

## Sondenmessungen am Lichtbogen mit Hochfrequenzströmen.

Von **A. Hagenbach** und **M. Wehrli** in Basel.

Mit vier Abbildungen. (Eingegangen am 1. Juni 1924.)

1. Im Anschluß an eine kürzlich erschienene Arbeit werden mit einem dem Lichtbogen überlagerten Hochfrequenzstrom die Hochfrequenzwiderstände und damit die gegenelektromotorischen Kräfte (G. E. K.) der einzelnen Bogenteile von Homogen-, Docht- und Effektkohlenbogen gemessen. 2. Die Resultate Duddells werden bestätigt. 3. Für den Dochtkohlenbogen wird an der Anode eine G. E. K. von 15,1 an der Kathode von — 2,3 Volt gefunden. 4. Für den Effektkohlenbogen betragen diese Größen — 2,1 und — 3,3 Volt. 5. Das Ergebnis der letzten Arbeit, daß die G. E. K. in der Gassäule verschwindet, wird bestätigt. 6. Es wird ein Zusammenhang zwischen Gassäulenwiderstand und spektraler Lichtemission gefunden, da bei den Dochtkohlen vor Anode und Kathode sowohl der Widerstand als auch die spektrale Emission verschieden ist. 7. Die G. E. K. an der Anode steigt mit wachsender Kratertemperatur; zugleich wächst der Anodenfall.

§ 1. Einleitung. In einer Arbeit, die kürzlich erschienen ist<sup>1)</sup>, wurde von uns eine Methode angegeben, um den Hochfrequenz-Wechselstromwiderstand eines Lichtbogens zu bestimmen. Daraus kann man bekanntlich seine gegenelektromotorische Kraft (G. E. K.), Arbeit 1, S. 96, berechnen. Der Sitz dieser G. E. K. wurde nahe an oder in den Elektroden gefunden. Die vorliegende Arbeit soll die Widerstandsverteilung im Bogen näher festlegen und damit zugleich die G. E. K. an der Anode und an der Kathode einzeln bestimmen. Die einzige Messung dieser Art wurde schon von Duddell<sup>2)</sup> ausgeführt. Er führte dabei eine Kohlensonde von 2 mm Durchmesser in den Bogen ein und fand folgendes: Für Homogenkohlen „Couradty Noris“ vom Durchmesser 11 mm, der Bogenlänge 6 mm und der Stromstärke 9,91 Amp. beträgt die G. E. K. an der Kathode — 6,1 Volt, an der Anode 16,7 Volt, d. h. es besteht die Ungleichung:

$$E_1/I \geq W_1 \frac{\text{Anode}}{\text{Kathode}},$$

wenn wir mit  $E_1$  die Gleichstromspannung, mit  $W_1$  den Wechselstromwiderstand zwischen der Sonde und einer Elektrode und mit  $I$  den Betriebsstrom des Bogens bezeichnen.

<sup>1)</sup> A. Hagenbach und M. Wehrli, ZS. f. Phys. **20**, 96, 1923. (Arbeit 1.)

<sup>2)</sup> W. Duddell, Phil. Trans. (A) **203**, 305, 1904, oder A. Hagenbach, Der elektr. Lichtbogen, Handbuch der Radiologie IV, **2** (Rad. IV, 2), S. 102, 2. Auflage. Leipzig, Akad. Verlagsges., 1924.

§ 2. Meßanordnung. Auch bei dieser Untersuchung gelangten Kohlensonden zur Verwendung, und zwar von 1,1 mm Durchmesser. Sie sind dem Nernststifte vorzuziehen, da sie sich von selbst scharf zuspitzen. Der Sondenhalter war so eingerichtet, daß die Sonden sowohl in ihrer eigenen Richtung, als auch parallel zur Bogenachse mittels Mikrometerschrauben verschoben werden konnten. Ihre Stellung wurde im siebenfach vergrößerten projizierten Bilde des Bogens abgelesen. Eine Anordnung nach dem von uns verwendeten Prinzip der Strommessung mittels Thermokreuz mußte verlassen werden, da der Übergangswiderstand Sonde—Bogen neben dem Bogenwiderstand zu stark ins Gewicht fiel und

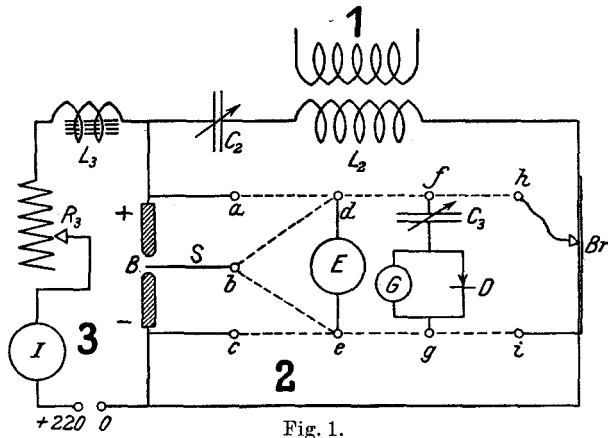


Fig. 1.

zu wenig definiert war. Wir kehrten deshalb zu dem bereits von Duddell sowie Hagenbach und Percy<sup>1)</sup> gebrauchten Prinzip der Spannungsmessung zurück. Die von letzteren Autoren angegebene Methode hat den Nachteil, daß eine Einzelmessung zu viel erfordert; denn bei dem raschen Abbrand der Sonde und der Instabilität des Bogens ist eine rasche Messung notwendig. Die endgültige Meßanordnung ist in Fig. 1 dargestellt.

3 ist der Betriebsstromkreis, und 1 der Hochfrequenzröhrengenerator (Arbeit 1, Seite 97), die beide von unserer letzten Anordnung übernommen wurden.

2 ist der sekundäre Schwingungskreis, dem der hochfrequente Meßstrom entnommen wird,  $C_2$  die variable Kapazität und  $L_2$  die Selbst-

<sup>1)</sup> A. Hagenbach und R. Percy, Arch. sc. phys. et nat. 4, 363, 1922; Rad. IV, 2, 110.

induktion. Der Meßstrom fließt stets sowohl durch den Bogen  $B$  als auch durch den Vergleichswiderstand  $Br$ . Die Kathode des Bogens  $e$ , damit auch das eine Ende von  $Br$ , sind geerdet.  $a, b \dots i$  sind Quecksilbernäpfe auf Paraffin zur Herstellung der verschiedenen Verbindungen. An  $b$  liegt die Sonde  $S$ . Zwischen  $e$  und  $d$  befindet sich ein Gleichstrom-Präzisionsvoltmeter von Siemens und Halske  $E$  mit 49 000 Ohm Vorschaltwiderstand. Zwischen  $g$  und  $f$  ist der Spannungsmesser für Hochfrequenzstrom, bestehend aus dem Drehkondensator  $C_3$ , dem Kristalldetektor  $D$  (Pyrit-Zinkit) und dem Zeigergalvanometer von Hartmann und Braun.

Um z. B. den Widerstand des Bogenstückes  $ab$  zu messen, wird die Verbindung  $a-d-f$  und  $b-e-g$  hergestellt und am Galvanometer der Ausschlag abgelesen. Dann wird  $d-f$  in  $f-h$  und  $e-g$  auf  $g-i$  umgeschaltet und der Schieber des bekannten Widerstandes  $Br$  so eingestellt, daß das Galvanometer den gleichen Ausschlag zeigt. Im Augenblick des Umschaltens von  $f, g$  liest ein zweiter Beobachter die Gleichstromspannung an  $E$  und den Betriebsstrom an  $I$  ab. Der an  $Br$  eingestellte Widerstand wird dem Bogenwiderstande gleichgesetzt. Der Hauptunterschied gegen die Anordnung von Duddell besteht darin, daß bei uns der Betriebsgleichstrom nicht durch den Vergleichswiderstand  $Br$  fließt. Daß dies gestattet ist, wurde in der Arbeit 1 speziell gezeigt.

§ 3. Kontrollmessungen. Um die Anordnung zu prüfen, wurde der Bogen samt Sonde ersetzt durch bekannte selbstinduktionsfreie Widerstände, indem an die Enden zweier in die Bogenlampe eingesetzter Kohlen ein 0,1 mm dicker Nickeldraht befestigt werden konnte. Die Ableitung nach  $b$ , anstatt der Sonde, war ein 0,9 mm dicker am Nickeldrahte angelöteter Kupferdraht. An  $f$  und  $g$  konnte eine Präzisionswiderstandsbrücke der Seekabelwerke Köln-Nippes angeschlossen werden, womit einerseits der Gesamtwiderstand  $a, c$  (Kohlen + Draht), andererseits die Teilwiderstände  $a, b$  und  $b, c$  allein gemessen wurden. Aus der Differenz der Messung  $a, c$  minus die Summe der Teilmessungen, konnte der Widerstand der Sondenleitung berechnet werden. Trotzdem auf sorgfältige Drahtführung und Abschirmung geachtet wurde, konnte die Anordnung nicht vollständig fehlerfrei gemacht werden. Bei den Messungen Sonde — Kathode mußte für Widerstandswerte kleiner als 3,9 Ohm eine Korrektur im Sinne einer Widerstandsverkleinerung angebracht werden (bei 2,6 Ohm z. B. 9 Proz.). Alle übrigen Widerstände wiesen Abweichungen kleiner als 3 Proz. auf und wurden deshalb nicht korrigiert.

§ 4. Die gemeinsamen Bedingungen aller Messungen waren folgende: Anode oben, Bogenlänge 6 mm und Betriebsstromstärke 5 Amp. Der

hochfrequente Meßstrom hatte eine Frequenz von 190 000 und eine Effektivstärke von etwa 0,05 Amp.

Die Messungen wurden folgendermaßen durchgeführt: Einbrennen der Kohlen, etwa sechs Messungen am Gesamtbogen, Justieren der Sonde 1 mm vor einer Elektrode; Vorrücken der Sonde jeweils um 1 mm gegen die andere Elektrode, wobei stets nur gegen eine Seite gemessen wurde. Man erhielt so die Widerstände gegen Anode und Kathode in sechs Meßreihen, wobei abwechslungsweise bei zu- und abnehmendem Widerstande gemessen wurde. Jeder Meßreihe folgte eine Bestimmung des Gesamtbogenwiderstandes mit und ohne eingeführte Sonde. Dann wurden die Kohlen zur Berührung gebracht und ihr Widerstand ermittelt als Quotient der Gleichstrom-Spannung und -Stärke. Zum Vergleiche wurden schließlich noch alle Kohlen durchgemessen nach der Thermokreuzmethode gemäß Arbeit 1.

§ 5. Die Meßresultate für Couradty-Noriskohlen, homogen, vom Durchmesser 10 mm sind in Tabelle 1, für Siemens-Dochtkohlen vom Durchmesser 9 mm in Tabelle 2 und für Siemens-Effektkohlen, weißer Strich, vom Durchmesser 10 mm in Tabelle 3 zusammengestellt.

$E_0$  bedeutet dabei die Gleichstromspannung in Volt,  $I$  die Betriebsstromstärke des Bogens in Ampere,  $W_0$  den gemessenen Hochfrequenzwiderstand in Ohm,  $e_0$  die G. E. K. in Volt,  $e_a$  die G. E. K. gegen die Anode und  $e_k$  gegen die Kathode. Unter dem + - bzw. — -Zeichen stehen die Messungen gegen Anode bzw. Kathode.  $s$  bedeutet die aus den beiden Teilmessungen errechnete Summe. Die Angaben sind das Mittel aus mindestens zwei Meßreihen. Die Messungen der ersten zwei Zeilen wurden vor bzw. nach der Sondenmessung ausgeführt, wobei die Sonde jeweils isoliert in den Bogen eingebracht war. Die Zeile 3 enthält die Werte nach der Thermokreuzmethode (Th. M.), die ohne Sonde erhalten wurden. Bei den Dochkohlen beträgt der Dochtdurchmesser 3 mm, bei den Effektkohlen 4 mm.

Die Resultate der Tabellen 1 bis 3 sind in der Fig. 2 aufgetragen, und zwar als Abszissen die Abstände der Sonde von der Kathode in Millimetern, als Ordinaten die Spannungen  $E_0$  in Volt und die Wechselstromwiderstände  $W_0$  in Ohm (Maßstab rechts), bzw. die Produkte  $IW_0$  in Volt (Maßstab links). Die Kreise bedeuten die Messungen gegen die Kathode, welche den Tabellen entnommen sind. Die Kreuze wurden erhalten aus den Werten gegen die Anode, indem diese vom Mittel der Spannungs- bzw. Widerstandssummen  $s$  abgezogen wurden. Die verwendeten Mittelwerte von  $s_1$  bzw.  $s_2$  sind in der Fig. 2 angegeben.

Tabelle 1. Couradty-Homogenkohlen.

Meßart		Spannung $E_0$			Stromstärke $I$		Widerstand $W_0$			G. E. K. $e_0$		
Gesamt- bogen	vorher	65,1			5,00		11,02			10,0		
	nachher	66,6			5,00		11,60			8,6		
	Th. M.	66,3			5,00		10,78			12,4		
		+	-	$s_1$	+	-	+	-	$s_2$	$e_a$	$e_k$	$s_3$
Abstand Sonde —Kathode in mm	1	56,4	11,0	67,4	4,97	5,00	7,93	3,54	11,5	17,0	-6,7	10,3
	2	53,4	13,4	66,8	4,98	5,00	7,40	4,08	11,5	16,6	-7,0	9,6
	3	50,6	18,1	68,7	5,00	5,00	6,59	5,02	11,6	17,7	-7,0	10,7
	4	45,4	23,9	69,3	5,00	5,00	5,90	5,88	11,8	15,9	-5,5	10,4
	5	42,4	28,3	70,7	5,00	5,00	5,20	6,48	11,7	16,4	-4,1	12,3
Mittelwerte . . .		-	-	68,6	4,99	5,00	-	-	11,6	16,7	-6,1	10,7

Tabelle 2. Siemens-Dochtkohlen.

Meßart		Spannung $E_0$			Stromstärke $I$		Widerstand $W_0$			G. E. K. $e_0$		
Gesamt- bogen	vorher	48,7			5,00		7,26			12,4		
	nachher	49,1			5,00		7,29			12,6		
	Th. M.	47,0			5,00		6,77			13,2		
		+	-	$s_1$	+	-	+	-	$s_2$	$e_a$	$e_k$	$s_3$
Abstand Sonde —Kathode in mm	1	38,9	9,5	48,4	5,00	4,98	4,88	2,35	7,23	14,5	-2,2	12,3
	2	38,2	11,2	49,4	4,99	5,00	4,65	2,68	7,33	15,0	-2,2	12,8
	3	36,6	12,9	49,5	4,99	5,00	4,22	3,04	7,26	15,6	-2,3	13,3
	4	34,0	14,6	48,6	4,99	4,99	3,73	3,41	7,14	15,4	-2,4	13,0
	5	31,3	17,8	49,1	4,98	5,03	3,24	4,05	7,29	15,2	-2,6	12,6
Mittelwerte . . .		-	-	49,0	4,99	5,00	-	-	7,25	15,1	-2,3	12,8

Tabelle 3. Effektkohlen.

Meßart		Spannung $E_0$			Stromstärke $I$		Widerstand $W_0$			G. E. K. $e_0$		
Ge- samt- bogen	vorher	31,0			5,02		7,40			-6,1		
	nachher	31,5			4,97		7,42			-5,3		
	Th. M.	31,0			5,00		7,44			-6,2		
		+	-	$s_1$	+	-	+	-	$s_2$	$e_a$	$e_k$	$s_3$
Abstand Sonde —Kathode in mm	1	18,8	11,5	30,3	5,01	5,01	-	3,05	-	-	-3,8	-
	2	17,7	13,6	31,3	4,92	4,98	3,98	3,36	7,34	-1,9	-3,1	-5,0
	3	15,8	14,3	30,1	4,97	5,00	3,49	3,58	7,07	-1,5	-3,6	-5,1
	4	14,6	16,6	31,2	4,95	5,00	3,42	4,06	7,48	-2,3	-3,7	-6,0
	5	12,8	19,1	31,9	4,98	4,99	3,13	4,34	7,47	-2,8	-2,5	-5,3
Mittelwerte		-	-	30,9	4,96	5,00	-	-	7,27	-2,1	-3,3	-5,3

Wie man aus der Figur erkennt, zeigen Spannung und Wechselstromwiderstand bei den Homogen- und Effektkohlen in der Gassäule den bekannten linearen Verlauf. Bei den Dochkohlen hingegen beobachtet man vor der Anode einen größeren Gradienten des Widerstandes und der Spannung. Die  $E_0$ - und  $IW_0$ -Kurven laufen bei allen drei Bogen parallel, d. h. sie haben eine konstante Differenz, ein Resultat, welches bereits in der Arbeit 1 indirekt abgeleitet wurde. Es bedeutet, daß in der Gassäule der Wechselstromwiderstand  $W_1$  gleich ist dem Gleichstromwerte  $E_1/I$ , oder daß die G. E. K. Null ist.

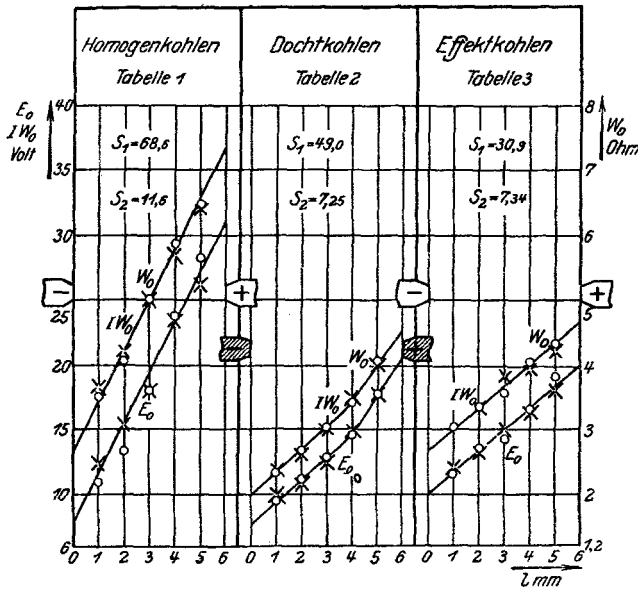


Fig. 2.

Es wurde den Kurven der Widerstandsabfall in der Gassäule entnommen, er beträgt pro Millimeter für die Homogenkohlen 0,76 Ohm, für die Dochkohlen gegen die Kathode 0,33 Ohm und für die Effektkohlen 0,33 Ohm, d. h. die Gassäule der Homogenkohlen hat einen mehr als doppelt so großen Widerstand als die von Docht- und Effektkohlen bei derselben Stromstärke 5,00 Ampere.

Unter der Annahme, daß das Gebiet des Anoden- und Kathodenfalles klein sei gegen 1 mm, erhält man den Spannungsabfall sowie den Wechselstromwiderstand an den Elektroden aus den bis an die Elektroden verlängerten Kurven der Fig. 2. Die Werte sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4.

Kohlenart	An der Anode				An der Kathode			
	$E_a$	$W_a$	$I W_a$	$\bar{e}_a$	$E_k$	$W_k$	$I W_k$	$\bar{e}_k$
Homogenkohlen . . .	37,5	4,25	21,2	16,7	7,9	2,64	13,2	— 6,1
Dochtkohlen . . .	28,4	2,70	13,5	15,1	7,7	1,99	10,0	— 2,3
Effektkohlen . . .	10,9	2,67	13,3	— 2,1	10,1	2,65	13,3	— 3,3

Beim Anodenfall  $E_a$  sieht man den bekannten großen Sprung von den Reinkohlen zu den Effektkohlen. Zugleich nimmt auch der Widerstand  $W_a$  ab von 4,25 bis 2,67 Ohm. Der Kathodenfall  $E_k$  ändert sich nicht wesentlich, ebensowenig der Widerstand  $W_k$ . Die G. E. K.  $\bar{e}_a$  und  $\bar{e}_k$  sind die Mittelwerte aus Tabelle 1 bis 3. Bei den Homogenkohlen wird das von Duddell gefundene Resultat bestätigt, d. h. die G. E. K.  $e_a$  an der Anode hat einen positiven Wert von 16,7 Volt, sie wirkt dem Strome entgegen, während an der Kathode eine G. E. K.  $e_k$  von — 6,1 Volt den Strom unterstützt.

Für Dochkohlen wird eine ähnliche Verteilung gefunden: An der Anode 15,1, an der Kathode — 2,3 Volt.

Bei den Effektkohlen dagegen ist die G. E. K. an der Anode auch negativ, und zwar — 2,1 Volt (d. h. sie scheint den Strom zu unterstützen), ebenso wie an der Kathode, wo  $e_k$  den Wert — 3,3 Volt hat.

Man sieht damit das in der Arbeit 1 gefundene Resultat bestätigt. Die negative G. E. K. der Effektkohlen rührt her von den abweichenden Zuständen an der Anode.

Pollock<sup>1)</sup> hat sich über die Vorgänge an der Anode gewisse Vorstellungen gemacht, die zu dem Ergebnis führen, daß der Spannungsabfall  $I W_a$  der G. E. K.  $e_a$  an der Anode gleich sein müsse. Es wurden deshalb in Tabelle 4 die  $I W_a$  eingetragen. Wie man erkennt, ist die von Pollock geforderte Gleichheit nirgends erfüllt. Ganz sicher nicht bei den Effektkohlen, wo die G. E. K. negativ wird.

§ 6. Die Bogen mit den zwei verschiedenen Elektroden. Siemens-Dochtkohle vom Durchmesser 9 mm und Effektkohle, weißer Strich vom Durchmesser 10 mm, wurden in gleicher Weise ausgemessen. Die Resultate mit der Dochkohle als Anode sind in Tabelle 5, mit der Effektkohle als Anode in Tabelle 6 zusammengestellt.

<sup>1)</sup> J. A. Pollock, Phil. Mag. 17, 361, 1909 oder Rad. IV, 2, 115.

Tabelle 5. Anode: Dochkohle (stabile Form). Kathode: Effektkohle.

Meßart		Spannung $E_0$			Stromstärke $I$		Widerstand $W_0$			G. E. K. $e_0$		
Gesamt- bogen	vorher	47,7			5,02		7,35			10,8		
	nachher	50,5			5,06		7,37			13,1		
	Th. M.	46,2			5,00		6,80			12,3		
		+	-	$s_1$	+	-	+	-	$s_2$	$e_a$	$e_K$	$s_3$
Abstand Sonde —Kathode in mm	1	39,3	11,8	51,1	5,00	5,02	5,14	3,05	8,19	13,7	-3,5	10,2
	2	37,6	12,3	49,9	4,97	5,20	4,75	3,14	7,89	14,0	-4,0	10,0
	3	37,8	14,3	52,1	5,03	5,20	4,53	3,16	7,69	15,0	-2,1	12,9
	4	32,2	15,6	47,8	5,04	5,00	3,56	3,56	7,12	14,3	-2,2	12,1
	5	34,6	18,3	52,9	4,93	5,00	4,17	3,98	8,15	14,0	-1,6	12,4
Mittelwerte	. .	—	—	50,8	4,99	5,08	—	—	7,81	14,2	-2,7	11,5

Tabelle 6. Anode: Effektkohle. Kathode: Dochkohle.

Meßart		Spannung $E_0$			Stromstärke $I$		Widerstand $W_0$			G. E. K. $e_0$		
Ge- samt- bogen	vorher	30,1			5,00		7,06			— 5,2		
	nachher	30,3			5,00		7,04			— 4,9		
	Th. M.	30,3			5,00		6,95			— 4,5		
		+	-	$s_1$	+	-	+	-	$s_2$	$e_a$	$e_K$	$s_3$
Abstand Sonde —Kathode in mm	1	18,1	11,2	29,3	5,00	5,00	3,78	3,10	6,88	-0,8	-4,3	-5,1
	2	16,4	11,8	28,2	5,00	5,00	3,42	3,20	6,62	-0,7	-4,2	-4,9
	3	15,3	13,2	28,5	5,00	5,00	3,26	3,42	6,68	-1,0	-3,9	-4,9
	4	13,1	16,0	29,1	5,00	5,00	2,98	3,94	6,92	-1,8	-3,7	-5,5
	5	11,9	18,0	29,9	5,00	4,95	2,58	4,00	6,58	-1,0	-1,8	-2,8
Mittelwerte	.	—	—	29,0	5,00	4,99	—	—	6,74	-1,1	-3,6	-4,6

Der Bogen mit der Dochkohle als Anode hat zwei Formen, eine stabile mit den Werten der Tabelle 5 und eine labile. Letztere tritt unvermittelt auf, bleibt aber nie bestehen; sie äußert sich durch starkes Schwanken der Spannung zu niedrigeren Werten, z. B. wurde dabei abgelesen für  $E_0$  41, 41, 35, 40, 36 Volt. Die stabile Form zeigt stets vor der Dochkohle die violette Stickstoff- bzw. CO-Emission bis etwa 2 mm in den Bogen hinein, während bei der labilen Form das weiße Licht, herrührend vom Salze der Effektkohle, bis zur Dochkohle reicht. Es scheint, daß diese labile Form sich dem Effektbogen nähert. Sie erreicht allerdings nie die niederen  $E_0$ -Werte der Tabelle 6. Sie entsteht leichter bei großen Stromstärken und kleinen Bogenlängen.



Der Bogen mit der Effektkohle als Anode zeigt nur das weiße Effektkohlenlicht.

Der Widerstandsabfall in der Gassäule beträgt pro Millimeter für den Bogen mit der Dochkohle als Anode 0,32, mit der Effektkohle als Anode 0,31 Ohm. Diese Werte wurden erhalten aus den Widerstandswerten  $W_0$ .

Die Verhältnisse an den Elektroden zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7.

Anode	An der Anode			An der Kathode		
	$E_a$	$W_a$	$\bar{e}_a$	$E_K$	$W_K$	$\bar{e}_k$
Dochtkohle . . . . .	31,8	3,65	14,2	9,5	2,55	— 2,7
Effektkohle . . . . .	10,2	2,42	— 1,1	9,5	2,74	— 3,6

Ein Vergleich der Tabellen 2 bis 4 mit den Tabellen 5 bis 7 läßt folgendes erkennen: Wesentlich für die Art des Bogens sind die Vorgänge an der Anode und damit das Anodenmaterial.

§ 7. Die Fehler, die bei den Sondennmessungen vorkommen, sind zweierlei Art:

a) Einerseits wird der gesamte Bogen durch das Einführen der Sonde verändert; man erkennt das daran, daß die Messungen am Gesamtbogen verschieden ausfallen, ob die Sonde eingeführt ist oder nicht. Diese Abweichungen ergeben sich aus unseren Meßwerttabellen durch Vergleich der Zeilen 1, 2 und 3, welche letztere ohne Sonde erhalten wurde. Wie schon Duddell<sup>1)</sup> festgestellt hat, bewirkt das Einbringen der Sonde eine Erhöhung der Spannung  $E_0$  und des Widerstandes  $W_0$ . Die Dochkohlen (Tabellen 2 und 5) zeigen die Abweichung recht deutlich. Die Veränderungen der G. E. K. liegen innerhalb der Versuchsfehler; da diese durch Differenzbildung zustande kommt, dürfte ihre Genauigkeit etwa  $\pm 3$  Volt sein. Die Abweichungen der Summen  $s$  geben ein Maß der Störungen beim Verschieben der Sonde. Wie man sieht, sind diese nicht systematisch, d. h. unabhängig von der Stellung der Sonde.

b) Andererseits ist zu prüfen, ob die Messungen Sonde—Elektrode wirklich dem Zustande entsprechen, der am Orte der Sonde im Bogen besteht. Child<sup>2)</sup> hat nachgewiesen, daß durch das stets vorhandene Ausströmen von Ionen bzw. Elektronen aus der glühenden Sonde die Gleichstrom-

<sup>1)</sup> l. c., S. 329.

<sup>2)</sup> C. D. Child, Phys. Rev. **24**, 498, 1907.

spannungsmessungen systematisch verändert werden. Bänderet<sup>1)</sup> hat diese Beobachtungen bestätigt. Bei den vorliegenden Messungen war die Sonde stets in die Mittelachse des Bogens gebracht, so daß sie weiß glühte und deshalb vorwiegend Elektronen emittierte. Die Spannungswerte  $E_0$  gegen die Anode sind deshalb zu klein, diejenigen gegen die Kathode zu groß gemessen. Bei den Hochfrequenzmessungen spielt dieser Glüheinfluß keine Rolle. Ob die Summe der Teilwiderstände gleich ist dem Gesamtwiderstande, wurde speziell nachgeprüft und erfüllt gefunden für Noris-Homogenkohlen vom Durchmesser 14 mm bei einer Bogenlänge von 6 mm und einer Stromstärke von 7,5 Amp. Die Mittel der Teilwiderstände aus zehn Messungen waren gegen die Anode 3,90, gegen die Kathode 4,17 Ohm, die errechnete Summe somit 8,07 Ohm, während die Messung 8,1 Ohm ergab. Da Wechsel- und Gleichstrommessung in der Gassäule den gleichen Widerstandsabfall ergeben, kann der vom Glüheffekt vorhandene Fehler der Gleichstromspannungsmessung von der Stellung der Sonde nur unmerklich abhängen, d. h. er ist in der Gassäule konstant. Bei der Berechnung der G. E. K. gegen die Elektroden muß er jedoch berücksichtigt werden, und zwar ist das  $e_a$  zu vergrößern, dagegen das  $e_k$  zu verkleinern, d. h. die G. E. K. an der Kathode ist noch mehr negativ, an der Anode für Homogen- und Dochkohlen noch mehr positiv zu nehmen. Bei den Effektkohlen könnte sie an der Anode statt negativ positiv werden. Die Korrektur konnte im Bogen selbst nicht bestimmt werden: nach Angaben von Child und einigen Beobachtungen, die wir am Wechselstrombogen gemacht haben, dürfte sie zwischen 1 und 4 Volt liegen. Auf jeden Fall ergibt sich, daß für die Untersuchung der Gassäule die übliche Sonden Spannungsmessung richtige Werte liefert.

§ 8. Beim Vergleich des Homogenkohlenbogens mit dem Dochkohlenbogen sieht man, daß sich diese beiden Bogen hauptsächlich durch den verschiedenen Widerstand der Gassäule (Fig. 2) unterscheiden. Vergleicht man die beiden Bogen im projizierten Bilde und im Spektroskop (die spektroskopischen Beobachtungen wurden mit einem kleinen, geradsichtigen Spektroskop von Schmidt und Haensch ausgeführt), so ergibt sich bekanntlich folgendes:

Der Homogenkohlenbogen ist ein einheitliches violettes Band mit schwacher gelblicher Aureole und zeigt überall die Stickstoffbanden (Cyanbanden), Gruppe II, Wellenlänge 4606,33 Å.-E., Gruppe III 4216,12 und

<sup>1)</sup> E. Bänderet, Sondenmessungen im Metalllichtbogen. Diss. Basel, 1912 oder Rad. IV, 2, 66.

Gruppe IV 3883,55 [die Wellenlängenangaben sind nach Kayser<sup>1)</sup>], ferner das sogenannte Swansche Spektrum 4737,18, 5165,30, 5635,43, das dem Kohlenstoff oder dem Kohlenmonoxyd zugeschrieben wird. Beim Flackern erscheinen die Linien von Ba, z. B. 4554,04, 4934,10, 6693,86 und die Ca-Linie 4226,23, was auch im Bilde beim Auflenchten der Aureole erkannt wird und stets die Spannung um 1 bis 4 Volt erniedrigt.

Der Dochtkohlenbogen zeigt eine deutliche Zweiteilung. Von der Kathode bis 2 mm vor die Anode ist er gelblich und sendet die Linien von Na, K und Ca aus. Besonders stark erschienen die K-Linien, z. B.:

4044,30	5323,55	5782,67	6911,2
—	5340,00	5802,01	6938,8
5099,64	5343,33	5812,54	—
5112,68	5359,88	5832,23	7699,3

von Ca 4226,91 sehr hell, 6102,99, 6122,46 und 6162,46 schwächer, von Na die beiden D-Linien. Vor der Anode dagegen hat auch der

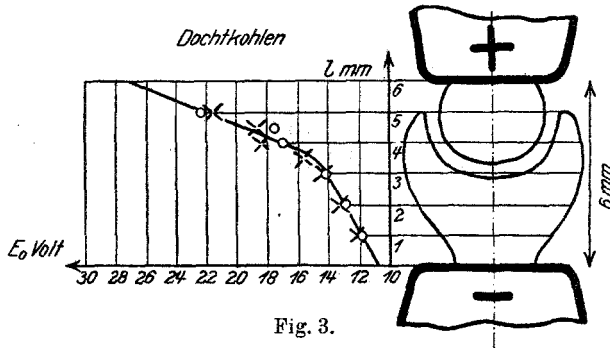


Fig. 3.

Dochtkohlenbogen die violette Farbe des Homogenkohlenbogens und sendet die oben angegebenen Banden aus. Bemerkenswert ist dabei, daß die K-Linien in diesem Teile nicht mehr beobachtet werden können, während die Na-Linien im ganzen Bogen sehr stark auftreten.

In Fig. 3 ist diese Zweiteilung schematisch angegeben. Zwischen den zwei Teilen ist eine farblose dunkle Zone. Nach Fig. 2 scheint auch der Widerstand des Bogens in den zwei Teilen verschiedene Werte anzunehmen, indem derselbe nämlich vor der Anode ansteigt, d. h. sich dem Werte des Homogenkohlenbogens nähert.

§ 9. Dieser Zusammenhang zwischen Bogenwiderstand und Spektrum wurde in weiteren Sondennmessungen sichergestellt, indem

<sup>1)</sup> H. Kayser, Handbuch der Spektroskopie 5, 226, 228. Leipzig, Verlag S. Hirzel, 1910.

mit 1 mm Kohlensonden der Spannungsabfall in acht Meßreihen aufgenommen wurde. Dabei geschah die Messung viermal gegen die Anode und viermal gegen die Kathode, wobei abwechselungsweise bei fallendem und steigendem Widerstande gemessen wurde. Alle acht Spannungskurven zeigen die Zweiteilung des Widerstandes. Als Beispiel möge in Tabelle 8 eine Meßreihe angegeben werden.

Tabelle 8. Messung gegen Kathode, mit wachsendem Widerstande.

Abstand Sonde—Kathode in mm	$E_0$	$V$	$I$	Abstand Sonde—Kathode in mm	$E_0$	$V$	$I$
1	12,1	52	5,0	4	17,0	50	5,0
	12,1	52	5,0				
2	13,8	52	5,0	4 $\frac{1}{2}$	21,0	54	4,9
	14,0	52	4,9		19,0	51	5,1
3	14,2	51	5,0		20,7	52	5,1
	14,6	54	5,0	5	22,9	53	5,0
3 $\frac{1}{2}$	15,0	46	5,1		22,2	51	5,0
	15,2	49	5,1		22,3	51	5,1
4	16,0	47	5,1		22,1	51	5,1
					22,3	54	4,9

$E_0$  bedeutet dabei die Spannung Sonde—Kathode in Volt,  $V$  die Spannung des gesamten Bogens, die an einem Voltmeter von Hartmann und Braun abgelesen wurde und  $I$  ist die Betriebsstromstärke.

Fig. 3 zeigt zwei weitere Messungen; die Kreise sind die gegen die Kathode abgelesenen Werte, während die Kreuze analog wie bei Fig. 2 aus den Werten gegen die Anode erhalten wurden. Jeder Punkt ist das Mittel aus zwei Ablesungen. Das Resultat ist folgendes:

Der Bogen zerfällt entsprechend seinem verschiedenen spektralen Verhalten in zwei Teile mit verschiedenem Widerstandsabfall. Als Mittelwerte für die beiden Widerstandsabfälle pro Millimeter ergaben sich aus den vorgenannten acht Meßreihen die Werte  $0,29 \pm 0,05$  und  $0,84 \pm 0,1$  Ohm, wobei der größere vor der Anode nahe an den im Homogenbogen erhaltenen ( $0,76$ ) herankommt, was auch mit dem spektralen Befunde im Einklang steht. Mathiesen<sup>1)</sup> hat mit verschiedenen Kohlensorten und in verschiedenen Gasen die Spannung des Bogens als Funktion der Bogenlänge untersucht bei konstantem Betriebsstrom. Er schließt aus einem Knie, das seine Kurven bei 2 mm Bogenlänge zeigt, auf eine heißere Gasschicht vor der Anode mit größerem Spannungsabfall; er findet allerdings eine solche Schicht nicht nur beim

<sup>1)</sup> W. Mathiesen, Untersuchungen über den elektrischen Lichtbogen, S. 127. Leipzig, Verlag E. Haberland, 1921.

Dochtkohlenbogen, sondern auch beim Homogen- und Effektkohlenbogen, wo wir eine Widerstandszunahme nicht bemerken konnten. Auch die spektralen Zustände scheinen dort keine wesentlich anderen zu sein.

§ 10. Schlußfolgerungen. Woher kommt dieses verschiedene Verhalten von der Anode? Man kann obige Resultate verstehen unter der Annahme der Temperaturanregung bzw. -ionisation. Grotrian<sup>1)</sup> hat gezeigt, daß bei der im Bogen herrschenden Temperatur (4000° C) und unter Voraussetzung Maxwell'scher Geschwindigkeitsverteilung stets eine sehr große Anzahl Elektronen vorhanden sind, deren kinetische Energie genügt, um die Gas- bzw. Dampfmoleküle zur Strahlung anzuregen bzw. zu ionisieren. Er glaubt sogar, daß die in der Gassäule durch Temperaturionisation erhaltenen Ionen und Elektronen den ganzen Strom übertragen.

Die Verhältnisse im Dochkohlenbogen sind damit folgende: Vor der Kathode reicht die Temperatur und damit die Elektronenenergie nur aus, die Alkalien mit den bekannten niedrigen Anregungs- und Ionisierungsspannungen<sup>2)</sup> genügend stark anzuregen. Vor der Anode dagegen ist die Temperatur höher und damit auch die mittlere kinetische Energie der Elektronen; es wird auch der Stickstoff mit  $V_A = 7$  bis 8 Volt und das CO mit  $V_A = 6,4$  Volt angeregt bzw. ionisiert.

Rechnet man beim Stickstoff mit einer Ionisierungsspannung von 17 Volt und bei CO von 10,1 Volt, so erhält man nach der Theorie von Grotrian bedeutend höhere Widerstandswerte, als wie sie das Experiment im Homogen- und Dochkohlenbogen ergibt, oder man ist gezwungen, mit Grotrian und anderen die etwas bedenkliche Hypothese der stufenweisen Ionisation einzuführen.

Man wird deshalb die Ansicht, welche von einer ganzen Reihe von Forschern, z. B. von J. J. Thomson<sup>3)</sup>, Stark<sup>4)</sup>, Child<sup>5)</sup> und Mit-

<sup>1)</sup> W. Grotrian, Ann. d. Phys. **47**, 180, 1915.

<sup>2)</sup> W. Roth und K. Scheel, Konstanten der Atomphysik. Berlin, Springer, 1923. S. 67, Anregungsspannung  $V_A$ , Ionisierungsspannung  $V_J$  in Volt.

	Na	K	Ca
$V_A$ . . . .	2,12	1,55	1,90
$V_J$ . . . .	5,13	4,13	6,01

<sup>3)</sup> J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen, S. 436. Übersetzt von E. Marx. Leipzig, Teubner, 1906.

<sup>4)</sup> J. Stark, T. Retschinsky u. A. Schaposchnikoff, Ann. d. Phys. **18**, 213, 1905.

<sup>5)</sup> C. D. Child, Jahrb. d. Radioakt. **3**, 189, 1906.

kiewicz<sup>1)</sup>, vertreten wird, vorziehen, nämlich die, daß in unserem Falle der größte Teil der den Strom übertragenden Elektronen bzw. Ionen nahe an der Kathode bzw. Anode entsteht, und damit der von Grotrian errechnete Strom nur einen geringen Bruchteil zum Bogenstrom beiträgt. Für diese Vorstellung sprechen die Vorgänge an den Elektroden (s. § 11 und bei Child, l. c.), z. B. die Tatsache, daß die Kathode auf jeden Fall sehr heiß (glühend) sein muß, was dagegen für die Anode nicht nötig ist.

Die Widerstandsverteilung, d. h. der steilere Gradient vor der Anode und der weniger steile im übrigen Teile der Gassäule läßt sich folgendermaßen erklären: Im Raume des Bogens befindet sich ein Gemisch von viel  $N_2$  und CO (eventuell CN) mit hoher und wenig Alkalien mit niedriger Anregungs- und Ionisierungsspannung. Die Elektronen werden deshalb häufig mit  $N_2$  und CO (eventuell CN) zusammenstoßen, dagegen selten mit den Alkalien. Vor der Kathode können sie aber ihre Energie in wesentlichen Beträgen nur an die Alkalien abgeben, vor der Anode dagegen, wo sie infolge der hohen Temperatur auch das  $N_2$  und CO ionisieren bzw. anregen, werden bei viel mehr Stößen Energiequanten abgegeben: zudem gibt das einzelne Elektron auch ein größeres Quantum an das  $N_2$  und CO ab. Es wird also in diesem Gebiete ein größerer Betrag der Elektronenenergie verbraucht, was, um denselben Strom zu erhalten, einen größeren Spannungsabfall, d. h. einen größeren Widerstand bedingt.

Daß die K-Linien in diesem Raume verschwinden, versteht man folgendermaßen: Die Elektronen geben viel Energie bei den häufigen Zusammenstößen mit  $N_2$  und CO ab, werden also im Mittel weniger Energie haben für die seltenen Zusammenstöße mit K, so daß die Anregung von K weniger wahrscheinlich wird.

Der Homogenkohlenbogen zeigt in der ganzen Gassäule dieselben spektralen Verhältnisse und auch einen steilen Widerstandsabfall wie der Dochkohlenbogen vor der Anode. Er muß also eine höhere Temperatur aufweisen als der Dochkohlenbogen. Außerdem ist hier die Zahl der Na- und K-Moleküle viel kleiner.

Beim Effektkohlenbogen, der einen kleinen Widerstandsabfall zeigt, wird wegen der niedrigen Anregungs- und Ionisierungsspannung des Ca ( $V_a = 1,90$  Volt) einerseits der nach Grotrian berechnete Strom

---

<sup>1)</sup> W. Mitkiewicz, Journ. Russ. Phys.-chem. **35**, 506, 1903; vgl. Rad. **4**, 2, 5, 84ff., 1924.

größere Werte annehmen und andererseits der Energieverlust des einzelnen Elektrons kleiner sein als im Homogenkohlenbogen. Auch wird das  $N_2$  und CO, welches nicht wesentlich angeregt wird, noch einen großen Teil des Bogengases ausmachen. Auch die Temperatur in diesem Bogen wird kleiner sein als diejenige des Homogenkohlenbogens.

§ 11. An den Elektroden besteht die Ungleichung (1). Da bei den Effektkohlen auch an der Anode das  $\frac{E_1}{I} < W_1$  gefunden wird, erhält die Ungleichung die Form:

$$\frac{E_1}{I} \geq W_1 \begin{cases} \text{Anode} \\ \text{Kathode (auch Anode, wenn Effektkohle).} \end{cases}$$

Duddell<sup>1)</sup> sieht die Ursache dieser Ungleichung in der sogenannten gegenelektromotorischen Kraft (G. E. K.), die den Gleichstrom an der Kathode beschleunigt, an der Anode verzögert. Für diese Auslegung spricht der Umstand, daß der Leistungsfaktor des Gesamtbogens, wobei die Widerstandsteile an den Elektroden inbegriffen sind, gleich Eins gefunden wird, d. h. auch durch die Vorgänge an den Elektroden der Hochfrequenzstrom weder kapazitiv noch induktiv merklich beeinflußt wird. Mit der Vorstellung Duddells lassen sich auch unsere Resultate befriedigend erklären:

Die G. E. K. sind glühelektrischer Natur [s. auch Stark]<sup>2)</sup>; an den heißen Ansatzstellen des Bogens werden Elektronen emittiert, die an der Kathode den Strom unterstützen, an der Anode verzögern.

Je höher die Temperatur der Elektroden, um so stärker müßte diese Emission, und um so größer müßte die G. E. K. sein.

§ 12. Der Vergleich Temperatur-G. E. K. wurde an der Kathode nach dem Schema der Fig. 4 durchgeführt.

Das Bild der horizontal stehenden Kathode, es wurde dabei eine 45° Bogenlampe verwendet, wird mit der Linse  $L$  auf einer Mattscheibe scharf eingestellt. Zur Temperaturmessung gelangt ein Wannerypyrometer zur Verwendung, wobei der abgebildete 5 mm breite Kathodenfleck das Gesichtsfeld vollständig ausfüllt. Die Stromstärke und Spannung des Bogens wurde gemäß den Tabellen 1 und 2 einreguliert.

Die Resultate, die sich auf mindestens zehn am Pyrometer abgelesene Werte beziehen, waren für Dochkohlen  $1290 \pm 10^0$  C, für Homogenkohlen  $1350 \pm 10^0$ . Zur Kontrolle wurden nochmals die Dochkohlen

<sup>1)</sup> l. c., S. 332.

<sup>2)</sup> l. c., S. 219.

eingesetzt, die den Wert  $1280 \pm 10^{\circ}$  ergaben. Diese Temperaturangaben haben wegen der Projektion nur relative Bedeutung. Wie man aus dem Vergleich mit Tabelle 4 erkennt, entspricht der höheren Temperatur der Homogenkohle auch die größere G. E. K.  $e_k$  an der Kathode, wie das erwartet wird. Die Temperaturmessungen an der Effektkohle mit dem Pyrometer sind, wie Mathiesen <sup>1)</sup> gezeigt hat, mit systematischen Fehlern behaftet.

An der Anode hat Mathiesen <sup>2)</sup> die Verhältnisse näher studiert; er findet die Kratertemperatur an der Dochkohle bedeutend höher als an der Effektkohle; für Docht- und Homogenkohlen liegen die Temperaturen nicht weit auseinander. Nach der Messung seiner Anodenfälle scheint die Temperatur an der Homogenkohle die höhere zu sein. Vergleicht man damit die G. E. K. an der Anode, so nehmen auch hier die G. E. K. mit fallender Temperatur ab (s. Tabelle 4). Der Vorgang soll

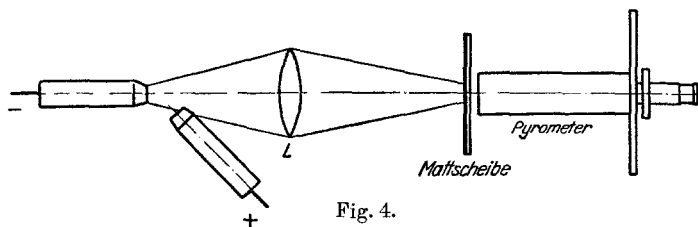


Fig. 4.

an dem besonders deutlichen Unterschiede Dochkohle–Effektkohle näher ausgeführt werden. Bei der Dochkohle sendet die Anode im wesentlichen Elektronen aus, die dem Strome entgegenwirken; dadurch wird die negative Raumladung vor der Anode verstärkt; der Anodenfall ist hoch. Die Effektkohle dagegen sendet wegen ihrer tieferen Temperatur und besonders wegen der Dochtmasse ( $\text{CaF}_2$ ) bedeutend mehr positive Ionen aus. Wenn die G. E. K. negativ ist (s. Tabelle 4 und § 7), würden sogar mehr positive als negative Ionen bzw. Elektronen emittiert werden. Diese positiven Ionen neutralisieren einen Teil der negativen Raumladung vor der Anode, weshalb der Anodenfall beträchtlich abnimmt. Die Homogenkohlen zeigen die größte G. E. K. und den größten Anodenfall, haben also eine noch stärkere Elektronenemission. Die Resultate der gemischten Bogen (§ 6) ergeben das gleiche. Daß dort die Dochkohle eine höhere Temperatur hat als die Effektkohle, geht auch daraus hervor,

<sup>1)</sup> l. c., S. 72, 85, 89.

<sup>2)</sup> l. c., Zahlentafel, S. 104.



daß vor der Dochkohle als Anode das violette  $N_2$ - bzw. CO-Licht erscheint, das erst bei höherer Temperatur angeregt wird (s. § 10).

§ 13. Nach obiger Auffassung besteht also der Kathodenfall  $E_k$  bzw. Anodenfall  $E_a$  aus zwei Teilen, einerseits aus der glühelektrischen G. E. K. und dem wahrscheinlich sehr komplexen Übergangswiderstande multipliziert mit der Betriebsstromstärke; der Widerstand wird teilweise innerhalb, teilweise außerhalb der Elektroden liegen. Der Spannungsabfall des Gesamtbogens  $E_0$  setzt sich deshalb aus fünf Gliedern zusammen, welche in Tabelle 9 zusammengestellt sind.

Tabelle 9.

Bogenart	$\overbrace{e_a + IW_a}^{E_a} + \overbrace{e_k + IW_k}^{E_k} + IW \cdot l = E_0$	$E_0$ beob.
1. Homogenkohlen	$16,7 + 21,2 - 6,1 + 13,2 + 5 \cdot 6 \cdot 0,76 = 67,8$	68,6
2. Dochkohlen .	$15,1 + 13,5 - 2,3 + 10,0 + 5(4 \cdot 0,29 + 2 \cdot 0,84) = 50,5$	49,0
3. Effektkohlen .	$-2,1 + 13,3 - 3,3 + 13,3 + 5 \cdot 6 \cdot 0,33 = 31,1$	30,9

$W$  bedeutet dabei den Widerstandsabfall pro Millimeter in der Gas-säule. Beim Dochkohlenbogen ist die Zweiteilung berücksichtigt, wobei der steile Abfall vor der Anode auf 2 mm, der übrige auf 4 mm angenommen wurde.