

Über die dielektrischen Eigenschaften eines organisch-anorganischen Mischkörpers*

von

E. HERRMANN

PROBLEMSTELLUNG

Dem Chemiker wird oft die Aufgabe gestellt Stoffe, beziehungsweise Stoffsysteme, mit bestimmten physikalischen Eigenschaften herzustellen. Diese Aufgabe, welche allgemein gesehen recht komplexer Natur ist, kann unter Umständen auf beträchtliche Schwierigkeiten stossen. Am Beginn einer solchen Arbeit wird man meistens versuchen, die geforderten Stoffeigenschaften in einer bestimmten Verbindung zu finden. Weichen die geforderten von den bestehenden Eigenschaften noch wesentlich voneinander ab, so bieten sich als Möglichkeiten der Angleichung recht viele Wege. Handelt es sich beispielsweise um einen festen Stoff, welcher durch Reaktion eines oder mehrerer fester Stoffe entstanden ist, so werden auf dem Wege zum Reaktionsendprodukt eine Reihe experimentell oftmals gut erfassbarer »Zwischenzustände«¹⁾ durchschritten, die sich in den physikalischen Eigenschaften wesentlich von denen der Ausgangsstoffe und denjenigen des endgültigen Reaktionsendproduktes unterscheiden können. Einen sehr breiten Rahmen solcher Variierungsmöglichkeiten bietet allgemein die Kolloidchemie, wenn man diese unter dem Gesichtspunkt betrachtet, dass alles zu ihr gehört was eine Zustandsaffinität besitzt.²⁾

Oftmals können jedoch auch diese Möglichkeiten nicht zum Ziele führen. In einem solchen Falle ist man gezwungen die geforderten Eigenschaften durch Mischung zweier oder mehrerer Stoffe zu erreichen. An diesem Punkt angelangt führt die gegebene Aufgabe in die Theorie der Mischkörper.

In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, wie man den Verlauf der Permeabilität von $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ in Abhängigkeit von der Frequenz durch Änderung der Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflussen kann.³⁾ In einer

* Die vorliegende Arbeit wurde im Jahre 1944 am Institut für anorganische und analytische Chemie der ehemaligen Deutschen technischen Hochschule in Prag durchgeführt. Die Ausführung der Messungen erfolgte am Institut für theoretische Elektrotechnik (Direktor: Prof. Dr. E. Flegler). Infolge anderweitiger Beanspruchung des Verfassers wurden die Ergebnisse erst jetzt ausgewertet.

Derzeitige Anschrift des Verfassers: Tvornica elektroda — Šibenik, Kroatien.

¹⁾ vgl. die zusammenfassende Darstellung von G. F. Hüttig, Handbuch der Katalyse VI. Bd. Wien 1943.

²⁾ W. Biltz, zitiert von G. F. Hüttig in dem Nachruf »Wilhelm Biltz als Kolloidchemiker«, Kolloid-Z., **106** (1944) 161.

³⁾ E. Herrmann, Arch. kem., **22** (1950) 85.

weiteren Arbeit konnte darauf hingewiesen werden, dass die Permeabilität dieser gleichen Verbindung durch die Vorgeschichte bei der Entstehung variiert werden kann.⁴⁾ Diese Möglichkeiten versagen jedoch bei dem Versuch der Variierung der dielektrischen Eigenschaften. Die Hochfrequenztechnik verlangt manchmal Stoffe, bei denen magnetische und dielektrische Eigenschaften in einer gewissen Analogie zueinander stehen sollen. Bei $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ist die Dielektrizitätskonstante (DK) als praktisch unabhängig von der Frequenz anzusehen. Desgleichen sind die dielektrischen Verluste meist sehr gering. Diese Frequenzunabhängigkeit ist verständlich, wenn man bedenkt, dass man es bei dieser Verbindung nur mit Verschiebungspolarisation zu tun hat und die Elektronen sich im gleichen Tempo, wie der Wechsel des elektromagnetischen Feldes, gegen die Atomkerne verschoben können.

Um eine gewisse Frequenzabhängigkeit der DK und dielektrische Verluste zu erreichen, wurde ein Mischkörper aus $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ und Buna⁵⁾ hergestellt. Dabei zeigte es sich, dass bei diesem organisch-anorganischen Mischkörper die logarithmische Mischungsregel von Lichtenecker⁶⁾ zur Berechnung der DK mit Vorteil angewandt werden kann.

EXPERIMENTELLER TEIL UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Über die Herstellung des $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ wurde bereits in einer früheren Arbeit berichtet³⁾. Das erhaltene Präparat, welches in Pulverform anfällt, wurde in einer Matritze mit einem Pressdruck von 7 to/cm² zu einem Ring gepresst und stets die Raumerfüllung ermittelt. Die Messung der DK erfolgte in der gleichen Messanordnung, deren Prinzip bereits früher angegeben wurde.³⁾ Zur Bildung der Mischkörper wurde aus Buna eine 10^{0/0}-ige benzolische Lösung hergestellt und dieser Lösung das $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ unter gleichzeitigem Mischen und Pressen zugesetzt. Nach dieser Operation erfolgte noch eine starke Druckbehandlung. Bei jedem Mischkörper wurde ferner die Raumerfüllung bestimmt.

In der Tabelle 1 ist die Abhängigkeit der DK und des dielektrischen Verlustfaktors ($= \text{tg } \delta_e$) eines aus $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ bestehenden Ringes eingetragen. Aus diesen Resultaten ist ersichtlich, dass die DK in diesem Messbereich von der Wellenlänge unabhängig ist. Eine geringe Abhängigkeit kann erreicht werden, wenn nach dem Oxydationsvorgang von $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O} \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ das noch heiße Oxydationsprodukt in flüssige Luft zur raschen Abkühlung eingeworfen wird. Diese Werte sind in Tabelle 2 angeführt.

In Tabelle 1 besitzt die DK einen kleineren Wert als in Tabelle 2. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass in jedem Präparat noch in wechselnder Menge vorhandene Verunreinigungen von Fe_3O_4 enthalten sind, welche die DK erhöhen. Bei den sehr zahlreich auf gleiche Weise hergestellten Präparaten schwankte die DK stets etwas. Auf die Abhängigkeit der DK von der Wellenlänge hat jedoch dieser Umstand keinen

⁴⁾ E. Herrmann, Arch. kem., 23 (1951) 22.

⁵⁾ Buna ist der Handelsname für ein Polymerisationsprodukt des Butadiens, welches vor dem 2. Weltkriege vom I. G.-Konzern hergestellt wurde.

⁶⁾ K. Lichtenecker, Physikal. Z., 27 (1926) 115.

Tabelle 1

I. λ (cm)	II. ϵ	III. $\text{Ag } \delta \epsilon$
173,8	5,23	0,101
80,0	5,38	0,050
77,4	5,40	0,030
39,4	5,40	0,031
25,1	5,10	0,030
22,4	5,15	0,050
9,5	5,28	0,050

Tabelle 2

I. λ (cm)	II. ϵ	III. $\text{Ag } \delta \epsilon$
174,3	6,61	0,209
72,6	6,22	0,150
27,3	5,30	0,060
12,0	5,15	

nennenswerten Einfluss. In der Tabelle 3 ist die DK des Mischkörpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge eingetragen. In der Kolonne III dieser Tabelle sind zum Vergleich die Werte nach Gleichung (4) (vgl. dazu den nächsten Abschnitt) gerechnet. Wie später gezeigt werden soll, ver-

TABELLE 3

I. λ (cm)	II. ϵ gemessen	III. ϵ berechnet
231,1	8,60	—
173,8	8,50	8,45
77,4	7,50	8,03
39,7	6,90	7,09
25,1	6,45	6,42
9,3	6,00	5,68

hält sich die DK, als auch der dielektrische Verlustfaktor, wie die eines echten Mischkörpers. Beide Grössen sind bei Kenntnis der Materialkonstanten der Ausgangsmaterialien berechenbar. Wird jedoch der Mischkörper einer Wärmebehandlung unterzogen, so sind die Stoffeigenschaften nicht mehr durch ein Mischungsgesetz darstellbar. Um den dielektrischen Verlustfaktor bedeutend zu erhöhen, genügt eine einhalbstündige Wärmebehandlung auf 140°. Nach dieser Zeit tritt jedoch in der DK noch keine Veränderung ein. Um eine Veränderung der DK zu erwirken ist eine 2-stündige Wärmebehandlung auf 200° notwendig. In der Abbildung 1 ist auf der Abszisse die Wellenlänge bei der Messung, auf der Ordinate der dielektrische Verlustfaktor, eingetragen. Die dargestellten Messwerte

beziehen sich auf ein Präparat, welches eine halbe Stunde auf 140° erwärmt wurde. Aus diesem experimentellen Verhalten lässt sich folgender Schluss ziehen: Bei einer Wärmebehandlung auf 140° tritt lediglich eine Art Homogenisierung beider Materialien ein. Bei weiterer Temperaturerhöhung finden jedoch bereits chemische Wechselwirkungen statt, was in der Veränderung der DK zum Ausdruck kommt.

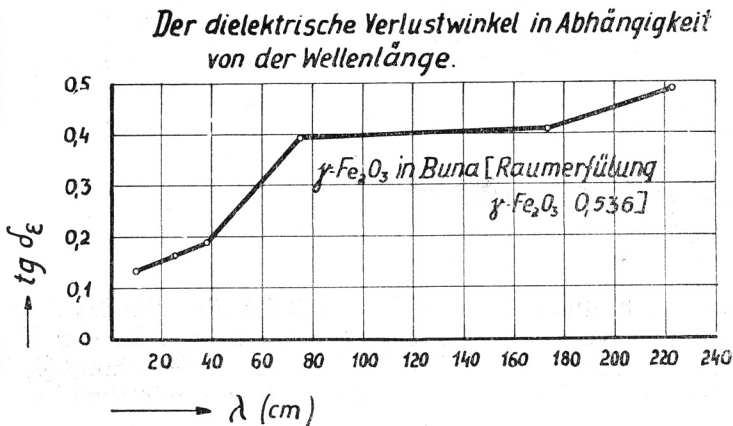


Abbildung 1. Der dielektrische Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Wellenlänge

AUSWERTUNG

Nach Lichtenecker⁷⁾ besteht für künstlich aufgebaute Mischkörper eine weitgehende Analogie zwischen Leitfähigkeit und der DK. Für binäre Mischkörper kann daher unter gewissen Voraussetzungen die logarithmische Mischungsregel zur Berechnung der DK angewendet werden. Die allgemeinste Form eines Mischungsgesetzes zur Berechnung der DK hat Büchner⁸⁾ durch folgende Gleichung

$$\varepsilon^k = v_1 \varepsilon_1^k + v_2 \varepsilon_2^k \quad (1)$$

zum Ausdruck gebracht. Dabei bedeuten ε_1 und ε_2 die DK der den Mischkörper aufbauenden Komponenten und v_1 und v_2 deren Raumanteile. k stellt eine Konstante vor, welche von der Gestalt und der Verteilung der Komponenten abhängt und deren numerischer Wert sich zwischen den Grenzen -1 und $+1$ bewegt. Ein solcher Formfaktor erschwert natürlich wesentlich die praktische Anwendung einer solchen Gleichung. Büchner konnte zeigen, dass für Materialien, welche aus einem Grundstoff bestehen, in welchem Fremtteilchen so eingelagert sind, dass die Mischung als isotrop bezeichnet werden kann und die DK des zugemisch-

⁷⁾ Lichtenecker, Physikal. Z., **21** (1920) 352; **25**, (1924) 297, 550; **27** (1926) 833; **30** (1929) 805; Z. Elektrochem., **40** (1934) 11.

⁸⁾ A. Büchner, Wissenschaftl. Veröffentl. aus dem Siemens-Konzern, 1939 II 84.

ten Körper grosser als jene der Grundsubstanz ist, bei kugelförmigen Teilchen der Formfaktor $k = 0$ wird.

Für einen solchen Fall gilt das Lichtnecker'sche Gesetz

$$\varepsilon = \varepsilon_1^{v_1} \cdot \varepsilon_2^{v_2} \text{ bzw. } \log \varepsilon = v_1 \log \varepsilon_1 + v_2 \log \varepsilon_2 \quad (2)$$

Mit dieser Gleichung lässt sich gleichfalls die DK des Presslings aus reinem $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (man hat es hier streng genommen mit einem Mischkörper Luft + Substanz zu tun) bei vollkommener Raumerfüllung, also der eigentliche Materialwert, berechnen.

Bei einem $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Pressling wurde $\varepsilon = 5,23$ gemessen. (vgl. Tabelle 1)

$$\log 5,23 = 0,436 \log 1 + 0,5634 \log \varepsilon_2$$

$$\underline{\varepsilon_2 = 18,85.}$$

Bei einem anderen Präparat war $\varepsilon = 6,9$. Bei dem Mischkörper

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ + Buna wurde $\varepsilon = 8,85$ gemessen.

$$\log 6,9 = 0,5634 \log \varepsilon_2 \quad \underline{\varepsilon_2 = 30,83.} \text{ (die Materialkonstante)}$$

Aus dem Messwert des Mischkörpers berechnet sich ε_2 zu

$$\log 8,85 = 0,464 \log 2,06 + 0,536 \log \varepsilon_2$$

$$\underline{\varepsilon_2 = 31,27}$$

Die DK des Mischkörpers berechnet sich daher zu

$$\log \varepsilon = 0,464 \log 2,06 + 0,536 \log 30,83$$

$$\underline{\varepsilon = 8,78}$$

während der Messwert $\varepsilon = 8,85$ ergab. Die Übereinstimmung ist daher zufriedenstellend und das Lichtnecker'sche Gesetz lässt sich somit auch für diesen organisch-anorganischen Mischkörper anwenden.

Bei dem Auftreten von dielektrischen Verlusten ist zu berücksichtigen, dass diese ebenfalls die DK des Mischkörpers beeinflussen und daher in die Rechnung eingehen müssen. Für $k = 0$ fand Büchner die Beziehung

$$\log \varepsilon = \sum_i^n v_i (\log \varepsilon_i - \log \cos \delta_i) + \log \cos \sum_i^n v_i \delta_i \quad (3)$$

Gleichung (3) soll an dem gleichen Mischkörper, welcher vorangehend behandelt wurde, geprüft werden.

Bei dem $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Pressling wurde $\text{tg } \delta^\circ = 0,25$ gemessen. Bei 100%₀ Raumerfüllung erhält man 0,443; [über die Berechnung vgl. Gleichung (6)] $\delta = 24^\circ$

daher erhält man für ε_2

$$\log 6,9 = 0,5634 (\log \varepsilon_2 - \log \cos 24^\circ) + \log \cos 0,5634 \cdot 24^\circ$$

$$\underline{\varepsilon_2 = 29,59.}$$

Nach der Rechnung gemäss Gleichung (2) erhält man für $\varepsilon_2 = 30,83$.

Zur Kontrolle berechnen wir ε_2 aus dem Mischkörper $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{Buna}$
 $\log 8,85 = 0,464 \log 2,06 + 0,536 (\log \varepsilon_2 - \log \cos 24^\circ) + \log \cos 0,536 \cdot 24^\circ$

$$\varepsilon_2 = \underline{29,94}$$

gegenüber der vereinfachten Rechnung $\varepsilon_2 = 31,27$.

Benützen wir den Wert $\varepsilon_2 = 29,59$ zur Berechnung der DK des Mischkörpers, so erhält man $\varepsilon = 8,79$ (experimentell gefunden $\varepsilon = 8,85$) während die Berechnung nach Gleichung (2) $\varepsilon = 8,78$ ergab. Wie man sehen kann, beeinflussen kleine Verlustfaktoren die DK nur in geringem Masse, sodass für praktische Zwecke eine Berechnung nach Gleichung (2) genügt.

Die Herstellung von Werkstoffen mit bestimmten dielektrischen Verlusten⁹⁾ ist an die Frage über ihre Entstehung gebunden.

Über die Entstehung von dielektrischen Verlusten durch Nachwirkungserscheinungen existieren heute in der Hauptsache zwei Theorien, welche von ganz verschiedenen Überlegungen ausgehen. Die eine stammt von Debye, die andere von K. W. Wagner. Nach Debye¹⁰⁾ besteht zwischen DK, der Frequenz und dem dielektrischen Verlustwinkel ($\text{tg } \delta_\varepsilon = \text{Verlustfaktor}$) folgender Zusammenhang

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \dots \quad (4)$$

$$\text{tg } \delta_\varepsilon = \frac{(\varepsilon_\infty - \varepsilon_0) \omega \tau}{\varepsilon_\infty + \varepsilon_0 \omega^2 \tau^2} \quad \dots \quad (5)$$

In den Gleichungen (4) und (5) bedeutet τ die Relaxationszeit, welche definiert ist als die Zeit, die die Momente der Moleküle brauchen, um nach plötzlicher Entfernung des Feldes praktisch wieder in eine ungeordnete Verteilung zurückzukehren, ε_0 die DK bei optischen Frequenzen, ε_∞ die statische DK und ω die Kreisfrequenz. Nach dieser Theorie ist der dielektrische Verlust frequenzabhängig und geht bei einer bestimmten Frequenz durch ein Maximum hindurch. Man hat diese Theorie mit Vorteil auch zur Strukturbestimmung von Kunststoffen und Molekülradien herangezogen.¹¹⁾

Von ganz anderen Gedanken ist K. W. Wagner¹²⁾ bei der Ausgestaltung seiner Theorie ausgegangen. Wird ein Dielektrikum an eine Gleichspannung gelegt, so wird in ihm in dem Masse elektrische Energie in Wärme verwandelt, indem es den elektrischen Strom leitet. Bei Belastung mit Wechselstrom tritt zu diesem Verlust noch ein zweiter hinzu, der mit der Frequenz des Wechselstromes zunimmt. Denkt man sich in einen vollkommenen Nichtleiter, ein ideales Dielektrikum, zahllose kleinste Kugeln verschiedener Grösse aus einem Material eingebettet, das eine mässige elektri-

⁹⁾ R. Nitsche und G. Pfestorf, Prüfung und Bewertung elektrischer Isolierstoffe, Berlin 1940.

¹⁰⁾ P. Debye, Polare Molekeln, Leipzig 1929.

¹¹⁾ G. Pfestorf, Kunststoffe, 33 (1943) 117.

¹²⁾ K. W. Wagner, Verhandl. deut. physik. Ges., 15 (1913) 45; Ann. Phys., 40 (1913) 817.

sche Leitfähigkeit hat, so entstehen in jeder dieser Kugeln bei Belastung der ganzen Anordnung mit Wechselfspannung, minimale Wechselströme, die jede einzelne Kugel nach Massgabe der Stromstärke und ihrer Leitfähigkeit erwärmen. Die mit Hilfe dieses Modells entwickelten Eigenschaften der dielektrischen Verluste stimmen mit den wirklich beobachteten gut überein. Es werden also die dielektrischen Verluste durch örtlich veränderliche Leitfähigkeit und DK der festen Körper hervorgerufen. In einem flüssigen Dielektrikum fehlen sie demgemäss völlig. Man kann daher nach K. W. Wagner dielektrische Verluste durch geeignetes Zumischen von Stoffen definierter Leitfähigkeit in ein Dielektrikum erzeugen. Dementsprechend wurde bei γ -Fe₂O₃-Präparaten meist ein Verlustwinkel gefunden, weil dieses fast immer Beimengungen an Fe₃O₄ enthält.

Bei isotropen Mischkörpern, bei denen der eingebettete Stoff eine grössere DK besitzt, als die Grundsubstanz und unter Annahme von kugelförmigen Teilchen der Beimischung gilt nach Büchner³⁾ für den Verlust des Mischkörpers

$$\delta_\epsilon = \sum_{i=1}^n v_i \delta_i \text{ bzw. } \text{tg } \delta_\epsilon = \text{tg } \sum_{i=1}^n v_i \delta_i \quad (6)$$

Diese Gleichung soll an einem Beispiel geprüft werden. An einem reinem γ -Fe₂O₃-Pressling wurde $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,25$ gemessen. Die zur Herstellung des Mischkörpers verwendete Buna besass keinen Verlustfaktor. Der Verlustfaktor des γ -Fe₂O₃ bei 100% Raumerfüllung ergibt sich $\frac{0,563}{0,25} = 0,443$

$$\delta_\epsilon = 24^\circ.$$

Daraus berechnet sich der Verlustfaktor des Mischkörpers

$$\text{tg } [0,536 \cdot 0,443] = 0,238; \text{ gemessen } 0,21.$$

Wie bereits im vorangehenden Abschnitt erwähnt wurde, verliert das Material nach einer Wärmebehandlung auf 140° in Bezug auf die dielektrischen Verluste die Eigenschaften eines Mischkörpers, während jedoch die DK noch konstant bleibt. Um nun die Messwerte in Abbildung 1 auswerten zu können und sich aus den Resultaten ergibt, dass von einer Mischung nicht mehr die Rede sein kann, wird angenommen, dass das Material sich in gewisser Hinsicht, zum Beispiel in Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit, als physikalisch »homogen« verhält. Rechnet man zunächst aus Gleichung (4) durch Einsetzen von ϵ_0 und ϵ_∞ (beide Werte wurden durch graphische Auswertung der Resultate aus Tabelle 3 Kolonne II ermittelt) die mittlere Relaxationszeit aus (τ) und setzt diese in Gleichung (5) zur Bestimmung des Verlustfaktors ein, so ergeben sich in der Abhängigkeit von der Frequenz Werte, welche in Tabelle 4, Kolonne V, beziehungsweise in der Abbildung 2 wiedergegeben sind. Der Rechnung liegt ein $\tau = 2,05 \cdot 10^{-10}$ sek ($\tau^2 = 4,20 \cdot 10^{-20}$) sowie $\epsilon_\infty = 8,6$ und $\epsilon_0 = 5,5$ zugrunde. Trägt man die in Kolonne VI angegebene Differenz von $\text{tg } \delta_\epsilon$ (gemessen) — $\text{tg } \delta_\epsilon$ (berechnet) in Abhängigkeit von λ auf, so ergibt sich eine Gerade, welche durch den Ursprung geht. Nun ergeben sich einige Abweichungen von dieser Geraden wobei in Kolonne VI sogar

Tabelle 4

I. λ (cm)	II. f	III. $(2\pi f)^2 = \omega^2$	IV. $\text{tg } \delta_\epsilon$ gemessen	V. $\text{tg } \delta_\epsilon$ berechnet	VI. $\text{tg } \delta_\epsilon$ Differenz
232,1	$1,29 \cdot 10^8$	$6,57 \cdot 10^{17}$	0,49	0,059	0,431
173,8	$1,73 \cdot 10^8$	$1,16 \cdot 10^{18}$	0,41	0,077	0,333
77,4	$3,87 \cdot 10^8$	$5,75 \cdot 10^{18}$	0,39	0,154	0,236
39,7	$7,6 \cdot 10^8$	$2,26 \cdot 10^{19}$	0,19	0,218	-0,028
25,1	$1,19 \cdot 10^9$	$5,58 \cdot 10^{19}$	0,16	0,220	-0,060
9,3	$3,16 \cdot 10^9$	$3,92 \cdot 10^{20}$	0,14	0,126	0,034

Minuswerte auftreten. In Gleichung (5) wurde mit einem Mittelwert von τ gerechnet. Viel wahrscheinlicher ist es jedoch, τ nach einer Wahrscheinlichkeitsfunktion analog wie die Molekulargeschwindigkeit nach dem Maxwell-Boltzmann'schen Energie- und Geschwindigkeitsverteilungsgesetz anzunehmen. Dadurch erklärt sich zwangsläufig das Auftreten negativer Werte in der Differenz $\text{tg } \delta_\epsilon$ (gemessen) — $\text{tg } \delta_\epsilon$ (berechnet). Das Maximum des Verlustwinkels ist in Wirklichkeit flacher als der Rechnung mit einem Mittelwert entspricht.

Welche physikalische Bedeutung kommt nun der Differenz $\text{tg } \delta_\epsilon$ (gemessen) — $\text{tg } \delta_\epsilon$ (berechnet) zu? Die Lage der Punkte auf einer Geraden besagt, dass hier der Verlustwinkel teilweise durch Stromleitfähigkeit verursacht wird.

Der dielektrische Verlustfaktor setzt sich somit aus zwei Teilen zusammen:

1. Durch die dielektrische Nachwirkung, hervorgerufen dadurch, dass bei hohen Frequenzen die Dipole der Moleküle, beziehungsweise Molekülgruppen, dem Felde nicht mehr trägheitslos folgen können,

2. durch den Ohm'schen Leitungsstrom, da die Substanz eine gewisse Leitfähigkeit besitzt. Der Verlustfaktor ist dann proportional der Wellenlänge und geht mit fallender Wellenlänge gegen Null zu. Die Werte des Verlustfaktors, welche durch den Ohm'schen Leitungsstrom verursacht werden, liegen somit auf einer Geraden, welche durch den Nullpunkt geht.

Umgekehrt lassen sich nun die Anteile des Verlustfaktors, welche durch dielektrische Nachwirkung entstehen, aus experimentell erhaltenen Werten bestimmen, um Rechnung und Experiment miteinander vergleichen zu können. Ganz exakt kann man dabei so vorgehen, dass man bei genügend grosser Wellenlänge, wo noch keine Nachwirkungerscheinungen auftreten, den Verlustfaktor bestimmt, auf Koordinatenpapier aufträgt und diesen Punkt dann mit dem Nullpunkt des Koordinatensystems verbindet. Sämtliche Anteile des Verlustfaktors, welche durch Ohm'sche Stromlei-

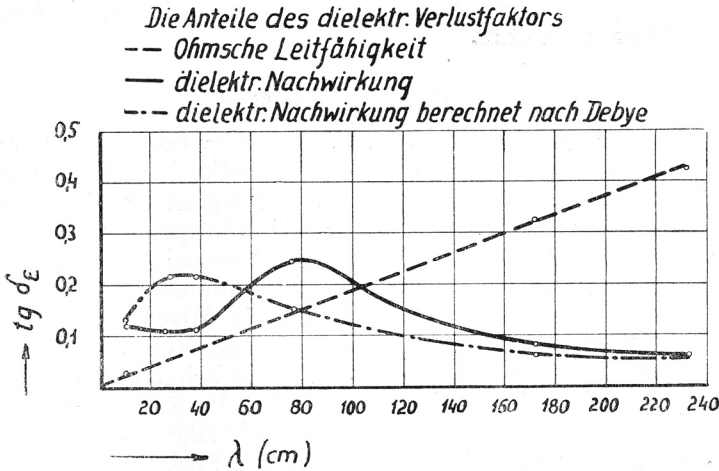


Abbildung 2. Die Abhängigkeit der Anteile dielektrischer Verluste von der Wellenlänge

ung verursacht werden, liegen dann auf dieser Geraden. (vgl. dazu Abbildung 2 beziehungsweise Tabelle 5)

Tabelle 5

I. λ (cm)	II. $\text{tg } \delta\epsilon$	III. $\text{tg } \delta\epsilon$ Ohm'sche Strom- leitung	IV. $\text{tg } \delta\epsilon$ gemessen Differenz
232,1	0,49	0,430	0,060
173,8	0,41	0,320	0,090
77,4	0,39	0,145	0,245
39,7	0,19	0,078	0,112
25,1	0,16	0,050	0,110
9,3	0,14	0,020	0,120

Aus der Differenz der gemessenen und der auf dieser Geraden liegenden Werte, ergibt sich der durch dielektrische Nachwirkung entstehende Verlustfaktor (vgl. dazu Abbildung 2). Mit Rücksicht auf den Umstand, dass es sich hier um ein organisch-anorganisches Stoffsystem handelt, sind die Abweichungen von der Theorie nicht verwunderlich. Man wird wohl annehmen müssen, da ohnehin die physikalische »Homogenität« des Stoffgemisches nicht sicher feststeht, dass hier nicht eine Relaxationszeit massgebend ist, sondern dass die anzunehmenden verschiedenen Relaxationszeiten eine Angelegenheit der statistischen Mechanik sind.

Diese Vorstellung, bietet jedoch in ihrer mathematischen Behandlung beträchtliche Schwierigkeiten.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde das dielektrische Verhalten eines organisch-anorganischen Mischkörpers untersucht. Ein Gemisch von $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ + Buna verhält sich, sofern man bei der Herstellung genügende Sorgfalt auf die physikalische Homogenität verwendet, wie ein echter Mischkörper. Zur Berechnung der