Indirekte Muskelreizung durch Kondensatorentladungen.

Von

William Sutherland,
Melbourne (Australia).

Unter diesem Titel hat L. Hermann¹⁾ an der Hand sehr ausgedehnter Versuche gezeigt, dass die Hoorweg'sche Formel, die die Beziehungen zwischen Potential p und Kapazität c bei Minimalerregungen von Nervmuskelpreparaten durch Kondensatorentladungen angibt, nicht zutreffend ist. Auf anderem Wege hat dies G. Weiss²⁾ bereits gefunden. Er hat nachgewiesen, dass die Beziehungen zwischen der Elektrizitätsmenge q , die nötig ist für eine Minimalerregung, und der Zeit t gegeben ist durch die Formel:

$$q = a + bt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1).$$

Hierin sind a und b Konstanten (Parameter), die für jedes Präparat charakteristisch sind.

Wenn man die Entladungszeit t eines Kondensators proportional c setzt, so kann (Weiss) statt bt gesetzt werden βc , und wenn $q = cp$, so lautet die Formel nunmehr:

$$cp = a + \beta c$$

oder

$$p = \beta + a/c \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2).$$

Das ist die Hoorweg'sche Formel.

Die Annahme, dass $bt = \beta c$ sei, ergibt aber nur eine rohe Annäherung, wie sich folgendermassen zeigen lässt:

Der Verlauf einer Kondensatorentladung wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$p = p_0 e^{-t/wc} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3).$$

Hierin ist p das Potential zur Zeit t , p_0 das zur Zeit 0, w der Widerstand des Kreises, in dem die Entladung stattfindet. Die Annahme

1) Pflüger's Arch. Bd. 111 S. 537. 1906.

2) Compt. rend. t. 132. 1901.

bt sei gleich βc besagt, dass die Kondensatorentladung als Reizung auf den Nerven in der Zeit wirkt, während der p von p_0 auf $p_0 e^{-\beta/wb}$ sinkt, ganz gleichgültig welchen Wert p_0 hat. Das ist, physikalisch betrachtet, recht unwahrscheinlich. Da aus Hermann's Versuchen folgt, dass die Hoorweg'sche Formel (obwohl sie ohne Zweifel wertvoll für die Elektrophysiologie ist) bei Variation von p und c nur in sehr geringem Bereiche stimmt, so ist es wichtig, nachzusehen, ob die Weiss'sche Formel den Versuchen gerecht wird. Cluzet¹⁾ hat diese Formel unter Anwendung von Kondensatorentladungen geprüft und findet sie experimentell bestätigt. Doch ist es erwünscht, sie auch an Hermann's Versuchen zu prüfen.

Bei Anwendung von Momentanreizen ist nach G. Weiss zur Erregung eine Elektrizitätsmenge a nötig. Wird die Elektrizität in der Zeit t zugeführt, wobei der Betrag b nicht wirkt, so ist die in der Zeit t nötige gesamte Elektrizitätsmenge:

$$q = a + bt.$$

Nun ist bei einer Kondensatorentladung zur Zeit t der Strom:

$$p/w = p_0 e^{-t/wc/w}.$$

Ist der Strom auf b gesunken, so ist der wirksame Teil der Entladung abgelaufen. Daher hat man für die Dauer τ der wirksamen Entladung:

$$wb = p_0 e^{-\tau/wc},$$

$$\tau = wc \log p_0/wb \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4).$$

Wie man sieht, kann τ nur unter der Bedingung annähernd proportional c sein, dass p_0 annähernd proportional wb ist; daher kann die Hoorweg'sche Formel von der Weiss'schen nur unter dieser Bedingung abgeleitet werden. Die Elektrizitätsmenge, die sich in der Zeit τ entlädt, ist:

$$cp_0 (1 - wb/p_0).$$

das ist nach Weiss' Gesetz gleich:

$$a + bt = a + bwc \log p_0/wb,$$

daher:

$$a/c = p_0 - wb (1 + \log p_0/wb) \quad . \quad . \quad . \quad (5).$$

Das ist die Cluzet'sche Formel. Sie gibt die Beziehung zwischen p_0 und c in der Kondensatorentladung bei Minimalreizung.

Will man Formel 5 auf Hermann's Versuche anwenden, so ist es einfacher das wb ausserhalb der Klammer als eine Konstante

1) Compt. rend. t. 137 p. 670. 1903, t. 138 p. 173. 1904.

(Parameter) und das wb in $\log p_0/wb$ als andere unabhängige Konstante zu nehmen.

So finde ich nach Hermann's Versuch I, wenn p_0 in Millivolt und c in Mikrofarad ausgedrückt ist:

$$1,20/c = p_0 - 45,6 (1 + \log p_0/46,0) \quad (6).$$

Hier ist die Übereinstimmung der beiden Werte von wb so gut, wie man nur erwarten kann, die Formel von Cluzet also sehr befriedigend bestätigt. Aus Gleichung 6 sind zum Vergleich mit den von Hermann in Versuchen gefundenen Werten für p_0 die folgenden errechnet. Die erste Reihe gibt die Kapazitäten c an.

$c \dots$	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
p_0 errech.	55,0	60,5	72,0	87,0	109,00	165,0	244,0	382,0	774,0	1402,0
p_0 beob.	56,4	62,0	69,5	82,5	107,80	163,5	242,5	381,9	765,0	1412,0

In dem Versuch I war ausser dem des Präparates kein Widerstand im Kreise. Für Versuch X, bei dem ebenfalls kein Widerstand eingeschaltet war, finde ich:

$$1,15/c = p_0 - 39,5 (1 + \log p_0/38,6).$$

Bei Vergleichung ergibt sich (unter Zugrundelegung derselben Werte für c wie in Versuch I):

$c \dots$	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
p_0 errech.	55,2	57,3	67,0	77,6	98,5	150,8	224,0	357,0	730,0	1331,0
p_0 beob.	53,5	58,3	67,6	76,9	99,8	148,1	226,2	360,7	730,2	1272,7

In Versuch XI waren 100 000 Ohm eingeschaltet. Der Widerstand des Präparates betrug 37 550 Ohm, mithin der Gesamtwiderstand 137 550 Ohm. In diesem Falle lautet die Formel:

$$1,02/c = p_0 - 272 (1 + \log p_0/270) \quad (7).$$

Die Vergleichung ergibt:

$c \dots$	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
p_0 errech.	315,0	321,4	339,0	361,0	397,0	481,0	604,0	792,0	1183,0	1810,0
p_0 beob.	329,9	329,9	333,3	367,5	400,0	467,4	563,7	736,2	1173,5	1812,6

In Versuch VIII war ein äusserer Widerstand von 100 000 Ohm eingeschaltet, so dass die Formel lautet:

$$0,95/c = p_0 - 43,4 (1 + \log p_0/14,3) \quad (8).$$

Hier findet sich eine auffallende Differenz zwischen dem Werte von wb ausserhalb der Klammer und dem im $\log$, nämlich 43,4 und 14,3. Sie verschwindet, wenn man die Formel so schreibt:

$$0,95/c = (p_0 - 48,6) - 43,4 (1 + \log p_0/43,4) \quad (9).$$

Das weist darauf hin, dass das wirkliche Potential in den Einzelbeobachtungen dieses Versuches immer 48,6 Millivolt geringer war

als das gemessene. Wenn man aber auch diese Annahme macht, so bleibt immer noch die sehr beträchtliche Differenz für wb von 272 in Versuch XI und 43,4 in Versuch VIII bestehen, obwohl die Widerstände nahezu gleich gewesen sein müssen. Vielleicht kann Prof. Hermann einen Grund für die Abweichung angeben.

Vergleichung durch Formel 8 ergibt:

c	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
p_0 errech. .	144,7	145,6	150,1	156,8	169,6	205,7	265,0	376,0	686,0	1185,0
p_0 beob. .	143,9	148,1	152,4	156,7	173,5	218,3	260,9	400,0	666,7	1179,6

Von den 15 Versuchsreihen habe ich keine weiteren genau geprüft. Sie scheinen sich teils unter Versuch XI, teils unter Versuch VIII einreihen zu lassen. Abgesehen von den Widersprüchen zwischen den Versuchen vom Typus XI und vom Typus VIII bestätigen die Versuche von Hermann das Gesetz von Weiss und die Formel von Cluzet.

Die Elektrophysiologen haben bisher bei der elektrischen Nervenreizung vorwiegend auf die Energie geachtet; das Weiss'sche Gesetz zeigt aber, dass die Elektrizitätsmenge wichtiger ist als die Energiemenge. Durch dieses Gesetz ist die Elektrophysiologie in nahe Beziehung gebracht zu Faraday's Gesetz von der Elektrolyse und zur Ionentheorie. Ionen und Elektronen spielen die Hauptrolle bei der Nervenreizung; ihre Ladung hat wirkliche Bedeutung, mehr als die hierbei auftretende Energie. Die Trennung ist wichtig für eine molekulare, elektrische Theorie der Nerventätigkeit.