

NEUER DURCHSCHLAGMECHANISMUS DER DIELEKT- RISCHEN FLÜSSIGKEITEN UNTER DEM ELECTRISCHEN HOCHFREQUENZFELD

MINORU UEDA

Department of Electrical Engineering

(Eingegangen am 31. Mai 1957)

Einleitung

Im früheren Bericht¹⁾ behauptete ich, daß man den elektrischen Durchschlagmechanismus, der durch dielektrischen Verlust als der Wärmedurchschlag einfach angesehen war^{2) 4)}, noch nicht genügend deutlich gemacht hat.

Die erste besondere Eigenschaft ist der außergewöhnliche Aufstieg von einer Durchschlagspannung der dipolaren Flüssigkeiten, die die anderen dipolaren Moleküle ein wenig absorbiert haben. Diese Eigenschaft ist von mir im vorhergehenden Bericht und in dem anderen Bericht⁵⁾ in diesem Heft ziemlich klar erläutert. Es ist die zweite Eigenschaft, die man besonders in viskosen Flüssigkeiten beobachten kann. Was dort ersichtlich ist: die Durchschlagspannung ist von der Frequenz wenig abhängig, zum Unterschied, vom gewöhnlichen Wärmedurchschlag, wo das nämlich nicht der Fall ist. Ich will hier die zweite Eigenschaft vom Methylpolysiloxan weiter auseinandersetzen.

Ich bin der Auffassung, daß eine Art des sogenannten Hochfrequenzdurchschlagmechanismus im Gas auch im flüssigen Dielektrikum wohl möglich wäre. Das heißt, die Ladungsträgern (Ionen oder Elektronen), die die kleinen Beweglichkeiten haben, vom Hochfrequenzwechselfeld in einem kleinen Raum umfasst werden. Zwar ist diese meine Aufnahme mir erst eine Hypothese. Weil ich aber an ihre mögliche Begründung glaube, setze ich die experimentellen und theoretischen Prüfungen fort. Deshalb wäre es mir äußerst wünschenswert, wenn über diesen meinen Bericht mir kritischen Äußerungen schriftlich zugesandt würden.

Einrichtungen und Materialien

Ich habe dieselben Einrichtungen gebraucht, die ich schon im vorhergehenden Bericht erläuterte, d.h. Hochfrequenzerzeuger, Kathodenstrahlenszillograph für Spannungsmessungen, Pendelvoltmeter und Spitz-Ebene- oder Kugel-Ebene-elektroden. Die höchste H. F. Spannung am Frequenzgebiet von 1 bis 10 MHz., ist ungefähr 10 KV. Zu den Messungen unter großer Schlagweite und zwar mit einer Kugelfunkenstrecke ist ein anderer Hochfrequenzerzeuger gebraucht worden. Er kann gegen 20 KV erzeugen.

Als Prüfstoff wurden Phenyl-äthanolamin, Dichlorbenzol und verschiedene Grade aus der Reihe des Methylpolysiloxans verwertet. Der größere Teil der Messungen am Frequenzgebiet, in welchem neuer Mechanismus herrschen könnte, ist hauptsächlich mit Methylpolysiloxan ausgeführt worden wegen der geringen Abhängig-

keit des dielektrischen Konstanten und des dielektrischen Verlustes an Frequenz und Temperatur. Die Messungen mit einer polymerisierten Substanz wie Methyl-polysiloxan haben den einen großen Vorteil, daß man sehr verschiedene Viskositäten (von 10 bis über 50,000 c-stokes.) in elektrischen Konstanten ohne großen Unterschied erwählen kann. Aber diese Hochmolekülen haben dagegen wieder den einen Nachteil, daß die Reinigung des einmal gebrauchten Stoffs sehr schwer ist.

Messergebnisse

A. Frequenzabhängigkeit des H. F. Durchschlags des Methylpolysiloxans

Abb. 1 zeigt in logarithmischen Koordinaten die Frequenzabhängigkeit der H. F. Durchschlagsspannung des Methyl-polysiloxans, das die verschiedenen Viskositäten von 20 bis zum 30,000 c-st. hat. In dieser Abbildung können die folgenden bemerkenswerten Tatsachen ersehen werden.

(i) Die Kurve des Mediums von 20 c-st. ist nahe an eine gerade Linie, die die abnehmende Neigung von 1/2 hat, im ganzen Gebiete von 1 bis 10 MHz.

(ii) Das Medium von 100 c-st. und 800 c-st. zeigt einen Krümmungspunkt, vor dem die Kurve des Mediums zur Kurve von 20 c-st. zuerst parallel läuft aber nachher sie viel weniger Neigung zu dieser Kurve zeigt, also abbiegt.

(iii) Das Medium von 3,000 und 30,000 c-st. hat im ganzen gemessenen Gebiete viel weniger Frequenzabhängigkeit.

(iv) Auf der linken Seite der Abbildung zeigt sich, daß je größer die Viskosität ist, desto niedriger die Durchschlagsspannung. Auf der rechten Seite aber steht das umgekehrte Verhältnis.

Man weiß, daß die gewöhnliche Flüssigkeit in diesem Frequenzbereich den sogenannten "Wärmedurchschlag" zeigt, und die Kurve der Durchschlagsspannung steht zur Quadrawurzel der Frequenz im umgekehrten Verhältnisse. Zum Vergleich stellen sich die Eigenschaften der gewöhnlichen Flüssigkeiten in Abb. 2 dar. Es ist bemerkenswert, daß die Kurve des Phenyl-äthanolamins in Abb. 2 ihre Neigung im höheren Frequenzbereich über 5 MHz. verändert und mit der mindesten Frequenzabhängigkeit verläuft. Phenyl-äthanolamin ist das visköseste Medium.

Daher kann man sich denken, daß ein sehr viskoser Stoff im höheren Frequenzbereich einen anderen Durch-

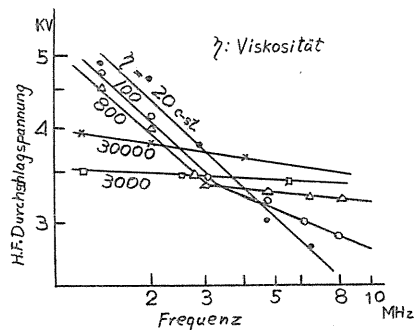


Abb. 1. H. F. Durchschlagsspannung des Poly-methylsiloxans.

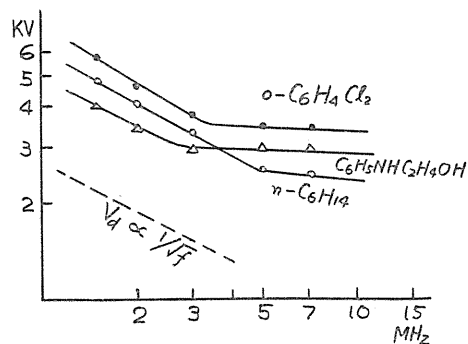


Abb. 2. H. F. Durchschlagsspannung der gewöhnlichen Flüssigkeiten.

schlagmechanismus, nicht als den bisherig bekannten, zeige. Dann ist der Krümmungspunkt an der Kurve in Abb. 2 als die *Grenzfrequenz* zwischen den beiden Gebieten aufzufassen, die ein gut bekanntes "Wärmedurchschlagsgebiet" und ein "Neugebiet" bilden.

Es ist schon klar von Abb. 3 aus, daß sich diese beim viskosen Stoff befindliche Eigenschaft der Durchschlagspannung nicht allein bei den Spitz-Ebene-elektroden, sondern auch bei den Kugel-Ebene-elektroden findet. Abb. 3 zeigt die Eigenschaft des Methyl-polysiloxans mit den Kugel-Ebene-elektroden. Die Form der Kurven in Abb. 3 ist nichts anderes als die Form in Abb. 1. Man ersieht aus Abb. 3, daß die Durchbruchfeldstärke des Methyl-polysiloxans 170 bis 250 KV/cm ist.

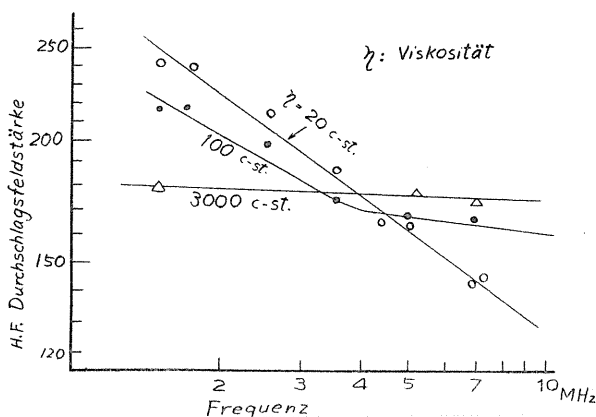


Abb. 3. H. F. Durchschlagfeldstärke des Poly-methylsiloxans.

B. Temperaturabhängigkeit der Frequenzeigenschaft der H. F. Durchschlagspannungen

Abb. 4 stellt zwei Kurven des Mediums von 800 c-st. dar, die bei 20° C und 140° C bzw. gemessen worden sind. Man kann in Abb. 4 einsehen, daß im Niederfrequenzgebiet die Durchschlagspannung bei 140° C höher als die bei 20° C ist, und daß sie im Hochfrequenzgebiet (höher als 4 MHz.) mit einander übereinkommt.

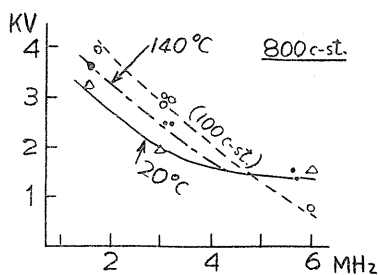


Abb. 4. Temperaturabhängigkeit des Mediums 800 c-st.

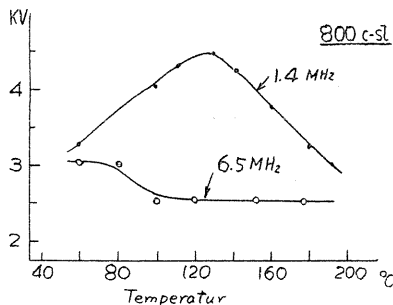


Abb. 5. Temperaturabhängigkeit des Mediums 800 c-st.

Abb. 5 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Mediums von 800 c-st. mit 1.4 und 6.5 MHz. Die Kurve von 1.4 MHz. läuft mit zunehmender Temperatur aufwärts, aber die Kurve von 6.5 MHz. im Gegenteil abwärts. Im allgemeinen steigert sich die Durchschlagsspannung des flüssigen Dielektrikums, welches zu dem Wärmemechanismus gehört, mit zunehmender Temperatur ab. Aber schon das Methylpolysiloxan, trotz seines Wärmemechanismus, nimmt an Durchbruchfeldstärke unter der mäßigen Bedingung bei zunehmender Temperatur zu.

C. Einfluss der Elektrodenmaterialien auf die H. F. Durchschlagspannung

Drei Arten der Elektrodenmaterialien, d.h. 18-8 Stahl, Messing und Silber, sind gebraucht worden. Obwohl mir die Reihe nach der Größe der H. F. Durchschlagsspannungen zwar $Ag > Cu > Fe$ (d.h. die Reihe der Wärmeleitfähigkeit) zu sein scheint, ist die Differenz so gering, daß man sie von anderem Einfluß nicht unterscheiden kann.

Ich möchte lieber behaupten, daß die Elektrodenmaterialien kaum darauf einwirken.

Diskussionen

1. Existenz des "Neugebietes"

Mit der Frequenzabhängigkeit des Methylpolysiloxans und dem im vorhergehenden Bericht geschriebenen Ergebnis kann man die Frequenzabhängigkeitskurve nach dem Mechanismus in drei Teile zerlegen: (A), (B) und (C) in Abb. 6. Über das Gebiet (A) möchte ich in dieser Arbeit nicht näher eingehen. Das Gebiet (B) scheint uns nichts anderes als reines "Wärmegebiet" wegen der Neigung der Kurve. Die Tatsache, daß je kleiner die Viskosität, desto höher auch die Durchschlagspannung, beweist auch, daß unter kleinerer Viskosität die Abkühlung des Mediums größer ist und daher in der Mitte die Temperatur umso mehr zurückgehalten wird, um die "Durchschlagtemperatur" nicht zu erreichen.

Im höheren Frequenzgebiet über f_g in Abb. 6 läuft die Spannungskurve doch höher hinauf als die Extrapolation der Kurve in (B). Das heißt, das Medium kann sich durch die Feldstärke nicht durchschlagen, die wesentlich zum Durchschlag stark genug ist. Daher kann man glauben, daß derselbe Mechanismus in (C) wie in (B) nicht entstehen kann. Die Tatsache, daß der Einfluß der Viskosität auf die Durchschlagspannung in (C) zur durch einen Änderung des Abkühlungseffektes zu erwartenden Tendenz umgekehrt ist, ist noch ein Grund, daß man wohl einen neuen Mechanismus für das Gebiet annehmen muß. Was ist das nun für ein Grundmechanismus, der das Medium gegen Wärmedurchschlag schützen kann? Dafür möchte ich annehmen, daß die Wechselbewegung der Ionen im Wechselfeld ein wesentlicher Grundmechanismus ist.

Unter dem sinuswelligen elektrischen Feld laufen die Ionen mit der Geschwindigkeit, $v = \sqrt{2} E b \cos \omega t$, wo E eine Feldstärke ist und b die Ionenbeweglichkeit. Daher lautet die Maximallaufweite der Ionen wie folgt:

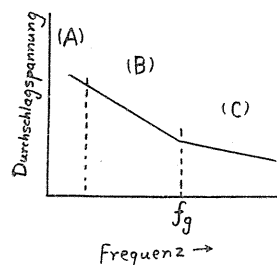


Abb. 6. Allgemeine Eigenschaft der Flüssigkeiten.

$$x_m = 2\sqrt{2} Eb/\omega$$

Man könnte sich denken, der Durchbruchsantrieb des neuen Mechanismus entstehe, wenn die Maximallaufweite der Ionen zu der eigentlichen Länge x_0 gleich kommt. Es ist schwer vorauszusehen, was die eigentliche Länge x_0 ist, und deshalb will ich die Länge x_0 aus E , f_g und b berechnen. Wenn man annimmt, $E = 2.0 \times 10^5$ v/cm, $b = 2 \times 10^{-4}$ cm²/sek. v.,⁶⁾ und $f_g = 5 \times 10^6$ /sek., so wird x_0 ungefähr 250 Å festgesetzt. Wie ist es im Vergleich zur Größe des Moleküls? In der Tat ist eine solche Größe von x_0 über zehnmal größer als gewöhnlicher Moleküldurchmesser, aber die Größe des hier gebrauchten polymerisierten Moleküls ist nicht so klar bestimmt. Man kann sie in etwa durch die Viskosität des Mediums annähernd vermuten, und mit Methyl-polysiloxan von 100 c-st. scheint mir die Größe des Moleküls längs seiner längeren Achse einige hundert Ångström zu sein.

Dann entscheidet sich die *Grenzfrequenz* dadurch, daß die Ionenbewegungsweite dem Moleküldurchmesser gleich wird. Nach der Gleichung kann man leicht verstehen, daß die visköseer Flüssigkeit die niedrigere *Grenzfrequenz* hat, denn je mehr die Viskosität, desto kleiner die Ionengeschwindigkeit. Die Durchschlagsbedingung wird auch entstehen, nachdem die Ionen zwischen den Molekülen eingeschloßen werden. Folglich könnte man verstehen, je mehr die Viskosität, desto höher die Durchschlagspannung in dem "Neugebiet". Denn die Feldstärke, die die Ionen um ein bestimmtes Raum umfasst, muß umso größer sein, wenn die Beweglichkeit kleiner ist.

2. Ionenquelle und Durchschlagsantrieb

Es sind noch zwei Fragen da. Die eine ist, was die Ionenquelle ist, und die andere, was der Antrieb zum Durchschlag unter der Ionenumfassung ist. Ich meine mit der Quelle die elektrolytische Dissoziation durch den starken Feld nach Wien-Onsager,⁷⁾ und mit dem Antrieb die eigentlichen Ionendichte, welche zur Veränderung der elektrischen Feldverteilung ausreicht ist. Denn ein andersartiger Mechanismus läßt sich nicht verstehen, als daß die Durchschlagspannung von Elektrodenmaterial und auch von Frequenz unabhängig ist. Über diese Behauptung will ich wieder schreiben, nachdem ich noch mehr eingehenden Versuch gemacht habe.

3. Temperaturabhängigkeit der Durchschlagspannung

Durchschlagspannung im niedrigen Frequenzgebiet, in dem der Wärmedurchschlag wohl möglich ist, nimmt aber doch mit aufsteigender Temperatur zu. Es mag etwas wunderlich sein. Denn aber die große Viskosität der Flüssigkeit mit aufsteigender Temperatur fällt sehr schnell ab⁸⁾, wie in Abb. 7 gezeigt, dann ist die Wirkung der Abkühlung größer als die der Näherung nach "Durchschlagtemperatur".

Natürlich in einer höheren Temperatur, d.h. in einer unmittelbaren Nähe von der "Durchschlagtemperatur", fällt die Durchschlagspannung mit Temperatur ab.

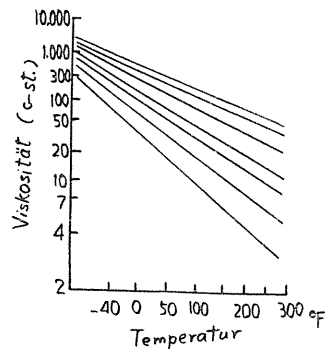


Abb. 7. Temperatureigenschaft der Viskosität des Polymethylsiloxans.

Im höheren Frequenzgebiet verändert sich die Abhängigkeit, d.h. in niedriger Temperatur nimmt die Spannung mit dem Temperaturaufsteigen ab, und nachher fängt sie an, wenige Temperaturabhängigkeit zu haben. Das erste Abnehmen kann dadurch verstanden werden, daß das Viskositätsabnehmen die Ionenbewegweite erweitert und die zur Ionenumfassung notwendige Feldstärke von kleinerer Größe genügt. Solche Überlegung kann durch Abb. 1 nahegelegt werden, nämlich daß eine kleine Viskosität eine kleine Spannung im "Neugebiet" hat. Die nächste Wiederaufnehmung der Spannung in etwas höherer Temperatur scheint mir ein Umzug zum "Wärmegebiet" zu sein.

Referenzen

- 1) M. Ueda: Memoirs of the Faculty of Eng., Nagoya Univ., Vol. 8, No. 1, May, p. 65 (1956).
- 2) T. Masaki: Researches of the Electrotechnical Labor., No. 481 (1948) (in Japanese).
- 3) S. Hirano und J. Nemoto: Abhandlungen der Tagung des Tokyo-Zweigs, I.E.E. of Japan, No. 1-17 (1947).
- 4) W. Schlegelmilch: Phys. Z. S., 34, 497 (1933).
- 5) M. Ueda: Memoirs of the Faculty of Eng., Nagoya Univ., Vol. 9, No. 1, May, p. 174 (1957).
- 6) M. Adamczewski: Ann. d. Phys. Paris, 8, 309 (1935).
- 7) L. Onsager: J. Chem. Phys., 5, 599 (1934), H. Plumley: Phys. Rev. 58, 61 (1940).
- 8) Hurd: J. Am. Chem. Soc., 68, 364 (1946); Wilcock: *ibid.* 691.