

Über einige physikalische Konstanten von Bitumen

Von Dr. P. C. BLOKKER u. Mitarbeiter

Mitteilung aus dem Amsterdamer Laboratorium der N. V. De Bataafsche Petroleum Mij.

Eingeg. 4. August 1939

Die bekannten Tabellenwerke über die physikalischen Eigenschaften von Stoffen, wie z. B. die deutschen Tabellen von *Landolt-Börnstein*, die französischen von *Abraham-Sacerdote* und die amerikanischen „*International Critical Tables*“, enthalten praktisch keine Angaben über Bitumen. Das liegt z. T. daran, daß Bitumen ein verhältnismäßig neuer Werkstoff ist, und auch daran, daß es früher beinahe ausschließlich im Straßenbau Verwendung fand, wo es lediglich darauf ankam, die die Konsistenz betreffenden Eigenschaften des Bitumens, wie Penetration, Erweichungspunkt, Duktilität, Viskosität bei höheren Temperaturen usw. gründlich zu kennen.

Nachdem aber Bitumen mehr und mehr für die verschiedensten industriellen Zwecke Verwendung fand, machte sich das Bedürfnis geltend, auch diejenigen physikalischen Konstanten kennenzulernen, die bei den einzelnen Anwendungsgebieten von Bedeutung sind. Das gilt vor allem für die Gebiete der Wärme- und elektrischen Isolation, und es handelt sich um die folgenden physikalischen Eigenschaften:

Spezifisches Gewicht,
Ausdehnungskoeffizient,
Spezifische Wärme,
Wärmeleitfähigkeit,
Durchschlagspannung,
Dielektrischer Verlustwinkel,
Dielektrizitätskonstante,
Spezifischer elektrischer Widerstand.

Dazu kommt noch die Oberflächenspannung, deren Kenntnis für die Praxis von untergeordneter Bedeutung ist, und die Wasserdampfdurchlässigkeit.

Da die bisher bekannten Daten über die obengenannten Eigenschaften unzulänglich und in der Literatur verstreut sind, wurde der Versuch unternommen, sie zu sammeln und durch eigene Untersuchungen zu ergänzen, wobei von der Voraussetzung ausgegangen werden durfte, daß diese Eigenschaften nur sehr wenig von dem Ursprung und der Herstellungsweise des Bitumens beeinflußt werden und daß daher die an einigen typischen Bitumenarten ermittelten Daten als ausreichend charakteristisch angesehen werden können. Die Untersuchungen wurden daher auf einige handelsübliche mexikanische und venezolanische Bitumina, ein Bitumen aus gecracktem Rückstand und ein hellfarbiges Bitumen beschränkt.

Spezifisches Gewicht. (Dichte.)

Die Kenntnis des spezifischen Gewichts von Bitumen bei einer bestimmten Temperatur ist praktisch nur insofern von Bedeutung, als z. B. in Deutschland die einschlägigen Vorschriften für Straßenbaubitumen (DIN 1995) ein spezifisches Gewicht bei 25° von mindestens 1,0 verlangen. Das spezifische Gewicht von Bitumen steht in engstem Zusammenhang mit seiner Härteeinstellung (Eindringungstiefe); es hängt außerdem von der Herkunft des Ausgangsmaterials ab und in geringem Maße auch von der Herstellungsart. Insgesamt sind die Unterschiede im spezifischen Gewicht verschiedener Bitumina so geringfügig, daß sie praktisch innerhalb der in Tabelle 1 angegebenen Grenzen

liegen. — Die Bestimmung erfolgt i. allg. im Pyknometer wie in DIN 1995 beschrieben, und nur bei sehr hartem Bitumen mit der *Mohrschen Waage*.

Tabelle 1. Spezifisches Gewicht von Bitumen.

| Eindringungstiefe (Penetration) bei 25° | Erweichungspunkt Ring und Kugel etwa °C | Spezifisches Gewicht bei 25° |
|---|---|---------------------------------|
| 300 | 34 | 1,01 ± 0,02 |
| 200 | 39 | 1,02 ± 0,02 |
| 100 | 46 | 1,02 ± 0,02 |
| 50 | 53 | 1,03 ± 0,02 |
| 25 | 63 | 1,04 ± 0,02 |
| 15 | 72 | 1,04 ± 0,02 |
| 10 | 80 | 1,05 ± 0,02 |
| 5 | 100 | 1,07 ± 0,03 |

Kubischer Ausdehnungskoeffizient. (Raumausdehnungszahl.)

Die Kenntnis des Ausdehnungskoeffizienten ermöglicht die Berechnung des spezifischen Gewichts bei verschiedenen Temperaturen, was z. B. für die Bemessung von Tankraum für heißflüssiges Bitumen und für die Berechnung der Bitumenzugabe im Asphaltstraßenbau wichtig ist.

In einer 1929 im Asphaltlaboratorium der Rhenania-Ossag Mineralölwerke A.-G., Hamburg, durchgeführten Arbeit wurde der kubische Ausdehnungskoeffizient verschiedener Bitumina im Temperaturbereich von 15—200° bestimmt mit dem Ergebnis, daß der Ausdehnungskoeffizient für diesen Temperaturbereich praktisch konstant und für alle Bitumina praktisch gleich ist. Mit zunehmender Härte des Bitumens scheint der Ausdehnungskoeffizient unwesentlich anzusteigen.

Tabelle 2. Kubischer Ausdehnungskoeffizient (γ) von Bitumen im Temperaturbereich von 15—200°.

| Eindringungstiefe (Penetration) bei 25° | Erweichungspunkt Ring und Kugel etwa °C | γ |
|---|---|----------|
| 196 | 39 | 0,00060 |
| 85 | 51 | 0,00061 |
| 50 | 58 | 0,00061 |
| 45 | 55 | 0,00061 |
| 23 | 63 | 0,00062 |

Die Messungen wurden im Temperaturbereich von 15—50° mit dem Pyknometer und von 120—200° mit der *Mohrschen Waage* und Senkkörper durchgeführt. — Nähere Einzelheiten siehe in der Originalarbeit¹⁾. — Die in der Literatur angegebenen Zahlen stimmen mit diesen Messungen ziemlich gut überein:

| | |
|---|--------------------------------|
| Bureau of Standards, Washington ²⁾ | zwischen 15 und 35° = 0,00063 |
| American Standards Association ³⁾ | zwischen 15 und 230° = 0,00068 |
| Siehe auch ⁴⁾ | |
| H. Roßbacher ⁵⁾ | zwischen 25 und 70° = 0,00058 |
| H. Mallison ⁶⁾ | |
| H. Mallison, F. Jacobsohn ⁷⁾ | |
| K. Sarre | zwischen 15 und 60° = 0,00062 |

¹⁾ K. Ziegs, Asphalt u. Teer. Straßenbautechn. 29, 944 [1929].

²⁾ Miscellaneous Publications of the Bureau of Standards, Washington D. C. [1929].

³⁾ American Standard A. S. A., Nr. Z 11 a, 1928.

⁴⁾ Abraham: Asphalt and allied Substances, 4. Ausgabe, Kapitel XXXII.

⁵⁾ H. Roßbacher, Ind. Engng. Chem. 7, 577 [1915].

⁶⁾ H. Mallison, Teer u. Bitumen 1932, 161.

⁷⁾ H. Mallison, F. Jacobsohn u. K. Sarre, diese Ztschr. 39, 154 [1926].

Spezifische Wärme.

Die spezifische Wärme ist für Bitumen besonders wissenswert, weil es vor der Verarbeitung fast stets auf Temperaturen von 180–200° erhitzt werden muß. Eine Nachprüfung der spärlichen in der Literatur vorhandenen Angaben erwies sich als sehr wünschenswert und wurde (von Dr. R. N. J. Saal) folgendermaßen durchgeführt:

Versuchsordnung.

Die in Abb. 1 schematisch dargestellte Apparatur besteht aus zwei Teilen, einer Heiz- und Fallvorrichtung und dem eigentlichen Calorimeter.

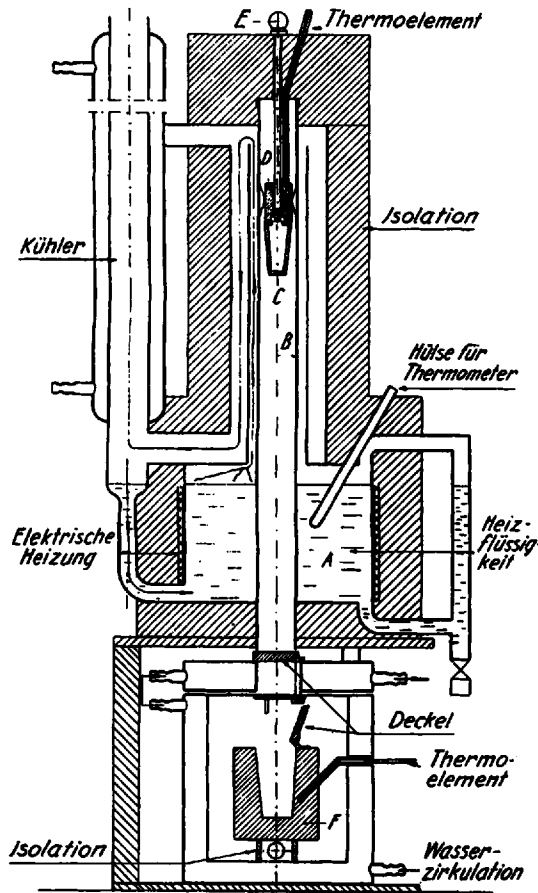


Abb. 1.

Apparat zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Bitumen.

Raum A enthält die Heizflüssigkeit (Wasser, Tetralin, Di-*sec*-butylnaphthalin), deren Dampf Rohr B umspült. In B hängt ein eimerförmiger mit einem Deckel verschlossener Behälter C, der etwa 7 g des zu untersuchenden Bitumens enthält und ungefähr den halben Wärmehalt wie dieses hat. Ein auf B sitzender Kupferblock D sorgt für schnelle Wärmeübertragung auf das Bitumen, dessen Temperatur mit Hilfe eines Thermoelements gemessen wird. Durch Betätigung des Stabes E kann der Bitumenbehälter ausgelöst werden, um in das Calorimeter zu fallen. Dieses besteht aus einem doppelwandigen Gefäß mit Wasserkühlung und enthält einen auswechselbaren Kupferblock F (dessen Größe sich nach dem Temperaturbereich richtet, über den sich die Messung erstreckt) mit einer Aushöhlung, in die der Behälter C genau paßt. Calorimeter und Kupferblock sind mit Deckel versehen, die nach dem Einbringen des Behälters C sofort geschlossen werden. Die Temperaturmessung im Kupferblock erfolgt durch ein Thermoelement mit Spiegelgalvanometer und einer Meßgenauigkeit von $\pm 0,02^\circ$, was dadurch erreicht wird, daß Kühlwasser und Galvanometer auf $25^\circ (\pm 0,02^\circ)$ gehalten werden.

Eichung.

Das Calorimeter wurde in der Weise geeicht, daß einmal durch einen Blindversuch die Wärmeabgabe des Kupferblocks festgestellt und anschließend dessen Wärmehalt mit Hilfe eines silbernen Eichkörpers von etwa 130 g Gewicht bestimmt wurde, wobei als bekannte spezifische Wärme von Silber die aus der Formel:

$$c_p = 0,055936 + 1,05607 \cdot 10^{-5} t + 1,861610 \cdot 10^{-8} t^2$$

berechneten Werte angenommen wurden.

0,05663 für den Temperaturbereich von 100–30°
0,05721 für den Temperaturbereich von 207–30°
0,05785 für den Temperaturbereich von 322,4–30°
(Tabelle von Landolt-Börnstein).

Die Eichung wurde kontrolliert durch Berechnung der spezifischen Wärme des Kupferblocks, die befriedigende Werte ergab.

| Temp. d. silb. Eichkörpers (Gew. 180 g) | Kupferblock Nr. | Gewicht des Kupferblocks | Wärmehalt des Kupferblocks in cal/°C | Spezifische Wärme des Kupfers gefunden (etwa bei 30°) | Literatur (Tabellen Landolt-Börnstein) |
|---|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|---|--|
| 100° | 1 | 883 g | 81,77–81,84 | 0,0927 | |
| 207° | 2 | 1966 g | 181,2–182,0–181,2–180,9 | 0,0923 | 0,09185 (25,6°) 0,09244 (38,1°) |
| 322,4° | 3 | 3432 g | 316,7–319,4–318,2–319,1 | 0,0928 | |

Die Meßgenauigkeit bei den einzelnen Bestimmungen betrug etwa $\pm 0,5\%$.

Die Messungen erstrecken sich auf die Temperaturbereiche von 100–30°, 207–30° und 322–30° und wurden jeweils dreifach durchgeführt.

Tabelle 3. Spezifische Wärme von Bitumen.

| Bitumen | Pen. bei 25° | Erweichungspunkt R. u. K. | Spez. Wärme in cal/°C bei | | | | Änderung der spez. Wärme pro 1° (α) |
|--------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------------|
| | | | 0° | 100° | 200° | 300° | |
| Dest. Bitumen I | 177 | 39 1/2 | 0,425 | 0,472 | 0,520 | 0,567 | 0,00047 |
| Dest. Bitumen I | 23 | 62 1/2 | 0,409 | 0,463 | 0,518 | 0,572 | 0,00054 |
| Dest. Bitumen I | 7 | 96 1/2 | 0,382 | 0,455 | 0,527 | 0,600 | 0,00073 |
| Dest. Bitumen II | 22 1/2 | 65 | 0,420 | 0,464 | 0,499 | 0,534 | 0,00035 |
| Gebil. Bitumen II | 39 | 84 1/2 | 0,430 | 0,462 | 0,494 | 0,526 | 0,00032 |
| Gebil. Bitumen II | 25 | 86 1/2 | 0,402 | 0,458 | 0,514 | 0,570 | 0,00056 |
| Bitumen aus geacktem Rückstand | 2 | 73 | 0,419 | 0,459 | 0,499 | 0,538 | 0,00040 |
| Hellfarbiges Bitumen | 25 | 63 | 0,378 | 0,456 | 0,534 | 0,612 | 0,00078 |

Es ergibt sich daraus, daß die spezifische Wärme bei den untersuchten Bitumina nur innerhalb geringer Grenzen schwankt und sich linear mit der Temperatur ändert, was einmal bestätigt, daß Bitumen keinen „Schmelzpunkt“ hat, und außerdem die Möglichkeit gibt, die spezifische Wärme bei beliebigen Temperaturen nach

$$s.W. = s.W.0^\circ + \alpha t \quad (t = \text{Temp. in } ^\circ\text{C})$$

zu berechnen.

In der Literatur²⁾ wird angegeben, daß man die für die spezifische Wärme von Mineralölen gefundene Formel:

$$\text{spez. Wärme} = \frac{1}{d} (0,388 + 0,00081 t)$$

(t = Temp. in °C, d = spez. Gew. bei 15°)

auch für Bitumen anwenden kann (vgl. auch ⁸⁾).

Unsere Messungen zeigen jedoch, daß in den meisten Fällen der Temperaturkoeffizient der spezifischen Wärme kleiner ist, als diese Formel angibt.

Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird durch die Wärmeleitzahl λ ausgedrückt, d. h. durch die Wärmemenge, die in 1 h durch einen Querschnitt von 1 m² bei einem Temperaturgefälle von 1°/m strömt. Diese in kcal/m²C/h ausgedrückte (technische) Zahl λt kann durch Multiplizieren mit 0,00278 in die cgs-Einheit gcal/cm²C/s λ_p umgerechnet werden. Die Wärmeleitzahl von Bitumen interessiert im Zusammenhang mit der umfangreichen Verwendung von Bitumen in der Isoliertechnik.

Versuchsordnung.

Der in Abb. 2 schematisch dargestellte Apparat besteht aus einem kupfernen kugelförmigen Gefäß A, in dessen Mitte sich eine massive Kupferkugel B mit zwei Bohrungen befindet, von denen die eine zur Aufnahme eines Heizelementes C, und die andere zur Aufnahme eines Thermoelementes dient. Das Gefäß A wird mit dem zu untersuchenden Bitumen gefüllt und das Ganze in ein Wasserbad konstanter Temperatur gesetzt, wobei das Wasser durch die Löcher D nach innen fließen kann und das Bitumen überspült.

Das Heizelement ist derart berechnet, daß man bei einer Spannung von 4 V — beim Temperaturgleichgewicht — einen

⁸⁾ A. W. Don, Munic. Engng. sanit. Rec. munic. Motor 27, 22 [1904].

Temperaturunterschied von etwa 10° erwarten kann. Die Wärmeverluste bleiben bei dem kleinen Durchmesser der Zuleitungsdrähte und des Thermoelementes unter 1/2 %. Als Stromquellen dienen zwei Akkumulatoren. Die Stromabnahme (etwa 130 mA) ist so niedrig, daß eine konstante Klemmspannung und Stromstärke aufrechterhalten werden kann. Die Genauigkeit der Temperaturmessungen beträgt ± 0,02°, diejenige der Stromstärke und Spannung ± 0,5 %.

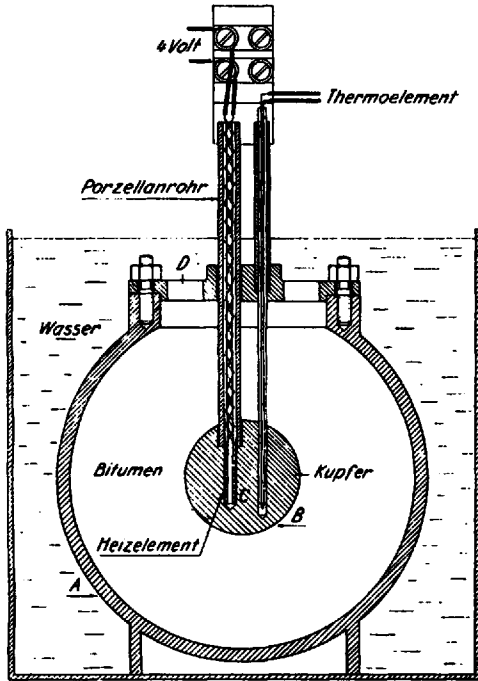


Abb. 2. Apparat zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Bitumen.

Kugel und Wasserbad sowie Klemmspannung des Heizelementes und Stromstärke gemessen. Aus der der kupfernen Innenkugel zugeführten Wärmemenge wird die Wärmeleitfähigkeit des Bitumens in kcal/m°C/h nach folgender Formel berechnet:

$$\lambda_t = \frac{\varphi}{t} \cdot \frac{R_2 - R_1}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot \frac{1}{4\pi R_1 R_2}$$

R_1 = Radius der inneren Kugel in m
 R_2 = Radius der äußeren Kugel in m
 ϑ_1 = Temperatur der inneren Kugel in °C
 ϑ_2 = Temperatur des Wasserbades in °C
 φ = Zugeführte Wärme (kcal) pro h

Die auf diese Weise erhaltenen Zahlen beziehen sich auf einen Temperaturbereich von etwa 10°. Da die Messungen bei verschiedenen Temperaturen ergaben, daß sich die Wärmeleitfähigkeit nur in geringem Maße mit der Temperatur ändert (etwa 1 % auf 10°), konnten die Zahlen für bequeme Temperaturen leicht berechnet werden.

Tabelle 4. Wärmeleitfähigkeit von Bitumen.

| Bitumen | Pen. bei 25° | Erweichungspunkt R. u. K. | Wärmeleitfähigkeit kcal/m°C/h | | | | |
|--------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0° | 20° | 40° | 60° | 70° |
| Dest. Bitumen I | 177 | 39 1/2 | 0,136 | 0,138 | 0,130 | — | — |
| Dest. Bitumen I | 23 | 62 1/2 | 0,141 | 0,137 | 0,133 | 0,129 | 0,125 |
| Dest. Bitumen I | 7 | 90 1/2 | 0,144 | 0,137 | 0,130 | 0,124 | 0,127 |
| Dest. Bitumen II | 22 1/2 | 65 | 0,137 | 0,135 | 0,133 | 0,131 | — |
| Gehl. Bitumen II | 30 | 84 1/2 | 0,141 | 0,139 | 0,136 | 0,136 | 0,134 |
| Gehl. Bitumen II | 25 | 86 1/2 | 0,150 | 0,146 | 0,143 | 0,140 | 0,130 |
| Bitumen aus geacktem Rückstand | 2 | 78 | — | 0,129 | 0,126 | 0,124 | 0,121 |
| Hellfarbiges Bitumen | 25 | 53 | 0,120 | 0,117 | 0,115 | — | — |

Diese Versuchsergebnisse zeigen, daß die Wärmeleitfähigkeit bei allen Bitumen praktisch gleich ist und mit steigender Temperatur etwas abnimmt.

M. Jacob⁹⁾ [s. a. ²⁾ und ⁴⁾] hat zwischen 0° und dem Erweichungspunkt R. u. K. des Bitumens eine Wärmeleitfähigkeit von 0,14 kcal/m°C/h gefunden. Dieser Wert stimmt gut mit unseren Messungen überein.

Elektrische Eigenschaften.

Die Durchschlagspannung, die dielektrischen Verluste sowie die Dielektrizitätskonstante von Bitumen sind für die Elektroindustrie, wo Bitumen für die Herstellung von Kabelvergußmassen, Dichtungsmassen für Transformatoren und Kondensatoren und als Isoliermaterial für Kabel usw. gebraucht wird, von großer Bedeutung.

⁹⁾ M. Jacob, Z. techn. Physik 7, 475 [1926].

A. Durchschlagspannung.

Zur Messung der Durchschlagspannung wird der zu untersuchende Stoff zwischen zwei platten- oder kugelförmigen Elektroden gebracht, deren Form und Abstand von großem Einfluß sind. Plattenelektroden haben den Vorteil, das sich Verunreinigungen mit größerer Sicherheit entdecken lassen. In Übereinstimmung damit sind die mit Kugelelektroden erhaltenen Werte für die Durchschlagspannung stets wesentlich höher. Die Verwendung von Plattenelektroden hat bei Bitumen noch den weiteren Vorteil, daß die Versuchsbedingungen mit den Bedingungen der Praxis besser übereinstimmen, weshalb auch die im folgenden beschriebenen Messungen mit einem von G. W. Nederbragt¹⁰⁾ ausgearbeiteten Apparat mit plattenförmigen Elektroden vorgenommen wurden (Abb. 3).

Bei diesem Apparat wird die Durchschlagspannung zwischen zwei ebenen, scheibenförmigen Elektroden A und B (Dmr. 40 mm) mit abgerundeten Kanten gemessen. Die Elektrode A wird von dem rechtwinklig gebogenen Stab C getragen, der in das Porzellanrohr D eingebettet ist. Alle Metallteile des Apparates sind aus einem Nickelstahl mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten (Invar) hergestellt. An dem Porzellanrohr ist der Block E derart befestigt, daß die eine Seite des Blockes in gleicher Ebene mit der Elektrode A liegt. Die Elektrode B ist durch den Stab F und das mit der Elektrode B in einer Ebene liegende Plättchen G mit dem Block E verbunden. Durch Einlegung eines Abstandsplättchens zwischen E und G kann der gewünschte Abstand zwischen A und B eingestellt werden. Invar hat infolge seines niedrigen Ausdehnungskoeffizienten einmal den Vorteil, daß es eingekittet werden kann, ohne daß das Porzellan beim Erhitzen bis 200° springt, und zweitens den Vorzug, daß die Stellung der Elektrode A zum Porzellanrohr stets die gleiche bleibt. Durch Blindversuche wurde bestätigt, daß sich der mit Hilfe einer Lehre (0,98—1,022 mm) auf 1 mm eingestellte Abstand zwischen den Elektroden A und B nur in sehr geringem Maße mit der Temperatur änderte.

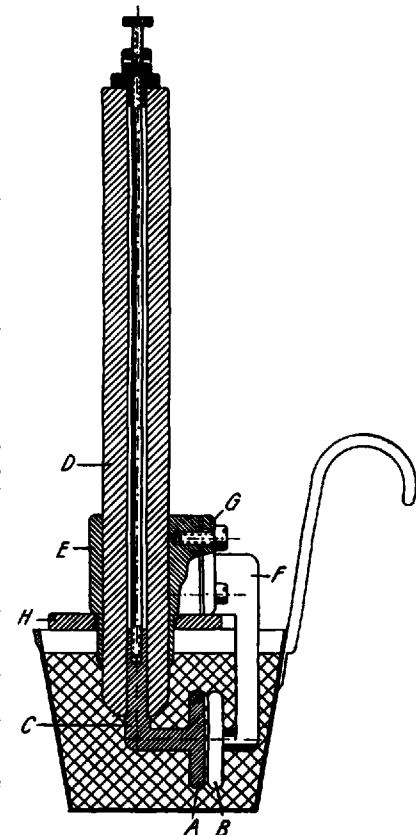


Abb. 3. Durchschlaggerät für Vergußmassen.

Das zu prüfende Bitumen wurde in dem Schmelzgefäß auf eine um 80—100° über dem Erweichungspunkt R. u. K. liegende Temperatur erhitzt, um allenfalls eingeschlossene Luft und Feuchtigkeit zu entfernen, dann wurde das Durchschlaggerät derart in das Bitumen gesenkt, daß der Block E auf dem über dem Schmelztiegel liegenden Träger H ruhte.

Bei den Versuchen wurde meist mit einer Spannung von 15 kV eff. begonnen (Wechselstrom 50 Perioden); nach jeder Erhöhung um 5 kV eff. wurde die Spannung 1 min konstant gehalten.

Gleichzeitig wurden zum Vergleich einige Messungen mit kugelförmigen Elektroden (Dmr. Kugel 3/8", Zwischenraum 1 mm) ausgeführt.

Tabelle 5. Durchschlagspannung von Bitumen.

| Bitumen | Pen. bei 25° | Erweichungspunkt R. u. K. | Durchschlagfeldstärke in kV eff./mm | | | |
|--------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------------|-----|-------------------------|------|
| | | | Platten-elektroden | | Kugelförmige Elektroden | |
| | | | 20° | 50° | 30° | 60° |
| Dest. Bitumen I | 180 | 39 1/2 | 10 | <10 | — | — |
| Dest. Bitumen I | 49 1/2 | 54 | 80 | 10 | (33) | (22) |
| Dest. Bitumen I | 23 | 61 | 80 | 10 | 67 | — |
| Dest. Bitumen I | 11 | 83 | >60 | 15 | — | — |
| Dest. Bitumen II | 25 | 63 | 35 | 10 | >60 | (22) |
| Gehl. Bitumen I | 30 | 86 1/2 | 25 | 15 | 60 | — |
| Gehl. Bitumen II | 35 | 88 1/2 | 30 | 20 | 60 | — |
| Gehl. Bitumen II | 20 | 86 | 30 | 15 | — | — |
| Gehl. Bitumen II | 11 | 120 | 35 | 15 | >60 | — |
| Bitumen aus geacktem Rückstand | 16 | 52 | 30 | 14 | — | — |
| Bitumen aus geacktem Rückstand | 1 1/2 | 74 | >60 | 20 | — | — |
| Hellfarbiges Bitumen | 15 | 55 | 30 | 14 | — | — |

¹⁰⁾ G. W. Nederbragt, World Petr. Congress, Paris 1937, Teil II, Sektion II, S. 653; Arch. techn. Mess. V, 942 [1937].

Die Ergebnisse finden sich in Tab. 5. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus drei Bestimmungen und drücken die Spannung aus, die das Material nach der obenerwähnten Spannungserhöhung wenigstens 1 min aushalten kann.

Bei den Messungen zeigte sich, daß die Durchschlagsfeldstärke i. allg. mit der Härte des Bitumens steigt und daß sie mit steigender Temperatur stark abnimmt.

B. Dielektrische Verluste¹¹⁾.

Wenn ein Isolationsmaterial dem Einfluß eines wechselnden elektrischen Feldes ausgesetzt wird, treten gewöhnlich sog. dielektrische Verluste auf, die in der Praxis als Wärmeentwicklung zum Ausdruck kommen. Diese Verluste spielen in der Isolationstechnik eine bedeutende Rolle, so z. B. beim Stromdurchgang durch ein Kabel, wobei elektrische Energie verlorengeht und außerdem der Zustand des Kabels durch die Erwärmung ungünstig beeinflusst werden kann. Diese Verluste sind zum Teil auf „dielektrische Hysteresis (Dipolverluste)“ und zum Teil auf Ohmsche Leitung zurückzuführen. Beide Arten verlorener Leistung sind bei einem bestimmten Stoff und einer bestimmten Temperatur dem Quadrat der effektiven Spannung proportional. Die durch dielektrische Hysteresis verursachten Verluste nehmen außerdem meistens noch stark mit der Frequenz des Wechselstroms zu. Als Maßzahl für die durch dielektrische Hysteresis verursachten Verluste wurde der Tangens des dielektrischen Verlustwinkels benutzt. Unter dem dielektrischen Verlustwinkel verstehen wir hier den Phasenunterschied zwischen dem dielektrischen Verluststrom und dem kapazitiven Strom (d. h. dem Strom, der fließen würde, wenn das Material ein ideales Dielektrikum wäre). Für die Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit benötigt.

Die Bestimmung des dielektrischen Verlustwinkels und der Dielektrizitätskonstante wurde bei einer Wechselstromfrequenz von 50 Hz unter Verwendung einer Schering-Brücke und eines Zylinderkondensators ausgeführt, der mit dem zu untersuchenden Bitumen gefüllt war.

Ein Schema des Zylinderkondensators ist in Abb. 4 gegeben. Der Innenzylinder C aus poliertem Poldimetall ist auf das Porzellanrohr A gelötet und durch den Aufsatz E (der mit Hilfe des Fiber-Isolierrohrs F gegen Erde isoliert ist) mit dem Nullinstrument (Vibrationsgalvanometer) der Schering-Brücke verbunden. Die Potentialdifferenz zwischen Innenzylinder C und Erde ist sehr gering (~0,1 V). Der Außenzylinder D (ebenfalls aus poliertem Poldimetall), ist mittels Schraubengewinde an einem Ring befestigt, der dem Porzellanrohr aufgelötet ist, und an den Speisetransformator angeschlossen. Ferner sind noch zwei Schutzringe B₁ und B₂ vorgesehen, die über den stromführenden Innenmantel des Porzellanrohrs geerdet sind und die dazu dienen, zwischen den Zylindern C und D ein möglichst homogenes Feld zu erhalten und zu verhindern, daß Streuströme am Porzellanrohr entlang entstehen.

Dieser Apparat wurde in flüssiges Bitumen gesetzt, wobei die Luft durch die Entlüftungslöcher entweichen konnte. Danach wurde auf die gewünschte Temperatur abgekühlt.

Die Feldstärke zwischen den Zylindern C und D, deren Abstand voneinander 3 mm beträgt, betrug bei unseren Versuchen stets etwa 20 kV eff./cm.

Aus diesen Messungen erhält man:

1. den Verlustwinkel, dessen Tangens das Verhältnis zwischen energieverbrauchendem Strom (dielektrischer Verluststrom + Leitungsstrom) und Blindstrom angibt;
2. die Kapazität des mit Bitumen gefüllten Kondensators (~100 cm). Dadurch, daß man auch die Kapazität des

mit Luft gefüllten Kondensators mißt, wird die Dielektrizitätskonstante als Quotient dieser beiden Kapazitäten gefunden.

Der auf diese Weise gefundene Verlustwinkel ist kein direktes Maß für die durch Hysteresis verursachten Verluste, da der gemessene Winkel auch durch Ohmsche Leitung beeinflusst wird.

Da der durch Ohmsche Leitung verursachte Teil des Verlustwinkels auf andere Weise von der Frequenz abhängig ist als der durch Hysteresis verursachte Teil, ist es erwünscht, die beiden Teile zu trennen. Die Trennung erfolgt derart, daß die Hysteresisverluste durch einen Winkel ausgedrückt werden (dielektrischer Verlustwinkel) und die Leitungsverluste durch die spezifische Leitfähigkeit. Es war daher erforderlich, die spezifische Leitfähigkeit zu messen (diese Messung ist nachstehend näher beschrieben).

Die Trennung erfolgte auf Grund der folgenden Gleichungen:

$$\text{Hysteresisverlust} \quad (\text{in W}) = \frac{2\pi}{9 \cdot 10^{11}} f U^2 \text{ eff. } C \operatorname{tg} \delta_H \quad (1)^{12)}$$

$$\text{Leitungsverlust} \quad (\text{in W}) = \frac{U^2 \text{ eff.}}{R} \quad (2)$$

In diesen Formeln ist:

f = Frequenz in Hz

U eff. = effektive Spannung in V

C = Kapazität in cm des mit Bitumen gefüllten Kondensators

δ_H = Verlustwinkel, verursacht durch Hysteresis

R = Widerstand in Ohm

Auch den Leitungsverlust kann man durch einen Winkel ausdrücken. Bei Abwesenheit von dielektrischer Hysteresis gilt folgende Formel:

$$\operatorname{tg} \delta_g = \frac{\text{Leitungsstrom}}{\text{Verschiebungsstrom}} = \frac{R}{U \text{ eff. } \cdot 9 \cdot 10^{11}} = \frac{9 \cdot 10^{11}}{R^2 \pi f C} \quad (3)$$

Hierin ist δ_g = durch Ohmsche Leitung verursachter Verlustwinkel.

Aus (2) und (3) folgt:

$$\text{Leitungsverlust} = \frac{2\pi}{9 \cdot 10^{11}} f U^2 \text{ eff. } C \operatorname{tg} \delta_g \quad (4)$$

Da die Verlustwinkel i. allg. klein sind, gilt diese Formel auch annähernd bei Anwesenheit von Hysteresis und ist

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} = \text{annähernd } \operatorname{tg} \delta_H + \operatorname{tg} \delta_g.$$

Nach Formel (1) und (4) beträgt also der Gesamtverlust

$$= \frac{2\pi}{9 \cdot 10^{11}} f U^2 \text{ eff. } C \operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} \quad (5)$$

$\delta_{\text{ges.}}$, der Gesamtverlustwinkel, ist der bei den Messungen gefundene Winkel. Wenn gleichzeitig der Widerstand gemessen wird, ist auch $\operatorname{tg} \delta_g$ bekannt [aus (3)], so daß $\operatorname{tg} \delta_H$ wie folgt berechnet werden kann:

$$\operatorname{tg} \delta_H = \operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} - \operatorname{tg} \delta_g = \operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} - \frac{9 \cdot 10^{11}}{R^2 \pi f C}$$

Da die spezifische Leitfähigkeit $= \frac{1}{4\pi C \operatorname{Co} R}$

(Co = Kapazität des mit Luft gefüllten Kondensators und C = 0,1; ϵ = Dielektrizitätskonstante),

ergibt sich für

$$\operatorname{tg} \delta_H = \operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} - \frac{18 \cdot 10^{11} \kappa}{f \epsilon} \quad (6)$$

(κ = spezifische Leitfähigkeit).

Zur Erläuterung geben wir nachstehend ein Beispiel für die Berechnung der $\operatorname{tg} \delta_H$ eines Destillationsbitumens bei 90° (Nr. 3 von Tab. 6).

$$\begin{aligned} \text{Gemessen: } \operatorname{tg} \delta_{\text{ges.}} &= 0,025 \\ \kappa &= 5,8 \cdot 10^{-13} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} \\ f &= 50 \\ \epsilon &= 2,88 \end{aligned}$$

Nach Formel (6) erhält man also:

$$\operatorname{tg} \delta_H = 0,025 - 0,007 = 0,018.$$

¹²⁾ Die Anwesenheit des Faktors $9 \cdot 10^{11}$ erklärt sich aus der Tatsache, daß die Kapazität nicht, wie die anderen Größen, in elektromagnetischer Einheit, sondern in elektrostatischer Einheit ausgedrückt ist. Die elektromagnetische Einheit der Kapazität (Farad) = $9 \cdot 10^{11}$ elektrostatische Einheiten (cm).

¹¹⁾ Messungen ausgeführt von G. W. Nederbragt.

Der Hysteresisverlust, ausgedrückt in Watt, ist aus (1) zu berechnen; dabei wird die Spannung U in Volt und die Kapazität C in Zentimeter ausgedrückt.

Bei dem vorgenannten Bitumen erhält man also bei 90° bei einer Spannung von 20000 V und einer Kapazität des Kondensators von 100 cm (Luftkapazität) einen Hysteresisverlust = $\frac{2\pi}{9 \cdot 10^{11}} \cdot 50 \cdot 20000^2 \cdot 100 \cdot 2,88 \cdot 0,018 \text{ W} = 0,72 \text{ W}$ und einen Leitungsverlust [nach Formel (2) oder (4)] = 0,28 W.

winkels. Wie aus den in Tab. 6 angegebenen Werten hervorgeht, nimmt die Dielektrizitätskonstante, vor allem in dem Temperaturbereich von 20–50°, mit steigender Temperatur zu. Diese Zunahme, die mit dem Maximum des Verlustwinkels in enger Beziehung steht, ist ohne praktische Bedeutung.

Die Dielektrizitätskonstante der verschiedenen Bitumina liegt bei den verschiedenen Temperaturen zwischen 2,5 und 3,3.

Tabelle 6. Verlustwinkel, Dielektrizitätskonstante und spezifische Leitfähigkeit von Bitumen bei verschiedenen Temperaturen.

| Bitumen | Temp. °C | Dest. Bitumen I | | | Dest. Bitumen II | | Gehl. Bitumen II | | | Bitumen aus geacktem Rückstand | | Hellfarbiges Bitumen |
|---|----------|-----------------|------|------|------------------|--------|------------------|--------|------|--------------------------------|-------|----------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Penetration bei 25° | | 175 | 23 | 11 | 25 | 19 1/2 | 38 | 22 1/2 | 11 | 19 | 1 1/2 | 15 |
| Erweichungspunkt R. u. K. °C | | 39 1/2 | 64 | 86 | 65 | 67 1/2 | 80 | 77 | 129 | 58 | 74 | 55 |
| *) Tangens der Gesamtverlustwinkel $\times 100$ (Hysteresisverluste + Leitungsverluste) | 5 | 2,0 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 1,4 | 1,7 | 1,7 | — | 1,2 | — | 0,2 |
| | 20 | 2,1 | 1,9 | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 1,4 | 2,3 | 1,0 | 1,5 |
| | 35 | 2,0 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 2,3 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 2,6 | 1,8 | 3,3 |
| | 50 | 2,0 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 2,3 | 1,5 | 1,7 | 1,3 | 2,2 | 2,1 | 2,5 |
| | 65 | ~ 9,0 | 2,1 | 1,5 | 2,2 | 2,4 | 2,3 | 1,9 | — | 2,9 | — | 1,0 |
| | 80 | — | 3,7 | 1,7 | 4,6 | 4,1 | 5,1 | 2,9 | — | 9,9 | — | 2,4 |
| | 100 | — | 7,8 | 2,5 | — | 7,2 | 8,3 | 4,5 | — | — | — | 5,6 |
| Tangens der Hysteresisverlustwinkel $\times 100$ (nur für Verluste verursacht durch dielektrische Hysteresis) | 5 | 2,0 | 1,4 | 0,7 | 1,2 | 1,4 | 1,7 | 1,7 | — | 1,2 | — | 0,2 |
| | 20 | 2,1 | 1,9 | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 1,4 | 2,3 | 1,0 | 1,5 |
| | 35 | 1,9 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 2,3 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 2,6 | 1,8 | 3,3 |
| | 50 | 2,0 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 2,2 | 1,4 | 1,7 | 1,3 | 2,1 | 2,1 | 2,5 |
| | 65 | ~ 2,6 | 1,8 | 1,5 | 1,8 | 2,1 | 1,9 | 1,8 | — | 1,7 | — | 0,6 |
| | 80 | — | 2,0 | 1,5 | 2,5 | 2,8 | 3,1 | 2,3 | — | 2,8 | — | 0,2 |
| | 100 | — | 3,1 | 1,8 | — | 3,2 | 4,0 | 3,0 | — | — | — | 0,4 |
| Dielektrizitätskonstante | 5 | 2,66 | 2,63 | 2,62 | 2,66 | 2,72 | 2,73 | 2,74 | — | 2,92 | — | 2,60 |
| | 20 | 2,76 | 2,69 | 2,60 | 2,78 | 2,78 | 2,79 | 2,83 | 2,45 | 2,99 | 3,01 | 2,64 |
| | 35 | 2,81 | 2,76 | 2,76 | 2,86 | 2,89 | 2,82 | 2,90 | 2,49 | 3,16 | 3,09 | 2,75 |
| | 50 | 2,84 | 2,81 | 2,82 | 2,90 | 2,95 | 2,84 | 2,96 | 2,52 | 3,27 | 3,20 | 2,90 |
| | 65 | 2,87 | 2,85 | 2,80 | 2,92 | 3,00 | 2,80 | 2,87 | — | 3,50 | — | 2,91 |
| | 80 | — | 2,88 | 2,87 | 2,94 | 3,08 | 2,90 | 2,99 | — | 3,50 | — | 2,87 |
| | 100 | — | 2,90 | 2,88 | — | 3,06 | — | 3,01 | — | — | — | 2,84 |
| Spezifische Leitfähigkeit $\times 10^{-12} \text{ (} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \text{)}$ | 35 | 1,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 0,12 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| | 50 | 7 | 0,4 | <0,1 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,11 | <0,1 | 0,7 | <0,1 | 0,4 |
| | 65 | 50 | 2,6 | 0,3 | 2,9 | 2,4 | 3,6 | 0,7 | — | 11 | — | 2,9 |
| | 80 | — | 14 | 1,9 | 17 | 11 | 16 | 5,0 | — | 70 | — | 18 |
| | 90 | — | 38 | 5,8 | 50 | 34 | 35 | 18 | — | — | — | 41 |
| | 100 | — | — | 16 | — | — | — | — | — | — | — | — |

*) In der Technik wird gewöhnlich dieser Gesamtverlustwinkel angegeben; dies ist jedoch insofern ein Nachteil, als der Teil des Verlustwinkels, der sich auf die Leitungsverluste bezieht, in ganz anderer Weise von der Frequenz abhängig ist, als der Teil, der sich auf die Hysteresisverluste bezieht.

Der Gesamtverlust beträgt 1 W. Bei Temperaturen unter 70° weist keines der untersuchten Bitumina einen höheren Verlust auf (vgl. Tab. 6). Wenn die Platten 1 cm voneinander entfernt sind, würden die Verluste, selbst wenn keine Wärmeübertragung auf die Umgebung stattfände, bei 20000 V Spannung nur eine Temperaturerhöhung des Bitumens von 1 1/2° pro h verursachen. Die Verluste sind daher bei Anwendungen mit Wechselspannung von niedriger Frequenz von keinerlei Bedeutung.

Aus den Messungen geht ferner hervor, daß bei den meisten der untersuchten Bitumina $\text{tg} \delta_H$ und daher auch der Hysteresisverlust als Funktion der Temperatur zwischen 20 und 40° durch ein Maximum geht. Bei höheren Temperaturen nehmen die Hysteresisverluste gewöhnlich wieder zu. Die Leitungsverluste, die bei Zimmertemperatur vernachlässigt werden können, nehmen jedoch mit steigender Temperatur in hohem Maße zu, so daß bereits bei Temperaturen zwischen 70 und 100° (je nach der Konsistenz des Bitumens) die Leitungsverluste größer sind als die Hysteresisverluste.

Bei höheren Frequenzen des Wechselstroms wird aber der Hysteresisverlust stets bedeutend größer als der Leitungsverlust, auch bei höheren Temperaturen.

C. Dielektrizitätskonstante (Elektrisierungszahl)¹³⁾.

Die Dielektrizitätskonstante erhält man, wie bereits erwähnt, gleichfalls beim Messen des dielektrischen Verlust-

D. Spezifische elektrische Leitfähigkeit¹³⁾.

Die Leitfähigkeit wurde ebenfalls mit dem in Abb. 4 dargestellten Apparat bestimmt, u. zw. unter Verwendung von Gleichstrom. Aus der beim Messen der Dielektrizitätskonstante bekanntgewordenen dielektrischen Kapazität des Kondensators läßt sich auch die Widerstandskapazität des Kondensators ableiten:

$$(\text{Widerstandskapazität} = \frac{1}{4\pi \cdot \text{dielektrische Kapazität (in cm)}})$$

Die Widerstandskapazität ist eine Apparatkonstante, die dem Produkt aus dem gemessenen Widerstand und der spezifischen Leitfähigkeit gleich ist. Aus der Widerstandskapazität und dem gemessenen Widerstand konnte also die spezifische Leitfähigkeit berechnet werden.

Die Feldstärke betrug bei den Messungen etwa 20 kV/cm.

Die spezifische Leitfähigkeit (s. Tab. 6) nimmt bei steigender Temperatur stark zu und ist i. allg. um so höher, je weicher das Bitumen ist; sie ist etwa proportional dem Quadrat der Penetration bei einer bestimmten Temperatur. Da R. N. J. Saal¹⁴⁾ als ungefähren Wert für η gefunden hat:

$$\eta = \frac{c}{\text{pen}^2}$$

η = Viskosität; pen = Penetration

(diese Formel gilt genau genommen nur für Bitumina, die sich wie rein viscose Flüssigkeiten verhalten), bedeutet dies,

¹³⁾ Messungen ausgeführt von G. W. Nederbragt.

¹⁴⁾ R. N. J. Saal, J. Instn. Petrol. Technologists 19, 176 [1933]; World Petr. Congress, London 1933, S. 515.

daß die spezifische Leitfähigkeit etwa proportional ist der Viskosität bei einer bestimmten Temperatur; dies ist auch auf Grund theoretischer Erwägungen zu erwarten.

Bei Bitumina, die härter sind als Pen/25° = 40 (d. h. bei Destillationsbitumina: Erwp. R. u. K. höher als etwa 55°), ist z. B. die spezifische Leitfähigkeit bei 20° = <10⁻¹⁵, bei 50° = <7·10⁻¹⁴. Das weichste der untersuchten Bitumina (pen. 175) hat den niedrigsten Wert, nämlich etwa 1,6·10⁻¹⁴ bei 20° und 7·10⁻¹³ bei 50°.

Oberflächenspannung und gesamte Oberflächenenergie.

R. N. J. Saal maß die Oberflächenspannung verschiedener Bitumina mit Hilfe des Apparates von du Nouy (in Wasserstoffatmosphäre), u. zw. bei so hohen Temperaturen, daß das Bitumen genügend flüssig war, um diese Messungen vornehmen zu können¹⁵⁾. Gemessen wird die Kraft, die erforderlich ist, um einen Metallring von bekanntem Durchmesser aus einem Bitumen herauszuziehen. Der dabei erhaltene Wert muß, mit Rücksicht auf die eigenartige Form des Flüssigkeitsfilmes, der sich beim Entfernen des Ringes bildet, korrigiert werden.

Da es noch keine Methode gibt, die es ermöglicht, die Oberflächenspannung von Bitumen bei Zimmertemperatur auf zuverlässige Weise zu bestimmen, mußte die Oberflächenspannung bei 25° durch Extrapolation bestimmt werden.

Die Gesamtoberflächenenergie W_s wird aus der folgenden Gleichung berechnet:

$$W_s = \gamma - T \frac{d\gamma}{dT}$$

(W_s = Gesamtoberflächenenergie, γ = Oberflächenspannung, T = absolute Temperatur)

Tab. 7 gibt eine Übersicht über die Oberflächenspannung bei verschiedenen Temperaturen und über die Gesamtoberflächenenergie bei verschiedenen Arten Bitumen. Die Genauigkeit der durch Messen erhaltenen Werte der Oberflächenspannung beträgt etwa $\pm 0,5$.

Der Unterschied zwischen den durch lineare Extrapolation erhaltenen und den wahren Werten wird nur sehr gering sein, da der Wert für die Gesamtoberflächenenergie bei einer auch nur einigermaßen erwähnenswerten Abweichung vom linearen Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Temperatur außerhalb der Grenzen von 50—70 erg/cm² fallen würde, zwischen denen die Gesamtoberflächenenergie aller Kohlenwasserstoffe liegt.

Tabelle 7. Oberflächenspannung und Gesamtoberflächenenergie von Bitumen.

| Bitumen | Pen. bei 25° | Erweichungspunkt R. u. K. | Oberflächenspannung in dyn./cm bei | | | | Gesamtoberflächenenergie erg/cm ² |
|----------------------|--------------|---------------------------|------------------------------------|------|------|------------------------------------|--|
| | | | 150° | 120° | 100° | 25° (durch Extrapolation erhalten) | |
| Dest. Bitumen I .. | 200 | 30 | 26,0 | 27,7 | 28,8 | 33,0 | 50 |
| Dest. Bitumen II .. | 190 | 42 | 25,5 | — | 28,7 | 33,5 | 51 |
| Dest. Bitumen III .. | 50 | 58 | 24,2 | 28,1 | 29,4 | 34,2 | 52 |
| Gelb. Bitumen II .. | 190 | — | 24,8 | — | 28,1 | 33,0 | 50 |
| Gelb. Bitumen III .. | 34 | 85 | 24,1 | 20,1 | — | 32,1 | 52 |
| Dest. Bitumen III .. | 230 | 33 | 20,0 | 28,8 | 30,0 | 34,4 | 51 |

Die von Nellensteyn¹⁶⁾ bei höheren Temperaturen (über 140°) gefundenen Werte, bestimmt nach der Jägerschen Blasendruckmethode, stimmen mit den von uns erhaltenen überein.

Wasserdampfdurchlässigkeit.

Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist von Bedeutung für Werkstoffe, die als Isoliermaterial in der Elektrotechnik Verwendung finden sollen. Messungen zur Ermittlung dieser Größe an einer größeren Anzahl von Stoffen, dar-

unter auch Bitumen, sind von Taylor¹⁷⁾ und Badum¹⁸⁾ durchgeführt worden. Bei diesen Messungen wurde davon ausgegangen, daß die Diffusion des Wasserdampfes nach dem Fickschen Diffusionsgesetz verläuft, das in folgender Formel dargestellt ist:

$$N = \frac{DA}{x} (p_1 - p_2)$$

wobei N die Menge Wasser angibt, die in der Zeit t durch einen Durchschnitt mit einer Oberfläche A in der Richtung von x diffundiert, wenn $p_1 - p_2$ = der Unterschied im Dampfdruck des Wassers ist.

Für Materialien, die praktisch kein Wasser aufnehmen, (wie z. B. Polystyrol) gilt dieses Gesetz ohne weiteres, dagegen braucht es für Stoffe, die Wasser absorbieren, wie folgende Überlegungen zeigen, nicht gültig zu sein.

In den meisten Fällen, in denen eine Wasserabsorption stattfindet, geht anfänglich weniger Wasser durch den Werkstoff als im Gleichgewichtszustand. Da die oben erwähnten Versuche unter Bedingungen durchgeführt wurden, bei denen sich praktisch ein Gleichgewicht eingestellt hatte, war die Diffusionsgeschwindigkeit bei einer bestimmten Schichtdicke und bei bestimmten Dampfdrucken konstant. Im allg. hängt aber die Diffusionsgeschwindigkeit bei wasserabsorbierenden Stoffen auch im Gleichgewichtszustand von der Höhe der Dampfdrucke, der Dampfdruckdifferenz und von der Schichtdicke des Materials ab. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Diffusionsgeschwindigkeit abhängig ist von der Menge des absorbierten Wassers und seiner Verteilung, die ihrerseits wiederum von der Höhe der Dampfdruckdifferenz und der Schichtdicke bestimmt werden.

Tabelle 8. Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener organischer Werkstoffe, u. a. von Bitumen.

| Werkstoff | Temp. | Dicke d. Materials ~ cm | Dampfdruck $p_1 - p_2$ in mm Hg | Diffusionskonstante D in g·h ⁻¹ ·cm ⁻² mm Hg | |
|--|-------|-------------------------|---------------------------------|--|--------|
| Paraffin | 21,1 | 0,05 | 18,8—0 | 0,05·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Thiokol | 21,1 | 0,08 | 18,8—0 | 0,22·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Igellit POU | 25,0 | — | 23,8—0 | 0,8·10 ⁻⁸ | Badum |
| Igellit PO | 25,0 | — | 23,8—0 | 1,1·10 ⁻⁸ | Badum |
| Bitumen-Vergußmassen | 25,0 | 0,08 | 23,8—0 | 1,15·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Bitumen | 25,0 | — | 23,8—0 | 1,4·10 ⁻⁸ | Badum |
| Cellophan „wetterfest“ | 25,0 | — | 23,8—0 | 1,5·10 ⁻⁸ | Badum |
| Guttapercha | 25,0 | 0,03 | 23,8—0 | 1,48·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Guttapercha | 25,0 | — | 23,8—0 | 1,5·10 ⁻⁸ | Badum |
| Ebonit | 25,0 | — | 23,8—0 | 1,5·10 ⁻⁸ | Badum |
| Ebonit | 25,0 | 0,05 | 23,8—0 | 1,51·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Balata | 25,0 | 0,04 | 23,8—0 | 1,80·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Paragutta | 25,0 | 0,05 | 23,8—0 | 1,80·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Styrolflex | 25,0 | — | 23,8—0 | 2,7·10 ⁻⁸ | Badum |
| Polystyrol | 25,0 | — | 23,8—0 | 2,7·10 ⁻⁸ | Badum |
| Polystyrol | 21,1 | 0,1 | 18,8—0 | 3,9·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Bakelit, gegossen | 25,0 | 0,05 | 23,8—0 | 4,7·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Phenolfiber | 25,0 | 0,08 | 23,8—0 | 5,0·10 ⁻⁸ | Taylor |
| Kautschuk, vulkanisiert, ohne Füllstoffe | 25,0 | — | 23,8—0 | 8·10 ⁻⁸ | Badum |
| Benzylcellulose | 25,0 | — | 23,8—0 | 8·10 ⁻⁸ | Badum |
| Perduren, je nach Mischung .. | 25,0 | — | 23,8—0 | 2·11 ⁻⁸ | Badum |
| Buna S, vulkanisiert, ohne Füllstoffe | 25,0 | — | 23,8—0 | 11·11 ⁻⁸ | Badum |
| Stabul (Polyacrylsäureester) .. | 25,0 | — | 23,8—0 | 16·11 ⁻⁸ | Badum |
| Igellit POU mit Weichmacher .. | 25,0 | — | 23,8—0 | 20·11 ⁻⁸ | Badum |
| Igellit MP mit Weichmacher .. | 25,0 | — | 23,8—0 | — | — |
| Cellulosetriacetat | 25,0 | — | 23,8—0 | 84·11 ⁻⁸ | Badum |
| Celluloseacetat | 25,0 | — | 23,8—0 | 160·11 ⁻⁸ | Badum |
| Cellophan | 25,0 | — | 23,8—0 | 200·11 ⁻⁸ | Badum |
| Cellulosetriacetat mit Weichmacher | 25,0 | — | 23,8—0 | 326·11 ⁻⁸ | Badum |

Die bei den obengenannten Arbeiten erhaltenen Werte, von denen einige in Tab. 8 zusammengestellt sind, sind daher, wie von den Autoren¹⁷⁾ angegeben, für die wasserabsorbierenden Materialien nur annähernd als Materialkonstanten zu betrachten; sie sind also nur unter den angegebenen Bedingungen genau gültig.

Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist in der Tabelle ausgedrückt durch die Diffusionskonstante D ; diese stellt dar die Menge Wasserdampf in g, die in 1 h bei einem Dampfdruckunterschied von 1 mm Hg durch eine 1 cm dicke Schicht mit einer Oberfläche von 1 cm² diffundiert, wenn das Ficksche Gesetz gelten würde. [A. 77.]

¹⁵⁾ R. N. J. Saal, Oel u. Kohle 2, 367 [1934].

¹⁶⁾ Nellensteyn u. a., Kolloid-Beih. 81, 434 [1930].

¹⁷⁾ R. L. Taylor, D. B. Herrmann u. A. R. Kemp, Ind. Engng. Chem. 28, 1255 [1936]. ¹⁸⁾ E. Badum, Kautschuk 12, 231 [1938].