

Versuch einer Bestimmung der in Ölschaltern auftretenden Drucke.

Von

L. Fleischmann.

Mit der Veröffentlichung der vorliegenden kurzen Arbeit beabsichtige ich das Interesse der Fachgenossen auf ein Gebiet hinzulenken, das mir der weiteren Untersuchung wert erscheint. Der zunächst so einfach erscheinende Ausschaltvorgang eines Ölschalters ergibt bei näherem Zusehen eine Fülle von Fragen thermochemischer, mechanischer und elektrischer Natur. Diese üben alle auf das den Techniker am meisten berührende Problem des beim Ausschalten auftretenden Druckes Einfluß aus. Wir wollen zunächst in großen Umrissen diese Vorgänge schildern, um dann unter wesentlich vereinfachenden Annahmen eine Berechnung der auftretenden Drucke vorzunehmen. In seiner allgemeinsten Form würde das Problem folgendermaßen lauten: Gegeben sei die Stromcharakteristik eines oder mehrerer Wechselstromgeneratoren in Abhängigkeit von der Zeit und von dem Widerstand des Außenkreises. Gegeben sei ferner die mechanische Schaltgeschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit, mit der sich die Kontaktflächen voneinander bewegen, und die Dimensionen des Ölkastens. Gesucht wird der im Schalter auftretende Druck im Falle eines Kurzschlusses. Unter der Stromcharakteristik ist hier der nichtstationäre Strom zu verstehen, der bei einer plötzlichen Änderung der Belastung auftritt.

Im ersten Augenblick fällt diese Stromcharakteristik mit dem nichtstationären Kurzschlußstrom zusammen, in dem Maße aber, in welchem im Schalter durch den Ausschaltvorgang die Länge des Lichtbogens wächst, nimmt der Widerstand des äußeren Kreises zu, und es tritt ein anderer nichtstationärer Stromverlauf ein. Um diesen im voraus bestimmen zu können, müßte der Zusammenhang zwischen Stromstärke, Länge des Lichtbogens und der Spannung am Bogen bekannt sein. Hier die Ayrtonsche Formel anwenden zu wollen, dürfte als eine allzu kühne Extrapolation betrachtet werden. Man wird also die Aufgabe zunächst schon einmal dahin einschränken müssen, daß einem durch eine oszillographische Aufnahme des Ausschaltvorganges der Strom und die Spannung am Lichtbogen bekannt seien und daß man hieraus die kW-Sekunden ermittelt hat. Der Lichtbogen wirkt nun thermisch auf das Öl ein, ein Teil wird erwärmt, ein Teil wird verdampft und ein weiterer Teil dissoziiert, z. B. wird Wasserstoff und Azetylen gebildet. Über die Temperatur, die hierbei herrscht, ist man auf Vermutungen angewiesen. Wir werden bei den weiter unten folgenden Rechnungen 3000 Grad zugrunde legen. Die Drucke, die beim Verdampfen und der Dissoziation auftreten, werden einesteils mit Schallgeschwindigkeit durch die Flüssigkeit bis zu den Gefäßwandungen übertragen und dort wieder zurückgeworfen, andernteils werden sie auch einem Teil der Flüssigkeit eine Bewegung erteilen. Wegen der sehr kurzen Zeit, während der diese beschleunigenden Kräfte wirken können, treten auch bei freier Oberfläche der Flüssigkeit erhebliche Drucke auf. Von allen diesen Vorgängen müssen wir nun absehen, und wir denken uns den Vorgang im Schalter wie folgt. Zunächst setzen wir das Schaltgefäß als kugelförmig voraus und vollständig mit Öl gefüllt. Dann nehmen wir an, daß uns die Energie, die im Lichtbogen auftritt, bekannt sei, und drittens setzen wir voraus, daß vom Öl ein Teil vollständig in überhitzten Dampf von überall gleicher Temperatur verwandelt wird, während der übrige Teil des Öles seine ursprüngliche Temperatur beibehält. Eine obere Grenze der Beanspruchung des Schaltgefäßes läßt sich, wenn wir von der Zusammendrückbarkeit des Öles absehen, leicht angeben. Diese läßt sich nämlich aus der Formänderungsarbeit des Kastens berechnen und die Formänderungsarbeit selbst muß gleich sein den Wattsekunden des Lichtbogens.

Wir wenden uns also zunächst der Bestimmung der Formänderungsarbeit eines kugelförmigen Gefäßes zu. Für eine Kugel mit den Begrenzungsradien a und b ist die Tangentialspannung σ_t für irgend einen zwischen den Radien a und b gelegenen Punkt mit dem Radius x

$$\sigma_t = \frac{p a^3}{b^3 - a^3} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{b^3}{x^3} \right)$$

p = Druck pro cm^2 , die Radialspannung

$$\sigma_r = \frac{p a^3}{b^3 - a^3} \left(1 - \frac{b^3}{x^3} \right),$$

die Formänderungsarbeit α pro Volumeneinheit ist, wenn m das Verhältnis der Dehnung zur Querkontraktion bezeichnet

$$\alpha = \frac{1}{E} \left[\sigma_t^2 + \frac{\sigma_r^2}{2} - \frac{1}{m} (\sigma_t^2 + 2 \sigma_t \sigma_r) \right],$$

setzt man $\frac{p a^3}{b^3 - a^3} = K$, so ist

$$\alpha = \frac{K^2}{E} 3 \left\{ \frac{m-2}{2m} + \frac{1}{4} \frac{m+1}{m} \frac{b^6}{x^6} \right\}$$

und die Gesamtformänderungsarbeit

$$A = \frac{K^2 3}{E} \int_a^b \left(\frac{m-2}{2m} + \frac{1}{4} \frac{m+1}{m} \frac{b^6}{x^6} \right) 4\pi x^2 dx$$

$$A = \frac{p^2}{E} \frac{4\pi a^3}{b^3 - a^3} \left[\frac{m-2}{2m} a^3 + \frac{m+1}{4m} b^3 \right].$$

Für $\frac{4\pi a^3}{3}$ setzen wir V_c , das Volumen des Gefäßes, ist ferner die Wandstärke $h = b - a$

klein gegenüber a , und wird m zu $\frac{10}{3}$ angenommen, so ergibt sich

$$A = \frac{p^2}{E} V_c \times 0,5 \frac{a}{h}.$$

Für andere Gefäßformen ergeben sich ähnliche Ausdrücke, so findet man z. B. für ein zylindrisches Gefäß

$$A = \frac{p^2}{E} V_c \times 0,95 \frac{a}{h}.$$

Betragen die Kilowattsekunden im Lichtbogen 500, und hat das Gefäß einen Durchmesser von 100 cm, eine Wandstärke von 3 mm, und beträgt der Elastizitätsmodul $E \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, so wäre die obere Grenze des Druckes p durch die Beziehung bestimmt

$$500 \times 10200 = \frac{p^2 \times 5,22 \times 10^5 \times 0,5 \times 50}{2 \times 10^6 \times 0,3}$$

$$p = 485 \text{ kg/cm}^2.$$

Man ersieht aus diesem Resultat, daß ohne Berücksichtigung der thermischen Vorgänge ein Aufschluß über die Größenordnung der wirklich auftretenden Drucke nicht zu erhalten ist.

Die Lichtbogenenergie Q wird unseren früheren Annahmen gemäß dazu verbraucht, G Gramm der Flüssigkeit vollständig zu verdampfen und dann das Gas auf T_1^0 zu erwärmen. Wir setzen voraus, daß die kritische Temperatur überschritten ist, und wir nennen die

Wärmemenge, welche wir der Flüssigkeit pro Gewichtseinheit bis zur Erreichung der kritischen Temperatur T_k zuführen müssen, g ; bezeichnen wir ferner die spezifische Wärme des gebildeten Gases mit c_v , so muß folgende Gleichung bestehen:

$$Q = G [g + c_v (T_1 - T_k)] + A. \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist uns G und die Formänderungsarbeit A unbekannt. Vernachlässigen wir die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeit, dann muß die Volumenvergrößerung des Gefäßes gleich dem gebildeten Gasvolumen vermindert um das Volumen der vergasteten Flüssigkeitsmenge sein. Ist das spezifische Gewicht der Flüssigkeit δ und v das spezifische Gasvolumen, so gilt die Beziehung

$$G p \left(v - \frac{1}{\delta} \right) = p^2 V_c 0,5 \frac{a}{h}. \quad (2)$$

Nach den Gasgesetzen ist ferner $p v = R_1 T_1$, woraus folgt

$$G = p^2 \frac{V_c}{E} 0,5 \frac{a}{h} \frac{1}{R_1 T_1} - \frac{p}{\delta}.$$

Dieses in die Gleichung (1) eingesetzt, ergibt

$$Q = p^2 \frac{V_c 0,5 a}{E h} \left\{ \frac{c_v (T_1 - T_k) \delta + g \delta}{R_1 T_1 \delta - p} + 1 \right\}.$$

Da die nötigen Daten für das übliche Schalteröl nicht zur Verfügung stehen, so wollen wir als Flüssigkeit Benzol C_6H_6 annehmen. Für dieses ist R_1 1,086 kgcm, $v = 0,264$, $g = 180$ cal, $\delta = 0,874$, $T_k = 300^\circ$, T_1 nehmen wir zu 3000° an. Q betrage wieder 500 kWsec. Wir wollen alle Größen auf kg und cm beziehen, dann lautet die Gleichung:

$$500 \times 10200 = \frac{p^2 \times 5,22 \times 10^5 \times 0,5 \times 50}{2 \times 10^6 \times 0,3} \left\{ \frac{[0,264 (3000 - 300) + 180] \times 0,874 \times 43 + 1}{1,086 \times 3000 \times 0,74 - p} \right\}.$$

Die Ausrechnung ergibt $p = 132$ kg/cm², einen Wert, der auch zur Zerstörung des Gefäßes führen muß. Denn $\sigma_t = \frac{p a}{2 h}$ ergibt $\frac{132 \times 50}{0,6} = 11000$ kg/cm². Dieses ist natürlich ein Wert, für den die Formeln für die Formänderungsarbeit ihre Gültigkeit verlieren.

Wir können nun rückwärts ausrechnen, welche Energiemenge der Schalter ohne Gefahr für das Gefäß aushalten kann, indem man vom zulässigen Wert von σ_t ausgeht.

Es ergibt sich $p = \frac{2 h \sigma_t}{a}$

$$Q = \sigma_t^2 \frac{V_c}{E} 2 \frac{h}{a} \left\{ \frac{[c_v (T_1 - T_k) \delta + g \delta] 43}{R_1 T_1 \delta - \frac{2 h}{a} \sigma_A} + 1 \right\}.$$

Wie bereits im Anfange erwähnt, stellen diese Resultate nur ganz grobe Annäherungswerte dar. Da man aber meines Wissens bisher die Größe der auftretenden Drucke in Schaltern rechnerisch überhaupt noch nicht festzustellen versucht hat, so ist vielleicht mit den hier angegebenen Rechnungen ein kleiner Schritt vorwärts getan.