

Über die Wirkungsweise des Kathodophons.

(Mitteilung aus dem Telegraphentechnischen Reichsamt.)

Von **Erwin Meyer.**

Das Kathodophon, das für den sprechenden Film von Massolle, Vogt und Engl¹⁾ eingeführt und im deutschen Rundfunk zeitweilig auch als Aufnahmemikrophon benutzt worden ist, besteht aus einer ionisierten Gasstrecke, die von den Schallwellen beeinflusst wird. Einer Glühkathode gegenüber befindet sich in geringem Abstände, bei dem seinerzeit im Rundfunk benutzten Apparat in etwa 0,5 mm Entfernung, eine durchlöchernte Anode, die gleichzeitig als Spitze eines Schalltrichters ausgebildet ist. Als Glühkathode dient ein Erdalkalioxydstift, der von einer im Innern befindlichen Platinspirale elektrisch geheizt wird. Die Stromrichtung Kathode—Anode liegt in der Trichterachse und ist daher mit der Schallrichtung identisch. Die unter dem Einfluß des Schalles erfolgenden Stromschwankungen werden über einen im Kathodophonkreis liegenden hochohmigen Widerstand einem Verstärker zugeführt. Wie der Schall auf die ionisierte Gasstrecke einwirkt, ist bisher nicht bekannt²⁾. Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist, rein experimentell die Wirkungsweise einer dem technischen Kathodophon sehr ähnlichen Anordnung zu untersuchen, die im

folgenden kurzerhand auch als Kathodophon (K.) bezeichnet sei.

Um das technische K. etwas einfacher zu gestalten, wurde der Trichter entfernt; man verliert durch seine Wegnahme zwar erheblich an Empfindlichkeit, da er den Schall stark konzentriert. Seine Öffnungsfläche beträgt nämlich ungefähr 200 cm² und verhält sich zur Fläche an der Spitze, d. h. zur Anodenfläche, etwa wie 1 : 1600. Zur Erzeugung des Ionenstromes wurden in der vorliegenden Untersuchung zwei verschiedene Glühkathoden benutzt, die eben genannte, die im eigentlichen Kathodophonapparat verwendet wird, und ein Nernststift. Beide Glühkathoden emittieren reichlich Elektronen, die sich wahrscheinlich in unmittelbarer Nähe der Kathode an die Luftmoleküle anlagern und als negative Ionen zur Anode gelangen. Das K. war empfindlicher, wenn der Elektrodenabstand größer als 0,5 mm war. Dazu kam, daß für den beim Brennen sich etwas krümmenden Nernststift kleinere Entfernungen als 0,5 mm kaum eingestellt werden können. Infolgedessen wurde die Anode, ein stark durchlöcherntes, kräftiges Messingstück, bei den im folgenden genannten Versuchen in einer Entfernung von 1—3 mm von der Kathode angebracht. Abb. 1 zeigt die beiden benutzten Anordnungen, auf der linken Seite den Kathodophonstift und rechts den Nernststift.

¹⁾ J. Engl, Funksonderheft der ETZ, April 1924, S. 11.

²⁾ Vgl. hierzu: J. Engl, Der tönende Film, Braunschweig 1927, S. 9 u. ff.

Die Schaltung, wie sie für die meisten Zwecke verwendet wurde, ist im Prinzip in Abb. 2 angegeben. Das K., dessen Glühkathode von einer besonderen Batterie (Kathodophonstift 12—13 V, Nernststift etwa 100 V) gespeist wird, liegt mit einer Anodenbatterie E und einem hochohmigen Widerstand in Reihe; die Anodenspannung E beträgt etwa 100—300 V³⁾. Die am hochohmigen Widerstand bei Betönung entstehenden Wechselspannungen werden über einen Verstärker von einem Röhrenvoltmeter angezeigt. Die Messungen erfolgen durchweg mit reinen Tönen, die ein von einem Röhrensummer betriebener Lautsprecher erzeugt. Der gleiche Röhrensummer stellt auch an dem kleinen Widerstande W einen

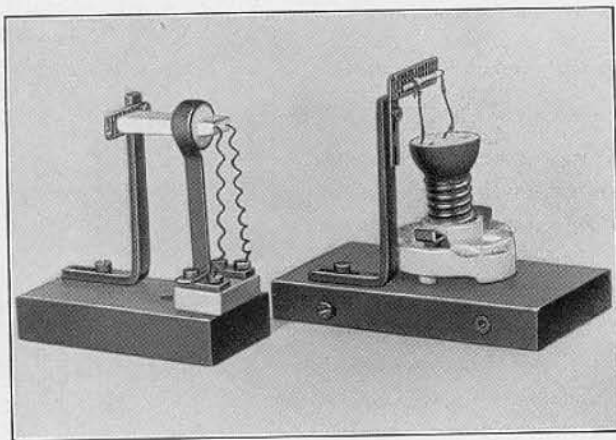


Abb. 1. Kathodophonanordnung.

meßbaren Spannungsabfall e her, der dazu dient, die EMK im Kathodophonkreis zu bestimmen. Die Spannung e wird dabei nach Abschalten des Lautsprechers so lange verändert, bis sie im Röhrenvoltmeter den gleichen Ausschlag wie der auf das K. auftreffende Ton hervorruft. Als Lautsprecher wurden der Blatthaller von S. & H. und der Rice-Kelloggsche Lautsprecher der AEG verwendet. Beide besitzen elektrodynamischen Antrieb.

Es war zunächst zu entscheiden, ob das K. ein Druck- oder ein Bewegungsempfänger ist. Diese Frage läßt sich mit stehenden Schallwellen leicht beantworten. Die stehenden Wellen wurden in einem etwa 2,50 m langen, um 60 cm in der

³⁾ Sie wurde also niedriger gehalten als im eigentlichen K. (500 V), weil für die benutzte Entfernung Kathode—Anode eine Erhöhung der Anodenspannung keine wesentliche Empfindlichkeitssteigerung brachte.

Länge veränderlichen und 16 cm breiten Kundtschen Rohr erzeugt. Das Rohr ist auf der einen Seite durch den Blatthaller, auf der entgegengesetzten Seite durch eine einigermaßen starre Hartgummiplatte abgeschlossen und jeweils auf die erregende Frequenz abgestimmt. Um die Resonanzlänge des Rohres für die betreffende Tonhöhe in einfacher Weise finden zu können, wird außen auf der Abschlußplatte ein gewöhnliches Kohlemikrophon befestigt, das mit einer Batterie und einem Milliampereometer in Reihe geschaltet ist. Ein Kohlemikrophon hat bekanntlich die Eigenschaft, seinen Gleichstromwiderstand mit wachsender Schallstärke zu vergrößern. Da die Abschlußplatte nicht vollkommen starr ist, wird auch das Kohlemikrophon vom Schall im Kundtschen Rohr erregt, und man stellt die Rohrlänge so ein, bis der Widerstand des Mikrophons am größten, d. h. der Ausschlag im

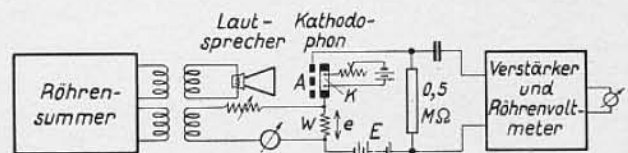


Abb. 2. Kathodophonschaltung.

Milliampereometer am kleinsten wird. Das K. kann, auf einer verschiebbaren Stange befestigt, an jeden Punkt des Kundtschen Rohres gebracht werden, und zwar so, daß Ionen- und Schallrichtung gleich sind. Die Messungen wurden sowohl mit dem Kathodophonstift wie mit dem Nernstfaden ausgeführt und ergaben, daß das K. ein Bewegungsempfänger ist. Im Druckbauch, d. h. im Geschwindigkeitsknoten, ist seine Wirkung praktisch Null. Abb. 3 zeigt als Beispiel zwei Messungen mit dem Kathodophonstift. Als Abszisse ist die Entfernung vom abgeschlossenen Rohrende (Druckbauch) in cm, als Ordinate die jeweils erzeugte EMK in Millivolt aufgetragen. In der oberen Kurve ist als Frequenz 405, in der unteren 815 Hertz gewählt; die entsprechenden halben Wellenlängen betragen, 340 m/s als Schallgeschwindigkeit vorausgesetzt, 42 und 21 cm, wie sie auch im Experiment ungefähr erhalten wurden. Beim quantitativen Vergleich muß man berücksichtigen, daß die Temperatur im Innern des Rohres infolge der Wärmeabgabe des K. beträchtlich erhöht und ungleichmäßig ist. Man sieht aus Abb. 3, daß das K. in einer Entfernung von

λ , 3λ , 5λ usw. vom abgeschlossenen Rohrende, $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{3\lambda}{4}$, $\frac{5\lambda}{4}$ d. h. also in den Geschwindigkeitsbäuchen, seine größte Wirksamkeit besitzt. Es gehört demnach zur Klasse der Bewegungsempfänger.

Der nächste Schritt in der Untersuchungsreihe war die Feststellung, wieweit die Stromrichtung in der Gasstrecke mit der Bewegungsrichtung der Luftteilchen infolge der Schallschwingungen übereinstimmen muß. Hierzu wurden in den stehenden Schallwellen des Kundtschen Rohres wie in rein fortschreitenden Schallwellen die folgenden

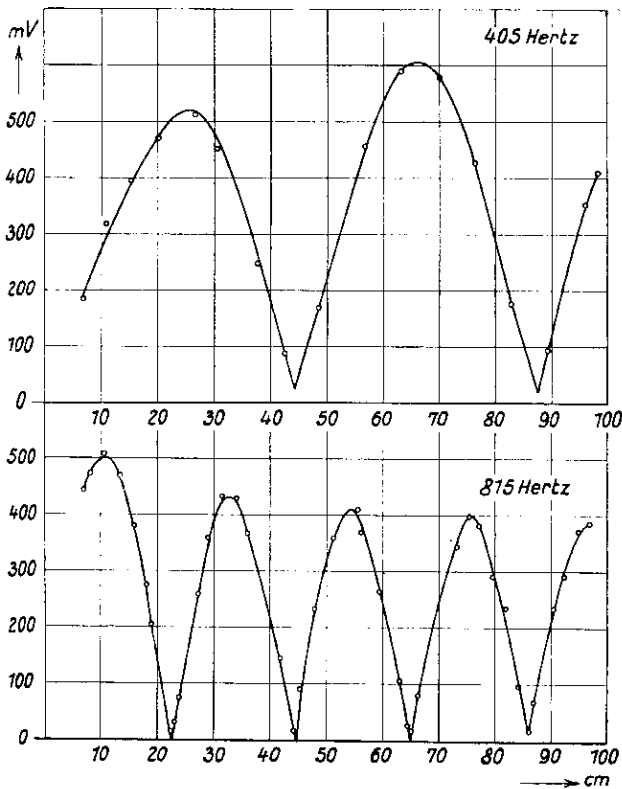


Abb. 3. Wirkungsweise des Kathodophons in stehenden Schallwellen.

drei ausgezeichneten Stellungen des K. geprüft, die in Abb. 4 angegeben sind. In Stellung *a* und *b* ist die Schallrichtung senkrecht zur Stromrichtung. In der Stellung *c* stimmen beide miteinander überein; in dieser Stellung sind auch die Kurven von Abb. 3 aufgenommen. Es zeigte sich, daß die Wirksamkeit des K. in den Fällen *a* und *b* praktisch Null ist. Damit ist zugleich auch bewiesen, daß die Wirkung nicht auf thermischen Ursachen, etwa auf einer Abkühlung der Kathode infolge der Schallschwingungen

ähnlich wie beim Thermophon, beruhen kann; die thermische Wirksamkeit ist schon wegen der großen Wärmekapazität der Kathode sehr unwahrscheinlich. Das K. ist also am wirksamsten, wenn Schall- und Stromrichtung übereinstimmen; dabei macht es übrigens bei fortschreitenden Schallwellen keinen Unterschied, ob zunächst die Kathode oder die Anode vom Schall getroffen wird.

Schließlich wurde noch die Frequenzabhängigkeit des K. geprüft. Da Trägheitserscheinungen irgendwelcher Art oder Resonanzeffekte kaum zu erwarten sind, existieren auf Grund der bisherigen Ergebnisse wohl nur zwei Möglichkeiten der Frequenzabhängigkeit; die EMK des K. kann entweder proportional der Geschwindigkeit oder proportional der Elongation der Luftteilchen sein.

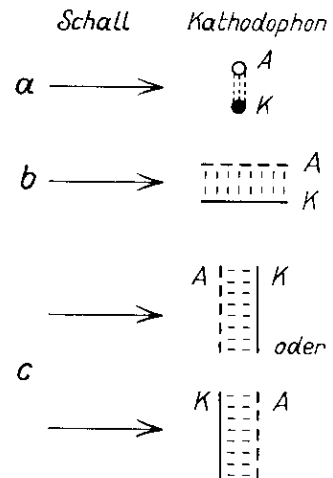


Abb. 4. Verschiedene Anordnungen von Schall- und Stromrichtung im Kathodophon.

Um dies festzustellen, bestimmt man mit Hilfe der Rayleigh'schen Scheibe, die als frequenzunabhängig bekannt ist und die absolute Messungen auszuführen gestattet⁴⁾, die Geschwindigkeitsamplitude des Schalles an der Stelle, an die das K. gesetzt wird, und mißt seine EMK, die unter der Einwirkung des Schalles erzeugt wird. Die Messungen wurden wiederum im Kundtschen Rohr sowie in fortschreitenden Wellen ausgeführt. Tafel 1 gibt die Messungen im Kundtschen Rohr wieder, und zwar für einen Nernstfaden und für einen Kathodophonstift. Das K. und die

⁴⁾ Vgl. Erwin Meyer, ENT 3, S. 290, 1926, u. ENT 4, S. 86, 1927.

Rayleighsche Scheibe befanden sich dazu für jede Frequenz in demselben Geschwindigkeitsbauch im Kundtschen Rohr. Spalte 1 gibt die Schwingungszahlen der zur Untersuchung benutzten Töne an. Spalte 2 enthält die Scheitelwerte der Geschwindigkeitsamplitude (15,2 bzw. 29,4 cm/s), die für alle Frequenzen konstant gehalten wurden. In Spalte 3 sind die gemessenen EMK (mV) angegeben, die nicht konstant sind. Sie nehmen vielmehr umgekehrt proportional mit der Frequenz ab, d. h. sie hängen unmittelbar mit der Elongation zusammen. Dies beweisen die nächsten beiden Spalten. Spalte 4 gibt für die verschiedenen Frequenzen die Elongation der Luftteilchen, d. h. also die Geschwindigkeitsamplitude dividiert durch die Kreisfrequenz, an. Spalte 5 endlich ist das Verhältnis EMK zu Elongation. Man sieht, daß der Quotient von der Frequenz nicht mehr abhängt, er beträgt im Mittel 2,0 bzw. 2,8 Volt je mm. Der mittlere Fehler der Messungen ist etwa 10 vH.

Tafel 1.

1	2	3	4	5
Hertz	Geschwindigkeit cm/s	EMK mV	Elongation 10 ⁻³ cm	Volt/mm
Nernststift.				
171	15,2	261	1,1	1,8
253	15,2	209	9,6	2,2
468	15,2	109	5,2	2,1
735	15,2	60	3,3	1,8
1010	15,2	54	2,4	2,3
1615	15,2	36	1,5	2,4
1985	15,2	21	1,2	1,8
2755	15,2	17	0,9	1,9
				Mittel 2,0
Kathodophonstift.				
172	29,4	623	27	2,3
251	29,4	450	19	2,4
465	29,4	269	10	2,7
714	29,4	179	6,6	2,7
992	29,4	143	4,7	3,0
1625	29,4	86	2,9	3,0
2022	29,4	84	2,3	3,6
2978	29,4	47	1,6	2,9
				Mittel 2,8

Tafel 2 gibt eine zweite Reihe der Messungen wieder, die in fortschreitenden Wellen in kleiner Entfernung vor dem Rice-Kelloggschen Lautsprecher ausgeführt wurden und die nicht die absolute Eichung enthalten. Die Messungen sind ebenfalls für einen Nernst- und einen Kathodophonstift gemacht; sie bereiten bei den geringeren Lautstärken der fortschreitenden Wellen Schwierigkeiten, weil das K. ähnlich wie die Rayleighsche

Tafel 2.

1	2	3	4	5
Hertz	$\sqrt{\text{Skt}}$	EMK	EMK · C $\sqrt{\text{Skt}}$	EMK · C $\sqrt{\text{Skt}}$
Kathodophonstift.				
219	6,5	2,4	3,7	8
392	4,5	1,2	2,7	11
675	6,3	8,6	1,4	9
1130	15,0	15	1,0	12
1350	11,6	10	0,86	12
2150	3,5	2	0,57	12
3100	7,7	3,6	0,47	15
4100	12,0	4,4	0,37	15
5000	7,4	2	0,27	14
7100	4,7	0,8	0,17	12
				Mittelwert 12
Nernststift.				
86,5	4,4	596	135	12
159	4,1	205	50	8
250	5,0	101	20	5,1
362	5,9	72	12	4,4
468	6,3	67	11	5,9
570	5,7	63	11	6,3
692	6,2	51,5	8,3	5,7
787	6,9	37,5	5,4	4,3
890	6,3	43	6,8	6,0
1006	7,6	43,5	5,7	5,8
1240	9,7	34	5,1	6,3
1505	4,0	16	4	6,0
1810	4,7	17	3,6	6,6
2140	1,7	6,5	3,8	8,2
2500	2,4	5,9	2,4	6,0
2985	5,0	11,4	2,3	6,8
3480	10	19	1,9	6,6
4100	8,7	14	1,6	6,6
4920	6,3	8,1	1,3	6,3
5400	3,2	4,4	1,4	7,4
6020	4,2	4,6	1,1	6,5
6670	4,2	3,9	0,9	6,2
7590	3,5	2,9	0,8	6,2
8520	1,7	1,0	0,6	5,0
				Mittelwert 6,0

Scheibe sehr stark auf Luftbewegungen im Zimmer reagiert. Dazu kommt, daß besonders der Nernststift sehr inkonstant brennt und starke Eigengeräusche erzeugt. Diese Eigengeräusche lassen sich übrigens durch ein Gegentaktkathodophon etwas vermindern, d. h. durch ein K., das zu beiden Seiten des Nernststiftes Anodenbleche besitzt und das auf einen Gegentakverstärker arbeitet. Dieses Gegentaktkathodophon wurde jedoch für die vorliegenden Messungen nicht benutzt. Die Anordnung der Tafel 2 ist etwas anders als vorher, insofern, als die Schallstärke, die übrigens geringer als im vorhergehenden Fall ist, für die einzelnen Frequenzen nicht konstant gehalten wurde. Spalte 1 gibt wiederum die jeweilige Schwingungszahl an, die über einen sehr großen Frequenzbereich hin variiert wurde. Spalte 2 enthält die Geschwindigkeits-

amplitude, die vom Lautsprecher an der Stelle des K. erzeugt wurde, aber nicht im absoluten Maß wie oben, sondern es sind nur die Quadratwurzeln aus den von der Rayleighschen Scheibe angezeigten Skalenteilen angegeben; sie sind proportional der Geschwindigkeitsamplitude. Die nächste Spalte enthält die zugehörige gemessene EMK des K. Würde das K. konstant auf die Geschwindigkeitsamplitude reagieren, so müßte der Ausdruck EMK, dividiert durch die Quadratwurzel aus den Skalenteilen, für alle Frequenzen konstant sein; das ist aber, wie Spalte 4 zeigt⁵⁾, nicht der Fall, vielmehr ist der Ausdruck EMK durch \sqrt{Skt} mal der Frequenz n unabhängig von der Schwingungszahl, wenn man von den ersten beiden tiefen Frequenzen beim Nernststift absieht, die eine systematische Abweichung zu zeigen scheinen. Tafel 2 beweist also wiederum, daß das K. direkt die Elongation der Luftteilchen anzeigt.

Das gefundene Resultat kann man auch qualitativ bestätigen, wenn man die beschriebene Kathodophonanordnung das eine Mal an einen frequenzunabhängigen Verstärker legt, das zweite Mal aber einen Verstärker benutzt, dessen Verstärkungsziffer proportional der Frequenz ansteigt und beide Male mit einem guten Fernhörer, etwa dem Reißchen Telephon, Sprache abhört. Im ersten Falle zeigt sich, daß die Sprache eine wesentlich tiefere Klangfarbe bekommt⁶⁾. Erst das K. mit Entzerrungsverstärker ist als verzerrungsfreies Mikrophon zu betrachten, weil dann die Spannung am Ende des Verstärkers der Geschwindigkeitsamplitude des auftreffenden Schalles entspricht.

Die genannten Ergebnisse zeigen experimentell in großen Zügen das Verhalten des K. Das K. ist ein Bewegungsempfänger, bei dem die erzeugte

⁵⁾ Die Werte in Spalte 4 und 5 sind mit einer passenden Konstanten (C bzw. \bar{C}) multipliziert.

⁶⁾ Eine ähnliche Beobachtung ist auch von J. Engl (l. c. S. 13) gemacht worden.

EMK proportional der Elongation der Luftteilchen ist; Schall- und Ionenrichtung müssen dabei übereinstimmen. Es bleibt übrig, im einzelnen noch die Abhängigkeit der gefundenen Effekte vom Elektrodenabstand, von der Anodenspannung, vom Heizstrom und anderen Variablen festzustellen; insbesondere ist noch der Fall sehr kleinen Elektrodenabstandes und hoher Anodenspannung, ein Fall, bei dem bereits Stoßionisation auftreten soll, zu untersuchen. Nach den bisherigen Resultaten liegt es zur Erklärung des Mechanismus im K. nahe, anzunehmen, daß sich in dem Raum zwischen Kathode und Anode eine Raumladung von negativen Ionen ausbildet, die die Schwingungen der Luftteilchen beim Schallvorgang mitmacht und die durch ihre Bewegung den Anodenstrom im Kathodophonkreis steuert. Es entspricht dies etwa bei einer Verstärkerröhre mit ebenen Platten als Elektroden dem Fall, daß das Steuergitter negativ aufgeladen und mechanisch in der Ebene des Elektronenstromes in Schwingungen versetzt wird. Hat das Gitter für alle Frequenzen gleiche Geschwindigkeitsamplitude, so sind die Stromschwankungen proportional der jeweiligen Elongation des Gitters und nehmen infolgedessen umgekehrt proportional mit der Schwingungszahl ab. Wie weit diese Anschauung richtig ist, soll durch weitere Versuche klargestellt werden.

Zusammenfassung.

Messungen an einer dem technischen Kathodophon sehr ähnlichen Anordnung zeigen, daß das K. zu den Bewegungsempfängern gehört; es spricht am stärksten im Geschwindigkeitsbauch einer stehenden Schallwelle an, und zwar nur dann, wenn Ionen- und Schallrichtung übereinstimmen. Die erzeugte EMK ist proportional der Elongation der Luftteilchen. Am Schlusse der Arbeit wird auf eine mögliche Erklärungsweise für dieses Verhalten des K. hingewiesen.

(Eingegangen am 18. Juli 1928.)