

**Das elektrische und dielektrische Verhalten alternativer
Isolierungen zum Clophen-impregnierten Dielektrikum**

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1 Beschreibung der Isolierflüssigkeiten
- 2 Untersuchungen an den Isolierflüssigkeiten
 - 2.1 Aufbereitung
 - 2.2 Bestimmung der elektrischen und dielektrischen Eigenschaften
 - 2.2.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen
 - 2.2.2 Vorbereitung und Durchführung der Messungen
 - 2.3 Meßergebnisse und Diskussion
 - 2.3.1 Verlustfaktorverhalten der Silikon- und Esterflüssigkeit
 - 2.3.2 Einfluß von Temperatur und Wassergehalt auf die elektrische Festigkeit der Silikon- und Esterflüssigkeit
 - 2.3.3 Einfluß einer natürlichen Alterung auf das Durchschlag- und Verlustfaktorverhalten der Isolierflüssigkeiten
- 3 Untersuchungen an flüssigkeitsimprägnierten Papierdielektrika
 - 3.1 Bestimmung der elektrischen Festigkeit
 - 3.1.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen
 - 3.1.2 Durchführung der Messungen
 - 3.2 Meßergebnisse und Diskussion

Zusammenfassung

Bildteil

Einleitung

Nach der im Jahre 1984 erfolgten Einstellung der PCB-Produktion in der Bundesrepublik Deutschland und einer Reihe freiwilliger Vereinbarungen zwischen Isolierflüssigkeitsproduzenten, Transformatorenherstellern und Transformatorenbetreibern, infolge derer keine weiteren PCB-gefüllten Transformatoren mehr hergestellt, verkauft und installiert wurden, war die Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Isolierflüssigkeiten bei Transformatoren darauf ausgerichtet, PCB-Ersatzflüssigkeiten zu finden, die

- gute elektrische Eigenschaften und Wärmeübertragungseigenschaften besitzen,
- chemisch und thermisch stabil,
- schwer entflammbar,
- verträglich mit anderen Transformatorbaustoffen,
- umweltfreundlich sowie
- preisgünstig verfügbar sind.

In diesem Zusammenhang haben wir im Rahmen umfangreicher Untersuchungen die relevanten elektrischen und dielektrischen Eigenschaften einiger Isolierflüssigkeiten ermittelt, welche bezüglich der Kriterien "Umweltfreundlichkeit" und "Entflammbarkeit" am geeignetsten erscheinen.

1 Beschreibung der Isolierflüssigkeiten

Im Rahmen dieses Vortrages möchte ich auf zwei Isolierflüssigkeiten eingehen, welche für den Einsatz in Verteilungstransformatoren besonders geeignet erscheinen. Hierbei handelt es sich um eine Silikonflüssigkeit auf der Basis linearer Polydimethylsiloxane (kin. Viskosität bei 25 °C: 50 mm²/s) und eine Esterflüssigkeit auf der Basis des Pentaerythritoltetraesters mit dem Handelsnamen MIDEL 7131. Die wichtigsten Daten dieser Isolierflüssigkeiten sind in Tabelle 1 denjenigen von Clophen und Mineralöl gegenübergestellt.

In beiden Flüssigkeiten kann Wasser in drei unterschiedlichen Zuständen vorhanden sein, und zwar gelöst, emulgiert und grob dispergiert, wobei die Grenzen zwischen Emulsion und Dispersion nicht eindeutig festliegen. Darüber hinaus sind beide Flüssigkeiten in der Lage, durch Anlagerung von H₂O-Molekülen an den in ihnen enthaltenen Sauerstoff Wasser zusätzlich chemisch zu assoziieren. Während im stabilen Lösungszustand die Flüssigkeiten durchsichtig - klar erscheinen, ist bei Überschreiten des Lösungsvermögens eine mehr oder weniger starke Flüssigkeitstrübung festzustellen. Dieser instabile Zustand der Emulsion wird durch das Ausfallen des über den - bei der jeweiligen Flüssigkeitstemperatur herrschenden - Sättigungszustand hinaus vorhandenen Wassers gekennzeichnet, das sich dann aufgrund seines größeren spezifischen Gewichts am Boden absetzt. Über den die Grenzen zwischen Lösung und Emulsion charakterisierten Trübungspunkt kann demnach das Wasserlösungsvermögen der Silikon- und Esterflüssigkeit hinreichend genau bestimmt werden.

Wie in Bild 1 eingezeichnet, läßt sich das Wasserlösungsvermögen beider Flüssigkeiten im untersuchten Temperaturbereich von 10 °C bis 100 °C in einem einfach logarithmischen Maßstab über dem Reziprokwert der absoluten Temperatur als Gerade darstellen. Dabei ist die Sättigungslöslichkeit der Esterflüssigkeit mit etwa 2700 ppm bei 20 °C und 7200 ppm bei 100 °C wesentlich größer als die der Silikonflüssigkeit mit ca. 200 ppm bzw. 1100 ppm bei 20 °C und 100 °C.

	Esterflüssigkeit	Silikonflüssigkeit	Mineralöl	Askarel
Elektrische Eigenschaften				
Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta (\cdot 10^{-4})$ bei 25 °C	10	0,9 ⁽²⁾	<10	30
Dielektrizitätszahl ϵ (25 °C, 50 Hz)	3,3	2,7 ⁽²⁾	2,2	4,4
Durchschlagsspannung nach IEC 156 [kV]	55	50, ⁽³⁾	80	50
Brandverhalten bestimmende Eigenschaften				
Brennpunkt [°C] (ASTM D 92)	310	>335, ⁽²⁾	150-175	—
Flammpunkt [°C] (ASTM D 92)	257	>300, ⁽²⁾	135-145	200
Verbrennungswärme [kJ/kg · 10 ³]	38,8	32,2 ⁽²⁾		12,8
Wärmeübertragung				
Wärmeleitfähigkeit [W/m K]	0,158	0,151 ⁽²⁾		0,105
Kinematische Viskosität bei 25 °C [mm ² /s]	58	50, ⁽²⁾	20	12
Allgemeine Eigenschaften				
Pourpoint [°C]	-50	-53, ⁽²⁾	-40	-40
Toxizität LD ₅₀ /LC ₅₀ ⁽¹⁾	bestanden	bestanden	bestanden	nicht bestanden
Spez. Gewicht bei 25 °C [kg/m ³]	960	960, ⁽²⁾	900	1390

(1) Prüfanordnung des Rates 79/831 EWG vom 18.9.1979.

(2) Die Zahlenwerte stellen Durchschnittswerte der Daten verschiedener Hersteller dar.

(3) Geänderte Prüfanordnung

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Kenndaten einiger Isolierflüssigkeiten für Transformatoren

2 Untersuchungen an den Isolierflüssigkeiten

Bei der Untersuchung der reinen Flüssigkeit stand zunächst die Klärung der Frage nach geeigneten und notwendigen Aufbereitungsprozessen im Vordergrund. Darüber hinaus wurden die elektrischen und dielektrischen Eigenschaften beider Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit von der relativen Feuchte und von der Temperatur ermittelt. Weiterhin wurde der Einfluß einer beschleunigten Alterung auf die elektrischen Eigenschaften der Flüssigkeiten untersucht.

2.1 Aufbereitung

Zur Trocknung und Entgasung der Silikon- und Esterflüssigkeit wurde jeweils eine zweistufige Füllkörperkolonne verwendet (Bild 2). Der in der zweiten Stufe erreichbare

Enddruck beträgt $5 \cdot 10^{-2}$ hPa. Durch Variation der Durchflußgeschwindigkeit, des Entgasungsdruckes und der Temperatur können in den Isolierflüssigkeitsproben unterschiedliche Wassergehalte eingestellt werden.

Ausgehend von einem Feuchtigkeitsgehalt im Anlieferungszustand, der bei der Silikonflüssigkeit etwa 55 ppm und bei der Esterflüssigkeit ca. 80 ppm beträgt, kann der Restwassergehalt beider Flüssigkeiten bis auf 10-20 ppm reduziert werden. Da sowohl die Silikon- als auch die Esterflüssigkeit im getrockneten und entgasten Zustand stark hygroskopisch ist, muß eine erneute Aufnahme von Feuchtigkeit durch Kontakt mit atmosphärischer Luft nach der Aufbereitung durch entsprechende Trockenvorlagen oder Lagerung unter Vakuum vermieden werden.

Höhere Wassergehalte als im Anlieferungszustand wurden in den Flüssigkeiten durch Zugabe von destilliertem Wasser und anschließender Lagerung im Wärmeschrank bis zur Lösung des Wassers eingestellt.

2.2 Bestimmung der elektrischen und dielektrischen Eigenschaften

2.2.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Die Messung der Durchschlagspannung und des Verlustfaktors $\tan \delta$ erfolgte in einem zylindrischen Doppelmantelgefäß (Bild 3). Um das zur vollständigen Füllung des Gefäßes notwendige Flüssigkeitsvolumen auf ca. 500 cm^3 zu reduzieren, befinden sich zwei mit SF_6 gefüllte Glasverdrängungskörper auf den Elektrodenstempeln. Durch einen geregelten Thermostatenkreislauf wird der Außenmantel des Prüfgefäßes beheizt und die Flüssigkeitstemperatur zwischen den Elektroden mittels eines Temperaturfühlers kontrolliert.

Die elektrische Festigkeit der Isolierflüssigkeiten wurde mit Kugelkalottenelektroden nach VDE bestimmt mit einem Elektrodenabstand von 2,5 mm. Durch einen Austausch der Kugelkalottenelektroden gegen geeignet dimensionierte Rogowski-Elektroden konnte in diesem Prüfgefäß ebenfalls der dielektrische Verlustfaktor ermittelt werden.

Der prinzipielle Schaltungsaufbau für Durchschlaguntersuchungen an Isolierflüssigkeiten ist in Bild 4 dargestellt. Für Durchschlaguntersuchungen an der Silikonflüssigkeit erfolgte eine Modifizierung der Prüfanordnung, indem die Lichtbogenenergie durch Begrenzung der Höhe und Dauer des Kurzschlußstromes im Falle eines Durchschlags soweit reduziert wird, daß nachfolgende Meßwerte durch Zersetzungsprodukte nicht mehr beeinflußt werden. In Bild 5 ist der hierfür entwickelte Schaltungsaufbau schematisch dargestellt. Er zeichnet sich durch einen in Abhängigkeit von der Spannung veränderbaren Vorwiderstand im Primärkreis aus, der den hochspannungsseitigen Kurzschlußstrom der gesamten Prüfeinrichtung auf maximal 18 mA begrenzt. Mit der elektronischen Abschaltvorrichtung wird über den Ankopplungsvierpol der sekundärseitig fließende Strom gemessen. Übersteigt dieser auch nur kurzzeitig einen Wert von 5 mA, erfolgt innerhalb von maximal 10 ms (bei induktiver Phasenverschiebung um 90°), die Abschaltung der Primärspannung des Prüftransformators mit Hilfe eines Thyristorschalters.

2.2.2 Durchführung der Messungen

Zur Messung der Durchschlagfestigkeit der Silikon- und Esterflüssigkeit bei verschiedenen Temperaturen und Wassergehalten wurden die jeweiligen Proben im quasihomogenen Feld der VDE-Kugelkalottenanordnung durch eine mit 2 kV/s ansteigende 50-Hz-Wechselspannung bis zum Durchschlag beansprucht, wobei der zeitliche Abstand zwischen zwei Einzelmessungen 5 min. betrug. In dieser Zeit werden eventuell

entstandene feste Zersetzungsprodukte mit Hilfe eines Rührers aus dem Elektrodenzwischenraum entfernt und gasförmige Zersetzungsprodukte in der Flüssigkeit wieder gelöst.

Im Falle der Silikonflüssigkeit tritt bei der gemäß den VDE-Richtlinien mit dem in Bild 4 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführten Reihenmessungen von 6 Einzelmessungen das Problem auf, daß sich beim elektrischen Durchschlag gelatinöse kreuzvernetzte polymere Siloxane bilden, welche in der Folgezeit die weitere Durchschlagfestigkeit der Silikonflüssigkeit stark beeinträchtigen, da sie sich zwischen den Elektroden und auf deren Oberfläche ansammeln und dort nicht wieder entfernt werden können. Mit der bereits beschriebenen Modifikation der Durchschlag-Prüfanordnung war es dann auch bei der Silikonflüssigkeit möglich, die Durchschlagsspannung aus einer Reihenmessung von 6 aufeinanderfolgenden Einzelwerten an einer Prüfgefäßfüllung ohne zwischenzeitliche Reinigung der Elektroden und Austausch der Flüssigkeitsprobe zu bestimmen. Vergleichende Untersuchungen, bei denen die Flüssigkeit nach jedem Durchschlag erneuert und die Elektroden gereinigt wurden, ergaben übereinstimmende Ergebnisse. Vor und nach jeder Meßreihe erfolgte die Bestimmung des Wassergehaltes der jeweiligen Flüssigkeitsproben nach der coulometrischen Karl-Fischer-Titrationsmethode.

2.3 Meßergebnisse und Diskussion

2.3.1 Verlustfaktoverhalten der Silikon- und Esterflüssigkeit

Der Verlauf des dielektrischen Verlustfaktors $\tan \delta$ der Silikon- und Esterflüssigkeit über der Temperatur ist in den Bildern 6 und 7 dargestellt. Der für Ionenleitungsmechanismen charakteristische exponentielle Anstieg des Verlustfaktors bei zunehmender Temperatur wird sowohl durch die dann verringerte Viskosität und damit größere Ladungsträgerbeweglichkeit als auch durch die aufgrund stärkerer thermischer Dissoziation wachsende Anzahl von Ladungsträgern verursacht (Van't Hoff'sches Gesetz). Die gegenüber Mineralölen und Askarelen geringere Temperaturabhängigkeit der Viskosität beider Isolierflüssigkeiten führt dabei bei Temperaturen zwischen 0 °C und 120 °C im Bereich von 10 kV/cm bis 60 kV/cm zu nahezu feldstärkeunabhängigen Verlustfaktorwerten. Des weiteren konnte kein Einfluß des Wassergehaltes bis zu Werten von ca. 140 ppm im Falle der Silikonflüssigkeit und unterhalb von 850 ppm bei der Esterflüssigkeit festgestellt werden, so daß für die Festlegung der Trocknungs- und Entgasungsparameter bei einer eventuellen Flüssigkeitsaufbereitung nur die Durchschlagfeldstärke als bestimmende Größe anzusehen ist.

2.3.2 Einfluß von Temperatur und Wassergehalt auf die elektrische Festigkeit der Silikon- und Esterflüssigkeit

Während sich bei Mineralöl und chlorierten Diphenylen die Durchschlagfestigkeit als eine Funktion der relativen Feuchte beschreiben läßt und dadurch alle Durchschlagswerte bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenem absoluten Feuchtigkeitsgehalt in einer gemeinsamen Abhängigkeit darstellen lassen (Bild 8a und b), ist dies sowohl bei Silikon- als auch bei Esterflüssigkeit nicht möglich, wie die Bilder 9 und 10 zeigen.

Vergleicht man die Temperaturabhängigkeit der Durchschlagfeldstärke der Silikonflüssigkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten (Bild 9), so stellt man zunächst eine starke Streuung der einzelnen Meßwerte fest. In grober Näherung läßt sich jedoch sagen, daß die elektrische Festigkeit im Bereich der Wasserlösung mit zunehmender Temperatur bis etwa 60°C ansteigt und anschließend bis 100°C annähernd konstant bleibt. Bei einer Darstellung aller Durchschlagswerte über der relativen Feuchte (Bild

9b) ergibt sich also nicht die eindeutige Abhängigkeit, wie z.B. bei Mineralöl, sondern ein relativ breiter Streubereich zwischen den niedrigsten und den höchsten Werten. Aber allgemein läßt sich auch hier feststellen, daß die Durchschlagfestigkeit umso höher ist, je geringer die relative Feuchte ist.

Ähnlich wie die Silikonflüssigkeit, jedoch mit geringerer Streuung, verhält sich die Esterflüssigkeit. In der Darstellung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Durchschlagfestigkeit kann man ebenfalls eine Unterteilung in drei Bereiche unterschiedlicher Feuchte mit charakteristischen Kurvenverläufen vornehmen: Im Bereich geringer Wassergehalte nimmt die elektrische Festigkeit bei Steigerung der Temperatur von 20°C auf 100°C kontinuierlich zu. Bei höheren, aber bei 20°C immer noch gelösten Wassermengen steigt die Durchschlagfestigkeit der Esterflüssigkeit mit der Temperatur zunächst an und wird dann praktisch unabhängig von der Temperatur. Bei Wassergehalten größer als etwa 620 ppm sinkt dann die Durchschlagfestigkeit auf niedrigere Werte als im Anlieferungszustand (80 ppm). Als weitere Besonderheit ist anzumerken, daß eine Trocknung und Entgasung in der bereits beschriebenen Weise, bei der der Restwassergehalt auf 20 ppm reduziert wird, im Temperaturbereich oberhalb 40°C zu einer gegenüber dem Anlieferungszustand (80 ppm) verminderten Durchschlagfestigkeit führt. Diese verschiedenen, für die Esterflüssigkeit typischen Erscheinungsformen, lassen sich in der Darstellung über die relative Feuchte mit zwei Grenzkurven für den gesamten Temperaturbereich zwischen 20 °C und 140°C zusammenfassen (Bild 10).

Das ungleiche Durchschlagverhalten der untersuchten Isolierflüssigkeiten läßt sich durch die unterschiedlichen Wasserlösungszustände in diesen Flüssigkeiten erklären:

Für die Einleitung eines Durchschlages in Isolierflüssigkeiten sind Stoßionisierungsprozesse in kleinen Gasblasen oder Mikrohohlräumen der Flüssigkeiten verantwortlich, die mit gelösten Fremdgasen (z. B. Wasserdampf) oder leicht flüchtigen Flüssigkeitsbestandteilen gefüllt sind ("Verschleierte Gasentladung"). In den Flüssigkeiten enthaltene Feuchte verringert dabei die elektrische Festigkeit erheblich. Sowohl bei der Silikonflüssigkeit als auch bei der Esterflüssigkeit läßt sich jedoch - im Unterschied zu Mineralöl und PCB - die doppelte Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke von der Temperatur und vom Wassergehalt nicht durch die Abhängigkeit von der relativen Feuchte zusammenfassen. Das Durchschlagverhalten beider Flüssigkeiten wird daher offenbar nicht vorwiegend durch physikalische Lösungsvorgänge des Wassers beeinflusst. Steigende Temperaturen bewirken z. B. eine Festigkeitszunahme der beanspruchten Flüssigkeitsstrecke, da der Aufbau leitfähiger Kanäle durch die bei geringer Viskosität verstärkte Flüssigkeitsströmung behindert wird. Dieser verfestigenden Wirkung steht gleichzeitig der schwächende Einfluß der sinkenden Flüssigkeitsdichte gegenüber.

Die Besonderheiten des elektrischen Verhaltens der Esterflüssigkeit sind möglicherweise auf die in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlichen Assoziationsformen des Wassers an die Estermoleküle und auf die damit verbundene Veränderung ihrer Molekülstruktur zurückzuführen. Da der elektrische Durchschlag von Isolierflüssigkeiten durch Elektronenleitungsprozesse bestimmt wird, hat die Molekülstruktur einen deutlichen Einfluß auf die Höhe der Durchschlagspannung. Elektronen besitzen in Flüssigkeiten mit kugelförmigen Molekülen eine wesentlich höhere Beweglichkeit als in Flüssigkeiten mit langkettigem Molekülaufbau. Es ist daher denkbar, daß die bei höheren Wassergehalten in der Esterflüssigkeit durch intermolekulare Wasserbrücken gebildeten Reihemoleküle die Beweglichkeit der Elektronen einschränken und somit die Durchschlagfestigkeit gegenüber der getrockneten Flüssigkeit mit vorwiegend kugelförmigen Molekülen zunächst erhöht.

2.3.3 Einfluß einer natürlichen Alterung auf das Durchschlag- und Verlustfaktorverhalten der Isolierflüssigkeiten

Zur Untersuchung der Alterungsbeständigkeit der Silikon- und Esterflüssigkeit bei verschärften Alterungsbedingungen (erhöhte Temperatur, Katalysatoren, Sauerstoffangebot) wurden Flüssigkeitsproben über 1000 h in einem offenen Gefäß bei 150 °C unter Zugabe von je etwa 3 g/l Kupfer-, Stahl- und Aluminiumspänen gelagert und anschließend nach Abkühlung auf 20 °C ihre Durchschlagfeldstärke bei 20 °C, 60 °C und 100 °C bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Bild 11 für die Silikon- bzw. Esterflüssigkeit eingezeichnet. Die gealterten Esterflüssigkeitsproben, deren Wassergehalt nach Abkühlung auf 20 °C ca. 1100 ppm betrug, weisen gegenüber thermisch unvorbelasteten Proben mit vergleichbar hohem Wassergehalt keine signifikante Verminderung der elektrischen Festigkeit auf. Demgegenüber ist bei den gealterten Silikonflüssigkeitsproben (ca. 80 ppm) insbesondere bei höheren Temperaturen ein festigkeitsmindernder Einfluß des Alterungsprozesses im Vergleich zu unvorbelasteten Proben zu verzeichnen.

An Silikon- und Esterflüssigkeitsproben, die einer beschleunigten Alterung unterzogen wurden, erfolgten neben den beschriebenen Durchschlagmessungen auch Untersuchungen zur Bestimmung des Temperaturgangs des Verlustfaktors. Die Silikonflüssigkeit erwies sich dabei als sehr alterungsbeständig, da gegenüber unvorbelasteten Flüssigkeitsproben keine Verlustfaktoränderung gemessen werden konnte. Demgegenüber zeigen Esterflüssigkeitsproben nach der Alterungsprüfung einen Anstieg des Verlustfaktors um etwa zwei Größenordnungen (s Bild 12).

3 Untersuchungen an flüssigkeitsimprägnierten Papierdielektrika

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten die Untersuchungen der mit Ester- bzw. Silikonflüssigkeit imprägnierten Papierdielektrika. Sie dienten zur Ermittlung der Auswirkungen der unterschiedlichen spezifischen Eigenschaften der beiden PCB-Substitute auf das elektrische Verhalten der gesamten Transformatorisolierung. Hierbei sollte insbesondere der Einfluß von verschiedenen Temperaturen sowie des Alterungszustandes der Isolierung auf das Durchschlagverhalten des Flüssigkeits-Papier-Mischdielektrikums geklärt werden.

3.1 Bestimmung der elektrischen Festigkeit

3.1.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Die Messung der elektrischen Festigkeit flüssigkeitsimprägnierter Papierproben erfolgte in einem Prüfgefäß, welches den speziellen Anforderungen des Silikon-/Esterflüssigkeits-Papier-Dielektrikums Rechnung trägt. Zur Durchführung der Untersuchungen bei erhöhter Temperatur und unter Ausschluß der Atmosphäre ist das Gefäß evakuierbar und durch Lötpatronen im Heizblock bis auf max. 180 °C beheizbar. Ein Temperaturfühler im Heizblock ermöglicht in Verbindung mit einem hierfür entwickelten Regler die Einhaltung der gewünschten Versuchstemperatur mit einer Genauigkeit von ± 2 °C. Die Papierproben befinden sich im homogenen Feld einer Rogowski-Elektrodenanordnung, die dafür sorgt, daß es im Randbereich des Feldes nicht zu Feldstärkeüberhöhungen kommt. Die Prüfwechselspannung wird über einen Gewindestempel, der gleichzeitig zum Einstellen des Elektrodenabstandes und des Elektrodenanpreßdruckes auf das Papierdielektrikum dient, an die obere Elektrode gelegt und das Meßsignal am Stempel der unteren Elektrode abgenommen. Der Homogenfeldbereich zwischen den Elektroden erstreckt sich bei einem Durchmesser von 4 cm auf eine Fläche der flüssigkeitsgetränkten Papierproben von etwa 12,6 cm². Zur statistischen Absicherung der Meßergebnisse ist die mehrfache Durchführung

einzelner Durchschlagprüfungen erforderlich. Um dies auch im Hinblick auf die Dauerversuche mit Belastungszeiten bis zu 1000 h in vertretbaren Zeiträumen zu ermöglichen, wurden 10 der beschriebenen Prüfgefäße gebaut und zu einem Parallelprüfstand mit gemeinsamer Spannungsversorgung aus einem 100-kV-Isoliermanteltransformator zusammengefaßt.

Für die Vorbelastung imprägnierter Papierprüflinge mit TE war die Entwicklung einer speziellen Elektrodenkonfiguration erforderlich. Bild 13 zeigt den Aufbau einer solchen Elektrodenanordnung. Eine in die obere Elektrode eingebrachte Nadel mit einer hyperboloidförmig geschliffenen Spitze erzeugt eine definierte Feldinhomogenität und begünstigt somit die Entstehung von TE. Eine temperaturbeständige Teflonscheibe hat die Aufgabe, die zwischen den Rogowski-Elektroden eingespannten Papierlagen vor einer mechanischen Schädigung durch die Nadel zu schützen, ohne die Feldüberhöhung an der Nadelspitze zu beeinflussen.

Als Spitzenelektroden dienten 40 mm lange korrosionsbeständige Wolframstifte mit einem Durchmesser von 0,8 mm, die mit einem Öffnungswinkel von 30 ° kegelig zugeschliffen und anschließend in einem Ätzbad elektrolytisch geätzt sind. Die optische Kontrolle der Nadelkontur erfolgte unter einem Mikroskop bei 400-facher Vergrößerung mit Radienschablonen als Vergleichsnorm.

Für die Messung der in den Proben auftretenden Teilentladungen steht ein Prüfaufbau gemäß Bild 14 zur Verfügung. Die Auskopplung der TE aus dem Hochspannungskreis erfolgt mit Hilfe eines Koppelkondensators (Kapazität: 1200 pF) sowie eines geeigneten Ankopplungsvierpols. Dieser leitet die TE-Impulse an ein Meßgerät weiter, welches nach Integration des gemessenen Stromimpulses i_{TE} gemäß

$$q_{TE} = \int i_{TE} dt$$

eine der Ladung q_{TE} proportionale Spannung erzeugt und oszillografisch darstellt. In einem ungeschirmten Versuchsraum ergab sich mit dem hier vorgestellten Meßaufbau eine untere Meßgrenze von ca. 2 pC. Da für die Vorbelastung imprägnierter Mischdielektrika mit TE wesentlich höhere Intensitäten vorgesehen waren, konnte auf eine Abschirmung der Versuchsanordnung verzichtet werden.

3.1.2 Durchführung der Messungen

Als Isolierpapier für die elektrischen Untersuchungen kam ein satiniertes und wärme-stabilisiertes Zellulosepapier (Rohdichte: 0,95-1,0 g/cm³, Temperaturindex: 115 °C) mit einer Dicke von 65 µm zum Einsatz, welches für den Bau von Transformatoren an thermisch hoch belasteten Stellen eingesetzt wird. Zur Probenherstellung wurde aus den angelieferten Papierbahnen eine der Probendicke von 0,65 mm entsprechende Anzahl von 10 Papierlagen aufeinandergeschichtet, zwischen zwei kreisförmige Metallscheiben mit dem Probendurchmesser von 90 mm gespannt und in einer Drehbank abgedreht. Die zur Erzielung guter elektrischer Eigenschaften notwendige Trocknung der Papierproben erfolgte in einem Vakuum-Wärmeschrank über eine Dauer von 5 Tagen bei einem Druck von etwa 5·10⁻² hPa und einer Temperatur von 80 °C. Die nach dem Einbau der Proben in das Versuchsgefäß dort unter gleichen Bedingungen vorgenommene Nachtrocknung diente zur Entfernung der beim Transport erneut aufgenommenen Wassermengen. Nach dem Befüllen der Prüfgefäße mit der jeweils vorher bei 5·10⁻² hPa auf 15 - 20 ppm getrockneten und entgasten Isolierflüssigkeit wurden die Papierproben bei 120 °C über eine Dauer von 5 Tagen unter Vakuum imprägniert.

Die nach Abschluß der Vorbelastung durchgeführte Bestimmung der Durchschlagfestigkeit der Papierprüflinge wurde unter Normaldruck (1013 hPa) im homogenen Feld

der Rogowski-Elektrodenanordnung in Hochfahrversuchen mit einer Spannungssteigerung von 2 kV/s durchgeführt. Als Ergebnisse aus diesen Messungen sind die Mittelwerte der an zehn Prüflingen ermittelten Durchschlagfeldstärken angegeben.

Zur Untersuchung der Alterungsbeständigkeit wurden imprägnierte Papierproben für 1000h einer natürlichen Alterung unterworfen. Die beigegebenen Katalysatoren Aluminium, Kupfer und Eisen (je 3 g/l) lagen in Form von Spänen vor. Die Prüfgefäße waren nicht verschlossen, so daß der in der Umgebungsluft enthaltene Sauerstoff die Reaktionen zwischen dem Mischdielektrikum und den Katalysatoren beschleunigen konnte. Die Vorbelastungstemperatur betrug 150 °C.

Für die Vorbelastung von MIDEL-Aramidpapier-Dielektrika mit Teilentladungen war zunächst die genaue Kenntnis der Abhängigkeit der TE-Einsetzspannung und der Durchschlagspannung vom Radius der Spitzenelektrode erforderlich. Hierfür wurde in Hochfahrttests die Kurzzeitdurchschlagspannung der imprägnierten Papierprüflinge für unterschiedliche Spitzenradien (10 µm, 30 µm und 50 µm) bestimmt. Die Vorbelastung imprägnierter Papierproben sollte bei einer gegenüber der Durchschlagspannung möglichst geringen Spannung erfolgen, um frühzeitigen Ausfällen der Prüflinge vorzubeugen. Aus diesem Grund stellte die Messung der TE-Einsetzspannung ein wichtiges Hilfsmittel zur optimalen Auslegung der Spitzenelektroden dar.

Für die Bestimmung des Einflusses von Teilentladungen auf die elektrische Festigkeit von MIDEL-Aramidpapier-Dielektrika wurden imprägnierte Papierprüflinge in den bereits beschriebenen Prüfgefäßen bei 20 °C mit TE definierter Größe vorbelastet. Die Untersuchungen erfolgten unter Luftabschluß bei unterschiedlichen Vorbelastungszeiten von 1 h, 10 h, 100 h, 250 h, 500 h und 1000 h. Die Bestimmung der elektrischen Festigkeit nach Abschluß der TE-Vorbelastungen wurde nach dem bereits beschriebenen Verfahren durchgeführt.

3.2 Meßergebnisse und Diskussion

Zunächst wurde die Kurzzeitdurchschlagfestigkeit imprägnierter Aramid- und Zellulosepapier-Proben in Abhängigkeit von der Imprägniertemperatur bestimmt. Die Imprägnierdauer betrug hierbei 5 Tage. Umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Imprägnierdauer bei Variation der Temperatur zeigten, daß die Imprägnierung im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 150 °C nach 5 Tagen abgeschlossen ist. Da bei gleichem Wasserdampfpartialdruck das Aufnahmevermögen und die adsorbierter Wassermenge bei der Zellulose um Größenordnungen höher ist als bei den verwendeten Isolierflüssigkeiten, wird der Feuchtigkeitsgehalt des gesamten Mischdielektrikums im wesentlichen nur durch den Trocknungszustand des Papiers bestimmt. (Die Durchschlaguntersuchungen wurden daher nur bei einer Flüssigkeitsfeuchte, d.h. bei Verwendung von getrockneter Ester- bzw. Silikonflüssigkeit zur Imprägnierung der Papierproben, durchgeführt.)

Die Messungen ergaben, daß die bei den reinen Isolierflüssigkeiten festgestellte Temperaturabhängigkeit der Durchschlagfeldstärke bei den imprägnierten Papierprüflingen nicht mehr zu erkennen ist (Bild 15). Im Bereich von 20 °C bis 150 °C streuen die Meßwerte der elektrischen Festigkeit des Mischdielektrikums um den Mittelwert von etwa 58 kV/mm. Die bei reinen Flüssigkeitsproben beobachtete verfestigende Wirkung steigender Temperaturen infolge einer dann verstärkten Flüssigkeitsströmung kann sich bei den flüssigkeitsimprägnierten Papierproben nicht ausbilden, da das Papier die Entstehung einer solchen Strömung stark einschränkt. Die durch die quer zur Feldrichtung geschichteten Papierlagen hervorgerufene Behinderung des Aufbaus leitfähiger Kanäle in der Isolierflüssigkeit ist unabhängig von der Temperatur und führt somit zu nahezu temperaturunabhängigen Festigkeitswerten des Mischdielektrikums.

Bild 16 zeigt die elektrische Festigkeit unterschiedlich vorbelasteter Flüssigkeits-Papier-Dielektrika im Vergleich. Es ist ersichtlich, daß eine 1000-stündige thermische Vorbelastung eine Steigerung der Durchschlagfeldstärke gegenüber unbelasteten Proben bewirkt. Eine kombinierte thermisch-elektrische Vorbelastung führte zu ähnlichen Festigkeitswerten wie nach einer rein thermischen Vorbeanspruchung. Es ist somit ersichtlich, daß eine 1000-stündige Vorbelastung mit einer Feldstärke von 20 kV/mm esterflüssigkeits-imprägnierter Zellulosepapier-Dielektrika nicht negativ beeinflußt. Demgegenüber verringert eine derartige Vorbelastung die elektrische Festigkeit imprägnierter Aramidpapierproben gegenüber rein thermisch vorbelasteten Prüflingen deutlich. So nimmt die Durchschlagfeldstärke bei einem aus Esterflüssigkeit und Aramidpapier bestehenden Mischdielektrikum von 73 kV/mm nach einer 1000-stündigen thermischen Belastung auf 60 kV/mm nach einer 1000-stündigen thermisch-elektrischen Vorbelastung ab.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Alterungsbeständigkeit imprägnierter Papierproben ergaben, daß die Durchschlagfeldstärke nach einer natürlichen Alterung bei Ester-Zellulosepapier-Dielektrika gegenüber thermisch-elektrisch belasteten Proben erheblich abnimmt. Zu beachten ist hier jedoch, daß die Durchschlagfestigkeit von Ester-Zellulosepapier-Proben nach allen genannten Belastungen höher liegt als die Durchschlagfestigkeit unbelasteter Proben.

Einen weiteren Schwerpunkt der umfangreichen Arbeiten stellten die Untersuchungen zur Klärung des Einflusses einer TE-Vorbelastung auf die elektrische Festigkeit imprägnierter Aramidpapierproben dar. Hierfür war zunächst eine optimale Auslegung der in diesem Versuchsteil verwendeten Elektrodenkonfiguration (Spitze-Platte-Elektrodenanordnung) erforderlich. Umfangreiche Voruntersuchungen zeigten, daß ein Spitzenradius von 50 µm für die Vorbelastung mit TE bezüglich der TE-Intensität besonders günstig ist. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher Spitzenelektroden mit Radien von 50 µm eingesetzt.

Die während der Vorbelastung gemessene Intensität der Teilentladungen betrug im Mittel 1000 pC. Eine zeitliche Abhängigkeit der Ladungsintensität wurde bei den durchgeführten Untersuchungen nicht beobachtet.

Bei den im Anschluß an die TE-Vorbelastungen durchgeführten Durchschlaguntersuchungen fiel auf, daß die Durchschläge häufig im Randbereich des homogenen Feldes der Rogowski-Elektrodenanordnung stattfanden. Dies deutet darauf hin, daß die durch die Spitze-Platte-Elektrodenanordnung im Zentrum der Proben erzeugte hohe Feldstärke keine irreversible Schädigung des Isolierstoffgefüges bewirkte. Eine visuelle Überprüfung der durchgeschlagenen Aramidpapierproben bestätigte diesen Sachverhalt.

Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt einige Ergebnisse der Untersuchungen vor, die zur Bestimmung der physiko-chemischen, elektrischen und dielektrischen Eigenschaften zweier Isolierflüssigkeiten am Schering-Institut durchgeführt wurden. Beide Isolierflüssigkeiten kommen als PCB-Ersatz für Verteilungstransformatoren in Frage. Es wurden hier einige der wichtigsten elektrischen und dielektrischen Eigenschaften dieser Flüssigkeiten im Neuzustand und nach einer 1000-stündigen Alterung gegenübergestellt. Neben dem Vergleich der reinen Flüssigkeiten kommt dem Kurz- und Langzeitverhalten, das für die Transformatoren wichtige Flüssigkeits-Papier-Mischdielektrikum, besondere Bedeutung zu. Dabei wird neben der Untersuchung der Zellulose-Papier-Mischdielektrika bei Temperaturen bis zu 120 °C die Möglichkeit einer höheren Temperaturnutzung der Flüssigkeiten beim Einsatz im Zusammenhang mit Aramid-Papier bei Temperaturen bis zu 150 °C untersucht. Als Alterungsparameter werden neben der thermischen, der

elektrisch-thermischen sowie einer natürlichen Alterung auch eine Vorbelastung mit Teilentladungen berücksichtigt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Das Wasserlösungsvermögen der Silikon- und Esterflüssigkeit steigt exponentiell mit der Temperatur an, wobei dieser Anstieg bei der Silikonflüssigkeit größer ist. Das Wasserlösungsvermögen der Esterflüssigkeit liegt um ca. eine Größenordnung über dem der Silikonflüssigkeit.
2. Der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ wies für die Silikon- und Esterflüssigkeit im Anlieferungszustand im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 120 °C nahezu gleiche Werte auf, wobei die Werte bei einer Temperaturänderung von 20 °C auf 120 °C von ca. $7 \cdot 10^{-2}$ auf etwa $3 \cdot 10^{-1}$ steigen.
3. Eine Feldstärkeveränderung im Bereich von 10 kV/cm - 60 kV/cm zeigte keinen Einfluß auf den Verlustfaktor.
4. Die Durchschlagfestigkeit beider Flüssigkeiten ist stark feuchteabhängig. Bei einer Feuchtigkeit in der Umgebung der Werte vom Anlieferungszustand (bei Silikon 55 ppm, bei Ester 80 ppm), wiesen beide Flüssigkeiten im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 150 °C ähnliche Durchschlagfeldstärken von über 200 kV/cm auf.
5. Eine 1000-stündige Alterung bei 150 °C unter der Einwirkung von 3 g/l Cu, 3 g/l Fe, 3 g/l Al und Luftsauerstoff, hatte bei der Esterflüssigkeit eine Erhöhung des Verlustfaktors $\tan \delta$ um 2 Größenordnungen zur Folge, während bei der Silikonflüssigkeit keine Veränderung zu beobachten war.
6. Die elektrische Festigkeit verminderte sich durch eine 1000-stündige natürliche Alterung bei beiden Flüssigkeiten. Der Einfluß dieser Alterung war bei der Silikonflüssigkeit stärker ausgeprägt als bei der Esterflüssigkeit.
7. Ester-Aramid- und Ester-Zellulose-Mischdielektrika zeigten im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 150 °C eine von der Temperatur unabhängige Durchschlagfeldstärke von ca. 58 kV/mm.
8. Eine 1000-stündige thermische Vorbelastung imprägnierter Aramid- bzw. Zellulosepapier-Proben führte zu einer Erhöhung der elektrischen Festigkeit um ca. 25 % auf 72 kV/mm.
9. Bei einem aus Esterflüssigkeit und Zellulosepapier bestehenden Mischdielektrikum bewirkt eine 1000-stündige thermisch-elektrische Vorbelastung keine Veränderung der elektrischen Festigkeit, während bei esterflüssigkeits-imprägnierten Aramidpapier-Proben eine Verringerung der Durchschlagfeldstärke beobachtet wurde.
10. Eine 1000-stündige natürliche Alterung imprägnierter Papierdielektrika reduziert die elektrische Festigkeit erheblich.
11. Eine 1000-stündige TE-Belastung mit einer TE-Intensität von ca. 1000 pC führte zu keiner signifikanten Verschlechterung der elektrischen Festigkeit.

Bildteil

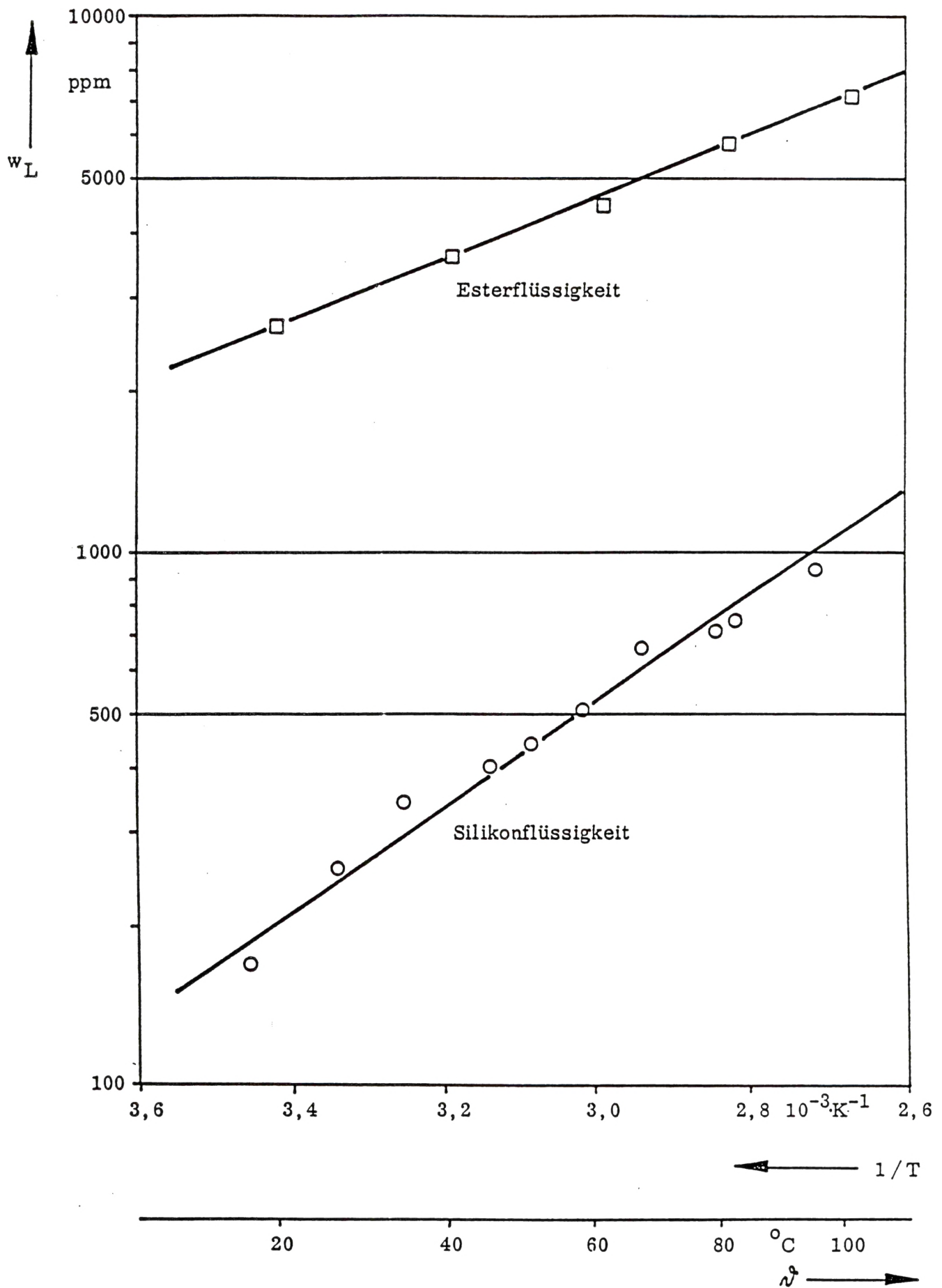


Bild 1: Wasserlösungsvermögen w_L der Silikon- und Esterflüssigkeit in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur

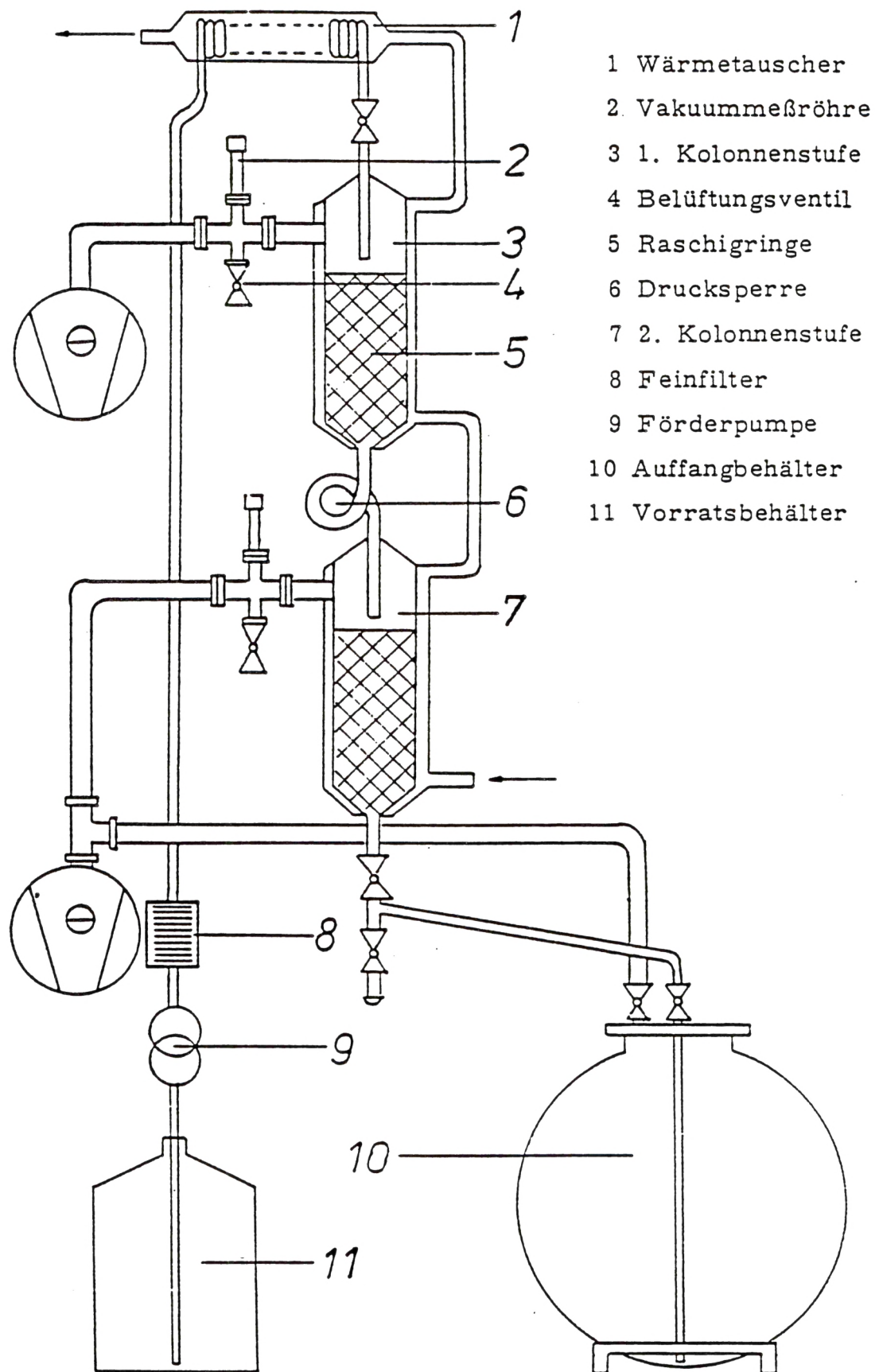
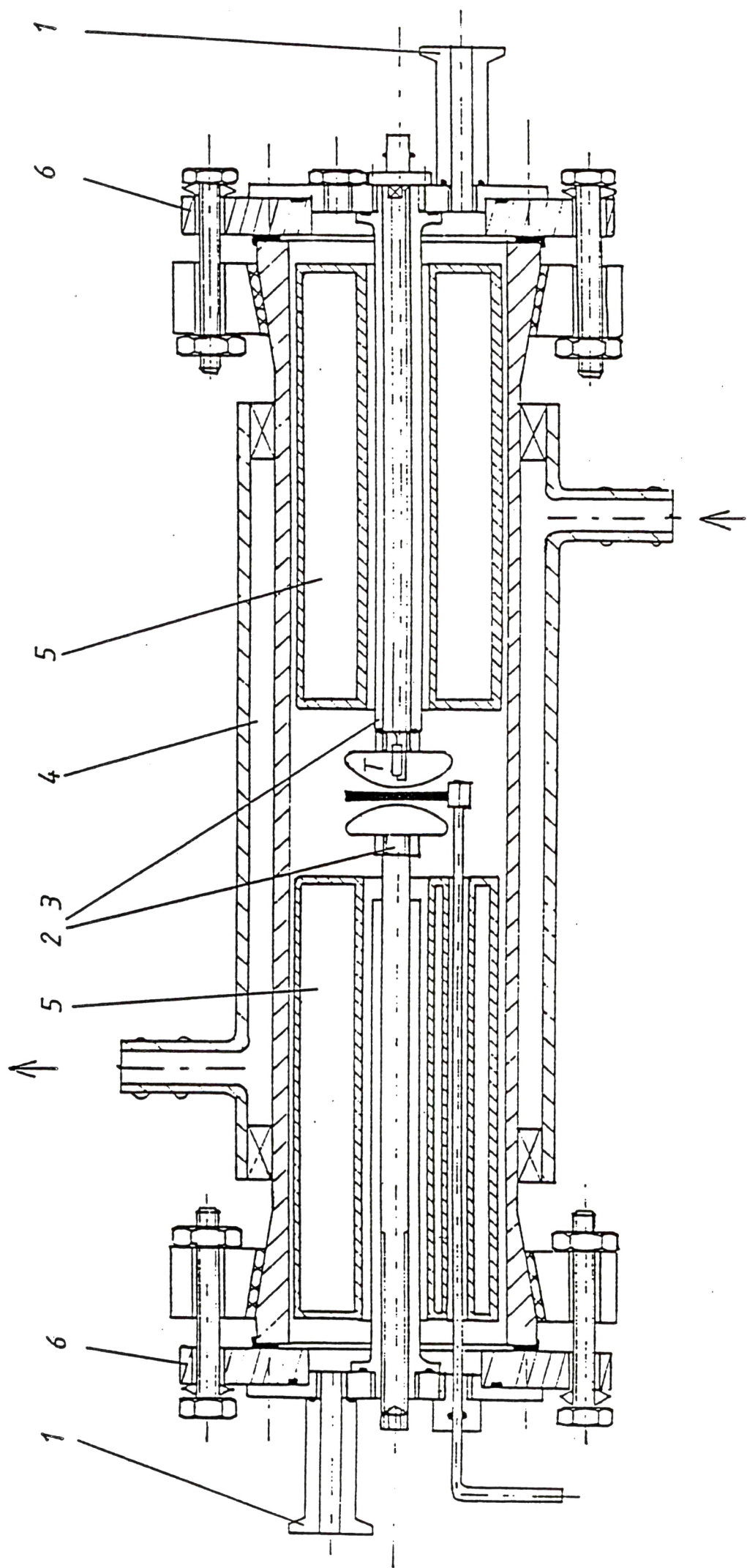
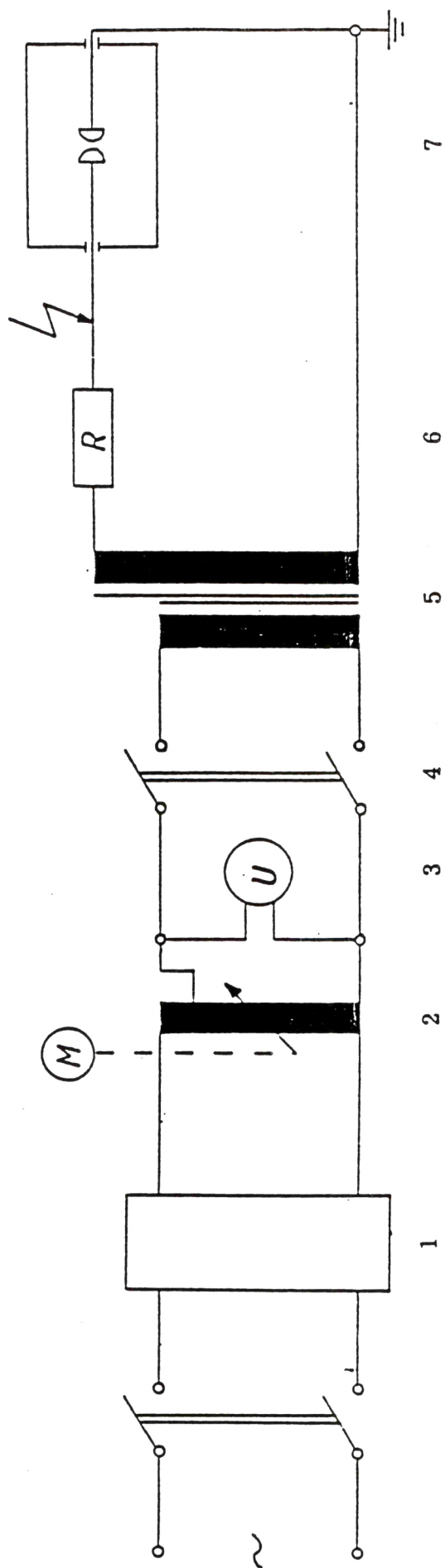


Bild 2: Flüssigkeitsaufbereitungsanlage



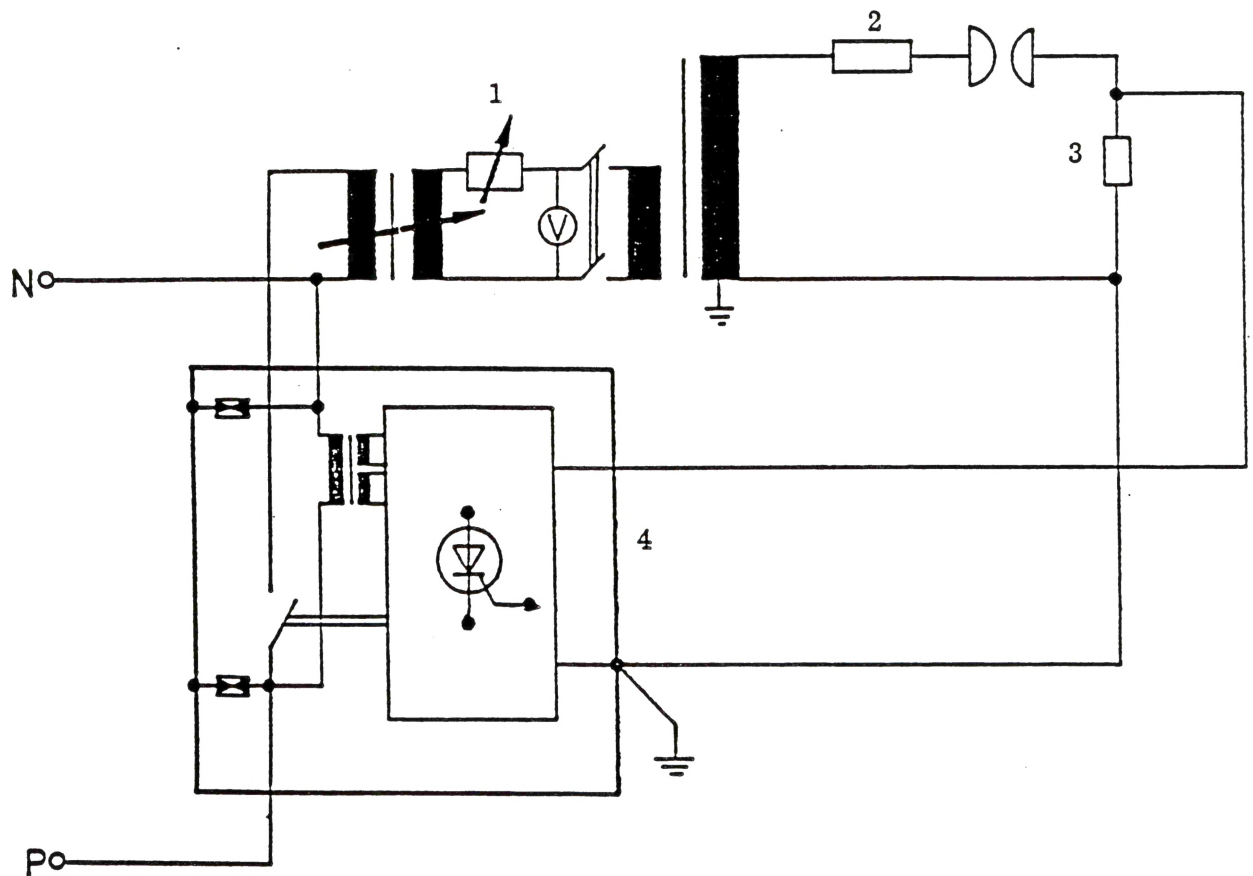
- 1 Anschlußstutzen
- 2,3 Elektrodenstempel mit VDE-Kugelkalottenelektroden
- 4 Doppelmantelglaszylinder
- 5 Verdrängungskörper
- 6 Deckel

Bild 3: Durchschlag-Versuchsgefäß



- | | | | |
|---|--|---|-------------------------|
| 1 | Zellenschutz mit Überstromauslöser | 2 | Motorstelltransformator |
| 3 | Spannungsmeßgerät | 4 | Trennschalter |
| 5 | Hochspannungstransformator
(220 V / 100 kV) | 6 | Schutzwiderstand |
| 7 | Versuchsgefäß | | |

Bild 4: Meßschaltung für Durchschlagversuche



- 1 Vorwiderstand im Primärkreis
- 2 Strombegrenzungswiderstand im Sekundärkreis
- 3 Ankopplungswiderstand
- 4 Elektronische Abschaltvorrichtung

Bild 5: Schematischer Schaltungsaufbau zur Messung der Durchschlagspannung von Silikonflüssigkeiten

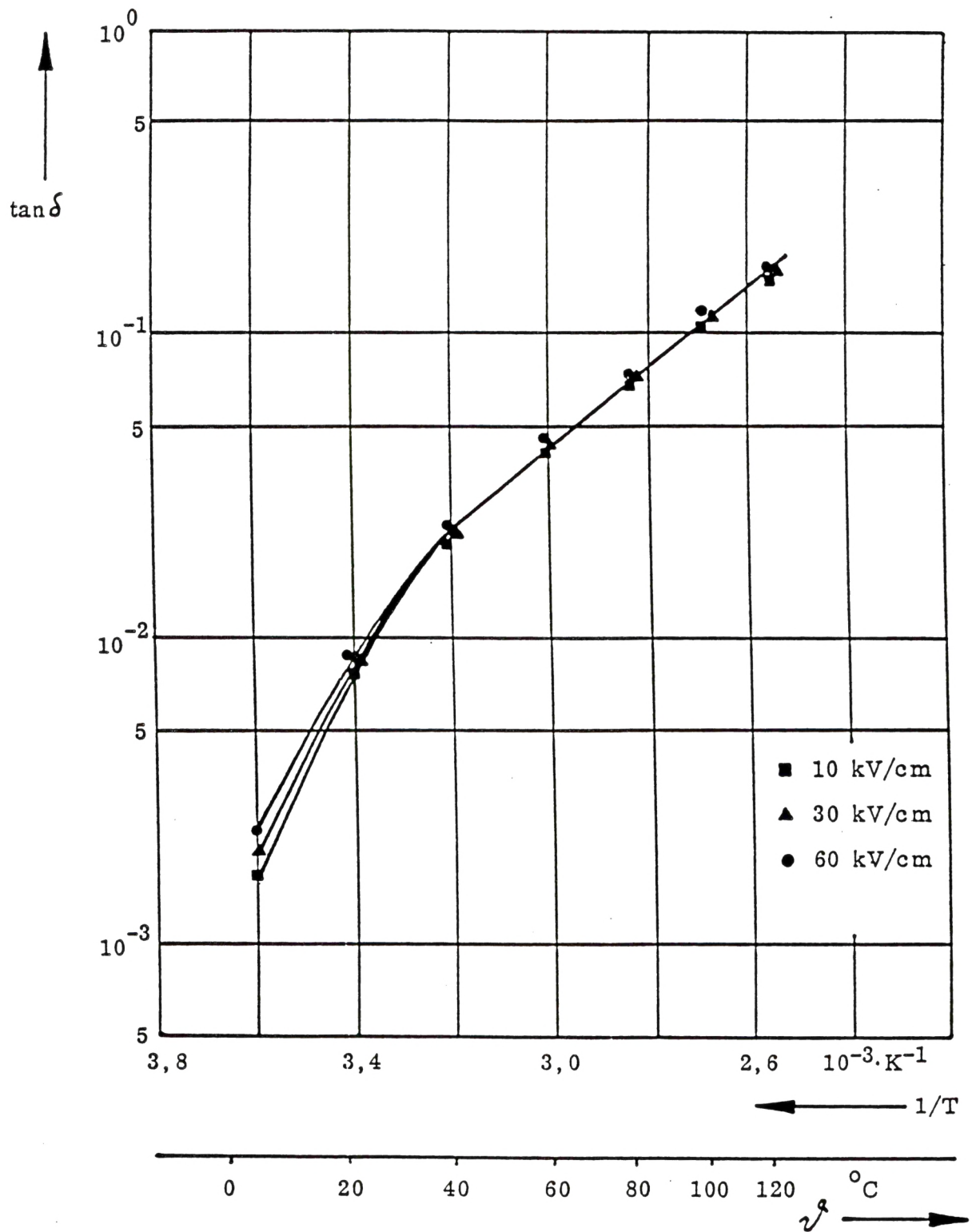


Bild 6: Dielektrischer Verlustfaktor tan δ der Silikonflüssigkeit (w = 55 ppm) in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur T

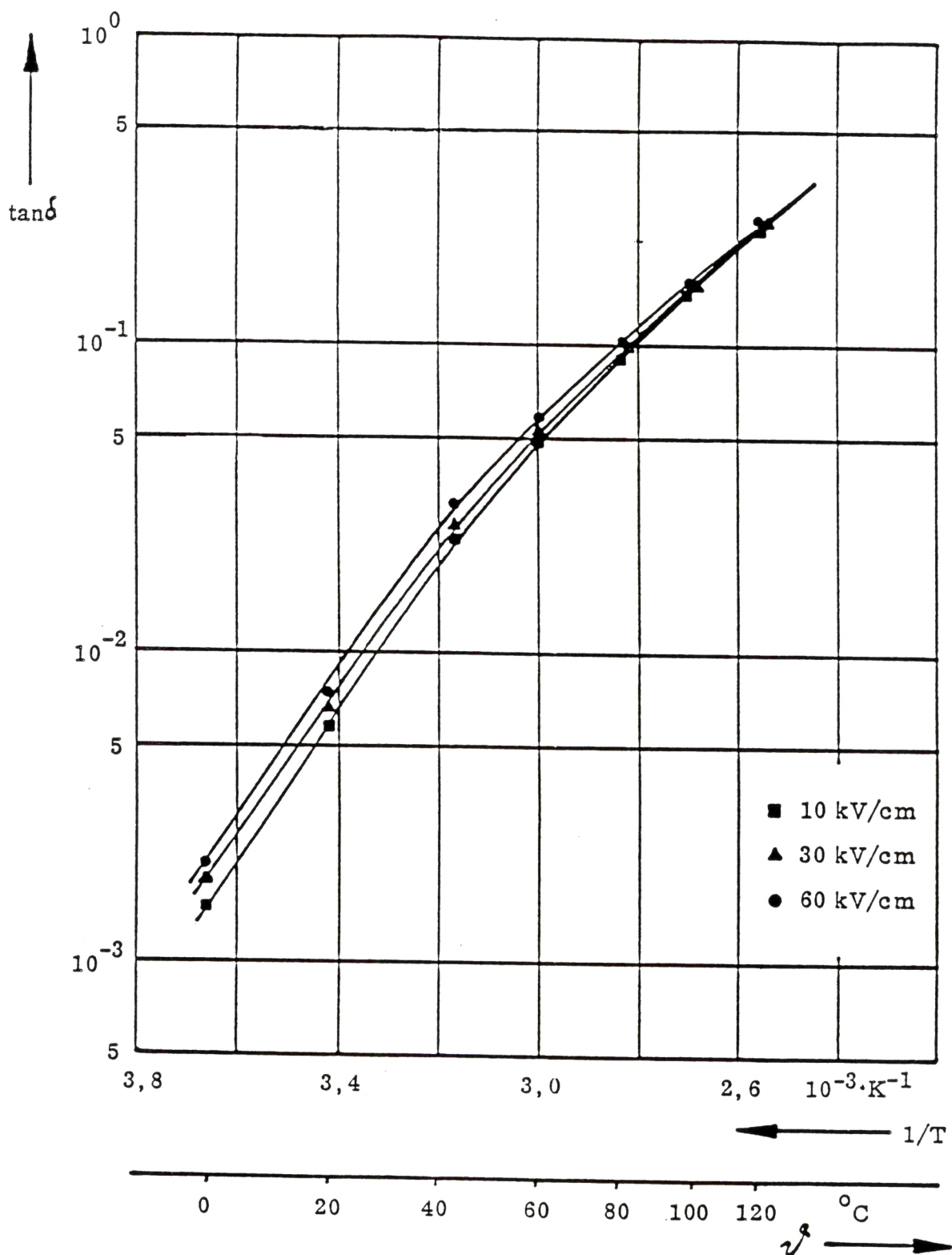


Bild 7: Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ der im Anlieferungszustand befindlichen Esterflüssigkeit in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur T ($w = 80$ ppm)

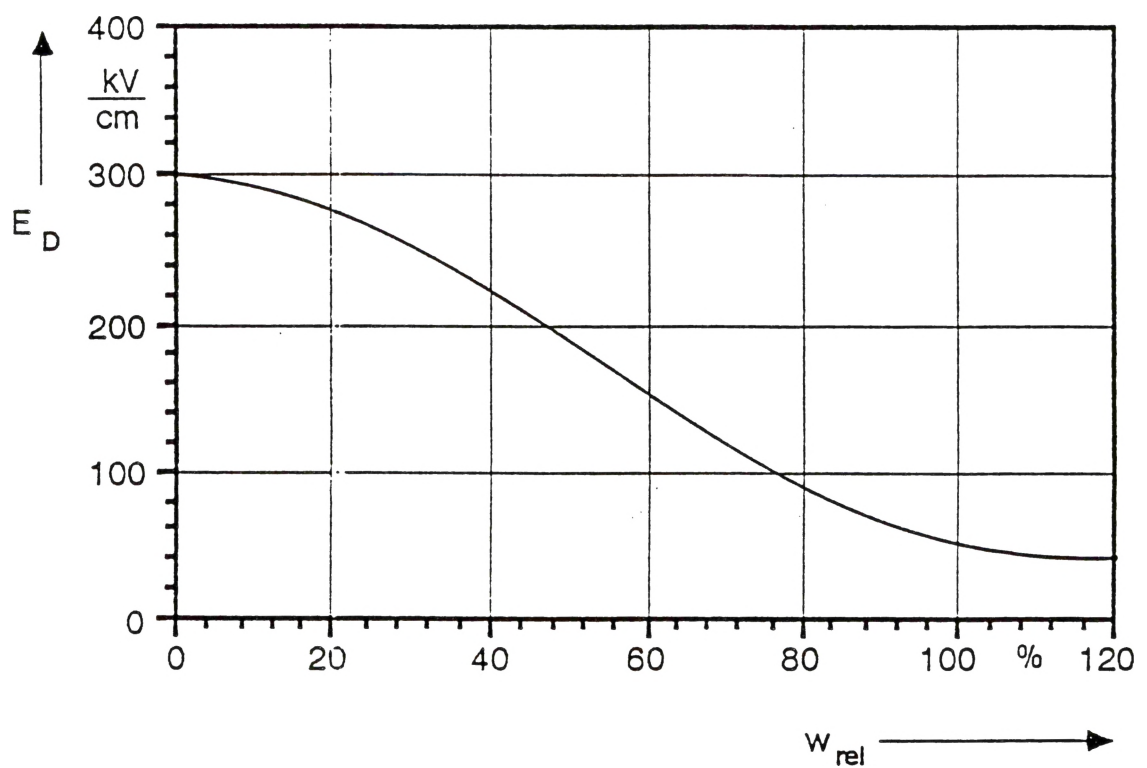


Bild 8 a: Durchschlagfeldstärke E_D von Transformatorenöl auf Mineralölbasis in Abhängigkeit von der relativen Feuchte im Temperaturbereich 20 ... 100 °C

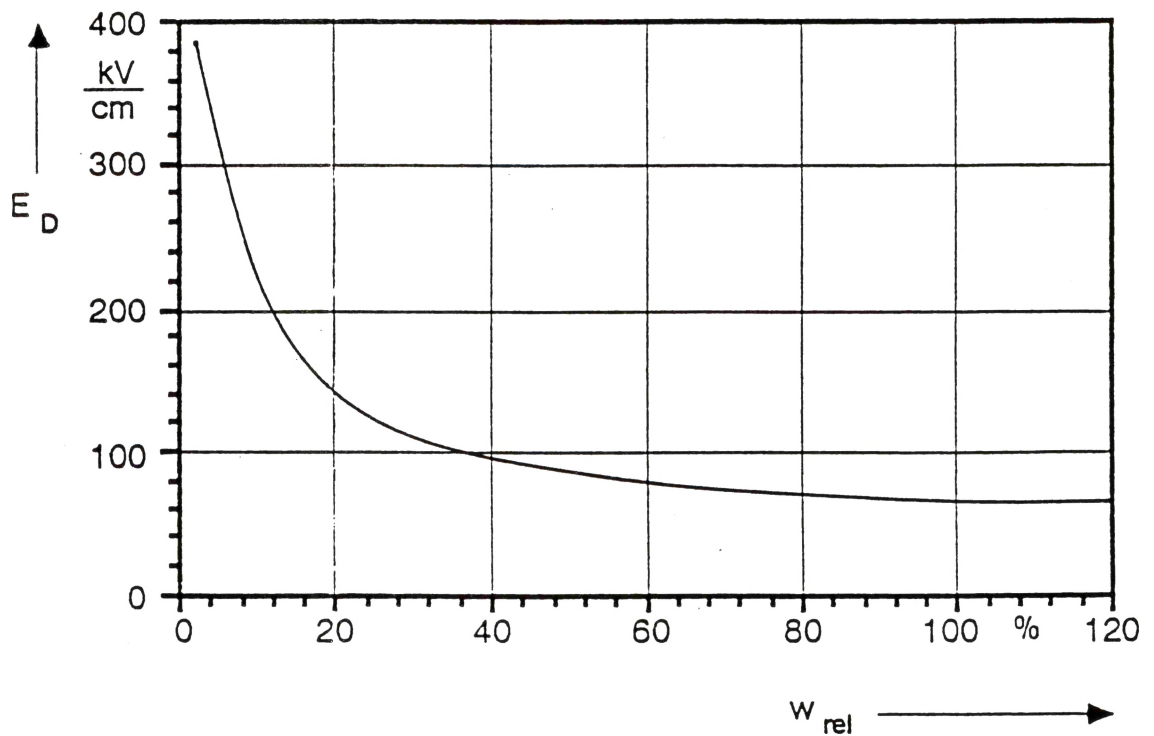


Bild 8 b: Durchschlagfeldstärke E_D von Clophen in Abhängigkeit von der relativen Feuchte im Temperaturbereich 20 ... 100 °C

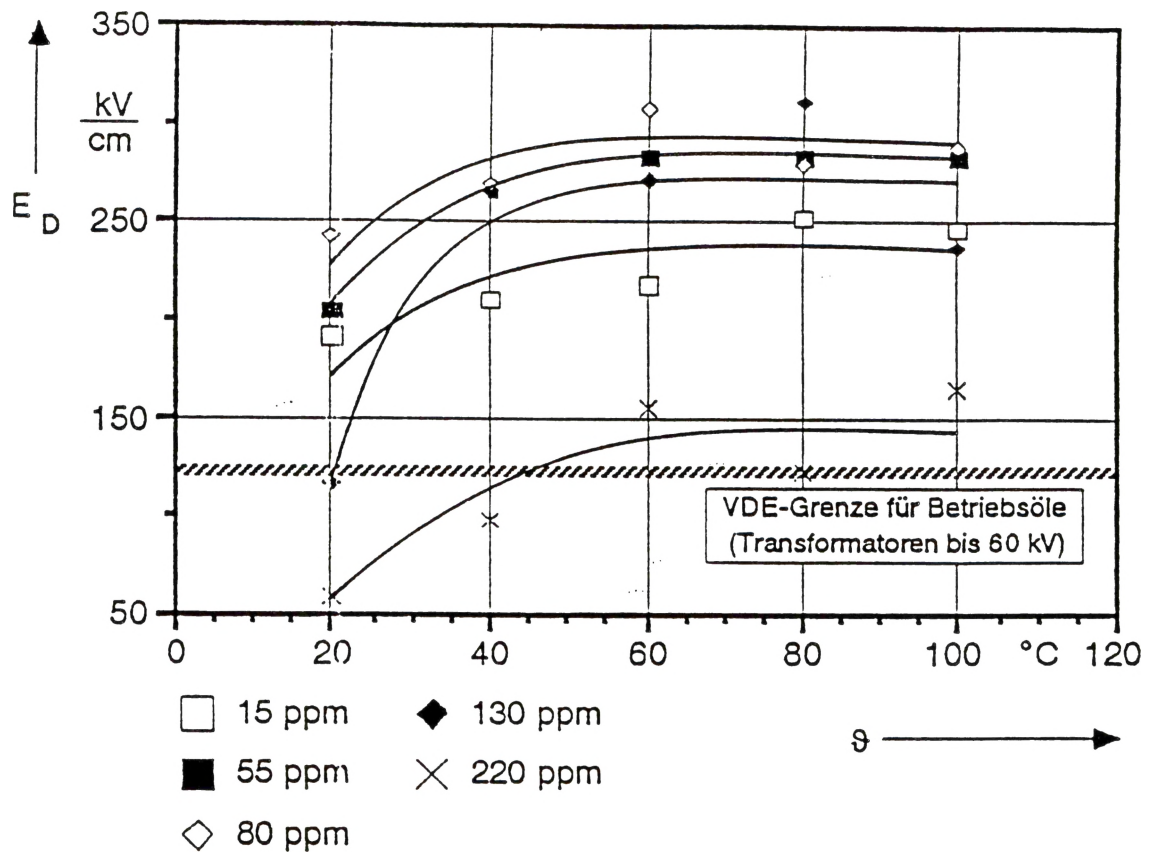


Bild 9 a: Durchschlagfeldstärke E_D von Silikonflüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur Θ für verschiedene Wassergehalte

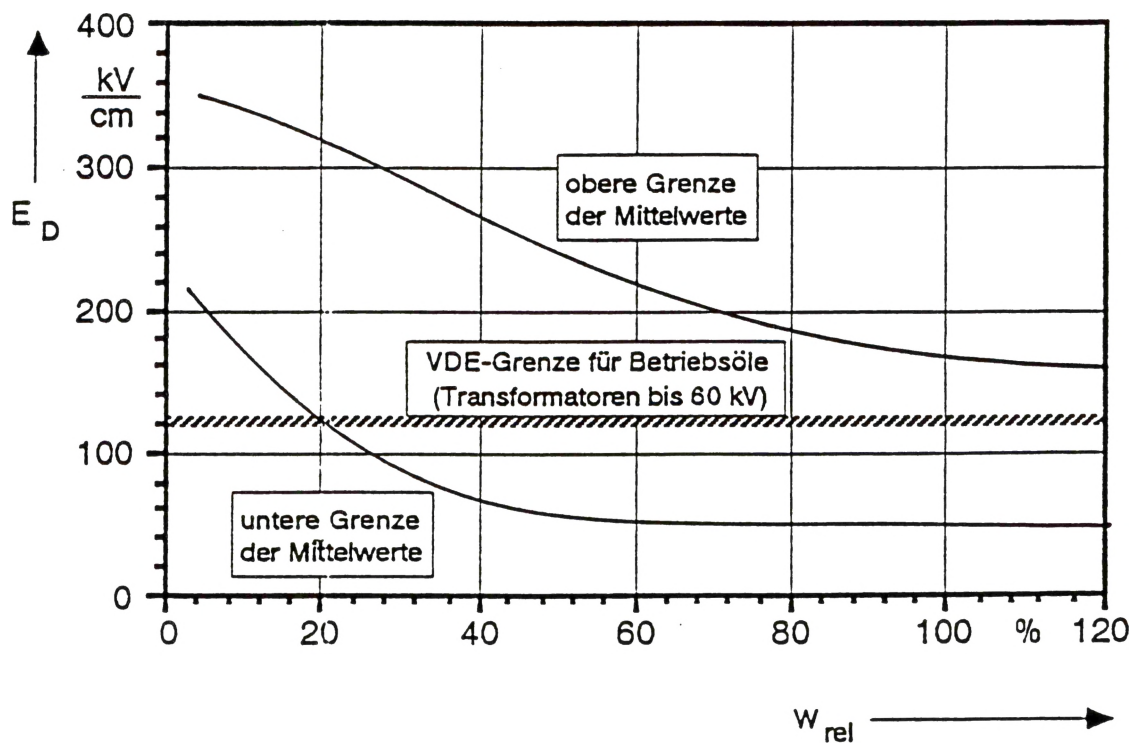


Bild 9 b: Streubereich der Mittelwerte der Durchschlagfeldsstärke E_D von Silikonflüssigkeit in Abhängigkeit von der relativen Feuchte w_{rel} im Temperaturbereich 20 ...100 °C

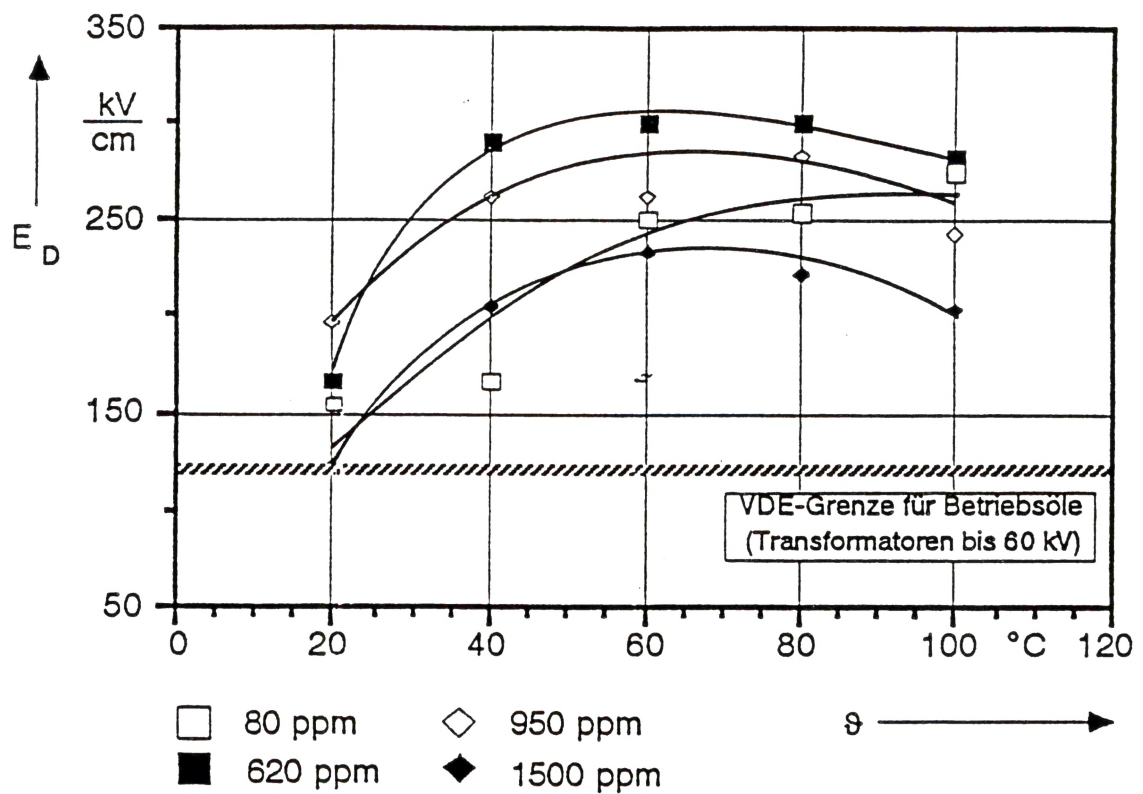


Bild 10 a: Durchschlagfeldstärke E_D von Esterflüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ für verschiedene Wassergehalte

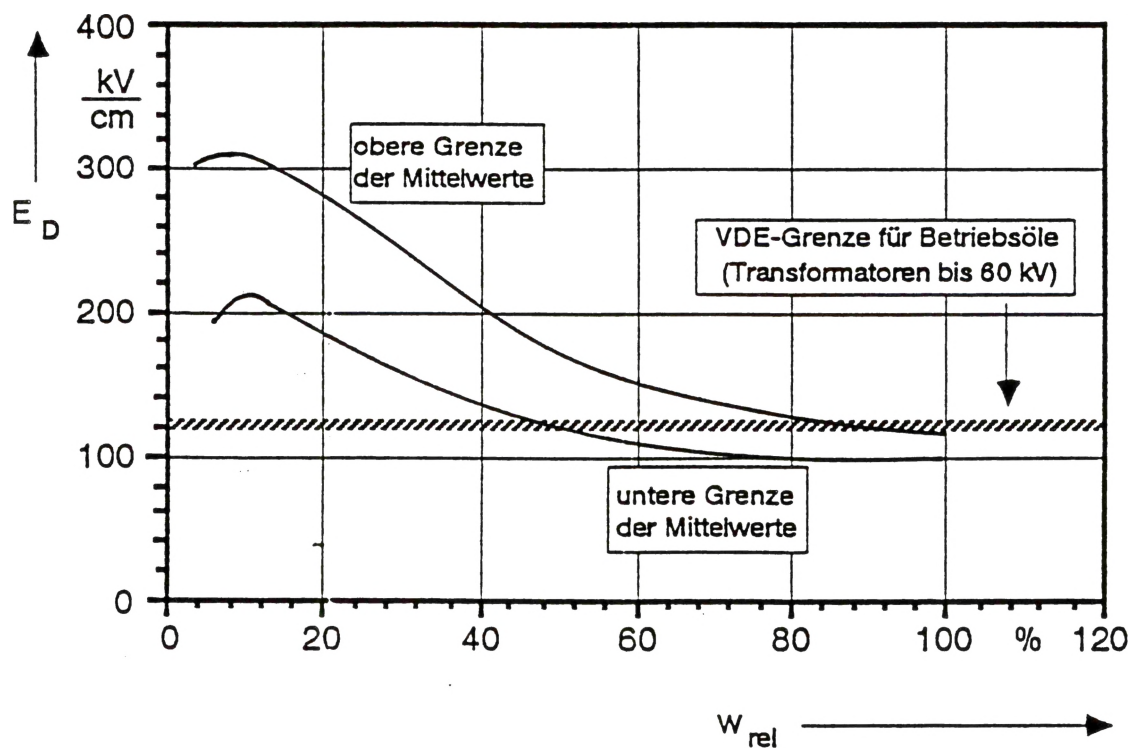
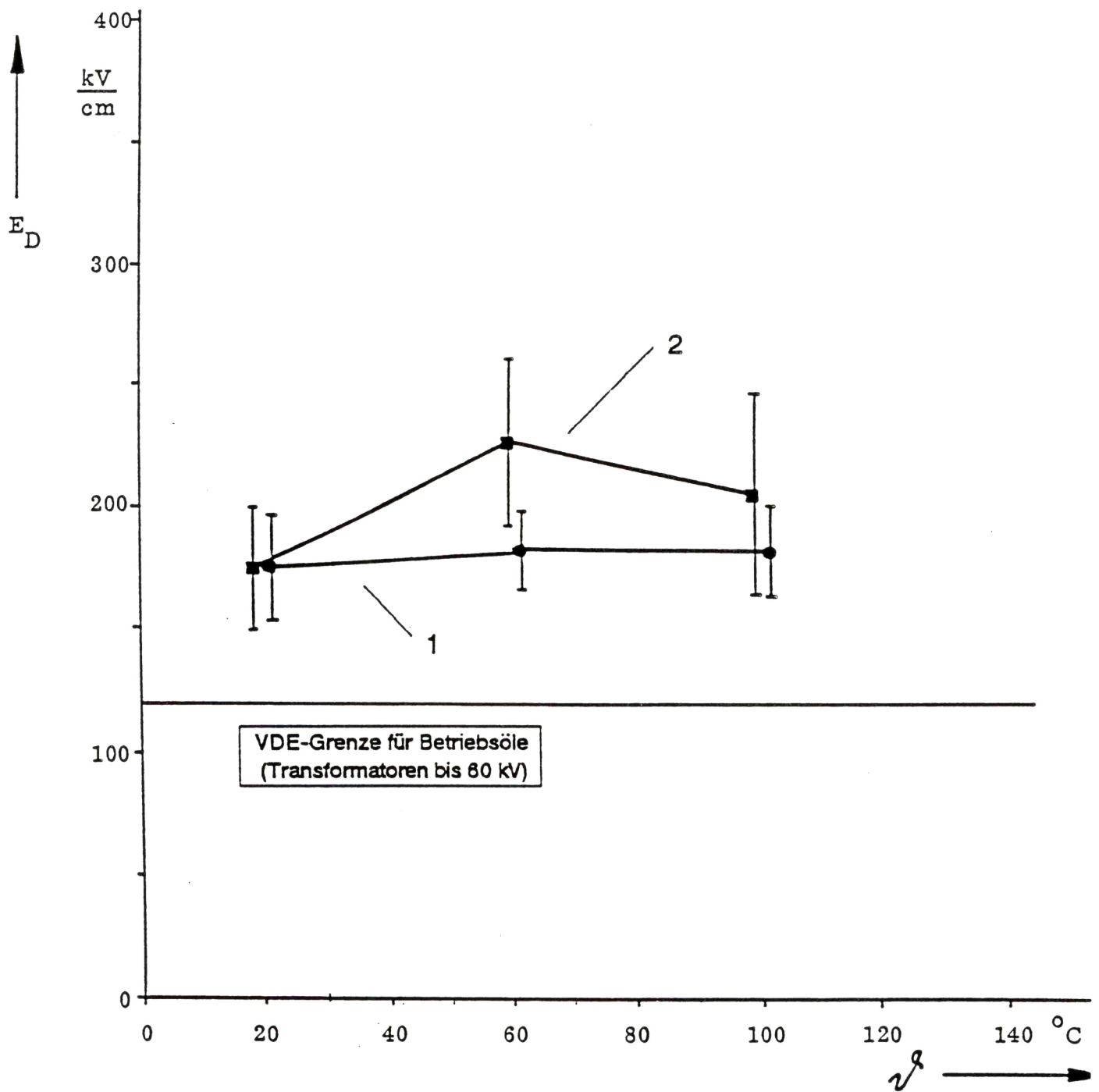


Bild 10 b: Streubereich der Mittelwerte der Durchschlagfeldsstärke E_D von Esterflüssigkeit in Abhängigkeit von der relativen Feuchte w_{rel} im Temperaturbereich 20 ...100 °C



- 1 Silikonflüssigkeit, w = 80 ppm
- 2 Esterflüssigkeit, w = 1100 ppm

I Standartabweichung von 6 bzw. 12 Durchschlagmessungen an einer Silikon- bzw. Esterflüssigkeitsprobe

Bild 11: Durchschlagfeldstärke der thermisch gealterten Silikon- und Esterflüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur θ

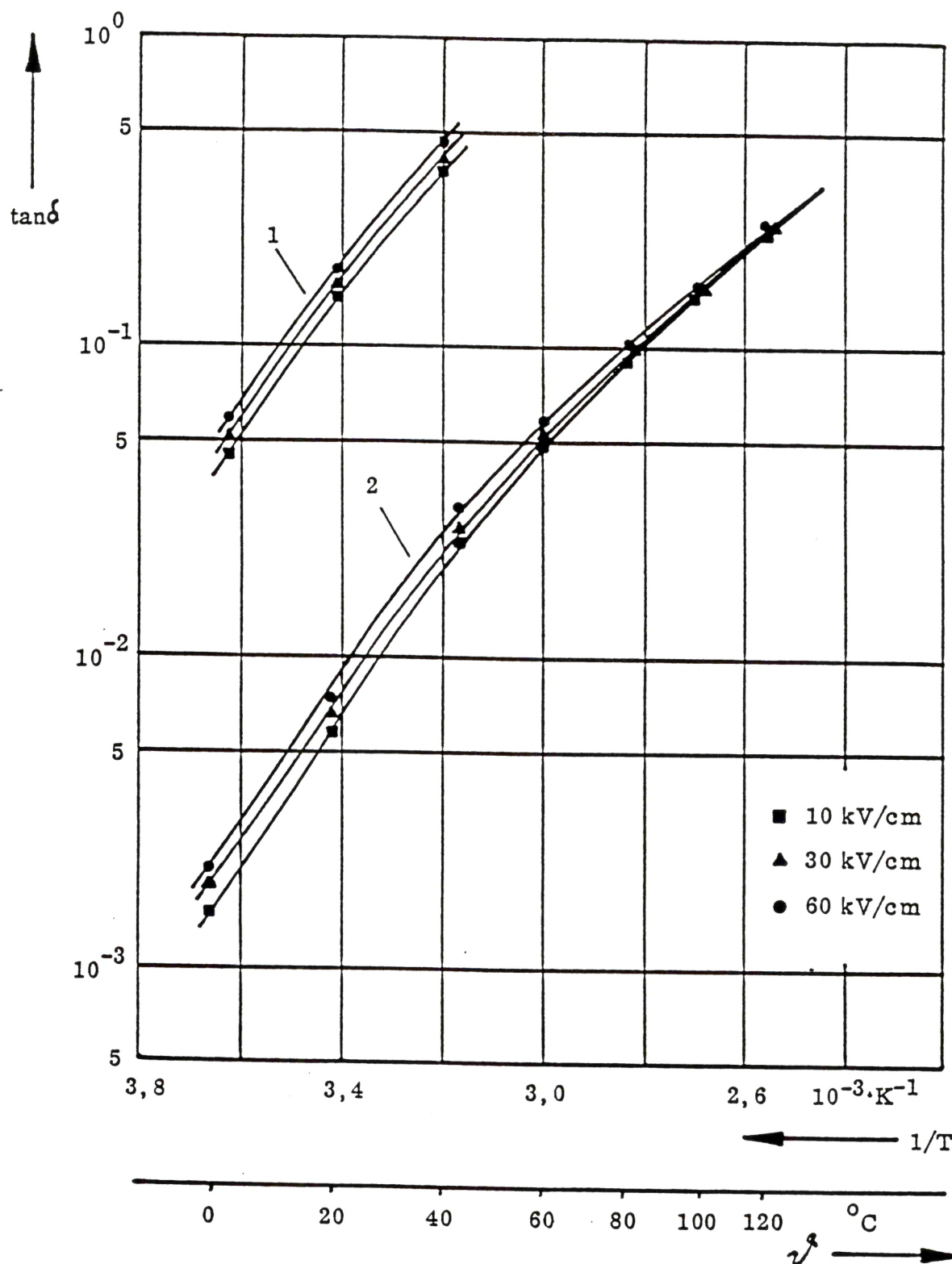
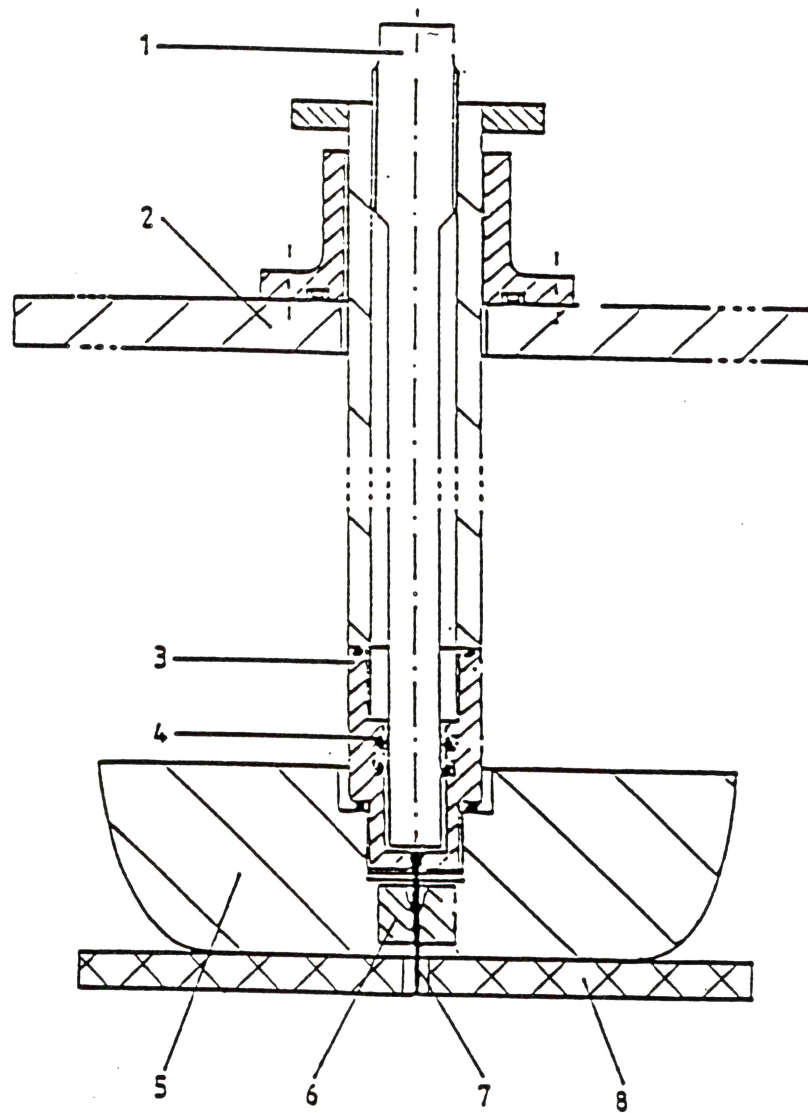


Bild 12: Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ der thermisch gealterten (1) und der im Anlieferungszustand befindlichen (2) Esterflüssigkeit in Abhängigkeit vom Reziprokwert der absoluten Temperatur

Alterung: 1000 h, 150 °C, 3g/l Cu, 3g/l Fe, 3g/l Al, offenes Gefäß



- | | | | |
|---|---------------|---|------------------------|
| 1 | Nadelhalter | 5 | Hochspannungselektrode |
| 2 | Gefäßdeckel | 6 | Nadelführung |
| 3 | Zwischenstück | 7 | Spitzenelektrode |
| 4 | Dichtring | 8 | Teflonscheibe |

Bild 13: Hochspannungselektrode zur Erzeugung von Teilentladungen in flüssigkeitsimprägnierten Mischdielektrika



Bild 14: Meßaufbau zur Registrierung von Teilentladungen in flüssigkeitsimprägnierten Papierdielektrika

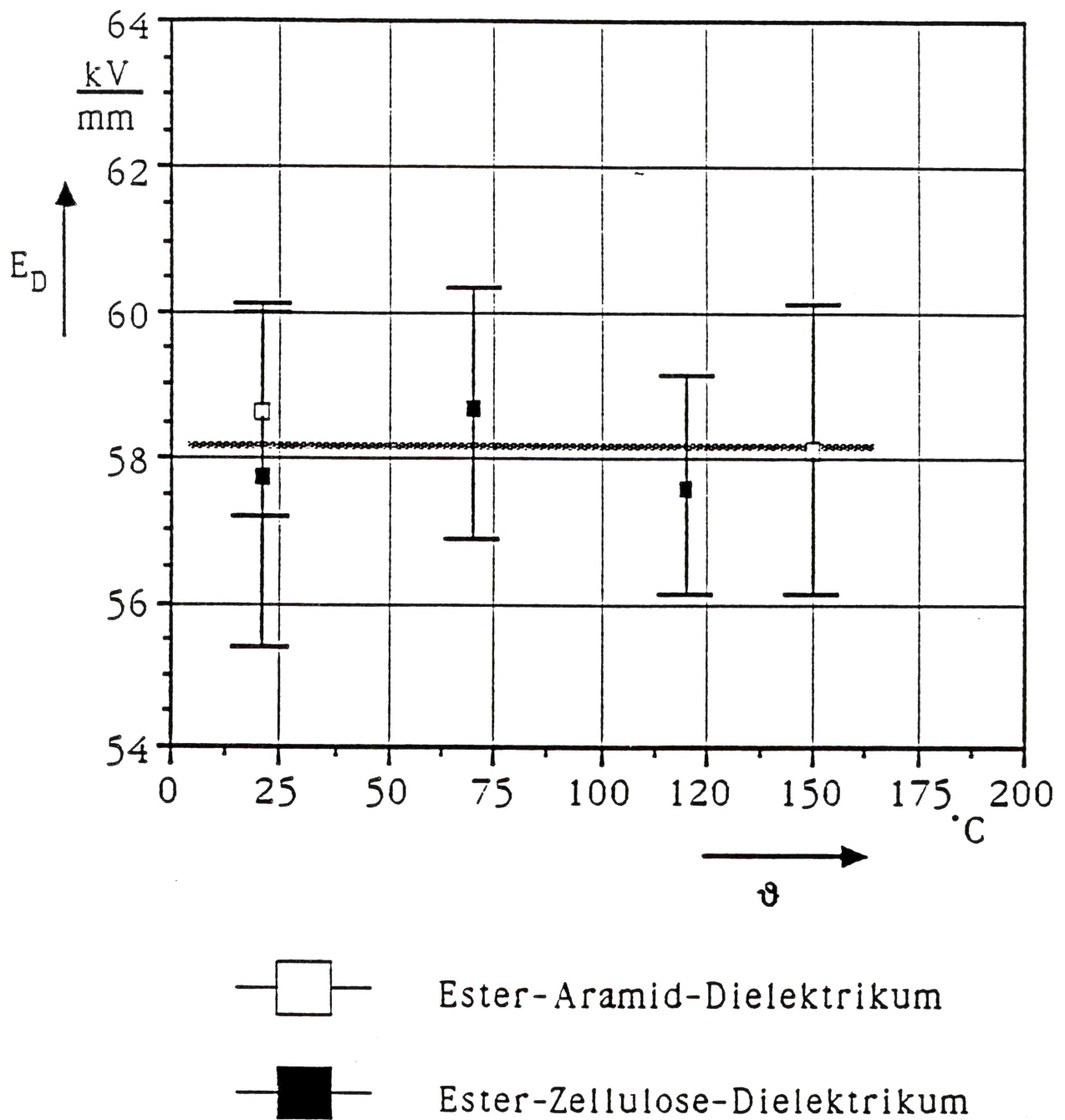


Bild 15: Durchschlagfeldstärke E_D eines esterflüssigkeits-imprägnierten Zellulose- bzw. Aramidpapier-Dielektrikums in Abhängigkeit von der Temperatur θ

 Standardabweichung der Durchschlagmessungen an 10 Prüflingen

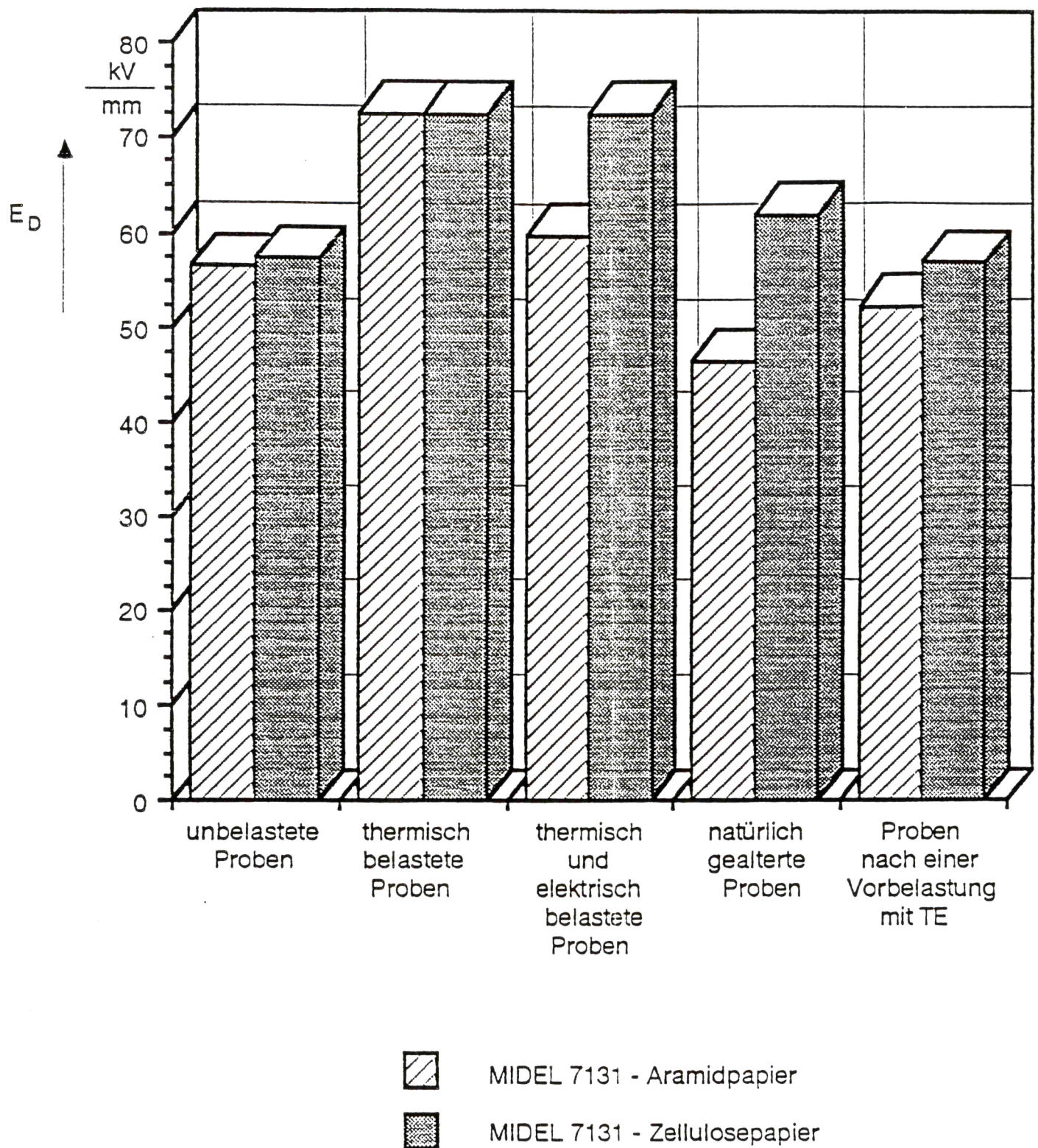


Bild 16: Durchschlagfeldstärke E_D eines esterflüssigkeits-imprägnierten Zellulose- bzw. Aramidpapier-Dielektrikums in Abhängigkeit von der Art der Vorbelastung