigkeit der Minimumtheorie noch nicht geliefert wurde und seine Richtigkeit angefochten [17] wird, so steht sie doch nach den Arbeiten von F. Kesselring [18], R. Holm, B. Kirschstein, F. Koppelman [19, 20] nicht im Widerspruch zur Beobachtung. Wegen der dabei gemachten Vernachlässigung der radialen Temperaturabnahme in der Säule kann allerdings nur eine angenäherte Wiedergabe der tatsächlichen Verhältnisse erwartet werden.

Da die Minimumtheorie zu den Grundgleichungen für die stationäre Bogenentladung, der Stromträgergleichung, der Ionisierungs- und der Energiebeziehung eine noch fehlende notwendige Zusatzbedingung darstellt, ist es mit ihrer Hilfe grundsätzlich möglich, die physikalischen Größen in der Lichtbogensäule ohne Anwendung von empirischen Meßwerten zu beschreiben.

Es muß nun als wertvoll angesehen werden, die Anwendbarkeit der Minimumtheorie durch weiteres Beobachtungsmaterial zu prüfen. Dafür sind Untersuchungen über die Druckabhängigkeit der Bogensäule besonders geeignet.

Es ist deshalb das Ziel der vorliegenden Arbeit, möglichst sorgfältige Messungen an der stabilisierten Säule einer Gleichstrombogenentladung bei verschiedenen

Strömen und Drücken durchzuführen und die Ergebnisse in Beziehung zu der nach der Minimumtheorie errechneten Strom- und vor allem Druckabhängigkeit der veränderlichen Größen der Bogensäule zu bringen.

II. Versuchsanordnung.

Bei den hierbei vorgesehenen Stromstärken bis etwa 25 A kommen zwei Stabilisierungsmethoden in Betracht, die Luftwirbelstabilisierung nach P. Schönherr [5,6,7] und die Wälzbogenstabilisierung nach R. Holm [9, 10]. Die Luftwirbelstabilisierung eignet sich vor allem für die Erzeugung extrem langer Bögen, hat jedoch Nachteile. Auf Grund sinngemäßer Übertragung der Reynoldsschen Ähnlichkeitsbeziehung¹⁾ ist anzunehmen, daß die Wirksamkeit der Luftwirbelstabilisierung bei hohen Drücken stark nachläßt, da die Neigung zur Bildung turbulenter Wirbel, die gerade beim luftwirbelstabilisierten Bogen besonders groß ist, proportional mit dem Druck ansteigt. Dagegen dürften beim Wälzbogen unter sonst gleichen Umständen (Rohrdurchmesser, Form der Elektroden, Winkelgeschwindigkeit des Luftwirbels bzw. des Glasrohres) turbulente Wirbel und damit Störungen der Stabilisierung erst bei wesentlich höheren Drücken auftreten.

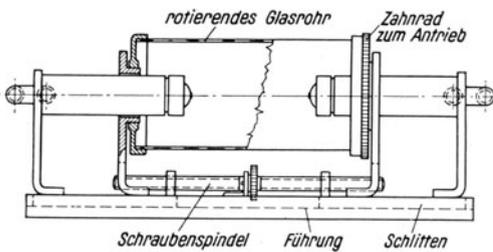


Bild 1. Wälzbogenanordnung.

Während ferner beim Wälzbogen die stabilisierenden Gasmassen vor allem in den mittleren Bogenbereichen eine reine Rotationsbewegung ausführen und somit eine gleichmäßige Energieabgabe längs der Bogensäule bedingen, überlagert sich bei

der Luftwirbelstabilisation der Rotation noch eine Translation der Gasmassen in der Einblasrichtung. Der Energieentzug und damit auch die Längsfeldstärke verringert sich dadurch längs der Bogensäule wegen der zunehmenden Erwärmung des Gases. Bei atmosphärischen Drücken scheint allerdings diese Abnahme der Längsfeldstärke von untergeordneter Bedeutung zu sein [9], es ist jedoch nicht ohne weiteres die Auswirkung bei höheren Drücken zu übersehen.

Für die Anwendung der Wälzbogenstabilisierung bei den vorliegenden Untersuchungen sprach neben den obigen Überlegungen vor allem die Tatsache, daß der Wälzbogen theoretischen Energiebetrachtungen deshalb besonders leicht zugänglich ist, weil bei ihm nur Wärmeleitung und Wärmestrahlung als Energieabfluß zu berücksichtigen sind, insbesondere also die Wärmekonvektion, die beim luftwirbelstabilisierten Bogen prinzipiell nicht zu vernachlässigen ist, hier keine Rolle spielt.

Die Stabilisierung nach dem Wälzbogenprinzip erfolgte durch ein um die Säulenachse schnellrotierendes schwer schmelzbares Glasrohr von 3 oder auch 5 cm Dmr.,

¹⁾ In der Strömungslehre ist nach O. Reynolds mechanische Ähnlichkeit zweier Systeme zu erwarten, wenn $\frac{\rho_1 \cdot w_1 \cdot l_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 \cdot w_2 \cdot l_2}{\mu_2} = \text{const}$ ist, wobei l_1, l_2 = charakteristische Längen, w_1, w_2 = charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten, μ_1, μ_2 = Zähigkeiten und ρ_1, ρ_2 = Dichten bedeuten. Turbulenz tritt auf, wenn die Konstante einen charakteristischen Wert (Reynoldssche Zahl) überschreitet. Die Zähigkeit oder innere Reibung von Gasen ist unabhängig vom Druck (außer in der Gegend des Verdampfungspunktes). Die Dichte verläuft hierbei etwa proportional mit dem Druck. Als charakteristische Länge kann hier der Radius des Luftwirbels angesehen werden.

das durch einen kleinen Elektromotor über ein Zahnrad angetrieben wurde. Die Drehzahl des Glasrohres konnte in weiten Grenzen bis zu maximal 3400 U/min reguliert werden. In Bild 1 ist ein Schnitt durch die Wälzbogenanordnung dargestellt.

Die beiden Bogenelektroden bestanden aus schwer schmelzbaren Metallen (Osmium-Iridium-Plättchen und Wolfram), die auf einem dünnen Kupferblech an der Stirnseite je eines wassergekühlten Kupferrohres befestigt waren. Bild 2 zeigt eine Elektrode im Schnitt. Die Elektroden waren zur Aufnahme des erhöhten Gasdruckes in einem abgeschlossenen Stahlgefäß angeordnet und also während der Versuche nicht zugänglich. Der gegenseitige Elektrodenabstand (Bogenlänge) wurde deshalb mit Hilfe eines im Druckkessel befindlichen

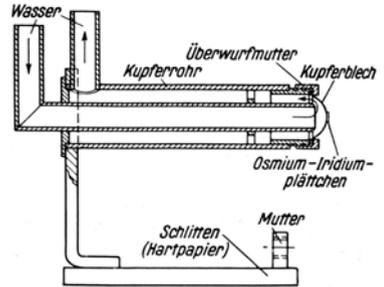


Bild 2. Bogenelektrode im Schnitt.

Elektromotors geändert. Mit einem besonderen elektrischen Kontaktgeber und Übertrager konnte der jeweilige Elektrodenabstand außerhalb des Kessels abgelesen und auf 0,02 cm genau eingestellt werden. Der größte Elektrodenabstand betrug 8,7 cm.

Das Druckgefäß war für einen Überdruck bis zu 100 at bemessen. Eine Skizze der gesamten Lichtbogenanordnung ist in Bild 3 wiedergegeben; man erkennt die

Einrichtung für die Kreislaufkühlung der Elektroden, die elektrische Mehrfachdurchführung für hohe Gasdrücke zur Betätigung der Hilfsapparate und das Fenster für die photographischen Aufnahmen des Lichtbogens. Die Speisung des Bogens erfolgte durch zwei hintereinandergeschaltete Gleichstromgeneratoren, die zusammen bei einer Spannung von 1000 V bis zu 25 A belastet werden konnten. Der parallel zum Lichtbogen liegende ohmsche Widerstand des Kühlwassers hatte einen Wert von 2 bis $3 \cdot 10^5$ Ohm.

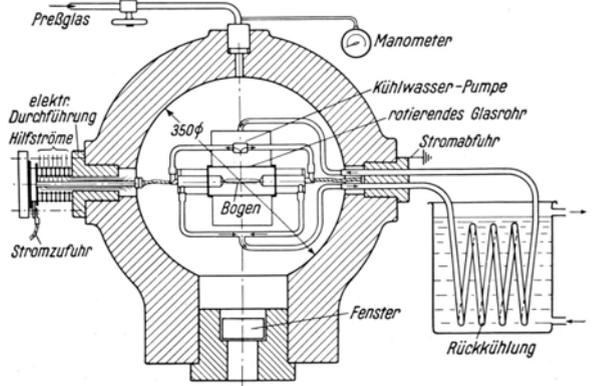


Bild 3. Skizze des Druckgefäßes mit elektrischer Mehrfachdurchführung, Lichtbogenapparat und Kreislauf-Wasserkühlung.

III. Prüfung der Meßapparatur.

Es wurde als notwendig angesehen, vor Beginn der eigentlichen Messungen am Wälzbogen Fehlerquellen, die bei Lichtbogenanordnungen leicht vorhanden sein können, festzustellen, um sie durch geeignete Methoden auf ein Minimum zu beschränken bzw. um die dennoch auftretenden Fehler abschätzen und bei der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigen zu können.

a) Einfluß der Drehzahl des Stabilisierungsrohres auf die Stabilisierung der Säule.

Die Wirksamkeit der Stabilisierung beim Wälzbogen hängt genau so wie beim luftwirbelstabilisierten Bogen naturgemäß von der Rotationsgeschwindigkeit der

stabilisierenden Gasmassen und somit speziell beim Wälzbogen von der Drehzahl des Stabilisierungsrohres ab. Es war zu erwarten, daß zur Erreichung einer wirksamen Stabilisierung, d. h. zur Erzielung eines Bogens, der gleichmäßig und horizontal in der Elektrodenachse brennt, eine minimale Drehzahl des Glasrohres erforderlich war, jeweils abhängig von den Betriebsdaten des Bogens.

Um bei den durchzuführenden Lichtbogenmessungen in jedem Falle einer wirksamen Stabilisierung sicher zu sein, wurden diese minimalen Drehzahlen für verschiedene Stromstärken und Drücke durch Augenbeobachtung sowie durch photographische Lichtbogaufnahmen bestimmt; sie sind in der Zahlentafel 1 für Stickstoff und Kohlensäure wiedergegeben. Dazu ist zu bemerken, daß sich die Stabilisierung mit wachsender Drehzahl langsam einstellt und deshalb die Mindestdrehzahl nicht scharf definiert ist. Die in der Zahlentafel 1 angegebenen Daten, die jeweils auf mehreren Einzelbeobachtungen fußen, sind daher nicht als exakte Meßwerte anzusprechen, sondern dienen lediglich als Anhaltspunkte für die durchzuführenden Messungen.

Zahlentafel 1. Mindestdrehzahlen einer Wälzbogenstabilisierung für verschiedene Drücke und Stromstärken. Rohrdurchmesser 3 cm.

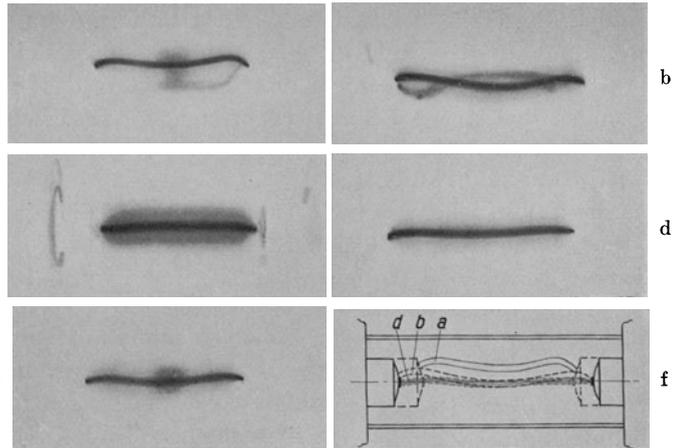
Stickstoff			Kohlensäure		
Druck at	ungefährer Strom A	Mindestdrehzahl U/min etwa	Druck at	Strom A etwa	Mindestdrehzahl U/min
1	2	300	1	3	400
1	15	500	1	10	600
5	6	1000	3	3	800
10	8	2000	3	10	1200
20	4	2500	5	2,5	1500
20	15	3000	5	10	2000
30	5	über 3400	8	2,5	2300
40	—	—	8	10	2600
			10	3	3000
			10	10	über 3400
			15	4	—

Wie aus Zahlentafel 1 zu ersehen ist, nimmt die Mindestdrehzahl sowohl mit wachsender Stromstärke als auch mit steigendem Druck zu und ist für Kohlensäure durchweg größer als für Stickstoff. Bei 30 at war in Stickstoff bei mittleren Stromstärken mit der höchsten erreichbaren Drehzahl von 3400 U/min eine nicht mehr vollkommene Stabilisierung zu erreichen, bei Kohlensäure jedoch setzten unter gleichen Bedingungen bereits bei 10 at Störungen der Stabilisierung ein.

Eine weitere Steigerung der Drehzahl, die mit der benutzten Anordnung allerdings nicht möglich war, hätte vermutlich keinen Erfolg gehabt, da bei diesen hohen Drücken, wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, turbulente Strömungen eine Stabilisierung verhindern. Man kann vielmehr annehmen, daß bei Drücken über etwa 40 at eine Lichtbogenstabilisierung durch rotierende Gasmassen bei stillstehenden Elektroden überhaupt nicht mehr möglich ist, da dann die Mindestrotationsgeschwindigkeiten schon in dem Bereich liegen, in dem störende Turbulenz auftritt. Das Einsetzen der Stabilisierung mit steigender Drehzahl zeigen die photographischen Aufnahmen (Bild 4), worin als Beispiele Bögen in Kohlensäure bei 1 at Druck dargestellt sind. Bei geringer Drehzahl (Bild 4a) verläuft der Bogen oberhalb der Achse (deutlicher zu erkennen in der Skizze Bild 4f) und hat nur durch das Vor-

handensein des Glasrohres eine annähernd horizontale Lage. Bei höherer Drehzahl werden die mittleren Bogenpartien bereits in die Bogenachse gezwungen, die Randpartien, bei denen die stabilisierende Wirkung durch die Reibung des rotierenden Gases an den nicht mitrotierenden Elektroden verringert ist, jedoch noch nicht. Der Bogen ist bei diesem Verlauf im allgemeinen recht unstabil und die Ansatzflecke wechseln oft sehr schnell ihre Lage. Bei Bild 4c ist schließlich die Mindestdrehzahl erreicht und es findet befriedigende Stabilisierung statt. Eine weitere Steigerung der Drehzahl ist ohne Einfluß sowohl auf die Stabilisierung als auch auf die Bogenspannung.

Bild 4. Einfluß der Drehzahl eines Rohres von 3 cm Dmr. auf die Stabilisierung des Wälzbogens in Kohlensäure von 1 at.



- a) 100 U/min $l = 6$ cm; 2,6 A,
- b) 180 U/min $l = 7$ cm; 2,4 A,
- c) 400 U/min $l = 6$ cm; 4,1 A,
- d) 1000 U/min $l = 7$ cm; 2,5 A,
- e) 3000 U/min $l = 6$ cm; 2,8 A,
- f) Zusammenstellung nach Bild a),
b) u. d).

b) Einfluß der Temperatur des Stabilisierungsrohres auf die Bogenspannung.

Aus theoretischen Betrachtungen über die Energiebilanz beim Wälzbogen ergibt sich bei Annahme einer vorwiegenden Energieabgabe durch Wärmeleitung, daß die abgegebene Energie (und damit die Bogenspannung) von der Temperatur des Stabilisierungsrohres abhängig ist. Da es bei dieser für Druckuntersuchungen eingerichteten Wälzbogenanordnung schwierig war, die Temperatur des rotierenden Stabilisierungsrohres durch Kühlung konstant zu halten, war es notwendig, den Einfluß der Temperatur des Rohres auf die Bogenspannung zu untersuchen, und zwar als Abhängigkeit der Bogenspannung von Stromstärke und Brenndauer des Bogens. In der folgenden Zahlentafel 2 sind die Ergebnisse solcher Messungen wiedergegeben:

Zahlentafel 2. Einfluß der Brenndauer eines Wälzbogens bei konstanter Stromstärke in Stickstoff von 1 at und 3 cm Rohrdurchmesser auf die Bogenspannung.

Brenndauer des Bogens sec	Bogenlänge 4 cm		Bogenlänge 7 cm		Bogenlänge 8 cm		Bogenlänge 6 cm	
	Strom	Spannung	Strom	Spannung	Strom	Spannung	Strom	Spannung
0	1,62	214	2,04	268	1,6	332	12,6	126
10	1,62	214	2,03	266	1,6	330	12,4	124
20	1,60	216	2,04	262	1,6	326	12	140
30	1,60	212	2,02	266	1,58	334	—	—
35	—	—	2,0	270	1,57	350	—	—
40	1,61	212	1,98	280	—	550	—	—
45	—	—	1,96	295	—	—	—	—
50	1,6	215	—	—	—	—	—	—

Diese Messungen ergaben ziemlich übereinstimmend, daß die Bogenspannung zunächst konstant bleibt oder langsam fällt, um nach einiger Zeit mehr oder weniger

stark anzusteigen, und zwar erfolgt dieses Ansteigen bei größeren Strömen und größeren Bogenlängen sowohl eher als auch steiler als bei kleineren Strömen und kürzerer Bogensäule. Bei 4 cm Bogenlänge und 1,6 A war bis zu $\frac{3}{4}$ min keine wesentliche Änderung eingetreten.

Dieses Verhalten der Bogen Spannung läßt sich folgendermaßen erklären: Das allmähliche Abfallen der Bogen Spannung hängt mit der geringer werdenden Energieabgabe durch Wärmeleitung zusammen, bedingt durch das abnehmende Temperaturgefälle bei Erwärmung des Rohres. Das dann folgende Ansteigen der Bogen Spannung ist wohl auf einen Störeinfluß zurückzuführen, vermutlich auf ein Verdampfen der Fettschicht aus den Lagern des Stabilisierungsrohres, die insbesondere bei langen Bögen (8 cm) ziemlich stark erwärmt wurden. Der Fettdampf wird beim Eindringen in die Bogensäule zu Wasserstoff zersetzt, der eine Erhöhung der Spannung bewirkt.

Diese Versuche waren richtunggebend für die spätere Aufnahmetechnik. Der Bogen wurde stets bei kleiner Stromstärke durch Kontakt gezündet und rasch auf die zu untersuchende Länge eingestellt. Dann wurde für die Aufnahme der einzelnen Meßpunkte die Stromstärke in Stufen gesteigert. Dabei wurden bei kleinen Strömen und geringen Drücken etwa 4 bis 5 Meßpunkte, bei großen Strömen und hohen Drücken jedoch nur 3, 2 oder 1 Meßpunkt aufgenommen. Zur Kontrolle wurde im Anschluß an den letzten Meßpunkt der kleinste Strom der betreffenden Meßreihe nochmals eingestellt und die Instrumente abgelesen¹⁾. Zeigte dabei der Kontrollpunkt eine Spannungserhöhung an, bedingt durch eine bereits zu lange Brenndauer des Bogens für die betreffenden Stromstärken und Drücke, so wurde die Meßreihe gar nicht oder nur teilweise verwendet.

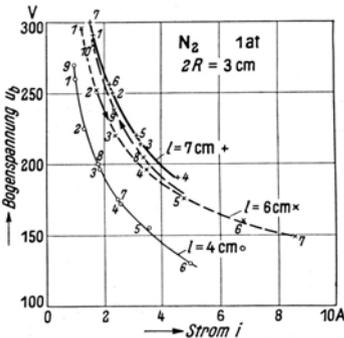


Bild 5. Stromspannungscharakteristiken von Wälzbögen, bei zu- und abnehmender Stromstärke zu Prüfzwecken aufgenommen.

Beispiele einwandfreier Meßreihen sind in Bild 5 für zwei Bogenlängen von 4 und 7 cm wiedergegeben, wobei die Reihenfolge der Meßpunkte durch laufende Ziffern gekennzeichnet ist.

Man sieht daraus, daß bei einem Druck von 1 at und kleinen Strömen 7...9 Meßpunkte bei einem 7 cm bzw. 4 cm langen Bogen aufgenommen werden konnten, ohne Auftreten einer merklichen Spannungserhöhung. Eine unbrauchbare bzw. nur teilweise brauchbare Meßreihe dagegen zeigt als Beispiel die Kurve für 6 cm Bogenlänge von Bild 5 (1 at, 10 Meßpunkte), bei der die Kontrollmeßpunkte bereits eine merkliche Spannungserhöhung durch zu große Brenndauer des Bogens zeigen. Nach erloschenem Bogen konnte man in solchen Fällen ein schwaches Glühen des Rohres beobachten.

c) Einfluß der optischen Verzerrung des Glasrohres auf die photographisch bestimmten Bogendurchmesser.

Für die genaue Bestimmung des Durchmessers der in der Achse des rotierenden Stabilisierungsrohres brennenden Bogensäule ist die Kenntnis einer etwaigen Ver-

¹⁾ Die Stromstärke war dann im allgemeinen wegen der Erwärmung des Vorschaltwiderstandes etwas kleiner als am Anfang einer Meßreihe.

zerrung beim Betrachten (Photographieren) durch ein Glasrohr notwendig. Die Berechnung aus den optischen Brechungsgesetzen ist nicht ganz einfach. Da jedoch damit noch nicht die besonderen Eigenarten des verwendeten Glasrohres — Brechungskoeffizient, Schlieren, unrunde Stellen usw. — berücksichtigt wären, wurde es vorgezogen, eine experimentelle Bestimmung der Durchmesserverzerrung zugleich bei rotierendem Rohr vorzunehmen. Zu diesem Zwecke wurde innerhalb des rotierenden Rohres ein Streifen Millimeterpapier zwischen den feststehenden Lagern axial gespannt und photographiert. Aus mehreren so hergestellten Lichtbildern bei Verwendung verschiedener Glasrohre konnte eine radiale Verzerrung gegenüber axialen Strecken nicht festgestellt werden.

IV. Meßergebnisse.

1. Messungen in Stickstoff.

a) Stromspannungscharakteristiken bei verschiedenen Drücken.

In Bild 6 ist eine Kurvenschar von Stromspannungscharakteristiken für eine Bogenlänge von 6 cm bei den gemessenen Drücken von 1 bis 40 at wiedergegeben. Der Einfluß des Druckes ist deutlich zu erkennen, und zwar steigt bei konstantem Strom die Bogenspannung mit steigendem Druck. Während ferner bei kleinen Drücken die Bogenspannung bis zu den größten gemessenen Strömen ständig abnimmt, erreicht sie bei großen Drücken in dem erfaßten Strombereich bereits einen konstanten Wert, bzw. sie nähert sich dem aus anderen Untersuchungen bekannten Minimum [3]. Dieses Minimum der Bogenspannung ist beim stabilisierten Bogen als Randeffect zu deuten.

Es sei noch erwähnt, daß bei Drücken bis zu 20 at die Meßpunkte verhältnismäßig wenig streuen, daß jedoch bei weiterer Druckzunahme auch die Streuung der Meßpunkte zunimmt. Das bereits beschriebene Nachlassen bzw. Versagen der Stabilisierung bei hohen Drücken verursacht neben einem starken Flattern der Bogensäule auch eine zunehmende Unruhe der Meßinstrumente und damit eine wachsende Ungenauigkeit der abgelesenen Werte mit steigendem Druck. So müssen insbesondere die bei 40 at aufgenommenen Meßwerte bereits als unbrauchbar für die weiteren Untersuchungen angesehen werden. Die bei anderen Bogenlängen aufgenommenen Stromspannungscharakteristiken liefern Kurvenscharen ähnlich der in Bild 6 dargestellten. Es soll hier jedoch nicht weiter auf die Einzelheiten der Stromspannungs-

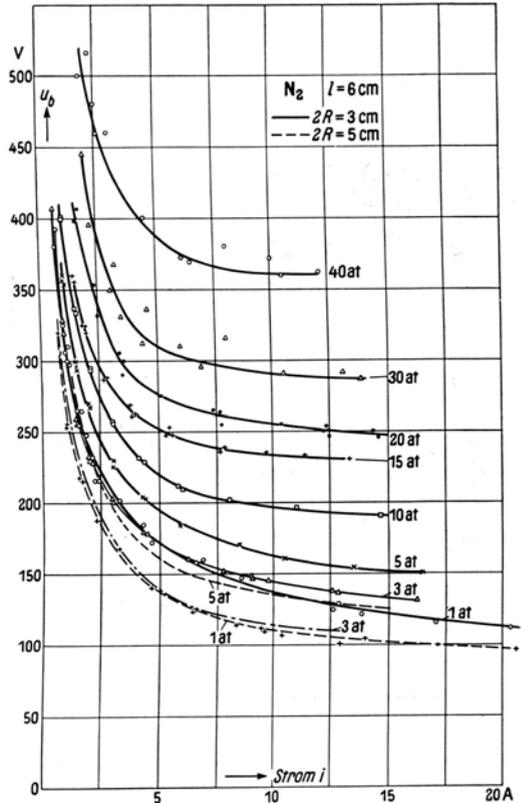


Bild 6. Stromspannungscharakteristiken von Wälzbögen konstanter Länge in Stickstoff von 1 bis 40 at.

Streuung der Meßpunkte zunimmt. Das bereits beschriebene Nachlassen bzw. Versagen der Stabilisierung bei hohen Drücken verursacht neben einem starken Flattern der Bogensäule auch eine zunehmende Unruhe der Meßinstrumente und damit eine wachsende Ungenauigkeit der abgelesenen Werte mit steigendem Druck. So müssen insbesondere die bei 40 at aufgenommenen Meßwerte bereits als unbrauchbar für die weiteren Untersuchungen angesehen werden. Die bei anderen Bogenlängen aufgenommenen Stromspannungscharakteristiken liefern Kurvenscharen ähnlich der in Bild 6 dargestellten. Es soll hier jedoch nicht weiter auf die Einzelheiten der Stromspannungs-

charakteristiken eingegangen werden, da sie für diese Arbeit keine besondere Bedeutung haben.

Sie dienen lediglich zur Bestimmung der Längsfeldstärke der Bogensäule.

b) Bestimmung der Längsfeldstärke aus den Stromspannungscharakteristiken.

Für die Bestimmung der Längsfeldstärke wurden bei jeweils konstantem Druck Scharen von Stromspannungskurven bei verschiedenen Bogenlängen aufgenommen,

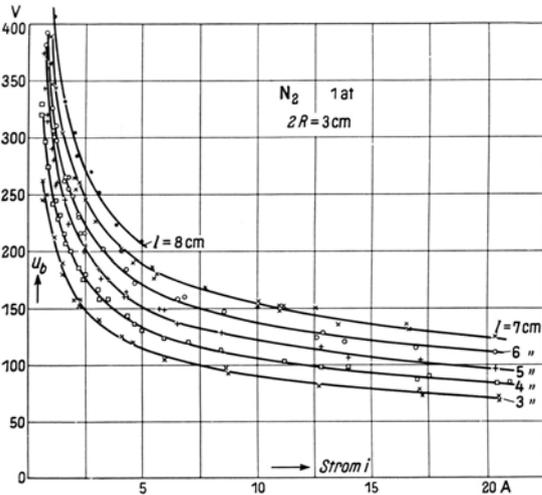


Bild 7. Stromspannungscharakteristiken eines Wälzbogens in Stickstoff von 1 at bei verschiedenen Bogenlängen.

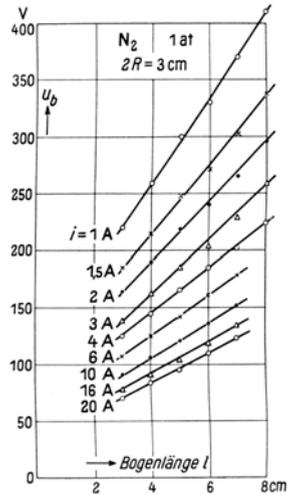


Bild 8. Abhängigkeit der Bogenspannung von der Bogenlänge beim Wälzbogen in Stickstoff von 1 at.

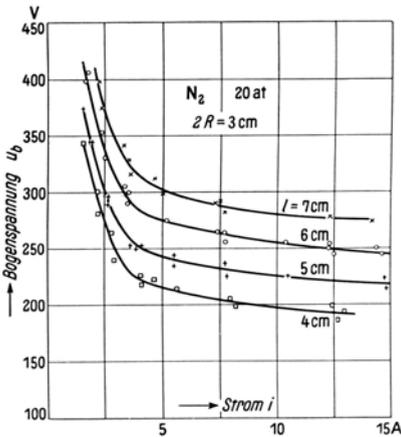


Bild 9. Stromspannungscharakteristiken von Wälzbögen verschiedener Länge in Stickstoff von 20 at.

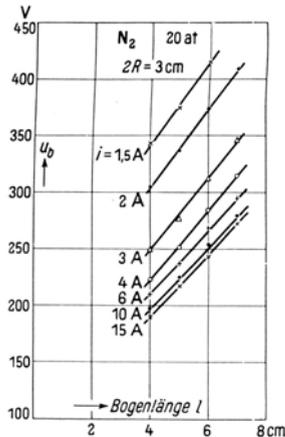


Bild 10. Bogenspannung in Abhängigkeit von der Bogenlänge für verschiedene Ströme zur Bestimmung der Längsfeldstärke.

und zwar wurde die Länge im allgemeinen zwischen 3 und 8 cm, von Zentimeter zu Zentimeter geändert.

Als Beispiel sind zwei solche Kurvenscharen für 1 und 20 at in den Bildern 7 und 9 dargestellt. Aus diesen Kurvenscharen wurde zunächst in der üblichen Art

für jeweils konstanten Strom die Bogenspannung über der Bogenlänge aufgetragen. Die entsprechenden Punkte liegen, wie aus den Bildern 8 und 10 zu ersehen ist, mit genügender Genauigkeit auf geraden Linien, ein Zeichen dafür, daß die Feldstärken in dem untersuchten Stück der Bogensäule konstant waren.

Für jeden untersuchten Druck wurde eine Geradenschar, wie die der Bilder 8 und 10, gezeichnet, jede dieser Scharen lieferte eine Kurve für die Längsfeldstärke in Abhängigkeit vom Strom. In Bild 11 sind für alle untersuchten Drücke diese Kurven zusammengestellt. Entsprechend wurden ferner aus den Geradenscharen Kurven für die Abhängigkeit der Längsfeldstärke vom Druck gezeichnet, wobei die Stromstärke Parameter ist. Diese Kurvenschar ist in Bild 12 dargestellt.

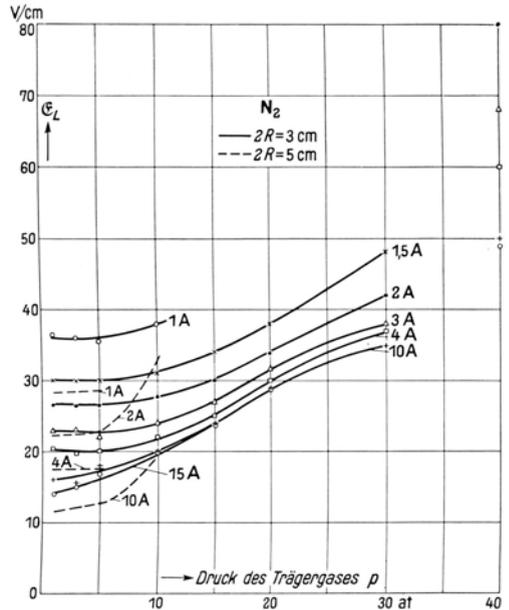
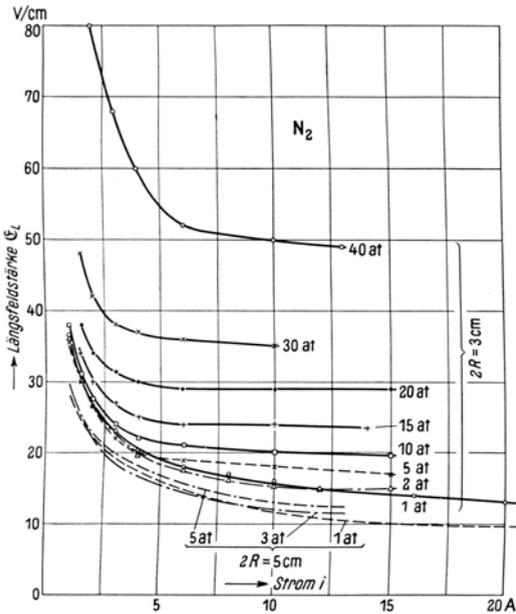


Bild 11. Längsfeldstärke E_L von Wälzbogensäulen in Stickstoff von 1 bis 40 at bei 3 und 5 cm Rohrdurchmesser abhängig vom Strom i .

Bild 12. Längsfeldstärke E_L von Wälzbogensäulen in Stickstoff, abhängig vom Druck p für verschiedene Ströme und Rohrdurchmesser.

Die beiden Kurvenscharen Bild 11 und 12 stellen im wesentlichen die Verarbeitung der gesamten aufgenommenen Stromspannungscharakteristiken bei Stickstoff dar.

Der größte Teil der Stromspannungscharakteristiken wurde mit einem Stabilisierungsrohr von 3 cm Dmr. aufgenommen. Dieses Stabilisierungsrohr wurde deshalb gewählt, weil mit ihm

1. bis zu höheren Drücken hin eine bessere Stabilisierung zu erreichen war als mit einem Rohr von größerem Durchmesser,
2. die durch die hohen Bogentemperaturen bei großen Stromstärken bedingte Gefahr eines Zerspringens des Glasrohres geringer war als mit einem Rohr von kleinerem Durchmesser.

Das gewählte Stabilisierungsrohr von 3 cm Durchmesser gestattete also sowohl in bezug auf den Druck als auch hinsichtlich der Stromstärke ein möglichst umfangreiches Gebiet meßbar zu erfassen.

Um jedoch den beim luftwirbelstabilisierten Lichtbogen bereits festgestellten und bekannten Einfluß des Rohrdurchmesser für den Wälzbogen zu untersuchen, wurden einige Meßreihen mit einem Stabilisierungsrohr von 5 cm Durchmesser aufgenommen. In Bild 11 und 12 sind die Ergebnisse dieser Messungen bei 1 bis 5 at ebenfalls eingetragen. Bei 10 at war eine Stabilisierung mit einem 5 cm-Rohr nicht mehr möglich. Man erkennt ferner, daß auch für den Wälzbogen der Rohrdurchmesser auf die Größe der Längsfeldstärke von Einfluß ist, und zwar nimmt sie in der erwarteten Richtung bei gleichem Strom und Druck mit wachsendem Rohrdurchmesser ab.

Um einen zahlenmäßigen Vergleich zwischen dem Wälzbogen und dem luftwirbelstabilisierten Bogen über den Einfluß des Rohrdurchmessers auf die Längsfeldstärke vornehmen zu können, wurden einige Meßreihen auch in Luft bei 1 at durchgeführt¹⁾. In Bild 13 sind die Ergebnisse dieser Meßreihen für einige Stromstärken wiedergegeben. Zugleich sind in dieses Bild Meßergebnisse von A. von Engel am luftwirbelstabilisierten Bogen [9] für die gleichen Stromstärken eingetragen. Für alle Stromstärken ist die Längsfeldstärke beim luftwirbelstabilisierten Lichtbogen um etwa 30 % größer als beim Wälzbogen.

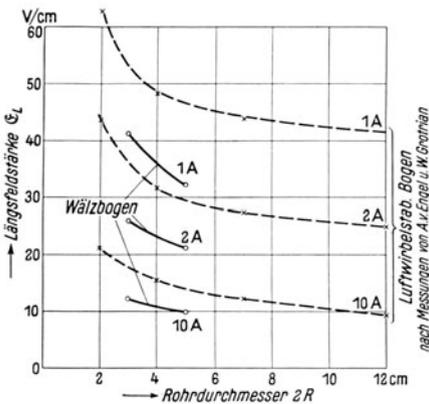


Bild 13. Einfluß des Rohrdurchmessers auf die Längsfeldstärke eines luftwirbelstabilisierten Lichtbogens im Vergleich zum Wälzbogen für Luft von 1 at.

phische Aufnahme notwendig, sondern bei gleichem Druck nur für die verschiedenen Stromstärken. Und zwar erfolgten die photographischen Aufnahmen, die ja im Rahmen der Stromspannungsmessungen zur Erfassung gleichzeitiger Verhältnisse möglichst rasch vorgenommen werden mußten, je nach den vorliegenden Verhältnissen bei verschiedenen Bogenlängen.

Die Aufnahmen wurden unmittelbar auf Bromsilberpapier hergestellt, wobei Belichtungszeit, Blende und Einstellung konstant blieben. Es wurde ferner besonderer Wert darauf gelegt, daß das Entwickeln der Aufnahmen in bezug auf Zusammensetzung des Entwicklers und Entwicklungsdauer gleichmäßig erfolgte. Einige Aufnahmen sind in den Bildern 14 und 15 wiedergegeben.

Die Ausmessung der Aufnahmen erfolgte mit einem Millimetermaßstab, wobei die Zehntelmillimeter geschätzt wurden. Es wurde im allgemeinen an 3 Stellen der Bogensäule der Durchmesser gemessen und aus den drei Werten das Mittel gebildet.

Prinzipiell ist zu der Frage der Durchmesserbestimmung von Lichtbögen in Stickstoff folgendes zu sagen: Die leuchtende Bogensäule ist nach dem Rande zu nicht

¹⁾ Untersuchungen am luftwirbelstabilisierten Bogen mit verschiedenem Rohrdurchmesser in Stickstoff konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

scharf begrenzt, vielmehr leuchten die angrenzenden Gaspartien, die für den Stromtransport längs der Säule nur von sehr untergeordneter Bedeutung sind [7], noch in relativ starkem Maße und bedingen, daß der Helligkeitsabfall am Bogenrand einen weniger steilen Verlauf hat als der Abfall der Stromdichte. Es ist deshalb in den photographischen Aufnahmen als Bogendurchmesser das stark geschwärzte Kerngebiet anzusprechen, das nach außen begrenzt ist durch die erste mit gewisser Unstetigkeit erfolgende Schwärzungsabnahme. Nach einiger Übung war trotz der unscharfen Begrenzung diese Berandung des Kerngebietes innerhalb einer verhältnismäßig kleinen Unsicherheitszone für die Auswertung festzustellen. Dabei ist noch zu bemerken, daß sich dem Bogenbilde ein mehr oder weniger starkes Bild des Glaszylinders überlagerte. Der langsam sich bildende leichte Metallniederschlag auf der Innenseite des Glases bedingte bei längerer Benutzung eines Glaszylinders infolge der außerordentlich intensiven Beleuchtung ein starkes Reflektieren des Bogenlichtes, das in seiner Intensität naturgemäß auch noch von der Stromstärke des Bogens abhing.

Aus den Bildern 14a bis c, in denen drei Aufnahmen von Lichtbögen bei 1 at, aber verschiedenen Stromstärken wiedergegeben sind, ist die bekannte starke Durchmesserzunahme der Bogensäule mit wachsender Stromstärke gut zu erkennen. Die Bilder 14b und d zeigen Lichtbögen bei gleicher Stromstärke und Drücken von 1 bzw. 5 at. Man kann daraus die bemerkenswerte Feststellung machen,

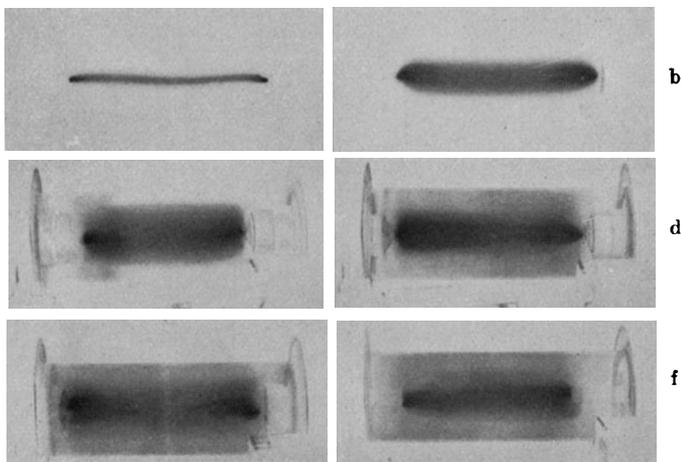


Bild 14. Photographische Aufnahmen von Wälzbögen in Stickstoff bei verschiedenen Drücken. Rohrdurchmesser: $2 R = 3$ cm.

- a) 1 at; $l = 7$ cm; 0,8 A, c) 1 at; $l = 6$ cm; 17 A, e) 15 at; $l = 6$ cm; 7,7 A, b) 1 at; $l = 7$ cm; 5,8 A, d) 5 at; $l = 7$ cm; 5,8 A, f) 20 at; $l = 6$ cm; 3,6 A.

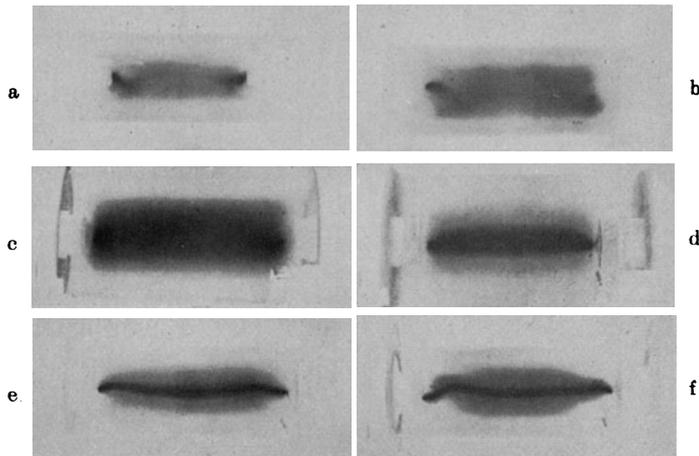


Bild 15. Photographische Aufnahmen von Wälzbögen in Stickstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drücken und Rohrdurchmessern.

- a) Stickstoff; 30 at; $l = 5$ cm; 4,8 A; 3 cm Rohrdmr.,
 b) Stickstoff; 40 at; $l = 6$ cm; 10,4 A; 3 cm Dmr.,
 c) Stickstoff; 1 at; $l = 7$ cm; 11,7 A; 5 cm Dmr.,
 d) Kohlensäure; 1 at; $l = 6$ cm; 11,4 A; 5 cm Rohrdmr.,
 e) Kohlensäure; 3 at; $l = 7$ cm; 5,4 A; 3 cm Rohrdmr.,
 f) Kohlensäure; 10 at; $l = 7$ cm; 3,3 A; 3 cm Rohrdmr.

Man kann daraus die bemerkenswerte Feststellung machen,

daß der Säulendurchmesser des Bogens bei Stickstoff¹⁾ mit wachsendem Druck ansteigt. Bei weiterer Druckzunahme ist für Bögen großer Stromstärke aus den Photographien kaum noch ein Anstieg des Durchmessers erkennbar, wie ein Vergleich der Bilder 14d und e zeigt. Der Bogen in Bild 14e hat bereits einen so großen Durchmesser erreicht, daß er fast den gesamten Gasraum im Stabilisierungsrohr ausfüllt. Einer Zunahme des Bogendurchmessers durch weitere Druck- oder

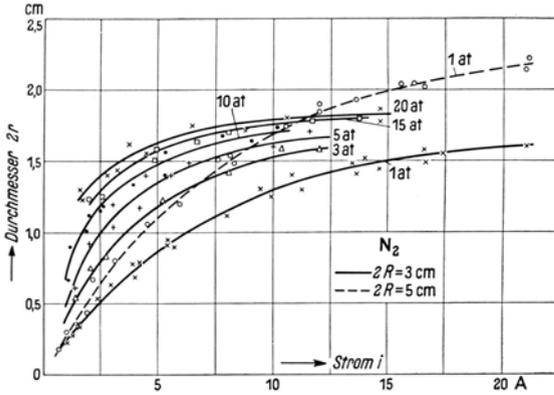


Bild 16. Säulendurchmesser eines Wälzbogens in Stickstoff bei verschiedenen Drücken abhängig vom Strom i .

Stromerhöhung wird durch den Einfluß des Stabilisierungsrohres eine Grenze gesetzt. Ein Vergleich der Bilder 14f sowie 15a und b läßt das zunehmende Versagen der Stabilisierung bei einer Druckzunahme von 20 bis 40 at erkennen.

Bild 16 gibt eine Zusammenfassung der aus den photographischen Aufnahmen gewonnenen Säulendurchmesser von Wälzbögen in Abhängigkeit von der Stromstärke für Stickstoff bei 1 bis 20 at, Bild 17 eine entsprechende Zusammenstellung für den Säulen-

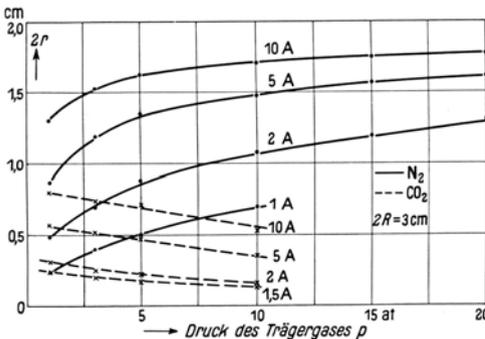


Bild 17. Säulendurchmesser $2r$ abhängig vom Gasdruck p .

Ein Ausmessen der Aufnahmen bei 30 at und darüber war wegen des sehr diffus gewordenen Randes nicht mehr möglich bzw. hatte wegen der unzulänglichen Stabilisierung keinen Sinn mehr. Die beiden Kurvenscharen zeigen zahlenmäßig die Zunahme des Bogendurchmessers mit wachsendem Strom und steigendem Druck und lassen vor allem deutlich erkennen, daß sich der Bogendurchmesser asymptotisch einem Grenzwert nähert, der mit steigendem Druck bei immer kleineren Stromstärken erreicht wird (Bild 16). Bei einem Rohrdurchmesser von 5 cm ist dieser Grenzwert größer als für den Rohrdurchmesser von 3 cm, wie aus der gestrichelten Kurve in Bild 16 zu erkennen ist.

d) Abhängigkeit der Stromdichte von Stromstärke, Druck und Längsfeldstärke.

Aus dem Bogenradius r und der Stromstärke i ergibt sich die Stromdichte j zu

$$j = \frac{i}{\pi r^2}$$

unter der Annahme, daß j über den Bogenquerschnitt konstant ist. Diese Annahme ist strenggenommen nicht erfüllt, vielmehr nimmt die Stromdichte nach außen hin ebenso wie die Temperatur allmählich ab. Da jedoch diese Abnahme der Stromdichte nur gering ist und überdies aus den Bogenphotographien, die über den ganzen Durchmesser eine gleichmäßige Schwärzung lieferten, nicht zu bestimmen war,

¹⁾ Im Gegensatz zu Kohlensäure, wie später gezeigt wird.

wurde für die folgenden Betrachtungen jeweils die aus der obigen Beziehung berechnete mittlere Stromdichte zugrunde gelegt.

Der Übersichtlichkeit halber wurde die Stromdichte nicht für jeden einzelnen Meßpunkt berechnet, sondern es wurden die Kurvenscharen in Bild 16 und 17 zugrunde gelegt und die Stromdichte in Abhängigkeit vom Strom, vom Druck und vom Durchmesser in den Bildern 18, 19 und 20 dargestellt.

Aus Bild 18 ersieht man, daß bei 1 at die Stromdichte zunächst stark abnimmt, bis sie bei etwa 10 A ein Minimum erreicht (bei einem Rohrdurchmesser von 3 cm), um nachher wieder anzusteigen. Dieser Anstieg der Stromdichte ist dadurch zu erklären, daß der Lichtbogen seinen Durchmesser wegen des Einflusses des Stabilisierungsrohres nicht beliebig vergrößern kann, sondern der Durchmesser sich einem Grenzwert nähern muß, der höchstens gleich dem Durchmesser des Stabilisierungsrohres sein kann. In dem gleichen Maße, in dem der Durchmesser des Lichtbogens sich diesem Grenzwert nähert, nähert sich der Anstieg der Stromdichte als Grenzwert einem zur Stromstärke proportionalen Anstieg. Ohne diesen Einfluß des Stabilisierungsrohres würde die Stromdichte in der Bogen säule mit zunehmender Stromstärke stetig kleiner werden. Bei einem Rohrdurchmesser von 5 cm ist naturgemäß der Einfluß der Rohrwand auf den Bogen geringer. Deshalb fällt auch die Stromdichte auf niedrigere Werte ab, wie die gestrichelte Kurve in Bild 18 zeigt; ferner liegt das Stromdichteminimum bei einer größeren Stromstärke (etwa 13 A) als bei 3 cm Rohrdurchmesser.

Für die höheren Gasdrücke von 3 bis 20 at erhält man grundsätzlich den gleichen charakteristischen Verlauf der Stromdichte abhängig vom Strom mit einem ausgeprägten Minimum wie für 1 at. Da der Durchmesser des Lichtbogens in Stickstoff, wie oben gezeigt wurde, nicht nur mit wachsender Stromstärke, sondern auch mit zunehmendem Druck ansteigt, ist der Einfluß des Stabilisierungsrohres auf die Stromdichte in Abhängigkeit vom Strom bei höheren Drücken auch größer. Das zeigt sich in einer Verschiebung des Stromdichteminimums zu kleinen Strömen hin (Bild 18). Aus Bild 18 erkennt man vor allem auch, daß die Stromdichte bei höherem Druck, z. B. bei 20 at für einen Lichtbogen, ungewöhnlich kleine Werte erreicht. Bei einem Strom von z. B. 2 A beträgt die Stromdichte nur

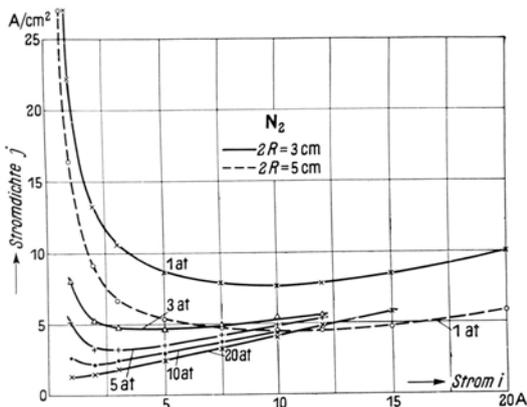


Bild 18. Stromdichte in der Säule eines Wälzbogens, abhängig vom Strom i , in Stickstoff von 1 bis 20 at.

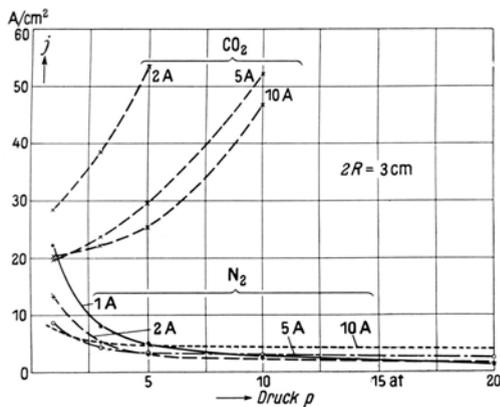


Bild 19. Abhängigkeit der Stromdichte j in der Wälzbogensäule vom Gasdruck p .

1,5 A/cm². Ohne den Einfluß der Rohrwandung würde auch bei diesem hohen Druck natürlich die Stromdichte mit steigendem Strom noch weiter fallen. Unter höherem Druck in Stickstoff könnte man also Lichtbögen von extrem kleiner Stromdichte herstellen. Wahrscheinlich sind diese aber nur im schwerfreien Raum stationär zu erhalten.

Der Einfluß des Stabilisierungsrohres auf die Stromdichte geht besonders klar

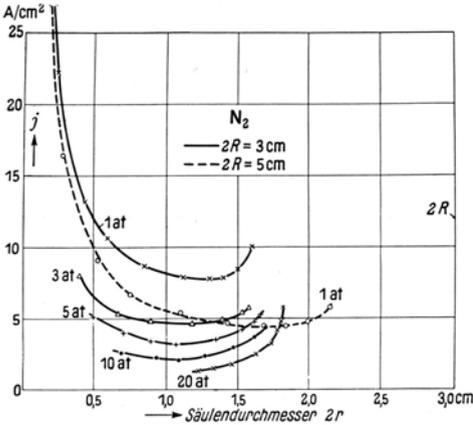


Bild 20. Abhängigkeit der Stromdichte vom Säulendurchmesser bei verschiedenen Drücken.

Nun ist es besonders bemerkenswert, daß dieses Minimum der Stromdichte für alle gemessenen Drücke bei etwa gleichem Säulendurchmesser liegt, und zwar beträgt dieser Säulendurchmesser stets etwa ein Drittel des Rohrdurchmessers. Auf das Minimum folgt ein steiler Anstieg der Stromdichte, wobei sich die Stromdichte einem Wert

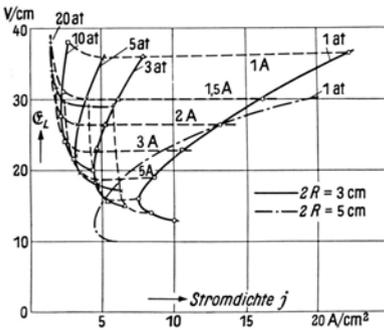


Bild 21. Abhängigkeit der Längsfeldstärke U_L von der mittleren Stromdichte j in der Säule eines Wälzbogens in Stickstoff bei verschiedenen Drücken und Stromstärken für $2R = 3$ cm Rohrdurchmesser.

aus der Abhängigkeit der Stromdichte vom Bogendurchmesser hervor, dargestellt in Bild 20. Da der Bogendurchmesser beim ungestörten Bogen annähernd proportional mit der Stromstärke ansteigt¹⁾, erfolgt, wie insbesondere die Kurven für 1 at (Rohrdurchmesser 3 cm und 5 cm) zeigen, der Abfall der Stromdichte bei kleinen Bogendurchmessern etwa umgekehrt proportional mit dem Bogendurchmesser. Mit weiter wachsendem Bogendurchmesser nimmt die Stromdichte weniger stark ab und erreicht ihr Minimum bei etwa 1 bis 1,3 cm Durchmesser für das 3 cm-Stabilisierungsrohr und bei etwa 1,8 cm Durchmesser für das 5 cm-Stabilisierungsrohr.

zu nähern scheint, der wesentlich geringer ist als der Rohrdurchmesser und etwa nur zwei Drittel des Rohrdurchmessers beträgt. Daraus kann man schließen, daß der Rohrdurchmesser die Bogensäule nicht unmittelbar beeinflußt, sondern daß vielmehr die Wirkung des Stabilisierungsrohres als eine thermische Randbedingung zu betrachten ist. Wenn auch das Stabilisierungsrohr durch den brennenden Bogen eine Erwärmung erfährt, so stellt es doch vor allem bei kurzzeitig brennenden Bögen wie bei diesen Untersuchungen eine relativ zur Temperatur der Bogensäule praktisch konstante Wärmesenke dar. Eine Vergrößerung der Bogensäule bedingt daher eine Vergrößerung des Temperaturgradienten vom Bogen zum Glasrohr und somit eine erhöhte Energieabgabe durch

Wärmeleitung. Die Vergrößerung des Bogendurchmessers wirkt aber wie ein Ansteigen der Bogenkühlung, und zwar in um so stärkerem Maße, je größer das Verhältnis Bogendurchmesser zu Rohrdurchmesser wird. Daß aber ein Lichtbogen bei stärker werdender Kühlung seinen Durchmesser verringert, ist eine bekannte Er-

¹⁾ Wie übrigens auch aus der Abhängigkeit der Stromdichte vom Strom zu entnehmen ist.

scheinung [18]. Es soll in diesem Zusammenhang der Einfluß des Stabilisierungsrohres beim hier untersuchten Wälzbogen verglichen werden mit dem beim luftwirbelstabilisierten Bogen. Nach A. v. Engel [9] liegt das Minimum der Stromdichte beim luftwirbelstabilisierten Bogen für 1 at bei einem Zehntel des Rohrdurchmessers, der Einfluß der Stabilisierung ist also wesentlich größer als beim Wälzbogen, was auch nach dem Vorhergesagten zu erwarten ist, da dort für den Energieentzug der Bogensäule, also für die Kühlung des Bogens neben der Wärmeleitung, vor allem die Konvektion durch die stabilisierenden Gasmassen des Luftwirbels hinzukommt.

Trägt man die Längsfeldstärke über der Stromdichte auf, wie das in Bild 21 erfolgt ist, dann stellt jeder Punkt in der Darstellung einen Wert für die mittlere Leistungsdichte in der Bogensäule dar. Linien gleicher Leistungsdichte werden durch gleichseitige Hyperbeln wiedergegeben. Die in der Darstellung eingetragenen Meßwerte für jeweils gleichen Druck des Trägergases zeigen einen eigenartigen Verlauf. Bemerkenswert ist, daß sie eine gemeinsame einseitige Schmiegunskurve haben, deren Verlauf ungefähr mit einer gleichseitigen Hyperbel, also einer Linie gleicher Leistungsdichte, zusammenfällt. Das besagt also, daß die Leistungsdichte der Säule bei verschiedenen Drücken und Stromstärken unter einen bestimmten Grenzwert nicht fallen kann. Dieser Grenzwert ist aber abhängig vom Rohrdurchmesser, wie aus der gleichfalls eingetragenen Kurve für ein 5-cm-Stabilisierungsrohr und 1 at hervorgeht, er verschiebt sich mit wachsendem Rohrdurchmesser zu kleineren Werten hin.

Trägt man die Leistungsdichte abhängig vom Druck auf, wobei der Bogendurchmesser Parameter ist, so erhält man für die Durchmesser von 0,5 bis 1,3 cm eine Schar von fallenden Charakteristiken, die sich für hohe Drücke einem unteren Grenzwert nähern.

2. Messungen in Kohlensäure.

Die Durchführung der Messungen sowie die Verarbeitung und Auswertung der Meßergebnisse erfolgte für die Untersuchungen in Kohlensäure in der gleichen Weise wie bei Stickstoff.

a) Stromspannungscharakteristiken und Längsfeldstärke.

Die in Bild 22 wiedergegebenen Stromspannungscharakteristiken für Kohlensäure bei verschiedenen Drücken (Bogenlänge 6 cm, Stabilisierungsrohr 3 cm Durchmesser) weichen von den unter sonst gleichen Verhältnissen aufgenommenen in Stickstoff (Bild 6) sowohl in ihrem absoluten Betrage als auch in ihrem Verlauf ab. Die Bogenspannung ist bei Kohlensäure für gleichen Strom und Druck höher als bei Stickstoff und fällt mit steigendem Strom bei Kohlensäure steiler ab als bei Stickstoff.

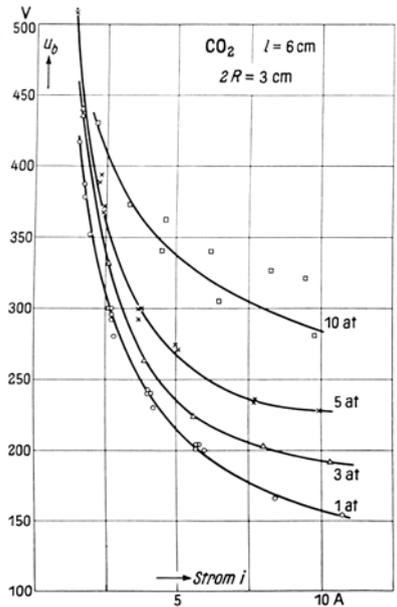


Bild 22. Stromspannungscharakteristiken von Wälzbögen konstanter Länge in Kohlensäure von 1 bis 10 at.

In den Bildern 23 und 24 ist auch für Kohlensäure und 1 at die Bestimmungskonstruktion für die Längsfeldstärke wiedergegeben, um zu zeigen, daß die Längsfeldstärke in dem untersuchten Bereich der Bogensäule ebenfalls konstant ist. Diese Konstanz ergab sich — sofern die Säule stabilisiert war — auch bei höheren Drücken.

Die Bilder 25 und 26 zeigen die Strom- bzw. Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke für Kohlensäure. Ein Vergleich von Bild 25 mit den entsprechenden Kurven für Stickstoff (Bild 11) ergibt, daß bei gleichem Druck und Strom die Längsfeldstärke in Kohlensäure in allen Fällen größer ist als in Stickstoff, etwa doppelt so groß.

Beispiel: N_2 1 at 2 A $E = 26,5$ V/cm N_2 10 at 2 A $E = 27,5$ V/cm
 CO_2 1 „ „ $E = 51$ „ CO_2 10 „ „ $E = 62$ „

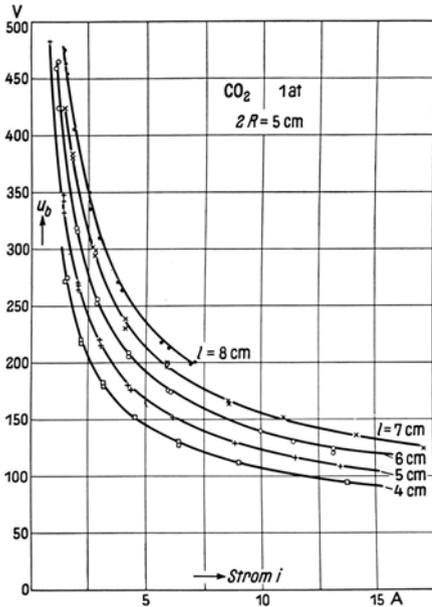


Bild 23. Stromspannungscharakteristiken von Wälzbögen verschiedener Länge in Kohlensäure von 1 at.

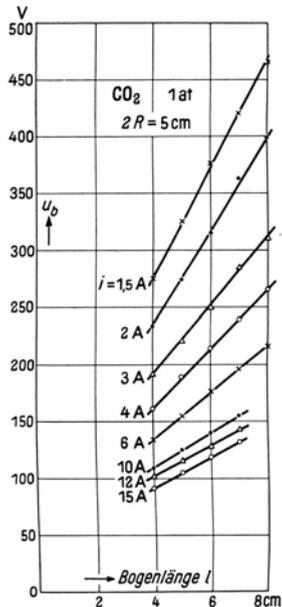


Bild 24. Bogenspannung U_b abhängig von der Bogenlänge l in Kohlensäure von 1 at.

Ferner zeigt der Lichtbogen in Kohlensäure in bezug auf die Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke ein anderes Verhalten als in Stickstoff, wie aus dem Vergleich der Bilder 12 und 26 hervorgeht. Während in Stickstoff die Längsfeldstärke bis etwa 5 at bei kleinen Strömen konstant bleibt oder sogar fällt, um nachher erst anzusteigen, steigt für Kohlensäure die Längsfeldstärke bereits ab 1 at an, und zwar erfolgt dieser Anstieg in dem untersuchten Druckbereich annähernd geradlinig. Diese Feststellung ist deshalb besonders bemerkenswert, da es sich bei dem untersuchten Kohlensäurebogen in noch stärkerem Maße¹⁾ als bei Stickstoff um einen Bereich handelt, in dem Randstörungen durch das Stabilisierungsrohr von untergeordneter Bedeutung sind.

In Bild 25 ist außerdem die Längsfeldstärke in Abhängigkeit vom Strom bei einem Stabilisierungsrohr von 5 cm Durchmesser eingetragen. Auch hierbei zeigt sich der Einfluß eines größeren Rohrdurchmessers in einer Verminderung der Längsfeldstärke.

¹⁾ Wegen des kleineren Bogendurchmessers bei Kohlensäure.

b) Säulendurchmesser und Stromdichte.

Aus Untersuchungen von W. Grotrian ist bereits bekannt, daß ein Lichtbogen in Kohlensäure bei 1 at ein anderes Aussehen zeigt als in Stickstoff (oder Luft), und zwar ist unter sonst gleichen Verhältnissen die Bogensäule in Kohlensäure schärfer begrenzt, von kleinerem Durchmesser, weißer und stärker leuchtend als in

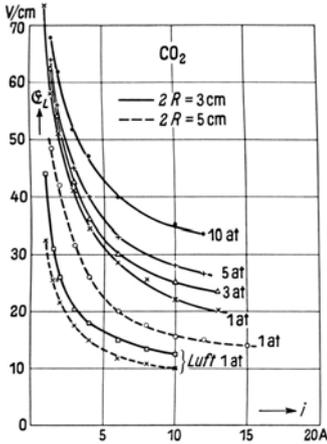


Bild 25. Längsfeldstärke E_L von Wälzbogensäulen in Kohlensäure bei verschiedenen Drücken und Rohrdurchmessern, abhängig vom Strom i .

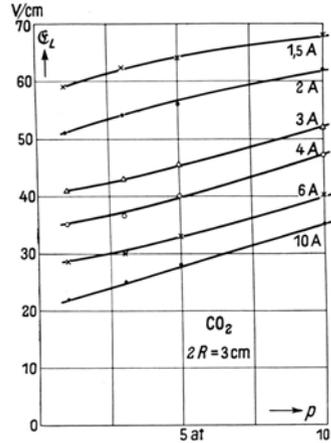


Bild 26. Längsfeldstärke E_L von Wälzbogensäulen in Kohlensäure, abhängig vom Druck p für verschiedene Ströme.

Stickstoff. Der hier untersuchte Wälzbogen in Kohlensäure zeigte auch bei höheren Drücken dieses unterschiedliche Verhalten gegenüber Stickstoff, wie durch die Gegenüberstellung von Lichtbogenphotographien in den beiden Gasen veranschaulicht wird (Bild 14 und 15).

Die Bestimmung der Bogendurchmesser aus den aufgenommenen Photographien war wegen der schärferen Berandung bei Kohlensäure einfacher durchzuführen als bei Stickstoff. Während bei Stickstoff eine Stabilisierung bis 20 at möglich war, konnte man bei Kohlensäure den Bogen nur bis 8 at stabil erhalten. Bei 10 at ist die Stabilisierung schon leicht gestört, wie Bild 15f zeigt; bei 15 at hatte die Stabilisierung bereits vollkommen versagt.

In Bild 27 ist der aus photographischen Aufnahmen gewonnene Säulendurchmesser in Abhängigkeit vom Strom aufgetragen. Der Säulendurchmesser nimmt selbstverständlich mit wachsendem Strom zu. Während die Bogenspannung und Längsfeldstärke bei Kohlensäure gewisse Abweichungen in ihrer Druckabhängigkeit gegenüber Stickstoff aufweisen, zeigt die Druckabhängigkeit des Durchmessers von Kohlensäure und Stickstoff ein geradezu entgegengesetztes Verhalten. Während bei Stickstoff der Bogendurchmesser mit steigendem Druck zunimmt (Bild 16), nimmt er bei Kohlensäure ab (siehe auch Bild 17, in dem die Druckab-

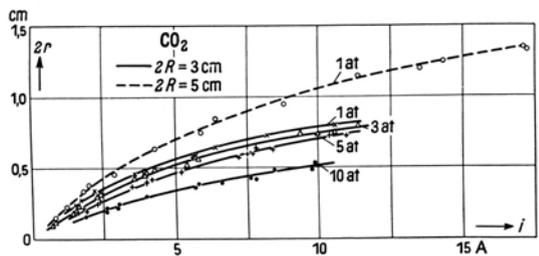


Bild 27. Säulendurchmesser $2R$ eines Wälzbogens in Kohlensäure von verschiedenem Druck, abhängig vom Strom i .

hängigkeit des Durchmessers für Kohlensäure und Stickstoff gemeinsam dargestellt ist). Aus Bild 17 erhält man ein zahlenmäßiges Verhältnis der Bogendurchmesser (Stickstoff zu Kohlensäure) von etwa 1,6 bei einem Druck von 1 at. Dieses Verhältnis ist unabhängig von der Stromstärke. Bei höheren Drücken nimmt es um so stärker zu, je kleiner die Stromstärke ist; es hat z. B. für 10 at und 2 A den Wert 6,7 und für 10 at und 10 A jedoch den Wert 3,1. Daß bei höheren Drücken dieses

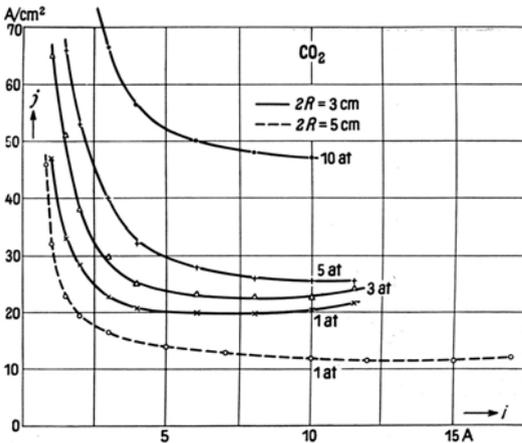


Bild 28. Stromdichte in der Säule eines Wälzbogens in Kohlensäure bei verschiedenem Druck, abhängig vom Strom i .

Durchmesser Verhältnis mit steigendem Strom abnimmt, ist wohl durch die zunehmende Randbeeinflussung bei Stickstoff zu erklären.

Die Stromdichte, die in Abhängigkeit vom Strom in Bild 28 dargestellt ist, nimmt für alle Drücke mit steigendem Strom zunächst ab und erreicht wie bei Stickstoff (Bild 18) ein Minimum. Dieses Minimum wird für alle Drücke bei einem Bogendurchmesser erreicht, der etwa ein Viertel des Rohrdurchmessers beträgt.

Die Stromdichte nimmt bei Kohlensäure im Gegensatz zu Stickstoff mit steigendem Druck zu, wie aus Bild 19 hervorgeht.

V. Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie.

a) Leitfähigkeit der Bogensäule im Stickstoff.

Die Stromdichte in der Säule einer Bogenentladung ist nach der thermischen Bogentheorie von K. T. Compton [22] gegeben durch die Beziehung

$$\text{worin} \quad j = \varepsilon \cdot n^- \cdot v^- = \varepsilon \cdot n^- \cdot b^- \cdot \mathcal{E}, \quad (1)$$

ε die Elementarladung,

n^- die Elektronenzahl pro Kubikzentimeter,

v^- die mittlere Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen,

b^- die Elektronenbeweglichkeit und

\mathcal{E} die treibende Feldstärke bedeutet¹⁾.

Die Elektronenzahl n^- läßt sich nach der von Megh Nad Saha angegebenen Formel für den Ionisierungsgrad x^2)

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{-2,5} \cdot e^{\frac{-\varepsilon \cdot V_j}{k \cdot T}} \quad (2)$$

¹⁾ Strenggenommen wird durch die Gl. (1) nicht die gesamte Stromdichte erfaßt, sondern nur die durch die Elektronen als Ladungsträger erzeugte, während die durch die in gleicher Anzahl vorhandenen Ionen bewirkte Stromdichte nicht berücksichtigt ist. Diese Vernachlässigung kann bekanntlich ohne weiteres gemacht werden, da die Beweglichkeit der Ionen und daher auch ihre Wanderungsgeschwindigkeit sehr viel kleiner ist als die der Elektronen und sie somit zur Stromdichte nur einen unwesentlichen Beitrag liefern.

²⁾ Die Berechnung des Ionisierungsgrades x nach der Saha-Beziehung ist nur ungefähr möglich, da das Vorhandensein bzw. Auftreten angeregter Zustände dabei vernachlässigt ist, d. h. eine direkte Ionisierung ohne Zwischenstufen angenommen wird, ferner unter anderem Molekülschwingungen nicht berücksichtigt sind.

in Abhängigkeit von Temperatur und Druck berechnen zu:

$$n^- = x \cdot N. \quad (3)$$

Dabei bezeichnet:

N die Zahl der vor der thermischen Ionisation vorhandenen neutralen Moleküle bzw. Atome,

p den Gasdruck in mm Hg,

T die absolute Temperatur der Bogensäule in °K,

k die Boltzmann-Konstante und

V_j die Ionisierungsspannung des Trägergases.

Da der Ionisierungsgrad x bei den beim Wälzbogen in Stickstoff in Frage kommenden Temperaturen von etwa 5000° K eine sehr kleine Größe ist, kann die Gl. (2) umgeformt werden zu

$$x = \text{const} \cdot g_x(T) \cdot p^{-1/2}, \quad (4)$$

wobei die Temperaturglieder in $g_x(T)$ vereinigt sind.

Die Zahl der neutralen Moleküle N ist dem Gasdruck direkt proportional, so daß man für die Druckabhängigkeit der Elektronenzahl je Volumeneinheit Bogensäule erhält

$$n^- = \text{const} \cdot g_n(T) \cdot p^{1/2}. \quad (5)$$

Die Elektronenbeweglichkeit b [Gl. (1)] ist ebenfalls druckabhängig, da sie bekanntlich gegeben ist durch die Gleichung [9]:

$$b = \frac{\varepsilon}{\sqrt{3} \cdot \mu \cdot k} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{T}}$$

(μ = Elektronenmasse). Die mittlere freie Weglänge der Elektronen λ ist umgekehrt proportional zum Gasdruck, so daß also

$$b \approx \frac{1}{p}. \quad (6)$$

Man erhält nun für die Druckabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit der Bogensäule j/\mathcal{E} aus den Gl. (1), (5) und (6)

$$\frac{j}{\mathcal{E}} = n^- \cdot \varepsilon \cdot b^- = \text{const} \cdot g(T) \cdot p^{-1/2}. \quad (7)$$

Bei der Ableitung der Gl. (7) wurde die Annahme gemacht, daß die Ionisierungsspannung V_j in der Saha-Gl. (2) unabhängig vom Gasdruck ist. Das trifft wohl für atomare Gase zu, nicht aber für die hier untersuchten molekularen Gase Stickstoff und Kohlensäure.

In der Bogensäule sind die Stickstoffmoleküle N_2 in Abhängigkeit von Gasdruck und Temperatur teilweise in Stickstoffatome N gemäß $N_2 \rightleftharpoons 2 N$ dissoziiert¹⁾, wobei der Dissoziationsgrad z gegeben ist durch die Gleichung:

$$\log \frac{4z^2}{1-z^2} \cdot p = -\frac{5040}{T} W + \frac{3}{2} \log T + 0,442 - \log V(T). \quad (8)$$

Darin ist

W die Dissoziationsenergie (für Stickstoff ist $W = 7,4$ V),

$V(T)$ die Zustandsfunktion für die Schwingungen im N_2 -Molekül,

p der Gasdruck in at.

¹⁾ Die folgenden Überlegungen und Berechnungen gelten für Stickstoff, sie lassen sich jedoch auf Kohlensäure sinngemäß übertragen.

Setzt man in Gl. (8) die Temperatur konstant, so erhält man mit genügender Annäherung $z \approx p^{-1/2}$. Für eine Temperatur von 5000°K , die etwa der Wälzbogen-temperatur in Stickstoff entspricht, erhält man zahlenmäßig für verschiedene Drücke die folgenden Werte für den Dissoziationsgrad z von Stickstoff:

p	1	5	10	20 at
z	0,079	0,035	0,025	0,018

Nun ist aber die Ionisierungsspannung V_j von Stickstoffmolekülen 15,8 V, von Stickstoffatomen jedoch nur 14,5 V. Bei höheren Drücken sind also weniger der leichter ionisierbaren Stickstoffatome vorhanden als bei geringeren Drücken, d. h. es verringert sich die resultierende Ionisierungsspannung $V_{j, \text{res}}$ des Gasgemisches $\text{N}_2 \rightleftharpoons 2 \text{N}$ mit steigendem Druck und damit auch nach Gl. (2) der resultierende Ionisierungsgrad x_{res} .

Berechnet man nach Gl. (2) zahlenmäßig diesen resultierenden Ionisierungsgrad x_{res} abhängig vom Druck, wobei mit Hilfe eines Systems von Gleichungen berücksichtigt werden muß, daß der atomare Stickstoff von kleinerer Ionisierungsarbeit stärker ionisiert ist, als seinem durch die thermische Dissoziation des molekularen Stickstoffs bestimmten prozentualen Anteil entspricht, so erhält man etwa die in der folgenden Tabelle zusammengefaßten abgerundeten Werte:

p at	1	5	10	20
$x_{\text{res}} \cdot p^{1/2}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$44 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$

Diese durch die Abnahme des Dissoziationsgrades von N_2 hervorgerufene zusätzliche Abnahme der resultierenden Ionisierungsspannung $x_{\text{res}} \cdot p^{1/2}$ mit steigendem Druck läßt sich nach diesen Zahlenwerten durch folgenden Potenzbereich des Druckes angleichen: $x_{\text{res}} \cdot p^{1/2} \approx p^{-1/6}$ bis $p^{-1/4}$. Mit dieser Berücksichtigung ergibt sich aus Gl. (7) für die spezifische Leitfähigkeit des Stickstoff-Wälzbogens:

$$\frac{j}{\mathcal{E}} = n^- \cdot \varepsilon \cdot b^- = \text{const} \cdot g(T) \cdot [p^{-2/3} \text{ bis } p^{-3/4}]. \quad (9)$$

Es soll der Einfachheit halber in den folgenden Überlegungen nur eine Potenz, und zwar $p^{-3/4}$ benutzt werden.

Diese Beziehung soll zum Vergleich mit den Meßergebnissen benutzt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß über die Druckabhängigkeit der Temperaturfunktion $g(T)$ keine Aussage gemacht werden kann, da die Temperatur im Lichtbogen in der vorliegenden Arbeit nicht gemessen wurde. Um den Vergleich zu ermöglichen, soll in der Gl. (9) zunächst die Temperatur konstant gesetzt werden. Man erhält dann also:

$$\frac{j}{\mathcal{E}} = \text{const} \cdot p^{-3/4}. \quad (10)$$

Auf Grund einer Vermutung, daß die Annahme konstanter Bogentemperatur am ehesten für Wälzbögen von gleichem Säulendurchmesser erfüllt sein müßte, wurde nach den Kurven der Bilder 11, 16 und 20 die spezifische Leitfähigkeit als Funktion des Druckes für gleiche Säulendurchmesser bestimmt und in Bild 29 aufgetragen. In das gleiche Bild wurde auch der Verlauf der durch die Gl. (10) dargestellten, theoretisch ermittelten Druckabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit eingetragen, und zwar sowohl für kleine Säulendurchmesser von $2r = 0,5$ bis $1,0$ cm als auch für $1,6$ cm Durchmesser. Die Konstante von Gl. (10) wurde also nicht berechnet, sondern ergab sich durch Angleichen an die Versuchswerte.

Die Übereinstimmung zwischen den rechnerischen und den experimentellen Kurven von Bild 29 ist erstaunlich gut. Das besagt aber auch, daß die Annahme konstanter Bogentemperatur für gleichen Säulendurchmesser bei steigendem Druck in gewissen Grenzen richtig ist.

Nach den Gl. (2) und (5) läßt sich zahlenmäßig die Temperaturfunktion $g(T)$ der Gl. (9) für verschiedene Temperaturen berechnen. Man erhält dann in dem Temperaturbereich von 4000 bis 7000° K angenähert $g(T) \approx T^{15}$ bis T^{20} . Danach bedingt z. B. bei 5000° K eine Zunahme der Temperatur um nur 10 % bereits eine Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit um das 4- bis 7fache (bei 5 % um das 2- bis 3fache). Würde sich also bei steigendem Gasdruck von 1 bis zu 20 at die Bogentemperatur um nur 10 % geändert haben, dann wäre die festgestellte gute Übereinstimmung der Kurven in Bild 29 nicht möglich. Es muß vielmehr daraus geschlossen werden, daß jedenfalls für gleichen Säulendurchmesser die Temperatur innerhalb weniger Prozente für den Druckbereich von 1 bis 20 at konstant geblieben ist.

Aus Bild 29 ist ferner zu erkennen, daß die spezifische Leitfähigkeit mit wachsendem Säulendurchmesser (0,5 bis 1,0 cm bzw. 1,6 cm) zunimmt, daß die Druckabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit j/\mathcal{E} jedoch für jeden Säulendurchmesser durch die Gl. (10) gut dargestellt werden kann. Daraus kann geschlossen werden, daß die Säulentemperatur des Wälzbogens in Stickstoff in engen Grenzen nur abhängig ist vom Säulendurchmesser, und zwar steigt die Bogentemperatur mit wachsendem Säulendurchmesser an. Es wird angenommen, daß dieser Temperaturanstieg durch den mit steigendem Säulendurchmesser wachsenden Randeinfluß des Stabilisierungsrohres (allmähliche Einengung der Bogensäule, womit eine Vergrößerung der Kühlung des Bogens verbunden ist) hervorgerufen wird.

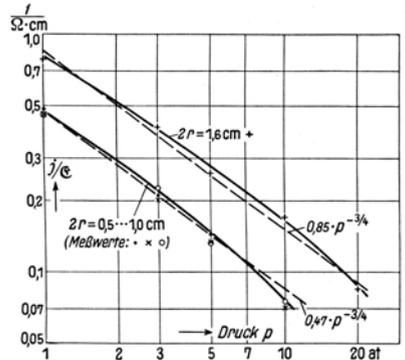


Bild 29. Vergleich zwischen der experimentell ermittelten und dem gerechneten Verlauf der Leitfähigkeit j/\mathcal{E} der Bogensäule in Stickstoff abhängig vom Druck. Rohrdurchmesser 3 cm ($2r =$ Bogendurchmesser).

b) Energie der Bogensäule in Stickstoff.

Die von 1 cm Länge der Bogensäule aufgenommene Energie $\mathcal{E} \cdot i$ wird beim Wälzbogen fast ausschließlich durch Wärmeleitung abgegeben. Der Anteil der Energieabgabe durch Strahlung beträgt nach Messungen am frei brennenden Lichtbogen bei 20 A und nach Berechnungen am stabilisierten Lichtbogen etwa nur 10 %. Er kann deshalb für die folgenden Überlegungen vernachlässigt werden¹⁾.

Es gilt deshalb für den Wälzbogen die folgende Energiegleichung

$$\mathcal{E} \cdot i = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}} \int_{T_0}^T \lambda dT. \tag{11}$$

¹⁾ Eine Energieabgabe durch Konvektionskühlung tritt beim Wälzbogen nicht auf (solange die Stabilisierung einwandfrei ist).

Darin bedeutet

- R den Radius des Stabilisierungsrohres mit der annähernd festgehaltenen Temperatur T_0 ,
 r den Radius der Bogensäule mit der mittleren Temperatur T ,
 λ die Wärmeleitfähigkeit¹⁾.

Es soll nun die experimentell bestimmte Druckabhängigkeit der vom Bogen aufgenommenen Energie bei Stickstoff an Hand dieser Beziehung behandelt werden.

Die experimentellen Werte für $\mathcal{E} \cdot i$ können aus den Kurvenblättern Bild 11 und 16 entnommen werden. Dabei steht es frei, eine experimentelle Größe konstant zu halten. Es erweist sich als vorteilhaft, den Bogenradius r konstant zu wählen, da dann, wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, auch die Bogentemperatur T unverändert bleibt. Die rechte Seite der Energiegleichung vereinfacht sich dadurch wesentlich, man erhält

$$(\mathcal{E} \cdot i)_{r = \text{const}} = \text{const} \cdot \lambda = f(p). \quad (12)$$

Die Energie $\mathcal{E} \cdot i$ ist in Bild 30 für verschiedene Radien r als Funktion des Druckes wiedergegeben. Bild 30 stellt eine Schar von Kurven mit fallendem Charakter dar. Mit wachsendem Bogenradius verschieben sich die Kurven zu größeren Energiewerten. Wenn nun die Gl. (12) gültig ist, müssen sich diese Kurven ihrem Verlauf nach durch die Funktion $\lambda = f(p)$ wiedergeben lassen. Das soll im folgenden untersucht werden.

Solange die thermische Dissoziation keine Rolle spielt, also im Bereich niedriger und mittlerer Temperaturen, ist die Wärmeleitzahl λ von Gasen unabhängig vom Druck²⁾.

Im Bereich der thermischen Dissoziation jedoch ergibt sich eine Druckabhängigkeit von λ dadurch, daß

1. sich das Gleichgewicht $\text{N}_2 \rightleftharpoons 2 \text{N}$ verschiebt und λ verschieden ist für N_2 und N ,
2. eine zusätzliche Wärmeübertragung durch die an verschiedenen Stellen erfolgende Dissoziation und Wiedervereinigung vonstatten geht.

Die nur durch den zweiten Vorgang bedingte Zunahme der Wärmeleitzahl λ_x läßt sich nach W. Nernst darstellen durch

$$\text{worin} \quad \lambda_x = -D \cdot W \cdot \frac{d\rho}{dz} \cdot \frac{dz}{dT},$$

D die Diffusionskonstante,

W die Dissoziationsenergie in V (für $\text{N}_2 \rightleftharpoons 2 \text{N}$ ist $W = 7,4 \text{ V}$),

ρ die Zahl der Moleküle je Volumeneinheit und

z den Dissoziationsgrad

bedeutet.

¹⁾ Diese Formel wurde für einen glühenden Stab vom Durchmesser $2r$ abgeleitet, der an seiner Oberfläche die Temperatur T hat und sich in einem Rohr vom Durchmesser $2R$ befindet, welches die konstante Temperatur T_0 besitzt. Da der Bogen keinen scharf begrenzten Rand hat, an dem eine Temperatur T herrscht, kann — wie schon in Abschnitt 4c) bzw. d) erwähnt — auch hierbei nur eine mittlere Temperatur bei einem mittleren Bogenradius r angesetzt werden. Die kleinen Änderungen der festzuhaltenden Temperatur T_0 am Stabilisierungsrohr machen wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit bei der vorkommenden Temperatur für T_0 von 300 bis 400° K nur einen geringen Einfluß auf eine Änderung der Energieabgabe aus.

²⁾ Es ist $\lambda = K \cdot \mu \cdot c_v$, mit $K = \text{Konst.}$, $\mu = \text{Zähigkeit}$, $c_v = \text{spezifische Wärme}$; c_v ist unabhängig vom Gasdruck; ferner gilt: $\mu = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot u \cdot L$, wobei $\rho = \text{Dichte}$, $u = \text{Geschwindigkeit der Moleküle}$, $L = \text{mittlere freie Weglänge}$. Da sowohl u als auch das Produkt $\rho \cdot L$ vom Druck unabhängig ist, ist auch μ und somit λ druckunabhängig.

Mit Verwendung dieser Beziehung erhält man nach Berechnungen von Ter Horst, H. Brinkmann und L. G. Ornstein [24] für die Druckabhängigkeit der Wärmeleitzahl λ für Stickstoff bei konstanter Temperatur die Beziehung

$$\lambda = K_1 \frac{2z}{1+z} + K_2 \frac{1-z}{1+z} + \lambda_x. \tag{13}$$

Das erste Glied ergibt den Anteil zur Wärmeleitzahl durch die Atome, das zweite den durch die Moleküle. Für λ_x erhält man für Stickstoff bei konstanter Temperatur

$$\lambda_x = K_3 \left[\frac{\sqrt{2}}{18 \frac{z}{1-z} + 17,5} + \frac{1}{18 \frac{1-z}{z} + 24,7} \right] \frac{W}{(1+z)^2} \cdot x. \tag{14}$$

$K_1 \dots K_3$ sind Konstanten.

Nach diesen Gl. (13) und (14) und nach den oben wiedergegebenen z -Werten für verschiedene Drücke wurde $\lambda = f(p)$ für 5000° berechnet. Die erhaltenen Zahlenwerte lassen sich für den Druckbereich von 1 bis 20 at mit guter Annäherung durch darstellen.

$$\lambda \approx p^{-1/4} \tag{15}$$

In Bild 30 wurde nun für jeden Säulendurchmesser eine Kurve $\lambda = \text{const} \cdot p^{-1/4}$ eingezeichnet an den jeweiligen experimentellen Wert von $\mathcal{E} \cdot i$ angeglichen. Die Übereinstimmung zwischen den Kurven $\lambda \approx p^{-1/4}$ und den experimentellen $\mathcal{E} \cdot i$ -Werten muß als recht gut bezeichnet werden. Man kann daraus schließen, daß die Anwendung der Energiegleichung auf den Wälzbogen berechtigt ist, und man kann die festgestellte Übereinstimmung als einen weiteren Beweis dafür ansehen, daß die Temperatur in der Wälzbogensäule bei konstantem Bogendurchmesser praktisch unabhängig vom Druck ist.

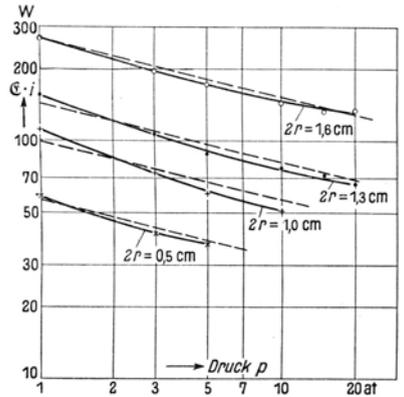


Bild 30. Energie der Bogensäule in Stickstoff abhängig vom Druck. Nach Messungen und Rechnung mit $\lambda \approx p^{-1/4}$ ($2r =$ Bogendurchmesser).

Mittels der Energiegl. (11) kann nun auch eine Erklärung für den in Bild 12 dargestellten und bereits diskutierten Verlauf der Längsfeldstärke bei Stickstoff für konstanten Strom in Abhängigkeit vom Druck gegeben werden. Es soll die Längsfeldstärke für 2 A betrachtet werden. In dem Bereich von 1 bis 7 at bleibt \mathcal{E} annähernd konstant und steigt dann mit wachsendem Druck gleichmäßig an. Aus Bild 17 ist zu erkennen, daß der Bogendurchmesser für 2 A ebenfalls mit wachsendem Druck ansteigt. Die Abhängigkeit des Bogenradius r vom Druck kann nach Bild 17 annähernd dargestellt werden durch

$$\ln \frac{1}{r} \approx p^{-1/4}.$$

Wie im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, ist die Bogentemperatur bis zu Bogendurchmessern von etwa 1 cm konstant¹⁾.

Man kann also für diesen Bereich die Energiegleichung schreiben:

$$\mathcal{E} \cdot i = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}} \cdot \lambda(p) = \text{const} \cdot p^{1/4} \cdot p^{-1/4} = \text{const} \tag{16}$$

¹⁾ Diese Aussage bezieht sich natürlich nur auf die vorliegenden Verhältnisse, also Stickstoff als Trärgas und ein Stabilisierungsrohr von 3 cm Dmr.

oder
$$\mathfrak{E}(p)_{i=\text{const}} = \text{const}, \quad (17)$$

d. h. mit Hilfe der Energiebeziehung erhält man für den eben betrachteten Druckbereich und für 2 A einen vom Druck unabhängigen Verlauf der Längsfeldstärke, wie er dafür auch gemessen wurde.

Für größere Drücke, also auch größere Bogenradien, bleibt die Temperatur nicht mehr konstant, sondern nimmt langsam zu, womit dann auch die Zunahme der Längsfeldstärke \mathfrak{E} zusammenhängt.

e) Strom- und Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke nach dem Minimumprinzip.

Während in den beiden vorangegangenen Abschnitten V. a und b kombinierte Meßwerte für den Vergleich mit rechnerisch ermittelten Abhängigkeiten herangezogen wurden, soll im folgenden die Strom- und vor allem die Druckabhängigkeit der 3 abhängigen Variablen der Bogensäule \mathfrak{E} , r , T für sich theoretisch bestimmt und in Vergleich zu den Meßergebnissen gebracht werden.

Außer den beiden vorher behandelten Beziehungen (1) und (11) für die Leitfähigkeit bzw. Energie der Bogensäule wird nun noch als dritte die in diesem Zusammenhang an anderer Stelle [18, 19, 20] schon mehrfach verwendete Theorie der kleinsten Brennspannung benutzt. Nach dieser Minimumtheorie stellen sich Temperatur und Durchmesser der Bogensäule so ein, daß für konstant gehaltenen Strom die Elektrodenspannung bzw. die Längsfeldstärke ein Minimum wird.

$$\frac{d\mathfrak{E}}{dT}_{i=\text{const}} = 0^1). \quad (18)$$

α) Es soll zunächst die Stromabhängigkeit der Längsfeldstärke des Wälzbogens untersucht werden: $\mathfrak{E} = f(i)$. Dazu gehen wir zurück auf die Beziehung (9) für die Leitfähigkeit der Bogensäule und formen sie für konstanten Druck um zu

$$i = n^- \cdot \varepsilon \cdot b^- \cdot \mathfrak{E} \cdot \pi \cdot r^2 = \text{const} \cdot g(T) \cdot r^2 \cdot \mathfrak{E}. \quad (19)$$

Ferner benutzen wir die Energiegleichung (11)

$$\mathfrak{E} \cdot i = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}} \int_{T_0}^T \lambda dT.$$

Will man aus diesen beiden Gleichungen r eliminieren, so muß man das logarithmische Glied durch eine Potenz m von r annähern, da man sonst im Verlauf der weiteren Rechnung auf unüberwindbare Schwierigkeiten stößt. Es wird also gesetzt:

$$\mathfrak{E} \cdot i = r^m \cdot f(T); \quad (20)$$

r eliminiert ergibt

$$i^{\frac{2}{m}-1} \cdot \mathfrak{E}^{\frac{2}{m}+1} = \text{const} \frac{[f(T)]^{\frac{2}{m}}}{g(T)}. \quad (21)$$

Die Bestimmung von m erfolgt graphisch.

In Bild 31 ist $\frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$ in Abhängigkeit vom Bogenradius r für ein Stabilisierungsrohr von $R = 15$ mm aufgetragen. Für einen Bogenradius r von 2 bis etwa 4 mm,

¹⁾ Siehe vor allem F. Kesselring, ETZ 53 (1934), 92. Die weiteren Betrachtungen und Berechnungen erfolgen in Anlehnung an diese Arbeit.

der bei Stickstoff und 1 at nach Bild 16 einem Bogenstrom von 2 bis 4,5 A entspricht, läßt sich $\frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$ etwa durch $r^{2/3}$ annähern, wie Bild 31 zeigt. Für diesen Strombereich

ist also $m = 2/3$, so daß Gl. (21) übergeht in:

$$i^2 \cdot \mathcal{E}^4 = \frac{[f(T)]^3}{g(T)}. \quad (22)$$

Diese Gleichung, entsprechend der Extrembedingung (18) nach T abgeleitet, ergibt

$$i^2 \cdot \mathcal{E}^4 = \frac{d}{dT} \left[\frac{[f(T)]^3}{g(T)} \right] = 0$$

und aufgelöst

$$i^2 \cdot \mathcal{E}^4 = \text{const};$$

oder

$$\mathcal{E} = \frac{\text{const}}{i^{1/2}}. \quad (23)$$

Für einen Bogenradius von etwa 5 bis 7 mm kann man — wie aus Bild 31 ersichtlich — $\frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$ durch r^1 annähern. Aus Bild 16 entnimmt man für diese Grenzen des Säulendurchmessers (10 bis 14 mm) bei 1 at einen Strombereich von etwa 6 bis 12 A. Setzt man in Gl. (21) $m = 1$ und führt die weitere Rechnung und Ableitung nach T wie oben durch, so erhält man für den letztgenannten Strombereich

$$\mathcal{E} = \frac{\text{const}}{i^{1/3}}. \quad (24)$$

In Bild 32 sind diese für 1 at rechnerisch ermittelten Stromabhängigkeiten der Längsfeldstärke nach (23) und (24) zusammen mit den gemessenen Werten aufgetragen. Die Konstante ist durch Angleichen an die gemessenen Werte bei 2 bzw. 10 A bestimmt.

Es sind also nicht Absolutwerte wiedergegeben, sondern nur der vor allem interessierende Verlauf der Längsfeldstärke mit dem Strom.

Bild 32 zeigt deutlich, daß der Charakter der gemessenen Stromspannungskurve durch den mit Hilfe des Minimumprinzips errechneten Verlauf im wesentlichen dargestellt werden kann. Die Übereinstimmung kann natürlich nur ziemlich roh sein, da das Annähern der Potenzen von r an den logarithmischen Ausdruck exakt nur in jeweils einem Punkte möglich ist.

Analog soll auch die Stromabhängigkeit der Längsfeldstärke bei Stickstoff von 20 at berechnet werden.

Nach Bild 16 liegt dafür bei einem Stromintervall von 1,5 bis 3 A der Bogen-durchmesser zwischen 12 und 14,6 mm bzw. der Radius zwischen 6 und 7,3 mm. Für diesen Radienbereich wurde die Annäherung bereits durchgeführt. Man erhält Gl. (24): $\mathcal{E} = \frac{\text{const}}{i^{1/3}}$. Für den Strombereich 5 bis 15 A ergibt sich nach Bild 16 und 31

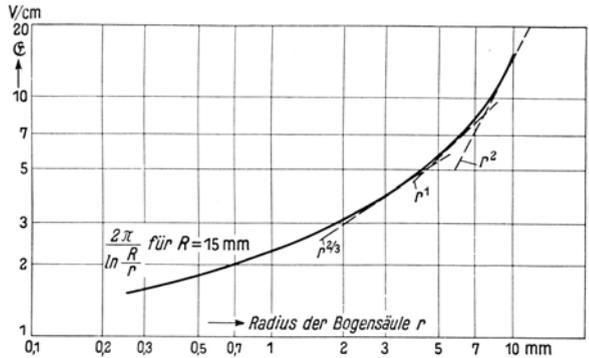


Bild 31. Ersatz von $\frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$ durch Potenzen von r .

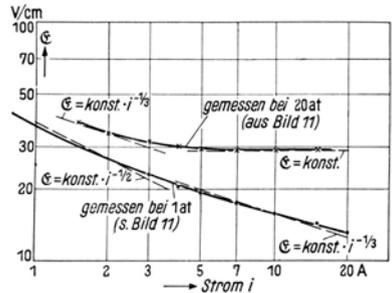


Bild 32. Vergleich der Meßergebnisse mit der Theorie. $\mathcal{E} = f(i)$ bei 1 und 20 at für Stickstoff und Rohrdurchmesser von 3 cm.

entsprechend $m = 2$ und weiter:

$$\mathfrak{E} = \text{const.} \quad (25)$$

In Bild 32 sind auch für 20 at die gemessenen und gerechneten Kurven wiedergegeben. Die gerechneten Werte sind wieder bei 2 bzw. 10 A an die gemessenen angeglichen. Die Übereinstimmung ist noch erstaunlich gut, obgleich die Voraussetzung ausschließlicher Energieabgabe durch Wärmeleitung vor allem bei den großen Strömen bzw. Säulendurchmessern wegen des zunehmenden Strahlungsanteiles hier immer weniger gilt.

β) $\mathfrak{E} = f(p)$; Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke. Es werden wiederum die Beziehungen (1) und (11) benutzt, jedoch mit Berücksichtigung von p [Gl. (9) und (16)]

$$i = n^{-\epsilon} b^{-\mathfrak{E}} \pi \cdot r^2 = \text{const.} \cdot g(T) \cdot r^2 \cdot \mathfrak{E} \cdot p^{-1/4} \quad (26a)$$

und

$$\mathfrak{E} \cdot i = \text{const.} \cdot r^m \cdot f(T) \cdot p^{-1/4}. \quad (26b)$$

Daraus r eliminiert ergibt:

$$i^{\frac{2}{m}-1} \cdot \mathfrak{E}^{\frac{2}{m}+1} \cdot p^{\frac{1}{2m}-\frac{3}{4}} = \text{const.} \frac{[f(T)]^{\frac{2}{m}}}{g(T)}. \quad (26c)$$

Aus Bild 17 ist zu ersehen, daß für den Druckbereich von 1 bis 5 at der Bogendurchmesser für Stickstoff bei 2 A zwischen 0,5 und 0,9 mm liegt. Nach Bild 31 erhält man als Annäherung für $\frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}} = \text{const.} \cdot r^{1/2}$. Setzt man in Gl. (26) $m = 1/2$ und führt die Ableitung nach T wie oben durch, so erhält man

$$i^3 \cdot \mathfrak{E}^5 \cdot p^{1/4} = \text{const.},$$

oder als Druckabhängigkeit der Längsfeldstärke für gleichbleibenden Strom:

$$\mathfrak{E} \approx p^{-1/20}. \quad (27)$$

In entsprechender Weise erhält man weiter für 2 A und einen Druckbereich von 10 bis 20 at $m = \text{etwa } 1$ und damit $\mathfrak{E} \approx p^{1/12}$, für 10 A und einen Druckbereich von 1 bis 5 at $m = 4/3$, also: $\mathfrak{E} \approx p^{1/7}$, für 10 A und Druckbereich von 5 bis 20 at $m = 5/3$ und $\mathfrak{E} \approx p^{1/5}$.

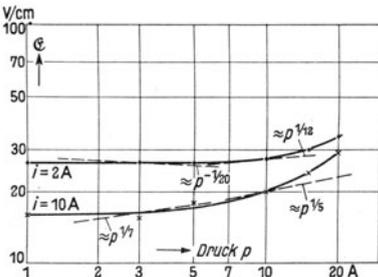


Bild 33. Vergleich der Meßergebnisse nach Bild 12 mit der Minimumtheorie. $\mathfrak{E} = f(p)$ für N_2 und $2R = 3$ cm.

Dieser theoretisch bestimmte Verlauf der Druckabhängigkeit ist in Bild 33 gemeinsam mit den gemessenen Werten aufgetragen. Es wurden auch hier die gerechneten Kurven an die gemessenen angeglichen, und zwar bei 3 und 10 at.

Es ist besonders interessant, daß nach dem Minimumprinzip bei kleinen Stromstärken (2 A) eine Abnahme der Längsfeldstärke mit steigendem Druck zwischen 1 und 5 at folgt. Wie Bild 12 zeigt, ist in einigen Fällen eine solche Abnahme tatsächlich gemessen worden.

Bei größeren Stromstärken und Drücken weicht aus den bereits genannten Gründen (vor allem Zunahme der hier nicht berücksichtigten Energieabgabe durch Strahlung) die theoretische Kurve von der experimentellen stärker ab.

d) Druckabhängigkeit von Säulendurchmesser und Säulentemperatur nach dem Minimumprinzip.

α) $r = f(p)$. Aus den beiden auf S. 54 zusammengestellten Beziehungen (26) und (26a) erhält man durch Eliminieren von \mathcal{E} für den Säulenradius r :

$$r = \frac{i^{\frac{2}{m+2}} \cdot p^{\frac{1}{m+2}}}{f(T)^{\frac{1}{m+2}} \cdot g(T)^{\frac{1}{m+2}}}, \tag{28}$$

bzw. für konstanten Strom und bei Annahme konstanter Temperatur:

$$r = \text{const} \cdot p^{\frac{1}{m+2}}. \tag{29}$$

Auf Grund der in den vorigen Abschnitten durchgeführten Überlegungen kann bei steigendem Druck die Säulentemperatur nur für jeweils gewisse Durchmesserbereiche konstant gesetzt werden (dabei nimmt mit steigendem Bogendurchmesser die Temperatur zu).

Die Beziehung (29) bzw. die Konstante darin gilt deshalb immer nur für solche Druckbereiche, bei denen die Änderung der Temperatur vernachlässigt werden kann.

Um einen Vergleich der rechnerisch ermittelten Werte nach Gl. (29) mit den Meßergebnissen zu ermöglichen, muß der Exponent m mit Hilfe des Kurvenblattes (31) zahlenmäßig ausgedrückt werden. Man erhält danach bei $r = 1 \dots 4$ mm für $m = 1/2$, das entspricht nach Bild 17 bei 2 A einem Druckbereich von 1 bis 4 at. Gl. (29) wird also zu: $r = \text{const} \cdot p^{2/5}$. (30)

Analog erhält man weiterhin die in der folgenden Tabelle zusammengefaßten Werte für m bzw. für Gl. (29):

r mm	Stromstärke A	Gültiger Druckbereich at	m	
(1 ... 4)	2	1 ... 4	1/2	$r \approx p^{2/5}$
5,5 ... 8	2	10 ... 20	4/3	$r \approx p^{3/10}$
5,5 ... 8	10	1 ... 5	4/3	$r \approx p^{3/10}$
8 ... 9	10	5 ... 20	5/3	$r \approx p^{3/11}$

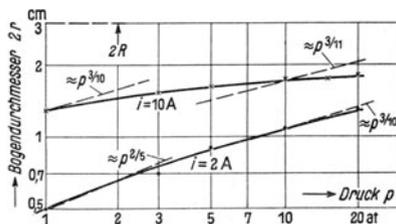


Bild 34. Vergleich der Meßergebnisse nach Bild 17 mit der Minimumtheorie. Bogendurchmesser $2r = f(p)$.

Bild 34 enthält eine Zusammenstellung des experimentell (nach Bild 17) und rechnerisch [nach Gl. (29)] bestimmten Druckverlaufs des Bogendurchmessers für 2 und 10 A. Wie man daraus ersieht, ist die Übereinstimmung bei 2 A hervorragend.

Bei einer größeren Stromstärke von 10 A stimmt der Verlauf der theoretischen mit der experimentellen Kurve aus den oben genannten Gründen weniger gut überein.

Nachdem aus den Betrachtungen der Abschnitte Va und Vb mit Hilfe der Meßergebnisse von \mathcal{E} , i und r geschlossen werden konnte, daß die Säulentemperatur beim Wälzbogen in gewissen Grenzen vom Druck des Trägergases unabhängig ist, soll im folgenden die Druckabhängigkeit der Bogentemperatur nach dem Minimumprinzip rechnerisch ermittelt werden.

β) Für die Energiebeziehung (11) bzw. (20) kann man wegen der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ näherungsweise auch setzen:

$$\mathcal{E} \cdot i = \text{const} \cdot r^m \cdot T^s \cdot p^q. \tag{31}$$

In Verbindung mit Gl. (26a):

$$i = \text{const} \cdot r^2 \cdot \mathcal{E} \cdot n^{-1} \cdot b^{-1}$$

erhält man durch Eliminieren von r

$$\mathcal{G}^{\frac{2}{m}+1} \cdot i^{\frac{2}{m}-1} = \text{const} \frac{T^{\frac{2s}{m}} \cdot p^{\frac{2q}{m}}}{n^- \cdot b^-}. \quad (32)$$

Darin ist die Elektronenzahl [s. Gl. (3)] $n^- = x \cdot N$ oder wegen des sehr kleinen Betrages des Ionisierungsgrades x beim Wälzbogen angenähert:

$$n^- = \text{const} \cdot \frac{x \cdot p}{T},$$

worin x durch die Ionisierungsgleichung (2) gegeben ist. Für die Abhängigkeit von Temperatur und Druck der Elektronenbeweglichkeit b^- gilt

$$b^- = \text{const} \frac{T^{1/2}}{p}.$$

Man erhält daraus für $n^- \cdot b^-$:

$$n^- \cdot b^- = \text{const} \cdot T^{3/4} \cdot p^{-1/2} \cdot 10^{-\frac{5040 \cdot Vj}{2T}}. \quad (33)$$

Nach der Minimumtheorie muß Gl. (32) nach T abgeleitet werden

$$\frac{d\mathcal{G}}{dT} = \text{const} \frac{d}{dT} \left[\frac{T^{\frac{2s}{m}} \cdot p^{\frac{2q}{m}}}{T^{3/4} \cdot p^{-1/2} \cdot 10^{-\frac{5040 \cdot Vj}{2T}}} \right] = 0 \quad (34)$$

oder

$$\frac{d}{dT} \left(T^{\frac{2s}{m}-3/4} \cdot p^{\frac{2q}{m}+1/2} \cdot 10^{\frac{5040 \cdot Vj}{2T}} \right) = 0$$

und nach T aufgelöst:

$$T = \frac{5040 \cdot \ln 10 \cdot Vj}{2 \left(\frac{2s}{m} - 1/2 \right)}. \quad (35)$$

Wenn auch in Gl. (35) der Druck selbst nicht in Erscheinung tritt, so kann daraus noch keine Unabhängigkeit der Temperatur vom Druck gefolgert werden; denn die Werte der Exponenten m und s und der resultierende Betrag der Ionisierungsspannung Vj ändern sich mit dem Druck. Die Druckabhängigkeit der resultierenden Ionisierungsspannung bei Stickstoff ist zwar sehr gering ($Vj \approx p^{-1/50}$) und kann also vernachlässigt werden.

Der Exponent s , der die Stärke der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ angibt, steigt für die beim Wälzbogen in Stickstoff auftretenden Temperaturen zwischen 5000 und 6500° K von etwa 4 bis 7. Da in diesem Falle der Druck besonders berücksichtigt wurde, geht er hier nicht mehr ein.

Am stärksten ändert sich mit dem Druck m , und zwar für 2 A z. B. von $1/2$ bei 1 at bis zu $3/4$ bei 20 at, wie bereits festgestellt.

Daraus folgt, daß die Temperatur des Wälzbogens fast nur von m abhängt; d. h. daß für konstanten Säulenradius die Temperatur unabhängig vom Druck ist und daß mit steigendem Radius auch die Temperatur der Bogensäule ansteigt.

Damit steht aber die Aussage der Minimumtheorie auch bezüglich der Druckabhängigkeit der Bogentemperatur in bester Übereinstimmung mit dem Experiment, denn obgleich in der vorliegenden Arbeit die Bogentemperatur nicht gemessen wurde, haben doch die in den Abschnitten Va und Vb auf Grund der Messungen der Längsfeldstärke, der Stromdichte und des Säulendurchmessers durchgeführten Überlegungen ohne Verwendung des Prinzips der kleinsten Brennspannung zu dem gleichen eben genannten Ergebnis über die Druckabhängigkeit der Temperatur geführt.

Eine theoretische Untersuchung der Verhältnisse beim Wälzbogen in Kohlensäure wird wegen der bisher nur mangelhaften Kenntnis der hierbei erheblich verwickelteren Elementarprozesse und damit wegen der Unmöglichkeit einer Berechnung der Druckabhängigkeit z. B. der Elektronenzahl oder der zusätzlichen Wärmeleitfähigkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Eine genauere Prüfung des Minimumprinzips an Hand der hier gebrachten Meßergebnisse wird nach einer anderen, wesentlich allgemeineren Methode in der anschließenden Arbeit von M. Steenbeck durchgeführt. Hierbei zeigt sich ebenfalls eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung.

VI. Schluß.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Hochspannungsinstitut Neubabelsberg der Technischen Hochschule Berlin durchgeführt.

Für die Ermöglichung der Arbeit und das ihr entgegengebrachte Interesse bin ich dem Vorsteher des Instituts, Herrn Prof. A. Matthias zu großem Dank verpflichtet. Weiterhin danke ich den ehemaligen wissenschaftlichen Assistenten des Instituts, den Herren Dipl.-Ing. Czemper und Dipl.-Ing. Mochow für ihre Unterstützung beim Aufbau der Versuchsapparatur.

Zusammenfassung.

Der Bogen brennt zur Erzielung reproduzierbarer Meßergebnisse in der Achse eines schnell rotierenden Glasrohres (Wälzbogen); er wird mit Gleichstrom von 1 bis 20 A gespeist. In Stickstoff wird oberhalb 20 at ein zunehmendes Nachlassen der Stabilisierung festgestellt. Oberhalb 40 at war infolge von Turbulenz ein stabil brennender Bogen überhaupt nicht mehr zu erhalten. Bei größerem Durchmesser des Stabilisierungsrohres (5 cm Durchmesser gegenüber 3 cm Durchmesser) und auch bei Kohlensäure werden die Stabilisierungsverhältnisse mit steigendem Druck schon oberhalb 10 at sehr ungünstig.

Die Messungen zeigen, daß die Stromspannungs- und die Stromlängsfeldstärkekurven für Stickstoff und Kohlensäure auch bei hohen Drücken einen fallenden Charakter haben. Zahlenmäßig liegen die Werte der Längsfeldstärke bei Kohlensäure höher (etwa $1\frac{1}{2}$ - bis 2mal so hoch) als bei Stickstoff bei gleichem Strom und Druck. In Stickstoff ist die Längsfeldstärke bei kleinen Stromstärken ($1 \dots 6$ A) in Abhängigkeit vom Druck bis 10 at annähernd konstant; bis 5 at zeigt sie sogar eine schwache Abnahme mit steigendem Druck. Sowohl bei Stromstärken oberhalb 6 A als auch bei Drücken oberhalb 10 at steigt die Feldstärke etwa linear mit dem Druck an. Bei Kohlensäure steigt die Längsfeldstärke von 1 bis 10 at auch bei kleinen Stromstärken etwa linear an und weicht damit gegenüber dem Verlauf bei Stickstoff ab.

In Stickstoff vergrößert sich der Bogendurchmesser mit zunehmendem Druck, die Stromdichte wird also mit steigendem Druck kleiner im Gegensatz zu Kohlensäure, wo die Stromdichte mit steigendem Druck größer wird.

Die Meßergebnisse werden mit bekannten theoretischen Ansätzen der Stromtransport-, Ionisierungs- und Energiegleichung sowie einer Extrembedingung, der Steenbeckschen Minimumtheorie der Bogenspannung in Beziehung gebracht.

Es ergibt sich für Stickstoff, daß der nach der Theorie der kleinsten Brennspannung errechnete Verlauf der Längsfeldstärke sowie der Stromdichte abhängig von

Stromstärke und Druck mit den Meßergebnissen in guter Übereinstimmung steht. Ferner steht die Aussage der Minimumtheorie, daß bei konstantem Säulendurchmesser die Temperatur vom Druck annähernd unabhängig ist und mit zunehmendem Säulendurchmesser ansteigt, in guter Übereinstimmung mit Ergebnissen, die auf Grund von Messungen gewonnen wurden.

Schrifttum.

1. L. Duncan, A. J. Rowland, R. J. Todd: Der elektrische Lichtbogen unter Druck. *ETZ* **14** (1893) S. 603.
2. O. Lummer: Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur. Braunschweig (1914).
3. G. P. Luckey: The Tungsten Arc under Pressure. *Phys. Rev.* (2) **9** (1917) S. 129.
4. W. Mathiesen: Untersuchungen über den elektrischen Lichtbogen. Leipzig (1921).
5. P. Schönherr: *ETZ* **30** (1909) S. 365.
6. E. Traub: Über rotierende Strömungen in Rohren und ihre Anwendung zur Stabilisierung von elektrischen Flammenbogen. *Ann. Phys.* (5) **18** (1933) S. 169.
7. W. Grotrian: Der Gleichstrom-Lichtbogen großer Bogenlänge. *Ann. Phys.* (4) **47** (1915) S. 141.
8. A. v. Engel: Elektrische Messungen an langen Gleichstromlichtbogen in Luft. *Z. techn. Phys.* **10** (1929) S. 505.
9. A. v. Engel u. M. Steenbeck: Elektrische Gasentladungen **I** und **II**. Berlin (1932 u. 1934).
10. A. v. Engel u. M. Steenbeck: Über die Temperatur in der Gassäule eines Lichtbogens. *Wiss. Veröff. Siemens* **X**, 2 (1931) S. 155.
11. C. Ramsauer: Über die Temperatur des elektrischen Lichtbogens. *Elektrotechn. u. Masch.-Bau* **51** (1933) S. 189.
12. B. Kirschstein u. F. Koppelman: Photographische Aufnahmen elektrischer Lichtbögen großer Stromstärke. *Wiss. Veröff. Siemens* **XIII**, 3 (1934) S. 52.
13. R. Holm u. A. Lotz: Messungen der Gesamtstrahlung der Säule eines Wechselstrombogens in Luft. *Wiss. Veröff. Siemens* **XIII**, 2 (1934) S. 87.
14. O. Mayr: Hochleistungsschalter ohne Öl. *ETZ* **53** (1932) S. 75.
15. J. Biermanns: Über den Unterbrechungsvorgang im Hochleistungsschalter. *ETZ* **53** (1932) S. 641.
16. M. Steenbeck: Energetik der Gasentladungen. *Phys. Z.* **33** (1932) S. 809.
17. W. Elenbaas, F. Kesselring u. F. Koppelman: Zur Frage der Berechtigung des Minimumprinzips in der Theorie der Bogenentladung. Briefwechsel *ETZ* **57** (1936) S. 1497.
18. F. Kesselring: Untersuchungen an elektrischen Lichtbögen. *ETZ* **55** (1934) S. 92.
19. R. Holm, B. Kirschstein u. F. Koppelman: Überblick über die Physik des Starkstromlichtbogens mit besonderer Berücksichtigung der Löschung in Hochleistungs-Wechselstromschaltern. *Wiss. Veröff. Siemens* **XIII**, 2 (1934) S. 63.
20. B. Kirschstein u. F. Koppelman: Beitrag zur Minimumtheorie der Lichtbogensäule, Vergleich zwischen Theorie und Erfahrung. *Wiss. Veröff. Siemens* **XVI**, 3 (1937) S. 56.
21. W. Schottky: Wandströme und Theorie der positiven Säule. *Phys. Z.* **25** (1924) S. 342.
22. K. T. Compton u. F. Langmuir: Review of Modern Physics **2** (1930) S. 218.
23. M. N. Saha: Versuch einer Theorie der physikalischen Erscheinungen bei hohen Temperaturen. *Z. Phys.* **6** (1921) S. 40.
24. Ter Horst, H. Brinkmann, L. G. Ornstein: Der zeitliche Verlauf der Temperatur in Bogenentladungen mit Wechselstrom. *Physica* **II**, 7 (1935) S. 652.
25. O. D. Chwolson: Lehrbuch der Physik **III** (1905).
26. L. S. Ornstein, H. Brinkmann u. A. Bennes: Prüfung der Comptonschen Bogentheorie durch Messung der Bogengastemperatur als Funktion des Druckes. *Z. Phys.* **77** (1932) S. 72.

Lebenslauf.

Ich wurde am 1. Februar 1905 in Myslowitz als Sohn des Seminarlehrers Prof. Franz Foitzik geboren.

Nach Besuch der Mittelschule und Oberrealschule zu Kattowitz legte ich dort am 23. Mai 1923 die Reifeprüfung ab. Nach einer praktischen Tätigkeit in einem oberschlesischen Hüttenwerk bezog ich die Technische Hochschule Breslau, wo ich im Februar 1929 die Diplom-Hauptprüfung in der Fachrichtung Elektrotechnik ablegte.

Im Juli 1929 trat ich in das Dynamowerk der Siemens-Schuckert-Werke AG zu Berlin-Siemensstadt ein. Seit Juli 1931 bin ich im Schaltwerk der Siemens-Schuckertwerke AG tätig.
