

1 Einleitung

Mit dem Einsatz von Mineralöl im Zusammenhang mit Zellulosepapier vor etwa 100 Jahren war eine sehr günstige Isolierung für Transformatoren gefunden. Die mannigfaltigen Vorzüge und die zweckmäßigen elektrischen, dielektrischen und Alterungseigenschaften dieser Isolierung neben des sehr niedrigen Preises stellten die Hauptgründe dafür dar, daß diese Isolierungskombination heute und auch morgen noch zufriedenstellend seine Dienste tut. Die ständig wachsenden elektrischen, thermischen und vor allem in den letzten Jahren auch im verstärkten Maße die ökologischen Anforderungen sowie der niedrige Brennpunkt von Mineralöl machten jedoch umfangreiche grundlegende Untersuchungen zur Suche nach und zur Erprobung von alternativen Isolierflüssigkeiten notwendig.

Im Zusammenhang mit den Anforderungen nach dem hohen Brennpunkt kamen schwer entflammbare Ersatzstoffe zum Einsatz, die polychlorierte Biphenyle (PCB) enthielten /1/. Infolge der größeren Dielektrizitätszahl, den guten elektrischen Eigenschaften sowie sehr guter Temperatureigenschaften fanden die polychlorierten Biphenyle (PCB) im Bereich des Kondensatoren- und Transformatorenbaus Eingang /2,3/. Im Transformatorenbau wurden sie in den Bereichen mit hohen Anforderungen bezüglich des Brandverhaltens wie in Industriekomplexen und Ballungsgebieten sehr häufig eingesetzt.

Die schlechten ökotoxikologischen Eigenschaften von PCB haltigen Isoliersystemen führten jedoch in den siebziger und achtziger Jahren zu strengen Reglementierungen bei den PCB-haltigen Isoliersystemen, und somit mehr und mehr zu Verbannung dieser Isolierflüssigkeiten aus den Komponenten bis hin zum Verbot und zur Einstellung der Produktion von PCB. Dies führte zu einer weiteren Intensivierung der Forschungsaktivitäten bei der Suche nach neuen Ersatzisolierflüssigkeiten, welche trotz guter elektrischer und thermischer Eigenschaften ökologisch und toxikologisch unbedenklicher sind.

Diese Aktivitäten führten unter anderem zu der Erprobung und dem Einsatz von schwerentflammbaren Silikonflüssigkeit, organischen Tetraestern und hydrokarbonbasischen Ölen mit hohem Siedepunkt /4,5/.

Diese gegenüber den mineralbasischen Ölen wärmebeständigeren Isolierflüssigkeiten ermöglichten neben Zellulose den Einsatz wärmebeständigerer Isolierpapiere wie Aramid-Papier. Dadurch konnte man höhere Temperaturen für Transformatoren zulassen. Solche Transformatoren haben insbesondere dort, wo eine kompakte Bauweise gefordert wird, wie bei Lokomotivtransformatoren, ihren Einsatz gefunden.

Weiterhin können Kombinationen dieser neuen Isolierflüssigkeiten eine Verringerung der Alterungsrate und den Einsatz des Transformators an verschiedenen Aufstellungsorten und bei unterschiedlichen Lastverhältnissen ermöglichen.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die elektrischen, dielektrischen und Alterungseigenschaften von zum Mineralöl und PCB alternativen Isolierflüssigkeiten im Zusammenhang mit Zellulosepapier vorgestellt. Weiterhin wird über einige Ergebnisse neuerer Untersuchungen über den Einsatz von synthetischen Isolierflüssigkeiten für Transformatoren und deren Vergleich mit Mineralöl eingegangen. Dabei wird auch die Möglichkeit des Einsatzes von Aramid-Papier anstatt von Zellulose-Papier zusammen mit im Vergleich zu Mineralöl wärmebeständigeren Isolierflüssigkeiten erläutert.

2 Isolierflüssigkeiten

Mineralöl ist die in Transformatoren am häufigsten eingesetzte Isolierflüssigkeit und wird seit etwa 100 Jahren insbesondere in Leistungstransformatoren verwendet. Die meisten Erfahrungen über Isolierflüssigkeiten für Transformatoren liegen daher für diese Flüssigkeit vor. In diesem Beitrag sollen die Eigenschaften der alternativen Isolierflüssigkeiten mit denen des Mineralöls verglichen werden. Zunächst sollen einige der charakteristischen Eigenschaften des Mineralöls vorgestellt werden. Als alternative Isolierflüssigkeiten werden die Esterflüssigkeit Mittel 7131 und die Silikonflüssigkeit Baysilone M50 EL in die Untersuchungen einbezogen.

2.1 Mineralöl

Ausgangsprodukt ist bei allen Mineralölen das Erdöl. Durch fraktionierte Destillation und anschließende Raffination erhält man ein Gemisch verschiedener Kohlenwasserstoff-Verbindungen. Seine Hauptbestandteile und deren Eigenschaften sind wie folgt:

- Paraffine (40 bis 60%)

Hierbei handelt es sich um gesättigte (kettenförmige) Kohlenwasserstoffe, die zu einer guten Oxidationsbeständigkeit führen. Demgegenüber stehen ein relativ hoher Stockpunkt sowie das Ausflocken von Kristallinen bei tiefen Temperaturen (hoher Pourpoint).

- Naphthene (30 bis 50%):

Da sie ebenfalls aus gesättigten (ringförmigen) Kohlenwasserstoffen bestehen, liegt wiederum eine gute Oxidationsbeständigkeit vor. Jedoch liegt der Stockpunkt wesentlich niedriger als bei Paraffinen.

- Aromate (5 bis 20%):

Aromate sind ungesättigte (kettenförmige) Kohlenwasserstoffe, die im elektrischen Feld nicht so stabil sind und somit die Durchschlagsspannung herabsetzen. Allerdings haben sie eine alterungshemmende Wirkung.

- Olefine (ca. 1%)

Olefine sind ungesättigte Verbindungen, d.h. nicht alle vier Bindungen des Kohlenstoffes sind abgesättigt und es kommt zur Doppelbindung. Olefine sind demnach paraffin- bzw. naphthenartige Verbindungen, die nicht die volle Anzahl Wasserstoffatome besitzen, so daß zwischen benachbarten Kohlenstoffatomen eine Doppelbindung besteht. Wegen dieser Doppelbindung sind Olefine weniger stabil als die Paraffine.

Je nach Konzentration unterscheidet man paraffinbasierte, naphthenbasierte und gemischbasierte Öle. Bis vor einigen Jahren kamen fast ausschließlich naphthenbasierte Öle zum Einsatz, da sie aufgrund ihres tiefen Pourpoints ohne zusätzliche Maßnahmen in nahezu allen Klimazonen der Erde einen problemlosen Betrieb gewährleisten. In der jüngeren Vergangenheit ist es jedoch gelungen, diesen Nachteil paraffinbasierter Öle durch Entparaffinierung auszugleichen. So genügen heutzutage sowohl die naphthen-, als auch die häufiger vorkommenden paraffin- und gemischtbasischen Isolieröle der Norm DIN 57370 Teil 1.

Nachteile mineralischer Isolieröle sind die relativ schnelle Alterung, die Brennbarkeit und eine große Empfindlichkeit der elektrischen und dielektrischen Eigenschaften in Bezug auf Verunreinigungen wie z.B. Wasser. Weiterhin fallen nichtinhibierte Mineralöle in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 1 und inhibierte in die WGK 2, womit das Aufstellen mineralölgefüllter Transformatoren in Wasserschutzgebieten mit besonderen Auflagen verbunden ist.

2.2 Synthetische Isolierflüssigkeiten

Mit der Einstellung der Produktion von PCB-haltigen Stoffen in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1983 wuchs bei den Betreibern von elektrischen Betriebsmitteln das Interesse, wärmebeständige und ökologisch unbedenklichere Ersatzstoffe mit ähnlichen oder besseren elektrischen Eigenschaften als PCB-haltige Isolierflüssigkeiten zu finden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Esterflüssigkeiten und Silikonflüssigkeiten in die engere Wahl gezogen worden. Diese Isolierflüssigkeiten sind bereits seit einigen Jahren insbesondere im Bereich der Verteiltransformatoren im Einsatz. Weiterhin ist im Bereich der PCB-gefüllten oder PCB-kontaminierten Transformatoren ein Retrofilling mit diesen Flüssigkeiten erfolgreich erprobt worden.

2.2.1 Esterflüssigkeit

Esterflüssigkeiten bestehen aus organischen Estern. Diese werden synthetisch aus ein- oder mehrwertigen Alkoholen und ein- oder mehrbasischen aliphatischen oder aromatischen Säuren hergestellt /7,8/. Die im Rahmen dieses Beitrages verwendete Esterflüssigkeit ist die synthetische Isolierflüssigkeit "MIDEL 7131". Chemisch gesehen ist MIDEL 7131 ein passivierter, oxidationsinhibierter Pentaeryth-Tetraester /9,10/. Seine Struktur zeigt Bild 1

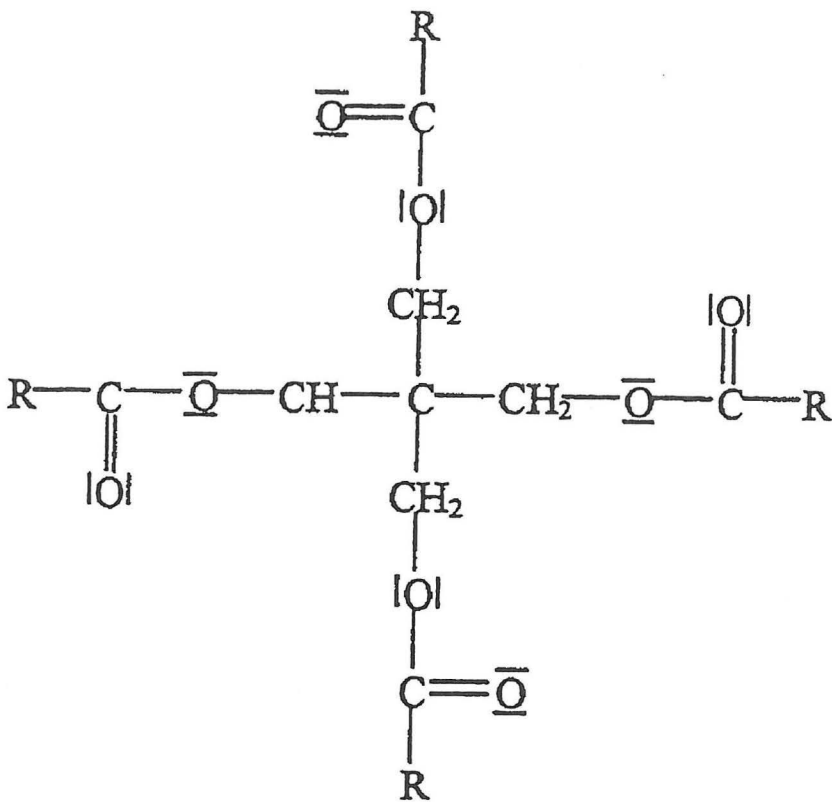


Bild 1: MIDELE 7131

MIDELE 7131 hat sehr gute toxikologische und ökologische Eigenschaften. Im Brandfall entstehen keine Dioxine und andere besonders toxischen Stoffe /11-13/. Im Boden ist diese Flüssigkeit gut biologisch abbaubar, so daß keine Gefahr der Anreicherung in Organismen besteht.

Die Einstufung der Esterflüssigkeit MIDELE 7131 in die WGK 0 machte diese Isolierflüssigkeit auch als ein Substitut für Mineralöl insbesondere dort, wo aufgrund von Wasserschutzbestimmungen besondere Auflagen für mineralölgefüllte Transformatoren gelten, noch interessanter. Umfangreiche neuere Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, daß die Esterflüssigkeit gut mit Mineralöl verträglich ist. Sie läßt sich problemlos mit Mineralöl vermischen. Durch eine Mischung von Mineralöl und Esterflüssigkeit werden die elektrischen und die Alterungseigenschaften nicht negativ beeinflußt. Durch eine Beimischung von Mineralöl in Esterflüssigkeit bis zu 3% bleibt Midel weiterhin in der WGK 0.

Die gute Mischbarkeit von Mineralöl und Esterflüssigkeit Midel 7131 eröffnete eine Möglichkeit zur Anpassung der elektrischen und Alterungseigenschaften der Transformatorisolierung an die jeweiligen Anforderungen. Es wird dadurch möglich, für jeden Transformator eine individuelle Isolierung entsprechend den Anforderungen problemlos herzustellen. Auf einige Möglichkeiten wird im Rahmen dieses Beitrags näher eingegangen.

2.2.2 Silikonflüssigkeit (Baysilone M50 EL)

Bei diesem Isoliermittel der Firma Bayer AG handelt es sich um ein a,w-Bis-tri-methylsiloxypolydimethyl-siloxan mit folgender chemischer Strukturformel:

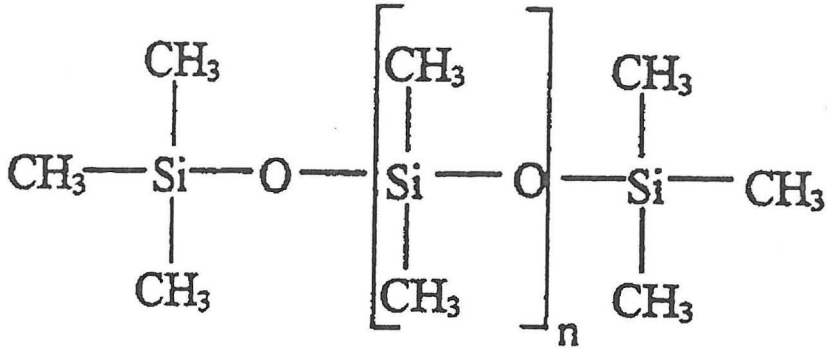


Bild 2: Strukturformel von Polydimethylsiloxan (n=35)

Neben der thermischen und oxidativen Stabilität, der chemischen Trägheit und dem höheren Flamm- bzw. Brennpunkt im Vergleich zu den Mineralölen muß man auch, gerade im Hinblick auf die immer mehr zunehmende Umweltdiskussion, die physiologische, toxikologische und ökologische Unbedenklichkeit hervorheben. Im Falle eines Austritts in die Umwelt zerfällt Silikonflüssigkeit in unschädliche Spaltprodukte wie Wasser, Kohlendioxid und Kieselsäure /14/. Silikonflüssigkeit ist in die WGK 1 eingestuft. Wegen der hervorragenden thermischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich (-60 °C bis 300 °C) ist Silikonflüssigkeit als Kühl- und Heizmedium weit verbreitet. Im Brandfall besteht durch die Bildung von Siliziumdioxid eine selbstlöschende Eigenschaft.

2.3 Vergleich der wichtigsten Eigenschaften einiger Isolierflüssigkeiten für Transformatoren

Ein Vergleich einiger der wichtigsten Eigenschaften der drei vorgestellten Isolierflüssigkeiten mit Transformatorenöl auf Mineralölbasis zeigt Tabelle 1.

Isolierflüssigkeit Eigenschaften	Esterflüssigkeit	Silikonflüssigkeit	Mineralöl ⁽¹⁾
Elektrische Eigenschaften			
dielektrischer Verlustfaktor			
$\tan \delta (* 10^{-4})$, (25°C, 50 Hz)	10	0,9	<10
Dielektrizitätszahl	3,3	2,7	2,2
ϵ_r (25°C, 50 Hz)			
Durchschlagsspannung nach IEC 156 [kV]	55	50	60
Brandverhalten			
Brennpunkt	310	>335	150 - 175
[°C] (ASTM D 92)			
Flammpunkt	257	>300	135 - 145
[°C] (ASTM D 92)			
Verbrennungswärme	36,8	32,2	
[kJ/kg * 10 ⁻³]			
Wärmeübertragung			
Wärmeleitfähigkeit [W/mk]	0,156	0,151	
kinematische Viskosität	56	50	20
bei 25°C [mm ² /s]			
Allgemeine Eigenschaften			
Pourpoint [°C]	-50	-53	-40
Toxizität LD50/LD50	bestanden	bestanden	bestanden
Wassergefährdungsklasse			
WGK	keine	1	1
Bedeutung	nicht wassergefährdend	schwach wassergefährdend	schwach wassergefährdend

(1) Durchschnittswerte der Daten verschiedener Hersteller

Tabelle 1: Vergleich einiger Kenndaten einer Esterflüssigkeit, einer Siliconflüssigkeit und eines Mineralöls.

Im folgenden werden einige weitere Diagramme über unterschiedliche Eigenschaften verschiedener Flüssigkeiten für verschiedene Anwendungsbereiche im Vergleich zusammengestellt.

Rauchentwicklung

Für die Aufstellung von Transformatoren in geschlossenen Orten und schwer zugänglichen Bereichen muß berücksichtigt werden, daß im Falle eines Brandes durch die starke Rauchentwicklung die Rettungs- und Löschmannschaften nicht behindert werden. Dies ist z.B. bei stationären Transformatoren oder Lok-Transformatoren bei Unfällen im Tunnelbereich der Fall. Bild 3 zeigt in diesem Zusammenhang einen Vergleich der Rauchgase der Isolierflüssigkeiten Midel 7131, Mineralöl und Askarel. Es ist ersichtlich, daß die Rauchdichte bei Midel 7131 wesentlich niedriger ist als bei den anderen beiden Flüssigkeiten.

Bild 4 zeigt die Zusammensetzung der Rauchgase bei Midel 7131 im Vergleich zu Holz bei einer Verbrennungstemperatur von 950°C.

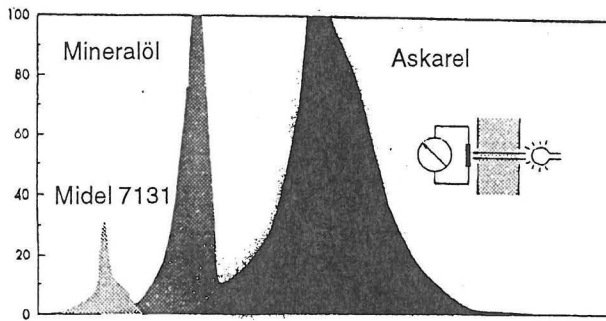


Bild 3: Vergleich der Rauchgase verschiedener Isolierflüssigkeiten.

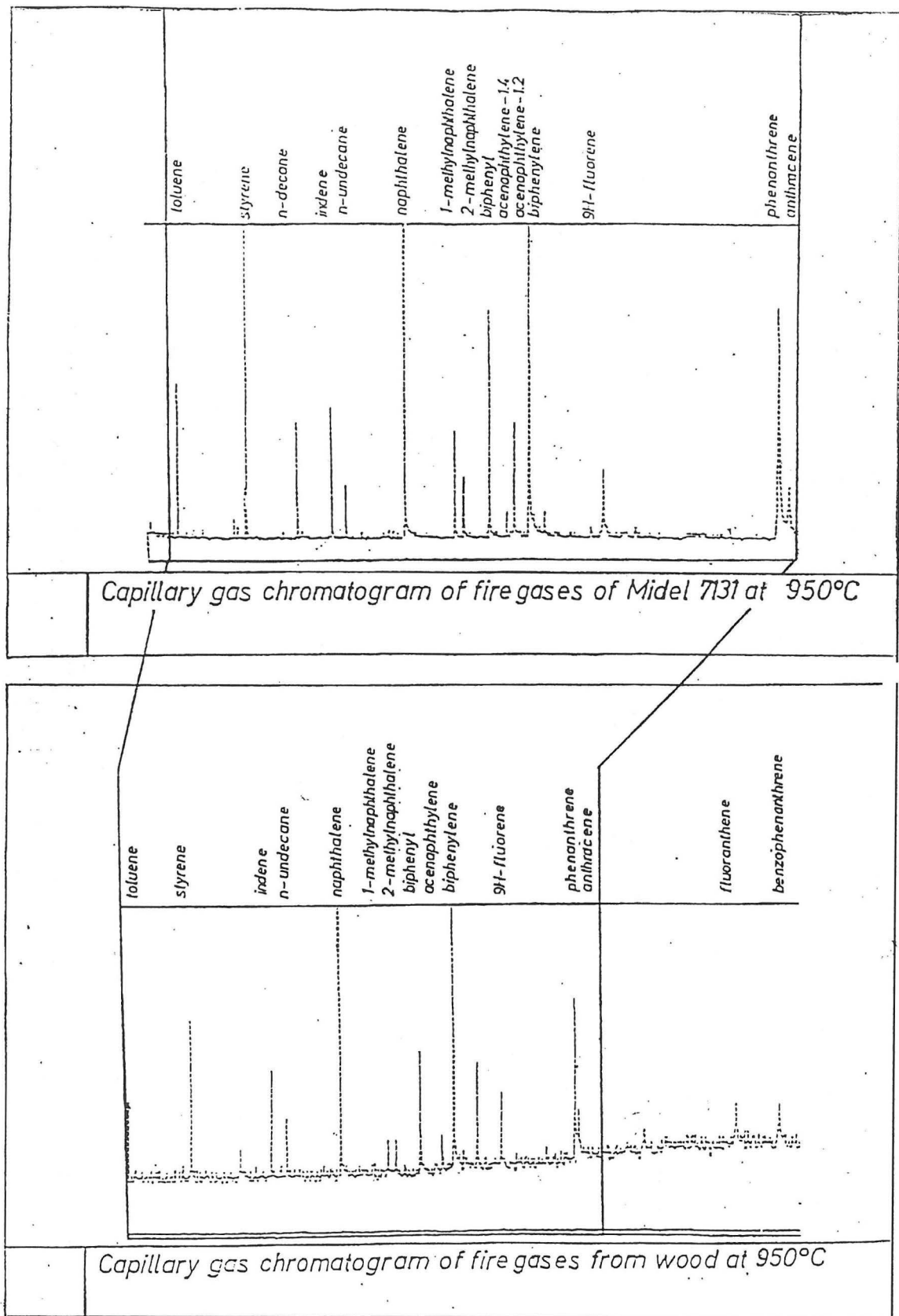


Bild 4: Zusammensetzung der Rauchgase bei Midel 7131 im Vergleich zu Holz bei einer Verbrennungstemperatur von 950°C.

Wärmeleitfähigkeit

Die Isolierflüssigkeit im Transformator hat neben der elektrischen Isolation die Aufgabe, die in der Wicklung, im Kern und in der festen Isolation entstandene Wärme abzutransportieren. Daher ist die Wärmeleitfähigkeit der Isolierflüssigkeit von großer Bedeutung. Bild 5 zeigt im Vergleich die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren über der Temperatur.

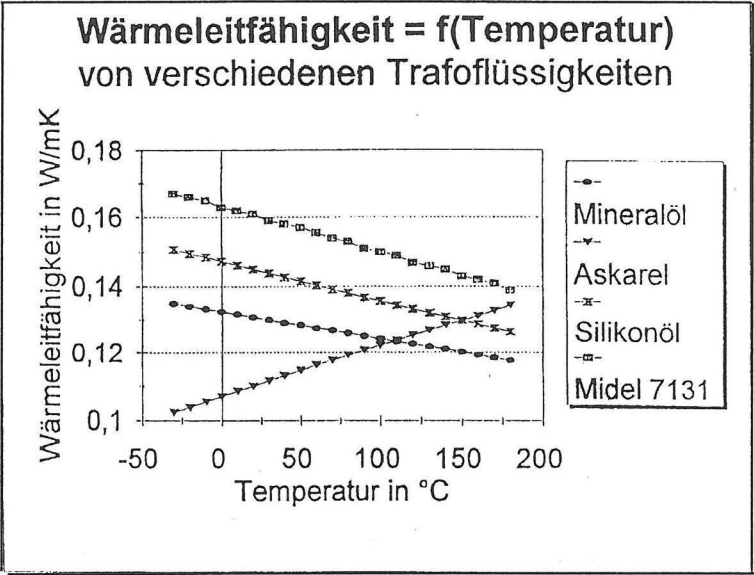


Bild 5: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren über der Temperatur

Viskosität

Eine weitere wichtige Kenngröße einer Isolierflüssigkeit für Transformatoren ist die Viskosität. Bild 6 zeigt die Viskosität verschiedener Isolierflüssigkeiten über der Temperatur. Aus der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit wird die Wärmeübertragung ermittelt. Bild 7 zeigt im Vergleich die Wärmeübertragung verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren im halblogarithmischen Maßstab über der Temperatur. Wie ersichtlich ist die Wärmeübertragung der Esterflüssigkeit erst bei höheren Temperaturen vergleichbar zu Mineralöl. Tabelle 2 zeigt den zahlenmäßigen Vergleich der Wärmeübertragung verschiedener Isolierflüssigkeiten. Weiterhin ist die relative Wärmeübertragung bezogen auf Mineralöl für verschiedene Temperaturen dargestellt.

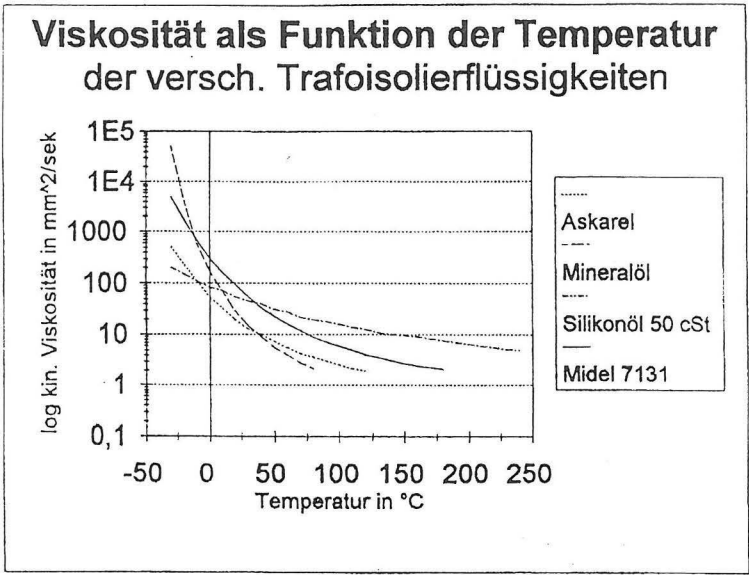


Bild 6: Viskosität verschiedener Isolierflüssigkeiten über der Temperatur.

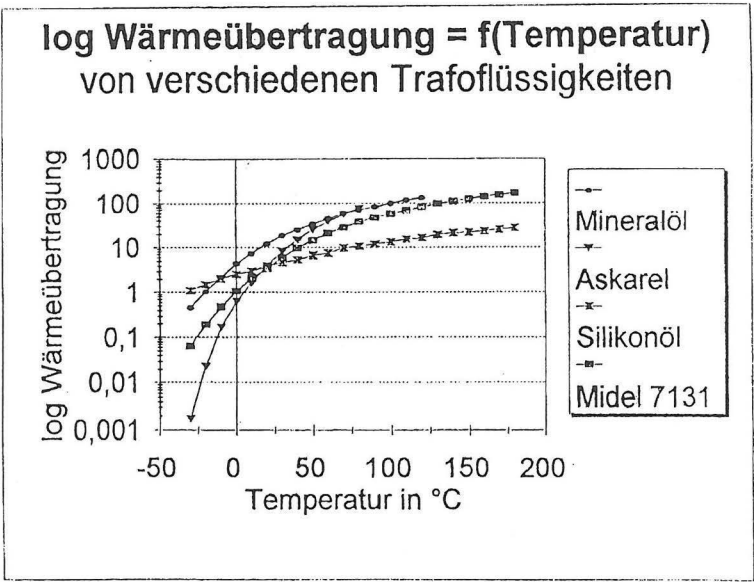


Bild 7: Vergleich der Wärmeübertragung verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren über der Temperatur.

Temperatur °C	1/K	Wärmeübertragung				rel. Wärmeübertragung bez. auf Mineralöl			
		Mineralöl	Askarel	Silikonöl	Midel 7131	Mineralöl	Askarel	Silikonöl	Midel 7131
-30,00	-0,00412	0,4562	0,00174	1,11943	0,08448	1,00000	0,00381	2,45368	0,14131
-20,00	-0,00395	1,0396	0,02337	1,48615	0,19090	1,00000	0,02248	1,42956	0,18363
-10,00	-0,00380	2,1905	0,16687	2,01769	0,48044	1,00000	0,07618	0,92110	0,21933
0,00	-0,00366	4,4140	0,62900	2,59952	1,05887	1,00000	0,14250	0,58892	0,23943
10,00	-0,00353	7,4104	1,62702	3,05500	2,08449	1,00000	0,21956	0,41226	0,27859
20,00	-0,00341	12,3136	4,03355	3,98091	3,50472	1,00000	0,32757	0,32329	0,28462
30,00	-0,00330	19,0739	8,55171	4,73757	5,94546	1,00000	0,44835	0,24638	0,31171
40,00	-0,00319	24,9607	15,07760	5,42237	9,66571	1,00000	0,60405	0,21724	0,39525
50,00	-0,00310	33,4949	25,58482	6,78743	14,66243	1,00000	0,76384	0,20204	0,43775
60,00	-0,00300	45,1363	37,75135	7,69927	21,15772	1,00000	0,83636	0,17050	0,46873
70,00	-0,00292	59,1386	55,75074	9,77809	28,32317	1,00000	0,94271	0,16534	0,47883
80,00	-0,00283	69,1286	77,28130	10,70136	37,94400	1,00000	1,11793	0,15480	0,54889
90,00	-0,00275	83,5111		11,88718	47,41819	1,00000		0,14210	0,56781
100,00	-0,00268	99,4656		13,32302	57,25000	1,00000		0,13395	0,57558
110,00	-0,00261	118,1661		15,19317	68,98700	1,00000		0,12857	0,58381
120,00	-0,00254	130,6393		16,32441	82,07500	1,00000		0,12496	0,62826
130,00	-0,00248			19,24811	96,27889				
140,00	-0,00242			21,11740	108,7047				
150,00	-0,00236			21,49181	124,0014				
160,00	-0,00231			22,83028	139,81440				
170,00	-0,00226			25,08491	152,21870				
180,00	-0,00221			27,09511	166,27048				
190,00	-0,00216								
200,00	-0,00211								
210,00	-0,00207								
220,00	-0,00203								
230,00	-0,00199								
240,00	-0,00195								

Tabelle 2: Zahlenmäßiger Vergleich der Wärmeübertragung verschiedener Isolierflüssigkeiten.

Biologische Abbaubarkeit

Für die Aufstellung von Transformatoren in Wasserschutzgebieten und an Orten mit hohen ökologischen Anforderungen spielt die biologische Abbaubarkeit der Isolierflüssigkeit eine große Rolle. Die Esterflüssigkeit Midel 7131 ist in diesem Zusammenhang eine geeignete Iso-lierflüssigkeit. Sie ist in die Wassergefährdungsklasse (WGK 0) eingestuft während die anderen vorgestellten Isolierflüssigkeiten in den Wassergefährdungsklassen 1 oder höher eingestuft sind. Bild 8 zeigt die biologische Abbaubarkeit der Esterflüssigkeit Midel 7131 im Vergleich zu Anilin. Es ist ersichtlich, daß die geforderte Abbaubarkeit von 80% nach etwa 20 Tagen er-reicht wird und auch nach 28 Tagen noch ein Anstieg der Kurve zu verzeichnen ist.

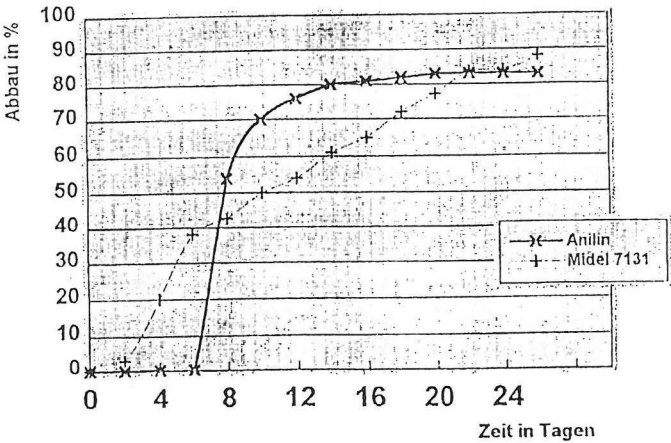


Bild 8: Biologische Abbaubarkeit der Esterflüssigkeit Midel 7131 im Vergleich zu Anilin.

Wasserlösungsvermögen

Der Wassergehalt der Isolierflüssigkeit hat einen direkten Einfluß auf ihre elektrische Festigkeit. Dabei ist nicht der absolute Wassergehalt sondern vielmehr die relative Feuchte für die Höhe der Durchschlagfestigkeit ausschlaggebend. Diese hängt wiederum von der Temperatur und dem Wasserlösungsvermögen der Isolierflüssigkeit bei der jeweiligen Temperatur ab. Bild 9 zeigt in diesem Zusammenhang das Wasserlösungsvermögen verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren über der Temperatur in einem Temperaturbereich von - 25 °C bis 100 °C im Vergleich.

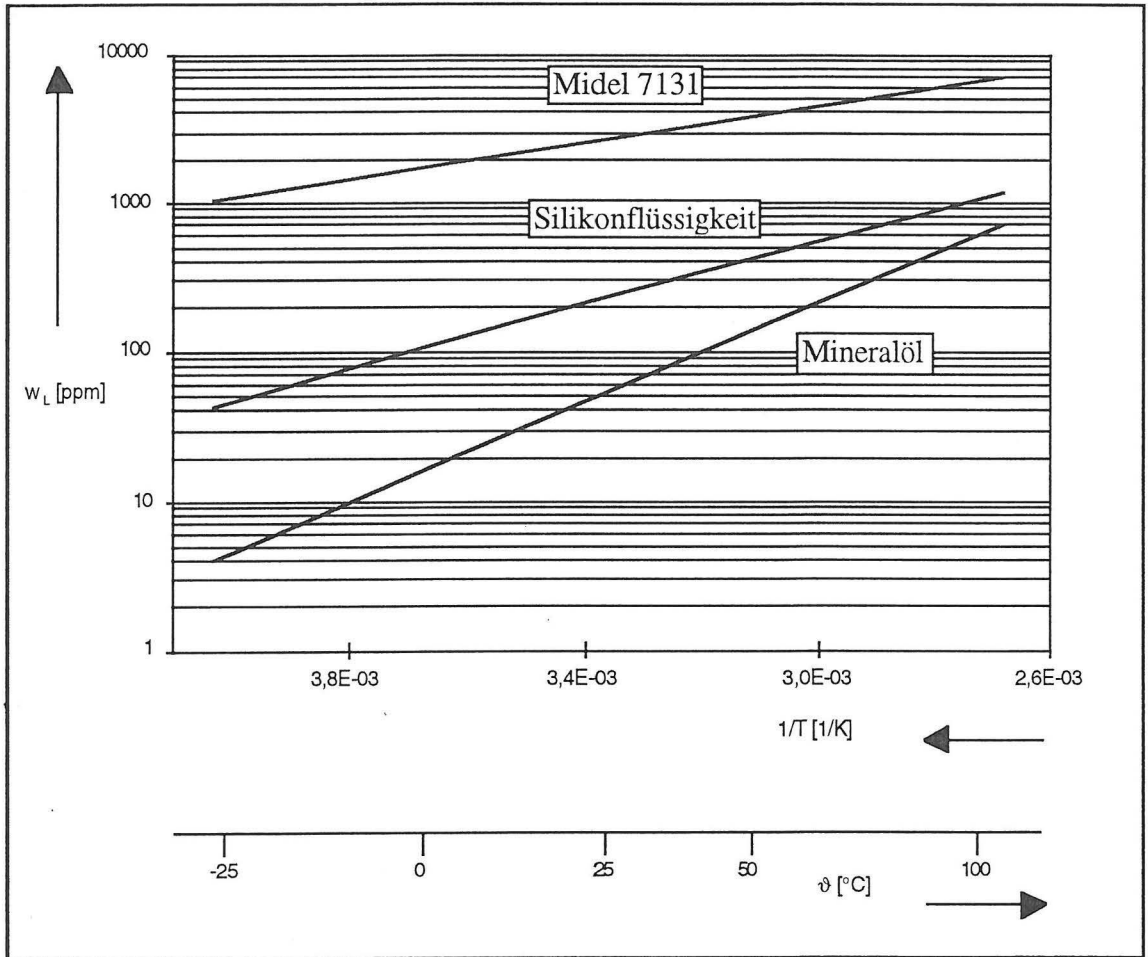


Bild 9: Wasserlösungsvermögen w_L verschiedener Isolierflüssigkeiten in Abhängigkeit vom Reziprokwert der Temperatur.

Wie ersichtlich, zeigen alle drei Isolierflüssigkeiten eine starke Zunahme des Wasserlösungsvermögens über der Temperatur. Die Steigung der Graden ist jedoch unterschiedlich.

Jede der zuvor genannten Flüssigkeiten wird in Kombination mit verschiedenen Papiersorten untersucht. Es werden im einzelnen der Zellulose-Papier Preßspan 3010 der Firma Krempel und das Meta-Aramid Papier NOMEX Typ 410 der Firma Du Pont in die Untersuchungen einbezogen.

3.1 **Zellulose (Psp 3010)**

Bei dem hier verwendeten Papier handelt es sich um Preßspan auf der Basis der ungebleichten Sulfat-Zellulose. Wie Bild 10 zu entnehmen ist, erfolgt die chemische Bindung der aufgetrennten Zellulosefasern über Wasserstoffbrücken. Neben guten elektrischen Eigenschaften und einer guten Imprägnierfähigkeit ist der fehlende Schmelzpunkt von besonderer Bedeutung.

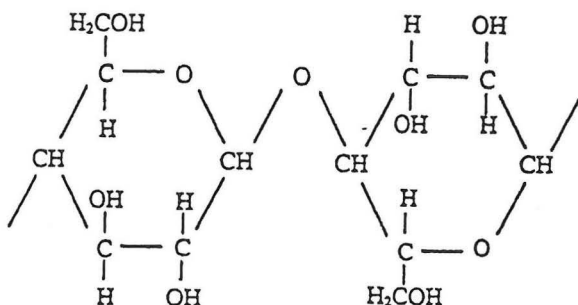


Bild 10: Strukturformel von Zellulose.

Aufgrund seines molekularen Aufbaus weist Zellulose-Papier eine große Hygroskopizität auf /15/. Da Wasser die elektrische Festigkeit herabsetzt und zu einer beschleunigten Alterung führt, wird Zellulosepapier vor dem Einsatz getrocknet und während des Betriebs die Wiederaufnahme von Wasser verhindert.

Als nachteilig sind der relativ niedrige Temperaturindex und die unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen von Mineralöl und Zellulose anzumerken.

3.2 **Aramid (NOMEX 410)**

Als Ausgangsprodukt für NOMEX Meta-Aramid dienen zwei Formen des synthetischen aromatischen Polyamid-Polymers: Flocken und Fasern. Aus Kombinationen dieser Flocken und Fasern und anschließendem Verdichten oder Kalandrieren erhält man eine Struktur mit einer hohen elektrischen und mechanischen Festigkeit.

Gerade in Verbindung mit temperaturbeständigen Isolierflüssigkeiten wie MIDEL 7131 oder BASYLONE M50, die im Unterschied zu Mineralölen auch bei Temperaturen von 130 °C und zum Teil höher eingesetzt werden können, bietet das ebenfalls sehr hitzebeständige NOMEX Aramidpapier eine gute Alternative zur Zellulose. Es kann ohne Verlust von mechanischen und elektrischen Eigenschaften kurzzeitig Temperaturen bis zu 300 °C ausgesetzt werden. Im

Dauerbetrieb ist die Höchstgrenze auf 220 °C beschränkt. Die Strukturformel einer NOMEX Aramid-Faser zeigt Bild 11.

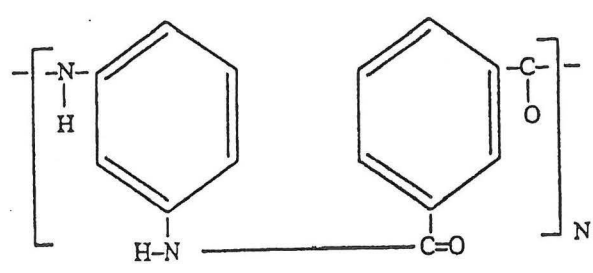


Bild 11: Poly-Meta-Phenylendiamin-Isophthalamid

Eine vergleichende Übersicht einiger wichtigen Eigenschaften von getrockneten nicht imprägnierten Zellulose- und Aramidpapier zeigt Tabelle 3.

Eigenschaft		Zellulose	Aramid
Dichte	g/cm ³	0,95 - 1,0	0,75
Dicke	mm	100	80
Zugfestigkeit N/cm	längs	130	65
	quer	53	39
Temperaturindex	°C	115	150
Dielektrizitätszahl ϵ_r		6,1	2,1

Tabelle 3: Technische Daten der Isolierpapiere Zellulose und Aramid

Beim Vergleich der beiden Isolierpapiere fällt die bessere mechanische Festigkeit des Zellulosematerials auf. Demgegenüber stehen der deutlich höhere Temperaturindex sowie eine Dielektrizitätszahl des Aramidpapiers, welche denen der Isolierflüssigkeiten besser angenähert ist.

4 Aufbereitung der Isolierung

4.1 Isolierpapier

Wie eben erwähnt, enthält das Papier aufgrund seiner Struktur viele Hohlräume, die im Normalfall mit Luft/Gas gefüllt sind. Außerdem kann das Papier große Mengen Wasser speichern. Um eine hohe elektrische Festigkeit zu erzielen, muß das Wasser und die Gase aus dem Papier herausgezogen werden. Die entstehenden Hohlräume sollen dann mit Öl imprägniert werden. Außerdem kann das Vorhandensein von Wasser im Papier eine Erhöhung des Verlustfaktors sowie eine Beschleunigung der Alterung verursachen.

Aus diesen Gründen muß das Papier vor der Imprägnierung entgast und getrocknet werden. Die Trocknung erfolgte hier im Vakuumofen bei einer Temperatur von 100 °C und bei einem Druck von <10 mbar über eine Dauer von zwei Tagen. Der Trocknungsprozeß läßt sich in drei

Phasen unterteilen. Zunächst verdampft das Wasser innerhalb des Papiers, anschließend wandert der Wasserdampf aus dem Material an die Oberfläche und wird von der Vakuumpumpe abgesaugt /15/. Wasser ist im bzw. am Papier in kondensierter, adsorbierter oder chemisch gebundener Form enthalten. Bei üblichen Temperaturen und einigen mbar wird bereits das kondensierte Wasser abgeschieden, während der adsorbierte Teil nach weiterer Druckverminderung verdampft. Das chemisch gebundene Wasser muß im Material verbleiben, damit die chemische Struktur erhalten bleibt. Es ist darauf zu achten, die Trocknungstemperatur bei Zellulosepapier unter 120 °C zu halten, da ansonsten eine thermische Alterung (Zersetzung) der Zellulose erfolgt. Zur Herstellung der Proben für die Untersuchungen, über die hier berichtet wird, wurden aus Zellulose- bzw. Aramidpapierbögen quadratische Teilstücke mit einer Fläche von ca. 28 cm² geschnitten. Um möglichst vergleichbare Bedingungen zu erhalten, bildeten jeweils vier Lagen des Aramid- oder drei Lagen des Zellulosepapiers eine Probe. Daraus ergaben sich Gesamtdicken von 320 µm bei Aramid bzw. 300 µm bei Zellulose. Zur Imprägnierung wurde das Papier im Anschluß an die Vakuumtrocknung unter Vakuum belassen und die Isolierflüssigkeit über eine spezielle Fülleinrichtung zugeführt. So konnte ein Kontakt und damit ein Feuchteausaustausch zwischen Papier und Atmosphäre verhindert werden. Da der gesamte Vorgang unter Vakuum ablief, reichte eine Zeitspanne von zwei Tagen zur vollständigen Imprägnierung des Materials aus.

Durch den vorhandenen Unterdruck von <10 mbar wurde verhindert, daß Gase oder Feuchtigkeit in das Mischdielektrikum eindringen. Während des Imprägnierens herrschte im Ofen eine Temperatur von 80 °C. Dies verringerte die Viskosität der Isolierflüssigkeit, so daß das Ausfüllen eventueller Faserzwischenräume erleichtert wurde. Für eine hohe elektrische Festigkeit ist es wichtig, alle Gaseinschlüsse mit Flüssigkeit zu füllen, da es an solchen Stellen ansonsten zu Teilentladungen und Durchschlägen kommen kann.

4.2 Isolierflüssigkeiten

Die elektrischen Eigenschaften von Isolierflüssigkeiten hängen ebenfalls wie bei den Papieren stark vom Wasser- und Gasgehalt ab. Um möglichst gute elektrische Eigenschaften zu erreichen, werden sie in einer Vakuumtrocknungsanlage getrocknet und entgast. Durch die gleichzeitige Verringerung des Sauerstoffpartialdruckes wird die Gefahr einer Oxidation der Flüssigkeitskomponenten herabgesetzt. Außerdem wird durch eine weitreichende Entgasung gewährleistet, daß die Isolierflüssigkeit beim Einfüllen in das Betriebsmittel geringer aufschäumt und so in kleinste Hohlräume eindringen kann.

In einer Isolierflüssigkeit kann sich Wasser in drei Zuständen befinden: gelöst, emulgiert und grob dispergiert. Gase können gelöst, fein- oder grobdispers vorhanden sein, wobei stabile Zustände nur im Bereich der Lösung anzutreffen sind. Im stationären Zustand stellen sich die durch Druck und Temperatur festgelegten Gleichgewichtszustände ein /16/.

Bei den Untersuchungen, über die hier berichtet wird, wurden jeweils verschiedene definierte Wassergehalte eingestellt. Dazu wurden die Flüssigkeiten bis auf ein Minimum an Feuchte getrocknet und dann mittels einer Pipette eine abgemessene Menge demineralisiertes Wasser zugegeben. Es wurden dadurch für das mineralische Isolieröl SHELL DIALA D Wassergehalte von 5 ppm bis 40 ppm, für MIDEL 7131 20 ppm bis 1000 ppm und bei BAYSILONE M 50 EL 10 ppm bis 100 ppm eingestellt.

5 Ergebnisse der Untersuchungen

5.1 Untersuchungen an Isolierflüssigkeiten

5.2 Untersuchungen der elektrischen Eigenschaften

Die meisten bislang veröffentlichten Resultate beziehen sich auf die elektrischen Eigenschaften der Isolierflüssigkeiten bei Raumtemperatur und manchmal auch auf höhere Temperaturen. Es kommen an vielen Aufstellungsorten jedoch auch tiefere Temperaturen unter 0 °C vor und es ist möglich, daß ein Transformator vom kalten Zustand auf Last eingeschaltet wird. In so einem Fall wird die Flüssigkeit eine sehr viel höhere Viskosität aufweisen als im normalen Betriebszustand. Dadurch wird die Wärmeübertragung auch wesentlich niedriger sein, als im normalen Betriebszustand. Ein weiterer wesentlicher Punkt bei tiefen Temperaturen stellt der Wassergehalt dar. In tiefen Temperaturbereichen ist auch bei relativ kleinen absoluten Feuchten die relative Feuchte auf Grund des sehr niedrigen Wasserlösungsvermögens sehr hoch. Bei hoher relativen Feuchte ist jedoch bekannt, daß die elektrische Festigkeit der Flüssigkeit sehr stark reduziert wird. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich jedoch auf Temperaturen im Bereich Raumtemperatur und höher.

Bezüglich der tieferen Temperaturen liegen bislang kaum Ergebnisse vor. Im Rahmen dieses Beitrages werden die elektrischen Festigkeiten verschiedener Isolierflüssigkeiten in einem Temperaturbereich von -25 °C bis 100 °C verglichen. Dabei wird abweichend von der VDE-Bestimmung 0370 Teil 5/8.92 bei tiefen Temperaturen die Schlagweite der VDE-Kugelkallotten zu 1mm gewählt.

Die Untersuchungen bei tiefen Temperaturen erfolgen in einem Kühlraum mit einem Volumen von 1 m³. Die tiefsten erreichbaren Temperaturen betragen ca. -30 °C bei einer Außentemperatur von 30 °C. Mit Hilfe entsprechender Durchführungen kann die Hochspannung bis zu 60 kV in den Kühlraum geführt werden. Die Meßreihen bei tiefen Temperaturen erfolgen in der Reihenfolge +25 °C, -25 °C, -10 °C, 0 °C, +10 °C und zur Kontrolle wiederum bei +25 °C statt. Eine Meßreihe besteht aus jeweils sechs Einzeldurchschlägen pro Prüfgefäß, wobei die Durchschläge 5 Minuten auseinander liegen. Eine Ausnahme bilden die Meßreihen mit Baysilone M50 EL. Da bei dieser Flüssigkeit nach jedem Durchschlag zwischen den Elektroden gelatinöse Siloxane gebildet werden können, welche zur Verringerung der folgenden Durchschlagsspannungen führen, muß nach jedem Durchschlag diese gereinigt und mit neuer Flüssigkeit gefüllt werden /20/. Aufgrund dieses Mehraufwands bei Baysilone M50 EL wird auf die Ergebnisse bei +10 °C verzichtet und statt der üblichen sechs Meßpunkte pro Durchschlagspannung werden nur 4 gemessen. Dies entspricht weitgehend der VDE 0374.

5.2.1 Shell Diala D

Die elektrische Festigkeit von Mineralöl Shell Diala D im Bereich 20 °C bis 100 °C ist aus der Literatur bekannt. Hier werden die elektrischen Festigkeitswerte bei tiefen Temperaturen bis zu -25 °C ermittelt. Bild 12a zeigt die elektrische Festigkeit von Shell Diala D über der Temperatur im Temperaturbereich -25 °C bis 25 °C mit dem Wassergehalt als Parameter. Zum Vergleich zeigt Bild 12b die entsprechenden Werte für den Temperaturbereich 20 °C bis 100 °C

aus der Literatur /17/. Wie ersichtlich, sind die Werte für sehr geringen Wassergehalten bis 5 ppm über dem gesamten Temperaturbereich auf sehr hohem Niveau konstant. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Durchschlagfestigkeit ab. Diese Abnahme ist in Abhängigkeit der jeweiligen Temperatur und des zugehörigen Wasserlösungsvermögens unterschiedlich. Verblüffend ist die gute Übereinstimmung der Durchschlagwerte bei tiefen Temperaturen gemessen bei einem Elektrodenabstand von 1mm (Bild 12a) mit den aus der Literatur bekannten Werten bei 20 °C bis 100 °C gemessen an einem Elektrodenabstand von 2,5 mm.

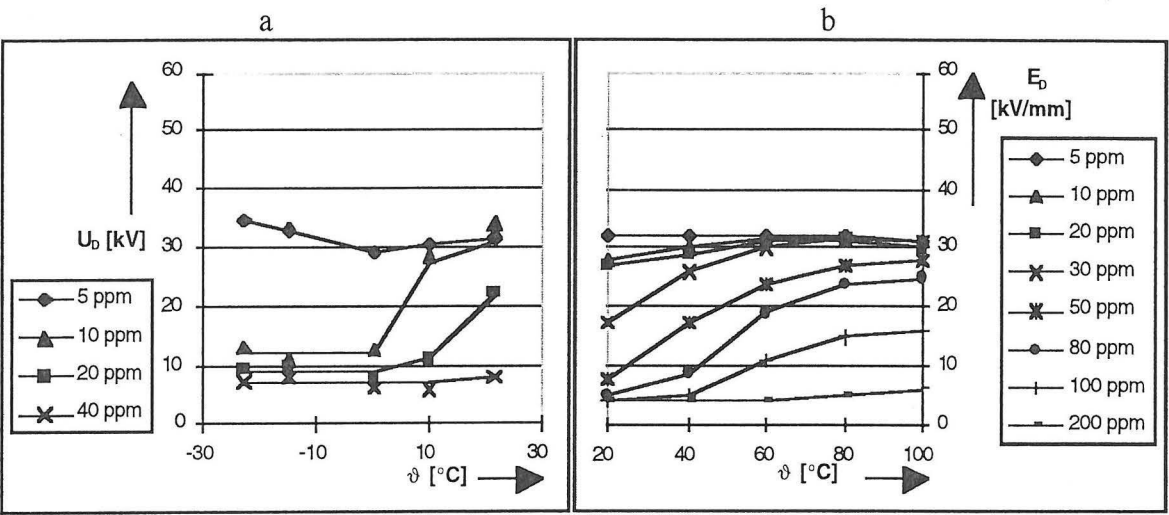


Bild 12: Durchschlagspannung U_D von Shell Diala D in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ bei verschiedenen Wassergehalten. Gegenüberstellung mit Meßwerten aus der Literatur

In Bild 13 ist die Durchschlagspannung über der relativen Feuchte dargestellt. Es zeigt sich der für ein Mineralöl typische Verlauf /17/. Mit zunehmender relativer Feuchte nimmt die elektrische Festigkeit ab. Sie erreicht bei einer relativen Feuchte von ca. 100% einen unteren Grenzwert und bleibt dann nahezu konstant. Im Bereich der Übersättigung (Emulsion von Wasser in Öl) ist die Durchschlagspannung unabhängig vom Wassergehalt. Die Meßpunkte haben in diesem Bereich einen sehr niedrigen Wert. Die beiden nicht in diese Kurve hineinpassenden Meßwerte sind die Durchschlagmeßwerte der trockenen 5 ppm Meßreihe bei den tiefen Temperaturen -22 °C und -15 °C. Sie belegen die Tatsache, daß bei sehr trockenem Mineralöl kein Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Durchschlagspannung besteht.

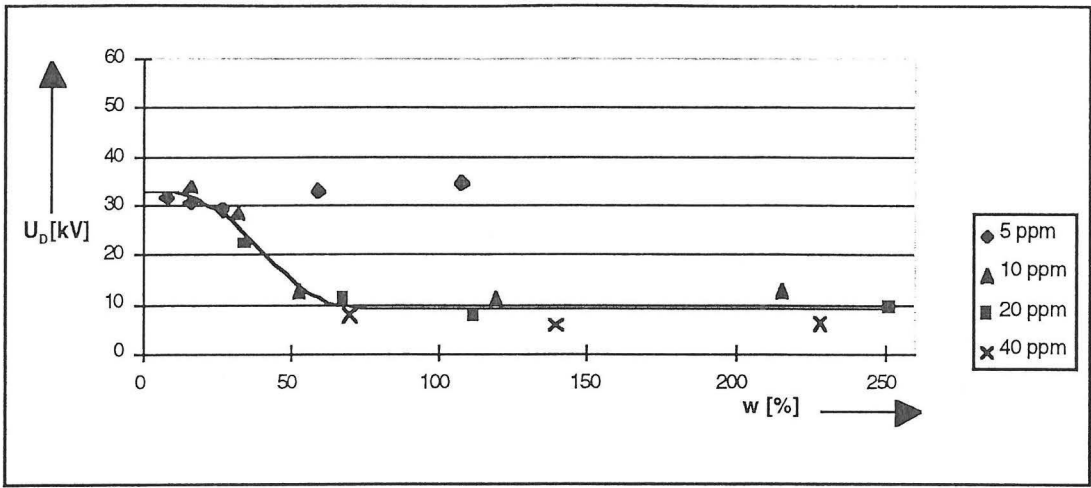


Bild 13: Durchschlagspannung U_D von Shell Diala D in Abhängigkeit von der relativen Feuchte w_{rel} .

Das starke Absinken der Durchschlagspannung bei der 10 ppm- und 20 ppm-Meßreihe ist darauf zurückzuführen, daß bei beiden Meßreihen die relative Feuchte gerade an diesen Stellen stark ansteigt. In der Meßreihe von 10 ppm steigen die Werte von 32% bei +10 °C auf 119% bei -15 °C, und in der Meßreihe von 20 ppm steigt die relative Feuchte von 35% bei +22 °C auf 112% bei 0 °C an. Die konstant niedrige elektrische Festigkeit bei Shell Diala D mit einem absoluten Wassergehalt von 40 ppm ist darauf zurückzuführen, daß die relative Feuchte bei +22 °C bereits über 70% beträgt und bei -22 °C auf einen Wert von 926% steigt. Diese Meßreihe ist damit überwiegend im übersättigten Bereich durchgeführt worden.

5.2.2 Midel 7131

Bild 14 zeigt die Durchschlagspannung von Midel 7131 in Abhängigkeit von der Temperatur mit dem absoluten Wassergehalt als Parameter.

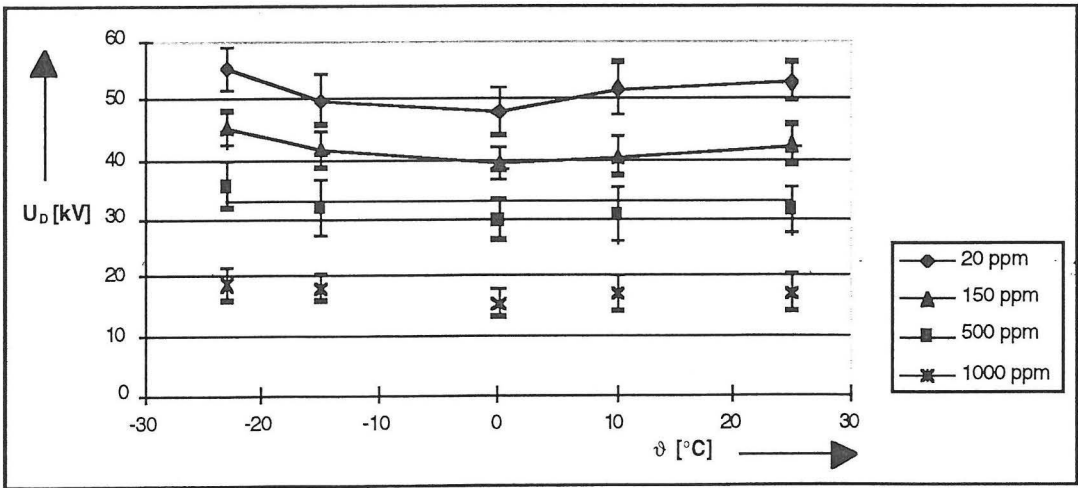


Bild. 14: Durchschlagspannung U_D von Midel 7131 in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ im Temperaturbereich - 25 °C bis 25 °C.

Obwohl der absolute Wassergehalt stark variiert, liegt bei allen Meßreihen ein leichtes Minimum bei einer Temperatur von 0 °C vor. Trotzdem kann festgestellt werden, daß der Einfluß der Temperatur auf die Durchschlagspannung im Temperaturbereich von +25 °C bis -25°C nicht signifikant ist. Zusätzlich ist Midel 7131 die einzige der drei untersuchten Isolierflüssigkeiten, bei der die Durchschlagspannungen bei den Temperaturen -15 °C und -23 °C etwa auf gleicher Höhe wie bei Raumtemperatur liegen.

5.2.3 Baysilone M 50 EL

Bild 15 zeigt die Durchschlagfestigkeit von Baysilone M 50 EL über der Temperatur mit verschiedenen Wassergehalten als Parameter.

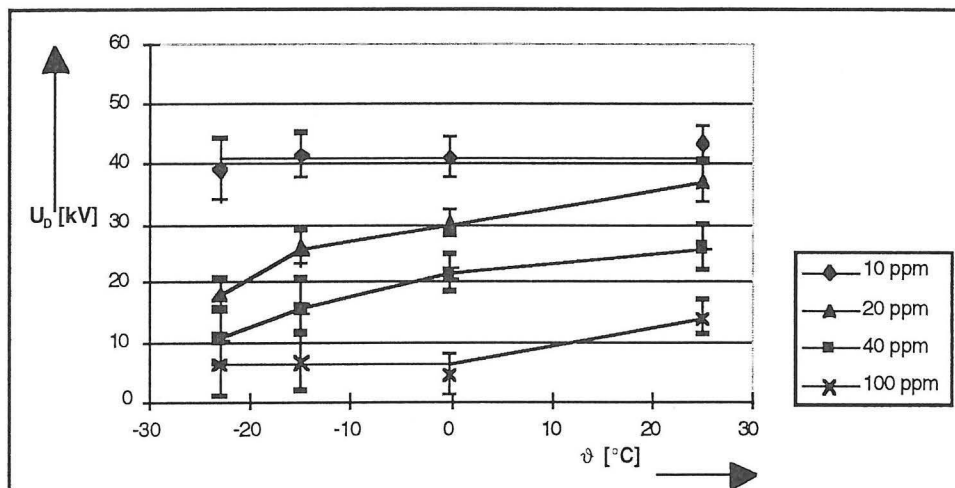


Bild 15: Durchschlagspannung U_D von Baysilone M 50 EL in Abhängigkeit von der Temperatur θ .

Im Temperaturbereich -23 °C bis 25 °C ist der Einfluß der Temperatur auf die elektrische Festigkeit bei der 10 ppm-Meßreihe vernachlässigbar. Dies korrespondiert mit der Meßreihe von Shell Diala D mit einer Feuchte von 5 ppm. Bei der 100 ppm-Meßreihe erkennt man, daß der Einfluß der Temperatur unter 0 °C nicht mehr festzustellen ist. Ähnlichkeiten fallen zwischen den 20 ppm und 40 ppm Meßreihen auf. Hier ist im Temperaturbereich von +25 °C bis zu -23 °C ein fast gleichmäßiges Abfallen der Durchschlagspannung zu beobachten.

Dabei fällt die relative Feuchte bei der 20 ppm Meßreihe von 44% bei -23 °C auf 8% bei +25 °C und bei der 40 ppm Meßreihe von 88% bei -23 °C auf 17% bei +25 °C. Dieses Verhalten ist dem des Mineralöls Shell Diala D sehr ähnlich.

Zur Vermeidung von Teilentladungen in Hohlräumen und zur Erzielung besserer elektrischer Alterungseigenschaften werden die Papierisolierungen mit entsprechenden Isolierflüssigkeiten imprägniert. Somit entsteht eine Serienschaltung aus Papier und Isolierflüssigkeit. Es ergibt sich daher für das Mischdielektrikum ein Wert, der sich aus den Dielektrika der beiden Materialien ableitet. Die Feldverteilung innerhalb des Dielektrikums verhält sich umgekehrt proportional zu den Dielektrizitätszahlen.

$$E_F/E_C = \epsilon_{rC}/\epsilon_{rF}$$

mit: E_F = Feldstärke des reinen Fluids
 ϵ_{rF} = Dielektrizitätszahl des reinen Fluids
 E_C = Feldstärke der reinen Zellulose
 ϵ_{rC} = Dielektrizitätszahl der reinen Zellulose

Betrachtet man als Beispiel Zellulose mit einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_{rC} = 6,1$ in Verbindung mit dem Mineralöl Shell Diala D mit $\epsilon_{rF} = 2,2$ so erhält man eine Feldstärkenverteilung von :

$$E_F/E_C = 2,77$$

Hieraus läßt sich erkennen, daß das Öl einer wesentlich stärkeren Beanspruchung unterliegt als die Zellulose.

Die elektrische Festigkeit von Flüssigkeit-Papier-Mischdielektrika wurde im Ramp-Test und im Step-Test ermittelt. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde gemäß VDE 0303 die Spannung beim Ramp-Test mit einer definierten Geschwindigkeit von 0 V bis zum Durchschlag linear gesteigert. Dabei sollte der Durchschlag nach ca. 10...20 s erfolgen. Bei den hier benutzten Proben ergab sich daraus eine Spannungssteigerungsgeschwindigkeit von ca. 2 kV/s, die mit Hilfe eines Motorstelltrafos eingestellt werden konnte. Die Durchschlagsspannung errechnete sich mit dem Auswertungsverfahren nach Weibull aus sechs äquivalenten Messungen.

Beim Step-Test wurde die Stehfeldstärke ermittelt. Hierzu wurde die Probe zunächst 40 % der nach dem Ramp-Test ermittelten Durchschlagfeldstärke E_D ausgesetzt. Jeweils nach einer bestimmten Zeitspanne Δt wurde die Feldstärke um $\Delta E = 8 \%$ von E_D gesteigert bis der Durchschlag erfolgte. Dabei konnte Δt zwischen einer und dreißig Minuten variiert werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde $\Delta t = 5$ min festgelegt.

Die Durchschlagfestigkeit der Mischdielektrika hängt außer von der Isolierflüssigkeit und dem Isolierpapier von vielen weiteren Parametern ab.

Im Rahmen dieses Beitrages soll lediglich auf die Untersuchungen im Zusammenhang mit Zellulosepapier-Mischdielektrika eingegangen werden. Die für diese Untersuchungen eingestellten Wassergehalte entsprechen für die Bezeichnung "getrocknet" dem Neuzustand direkt nach einer Imprägnierung. Dabei betrug der Wassergehalt für alle drei untersuchten Flüssigkeiten jeweils ca. 20 ppm. Die jeweils zugehörigen Feuchten für das Zellulosepapier betragen bei der

Imprägnierung mit der Esterflüssigkeit ca. 0,4 %, bei der Imprägnierung mit der Silikonflüssigkeit ca. 2 % und bei der Imprägnierung mit dem Mineralöl ca. 1,6 %.

6.1 Bestimmung der elektrischen Festigkeit der ungealterten Mischdielektrika

Den Einfluß der Temperatur auf die Durchschlagfestigkeit zeigt Bild 16. Als Parameter ist die Art der Isolierflüssigkeit dargestellt. Wie ersichtlich zeigt die Durchschlagfestigkeit des Zellulosepapiers mit allen drei untersuchten Isolierflüssigkeiten einen Abfall über der Temperatur. Während Esterflüssigkeit und Mineralöl hohe Werte aufzeigen, sind die Werte für Silikonflüssigkeit im gesamten Temperaturbereich etwa 10 kV niedriger.

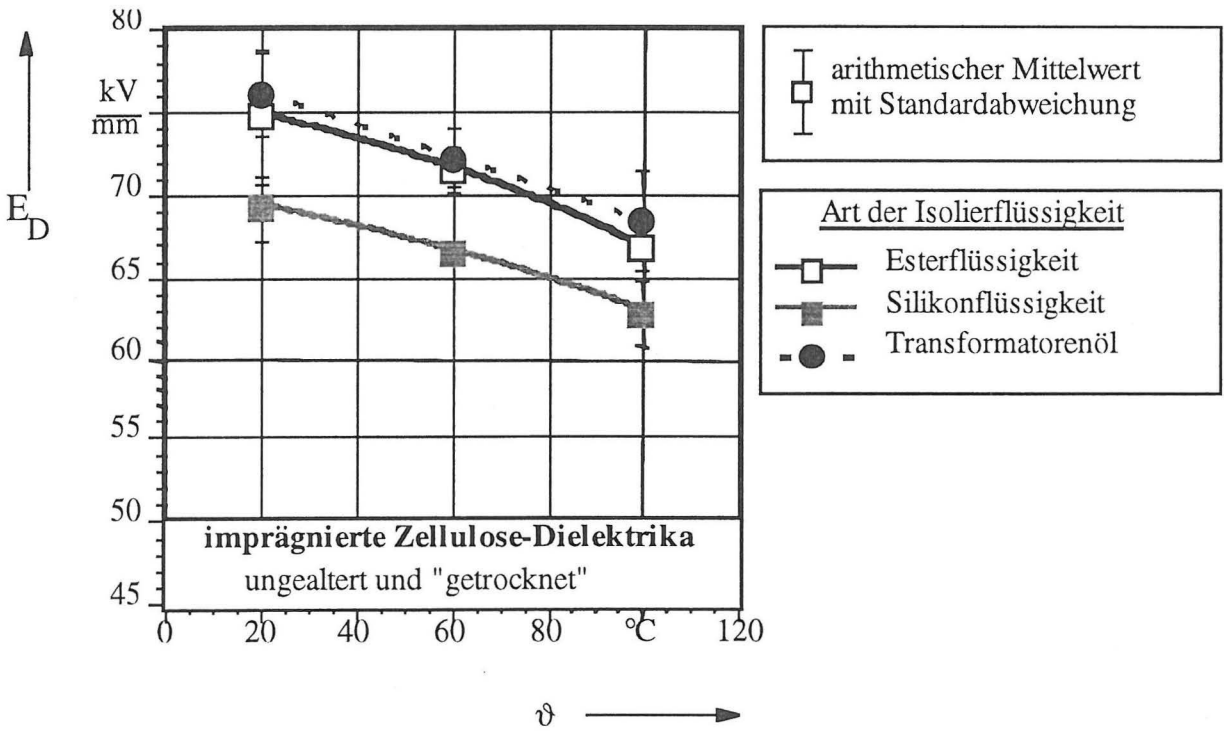


Bild 16: Durchschlagfeldstärke E_D von ungealterten Zellulose-Isolierflüssigkeits-Dielektrika.

Die Bilder 17-19 zeigen die elektrischen Festigkeiten der ungealterten Zellulose-Flüssigkeits-Mischdielektrika über der Temperatur jeweils für verschiedene Wassergehalte in der Isolierflüssigkeit. Die Wassergehalte wurden bei Mineralöl zu 20 ppm und 60 ppm, bei Silikonflüssigkeit zu 20 ppm und 100 ppm und bei Esterflüssigkeit zu 100 ppm und 1000 ppm gewählt. Wie ersichtlich, ist der Einfluß des Wassergehalts bei Mineralöl-Zellulosepapier im genannten Bereich über der Temperatur geringer als bei den anderen beiden Flüssigkeiten. Die untersuchten Proben zeigen im gesamten Temperaturbereich Festigkeitswerte größer 55 kV/mm.

Um eine vergleichbare Aussage und Bewertung von Flüssigkeits-Papier-Mischdielektrika zu erhalten, ist ein Vergleich der Durchschlagfestigkeit im neuen und gealterten Zustand von großer Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden die Flüssigkeits-Papier-Mischdielektrika unterschiedlichen Alterungen ausgesetzt. Die durchgeführten Alterungen sind mit den jeweiligen Parametern in der Tabelle 4 dargestellt. Für Alterungen mit Katalysatoren sind den Isolierflüssigkeiten jeweils 3 g/l Kupfer, Zink, Eisen und Aluminium in Span- bzw. Pulverform zugegeben worden. Dabei wird sichergestellt, daß diese Katalysatoren wieder vollständig aus den Isolierflüssigkeiten entfernt werden können, um die im Anschluß an die Alterung stattfindende Bestimmung der elektrischen Festigkeit nicht zu beeinflussen. Die Alterungsdauer betrug bei allen Prüflingen 1000 h. Als Alterungstemperatur wurde für Mineralöl und Zellulose 100°C, für Silikonflüssigkeit, Esterflüssigkeit und Aramidpapier 150°C gewählt.

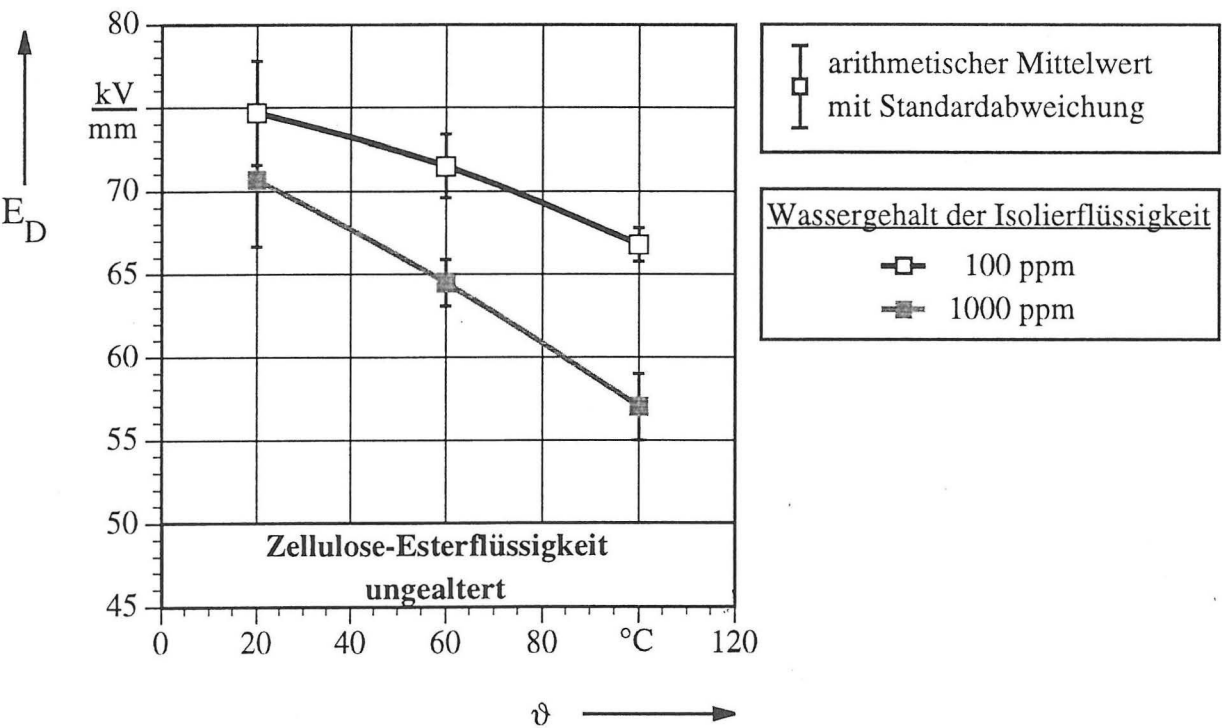


Bild 17 : Durchschlagfeldstärke E_D von ungealterten Zellulose-Esterflüssigkeit-Dielektrika über der Temperatur mit dem Wassergehalt als Parameter.

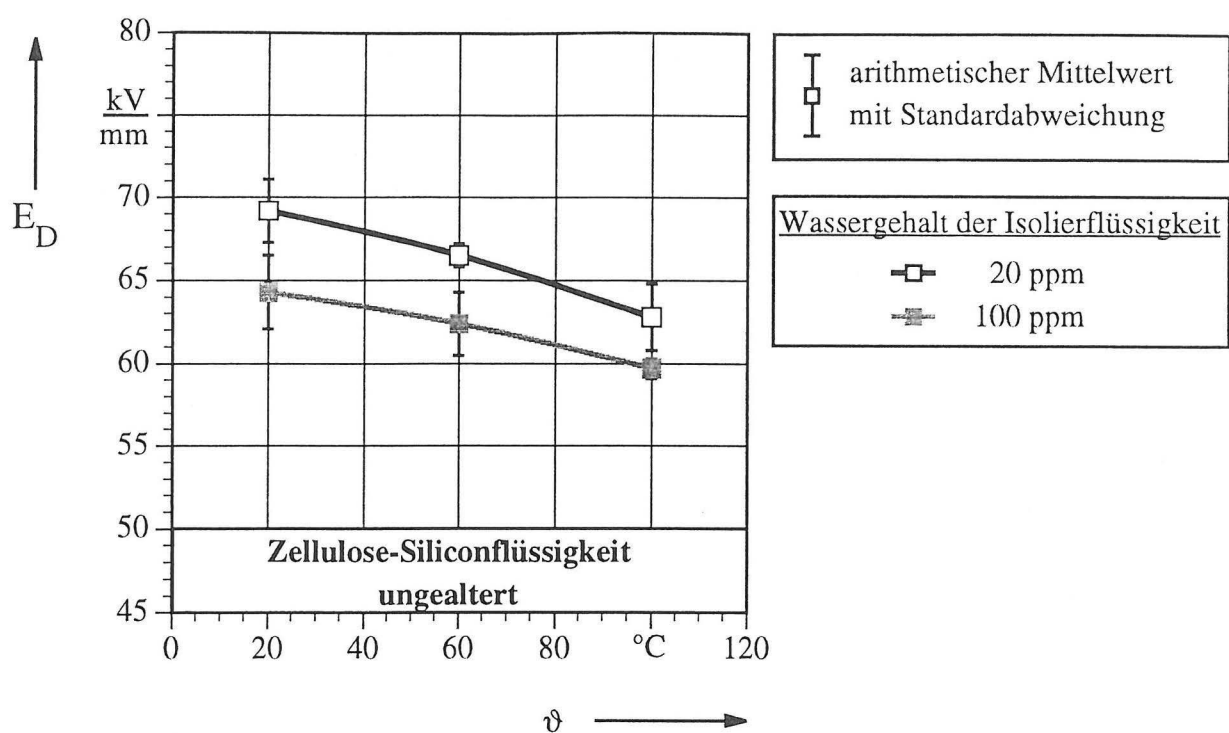


Bild 18 : Durchschlagfeldstärke E_D von ungealterten Zellulose-Silikonflüssigkeit-Dielektrika über der Temperatur mit dem Wassergehalt als Parameter.

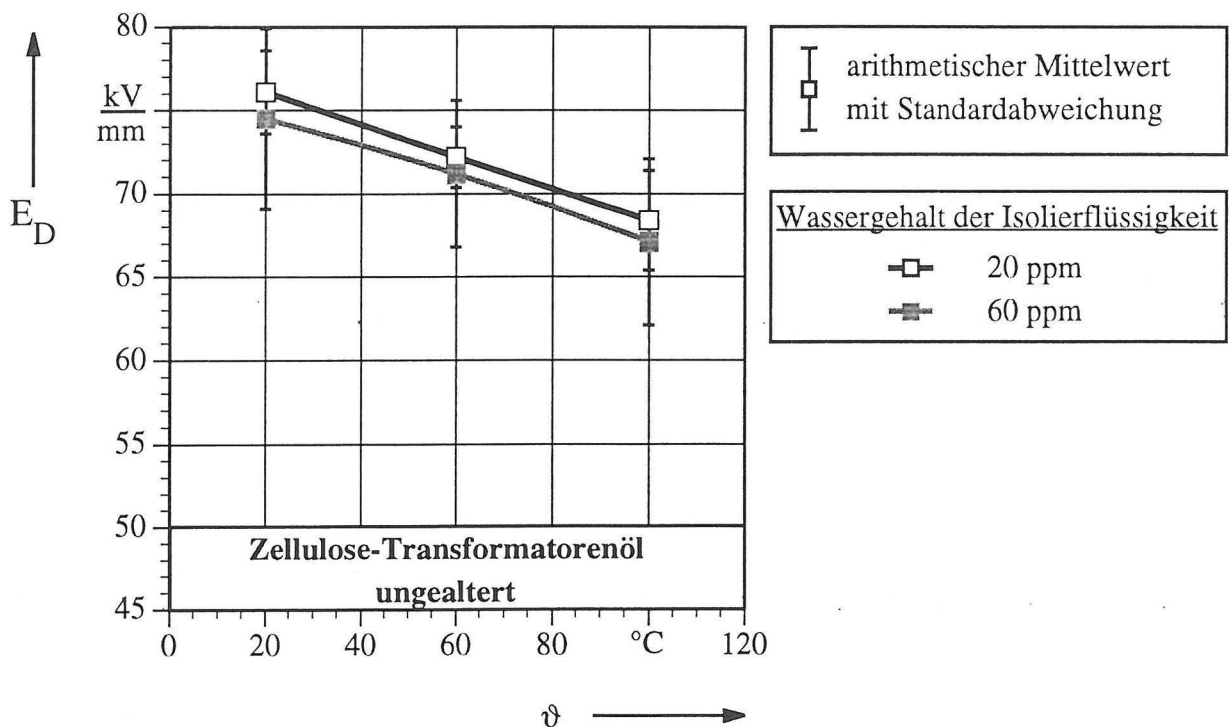


Bild 19 : Durchschlagfeldstärke E_D von ungealterten Zellulose-Transformatoröl-Dielektrika über der Temperatur mit dem Wassergehalt als Parameter

Die elektrischen Alterungen wurden bei zusätzlicher elektrischer Beanspruchung von 20 kV/mm in heizbaren Prüfgefäßen mit Rogowski-Elektroden durchgeführt.

	Bezeichnung der Alterung und Parameter während der Alterung		
Dielektrikum- Isolierflüssigkeit	thermisch	thermisch mit Katalysatoren (3 g/l)	thermisch-elektrisch mit Katalysatoren
Zellulose*- Midel	100°C	100°C	100°C 20 kV/mm
Zellulose*- Mineralöl*	100°C	100°C	100°C 20 kV/mm
Zellulose*- Silikonflüssigkeit	100°C	100°C	100°C 20 kV/mm

Tabelle 4: Durchgeführte Alterungen, Bezeichnungen und Parameter der Alterungen
(*Begrenzung der zulässigen Temperatur auf 100°C für Mineralöl und Zellulose)

Einige Ergebnisse der Alterungsuntersuchungen sind in Bild 20 gegenübergestellt. Als Vergleich ist die jeweilige Festigkeit der gleichermaßen imprägnierten, ungealterten Isolierpapiere "getrocknet" ebenfalls mit eingezeichnet. Wie ersichtlich, bewirken die durchgeführten thermischen Alterungen nur einen geringeren Rückgang der elektrischen Restfestigkeit. Bei einer Alterung mit zusätzlicher elektrischer Belastung trat innerhalb der Alterungsdauer eine hohe Anzahl von Frühausfällen auf, so daß die Ergebnisse der elektrisch/thermischen Alterungen erst nach weiteren Untersuchungen als statistisch gesichert anzusehen sind.

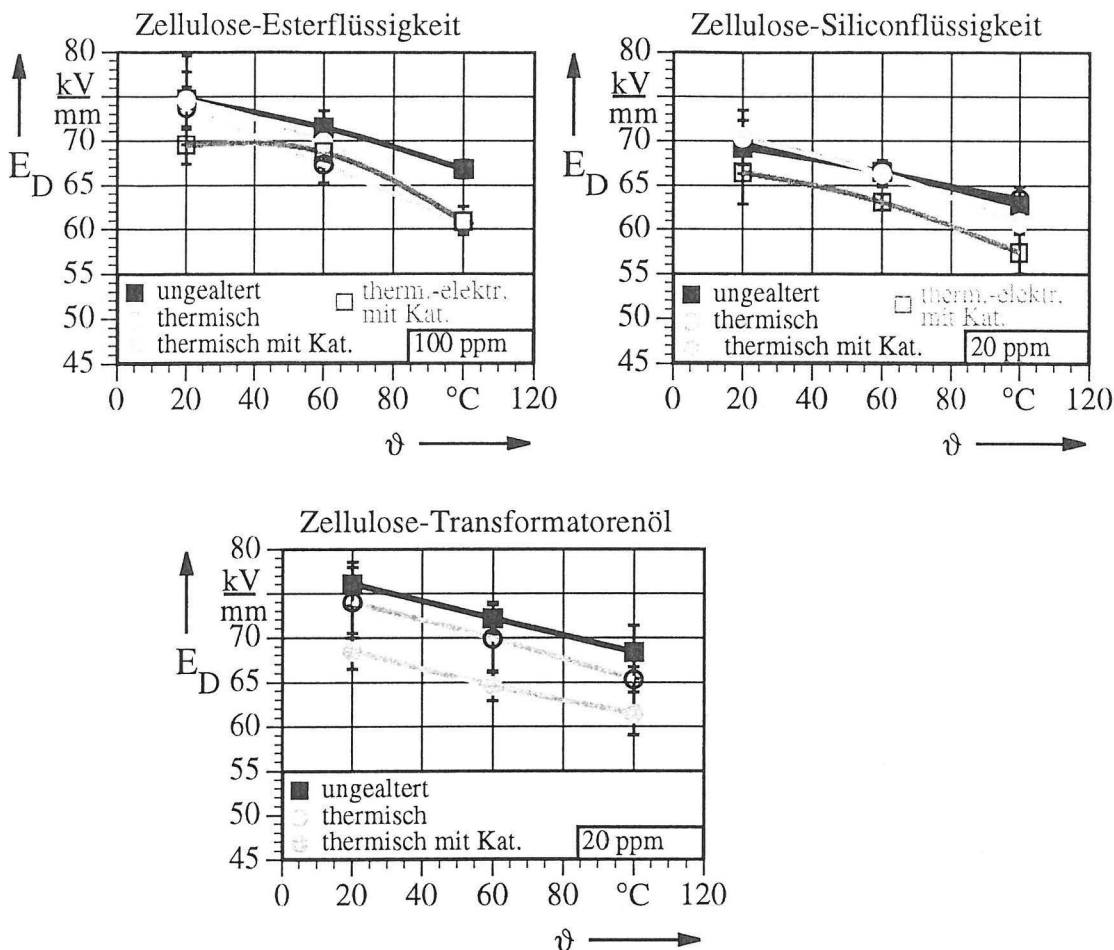


Bild 20: Durchschlagfeldstärke verschiedener Flüssigkeits-Papier-Mischdielektrika

7 Auswahl der Isolierung für Transformatoren

Das ständig wachsende Umweltbewußtsein und die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an Transformatoren sowie die umfangreichen Kenntnisse über die Eigenschaften verschiedener Isoliersysteme eröffnet neue Perspektiven für die Hersteller und Betreiber von Transformatoren bei der Wahl geeigneter Isoliersysteme. Es ist heute möglich, mit der Wahl der Isolierflüssigkeit und des Isolierpapiers sowie deren Aufbereitung für verschiedene Anwendungsfälle und Aufstellungsorte die jeweils günstigste Isolierung zu wählen. So kann z.B. bei Leistungstransformatoren mit großem Ölvolumen und Aufstellungsorten außerhalb von Ballungsgebieten und bei moderaten Temperaturen nach wie vor Mineralöl in Kombination mit Zellulose eingesetzt werden. Diese bietet nicht nur günstige elektrische und Alterungseigenschaften, sondern ist darüber hinaus nach wie vor die wirtschaftlichste Lösung.

Bei den Anwendungsbereichen, wo hohe Anforderungen bezüglich des Brandverhaltens gestellt werden, wie z.B. im Tunnelbereich, ist neben dem höheren Flamm- und Brennpunkt auch die Menge und die Zusammensetzung der Rauchgase von großer Bedeutung. Giftige Rauchgase und mengenmäßig große und lichtundurchlässige Rauchgase erschweren die Rettungs- und Löscharbeiten. Betrachtet man die Menge und die Zusammensetzung der Rauchgase verschiedener Isolierflüssigkeiten für Transformatoren so bietet sich die Esterflüssigkeit Midel 7131

als eine günstige Isolierflüssigkeit für diesen Anwendungsbereich an. Ist neben dem Brandverhalten auch der Raumbedarf von Bedeutung wie es z.B. bei Lokomotivtransformatoren der Fall ist, so kann die Esterflüssigkeit Midel 7131 im Zusammenhang mit Aramid-Papier eingesetzt werden. Dadurch ermöglicht man eine höhere Temperaturlastung des Transformators, als dies bei Mineralöl im Zusammenhang mit Zellulose-Papier der Fall ist. Dies erlaubt den Herstellern, den Transformator kompakter zu bauen und eine höhere Materialauslastung zuzulassen.

Sind Transformatoren für die Aufstellung in Wasserschutzgebieten und Orten mit hohen Anforderungen diesbezüglich vorgesehen, so ist es sinnvoll, Flüssigkeiten mit WGK 0 (die Klassifizierungen werden demnächst geändert) einzusetzen. Eine Flüssigkeit, die in WGK 0 eingestuft ist, ist Midel 7131, die je nach Anforderungen bezüglich der Betriebstemperatur in Kombination mit Zellulose- oder Aramidpapier eingesetzt werden kann.

Für die Aufstellung von Transformatoren in sehr kalten Gebieten, wo es im Winter die Möglichkeit von Kaltstarts gibt, ist es sinnvoll, Isolierflüssigkeiten zu verwenden, welche auch in tiefen Temperaturbereichen unter 0 °C gute elektrische Eigenschaften aufweisen. Eine Betrachtung der Bilder 14-16 zeigt, daß Mineralöl nur bei einer absoluten Feuchte von weniger als 5 ppm seine elektrische Festigkeit auch bei tiefen Temperaturen beibehält. Diesen sehr niedrigen Wassergehalt kann man jedoch nicht immer gewährleisten, zumal die Feuchtigkeit nicht nur von außen eindringen kann sondern darüber hinaus auch durch die Alterung der Zellulose entsteht. Ein Wassergehalt von ca. 10 ppm bewirkt, daß die elektrische Festigkeit des Isolieröls schon bei einer Temperatur unterhalb 0 °C rapide absinkt. Ein ähnliches Verhalten wie bei Mineralöl bei 5 ppm zeigt Silikonflüssigkeit bei 10 ppm Feuchte. Im Unterschied zu diesen beiden Flüssigkeiten zeigt die Esterflüssigkeit Midel 7131 auch bei Wassergehalten bis zu einigen 100 ppm noch Festigkeitswerte ähnlich wie bei Mineralöl bei 5 ppm. Es ist somit ersichtlich, daß für die Transformatoren in kalten Aufstellungsorten mit der Möglichkeit von großen Wassergehalten die Esterflüssigkeit geeignet erscheint.

Die Problematik der Wahl der Isolierung stellt sich nicht nur bei neu zu konzipierenden Transformatoren. Es kommt ebenfalls häufig vor, daß man aufgrund der neuen Auflagen und strengeren Anforderungen vor der Aufgabe steht, den Transformator zu erneuern oder auch, wenn möglich und ausreichend, nur die Isolierflüssigkeit auszutauschen. Der Austausch des Transformators stellt eine relativ große Investition dar, während der Austausch der Isolierflüssigkeit in vielen Fällen eine wirtschaftlich wesentlich günstigere Lösung darstellt. Welche Lösung letztendlich die bessere ist hängt von vielen Parametern, wie dem Zustand des Transformators, der Art der Isolierflüssigkeit, der Art der Anforderung u.s.w. ab.

Bei einem Austausch der Isolierflüssigkeit bleiben immer Teile der alten Flüssigkeit im Kern und in der festen Isolierung zurück. Diese Restflüssigkeit vermischt sich im Laufe der Zeit mit der neuen Flüssigkeit. Es entsteht somit eine Mischisolierflüssigkeit. Es muß daher das elektrische und dielektrische Verhalten dieser Mischisolierflüssigkeit im neuen Zustand und nach einer intensiven Alterung bestimmt werden, damit gewährleistet ist, daß der Transformator mit der neuen Isolierflüssigkeit einwandfrei arbeitet. Außerdem muß das Verhalten der Mischisolierflüssigkeit überprüft werden, ob sie die gestellten Anforderungen erfüllt.

Im nächsten Kapitel soll daher das Verhalten von Mischisolierflüssigkeiten, die bei einer Umfüllung eines Transformators entstehen können, untersucht werden.

8 Mischisolierflüssigkeiten

8.1 Mischung von Isolierflüssigkeiten Midel 7131 und Shell Diala D

8.1.1 Vorbereitung und Mischung der Isolierflüssigkeiten

Um die Einflüsse der Restflüssigkeit auf die Eigenschaften von Midel bei der Umfüllung eines Transformators zu untersuchen, wurde das Midel mit verschiedenen Volumenanteilen einer Isolierflüssigkeit auf Mineralölbasis gemischt. Als Mineralöl wurde Shell Diala D verwendet. Im Anlieferungszustand betrug die Feuchte bei der Flüssigkeit Midel 7131 ca. 80 ppm und beim Mineralöl ca. 55 ppm. Da bei den durchgeführten Untersuchungen auch andere Wassergehalte in Betracht gezogen wurden, war den Proben je nach Bedarf Wasser zu entziehen oder hinzuzufügen. Die Trocknung und Entgasung der Isolierflüssigkeiten erfolgte in einer zweistufigen Aufbereitungsanlage.

Bekanntlich können bei einer Umfüllung von Transformatoren je nach Behandlung bis zu 10% der alten Flüssigkeit im Transformator verbleiben. Um möglichst reale Verhältnisse nachzubilden, wurden Mischflüssigkeiten aus Midel 7131 und Mineralöl Shell Diala D mit unterschiedlichen Mineralölanteilen von 1 %, 5 % und 10 % erzeugt. Die beiden Flüssigkeiten weisen nahezu gleiche Dichten auf, so daß eine problemlose Vermischung möglich war. Das Mineralöl wurde in die Midelprobe langsam eingespritzt und mit einem Glasrührer vermischt.

8.1.2 Viskosität der Mischflüssigkeit

Für Mischverhältnisse von ein, fünf und zehn Prozent Mineralölanteil wurden die Mischisolierflüssigkeitsviskositäten ermittelt. Wie erwartet, nimmt sie mit zunehmendem Mineralölgehalt ab. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Viskositätsmessungen im Vergleich zusammengestellt.

Mischform	Viskosität [mPas]
Midel 7131	73,5
Midel 7131 + 1% Shell Diala D	72,4
Midel 7131 + 5% Shell Diala D	65
Midel 7131 + 10% Shell Diala D	58

Tabelle 5: Viskositäten der Flüssigkeitsmischungen

8.1.3 Einige Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

a) Durchschlagfestigkeit

Die Durchschlagfeldstärken von Mischflüssigkeiten (Midel/Mineralöl) in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich zwischen 20 °C und 100 °C bei verschiedenen Wassergehalten zeigen die Bilder 21-23. Der Mineralölgehalt, welcher zwischen 1 % und 10 % variiert, dient als Pa-

parameter. Der in den Bildern 21-23 dargestellte Wassergehalt beträgt jeweils 20 ppm und 300 ppm.

Man erkennt im Bild 21 für die Wassergehalte 20 ppm und 300 ppm, daß die Zumischung von Mineralöl keinen negativen Einfluß auf die Durchschlagfeldstärke E_d besitzt. Mit zunehmender Temperatur wächst bei 20 ppm ebenfalls die elektrische Festigkeit. Bei einem Wassergehalt von 300 ppm (Bild 21) bleibt die Durchschlagfeldstärke über der Temperatur nahezu konstant.

Um das elektrische Verhalten der Isolierflüssigkeit im Betrieb zu simulieren, wurden die Durchschlagfestigkeitswerte nach folgenden Vorbelastungen ermittelt:

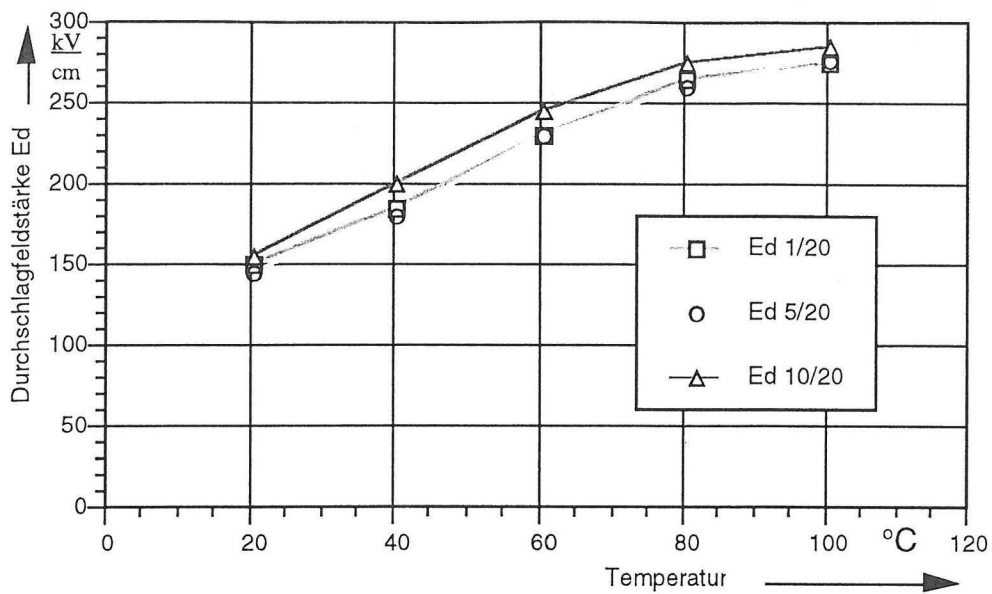
1. Mischflüssigkeiten aus Midel 7131 und jeweils 1%, 5% und 10 % Mineralöl wurden in einem Ofen bei 100 °C über 1000 h thermisch gealtert.
2. Ähnliche Prüflinge wurden einer 1000stündigen kombinierten thermischen und elektrischen Vorbelastung unterzogen.
3. Weitere Proben wurden einer natürlichen Alterung unterzogen. Als Katalysatoren dienten dabei jeweils 3 g/l Al, Cu und Fe. Diese Proben wurden bei Luftzufuhr ebenfalls einer 1000stündigen thermischen und elektrischen Vorbelastung unterzogen.

Bild 22 zeigt einen Vergleich der Durchschlagfeldstärken von 1000 h natürlich gealterten und ungealterten Midelflüssigkeitsmischungen bei ähnlichen Wassergehalten. Die gealterten Flüssigkeitsmischungen zeigen gegenüber den ungealterten eine Verkleinerung der Durchschlagfeldstärke. Der Einfluß der Alterung vermindert sich jedoch mit dem Mineralölanteil und der Temperatur, wobei das Mineralöl hier alterungshemmend zu wirken scheint.

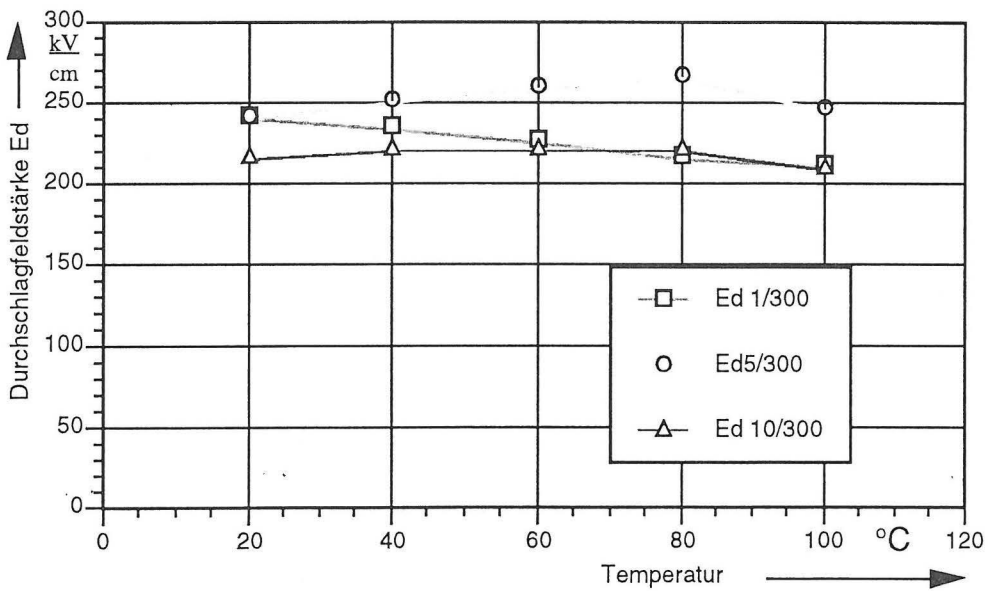
Bild 23 zeigt die Durchschlagfeldstärke bei Raumtemperatur nach verschiedenen Alterungen der Isolierflüssigkeitsmischungen.

Die niedrigsten Werte wurden für die natürlich gealterten Proben ermittelt. Die rein thermische wie auch die thermisch-elektrische Alterung bewirkte keinen Rückgang der elektrischen Festigkeit.

Die für gebrauchte Isolieröle nach VDE 0370 Teil 2 geforderte Festigkeit von 12 kV/mm für Geräte der Reihenspannung 60 kV wird von MIDEL/Mineralöl-Mischisolierflüssigkeit auch nach den Alterungen stets erfüllt.

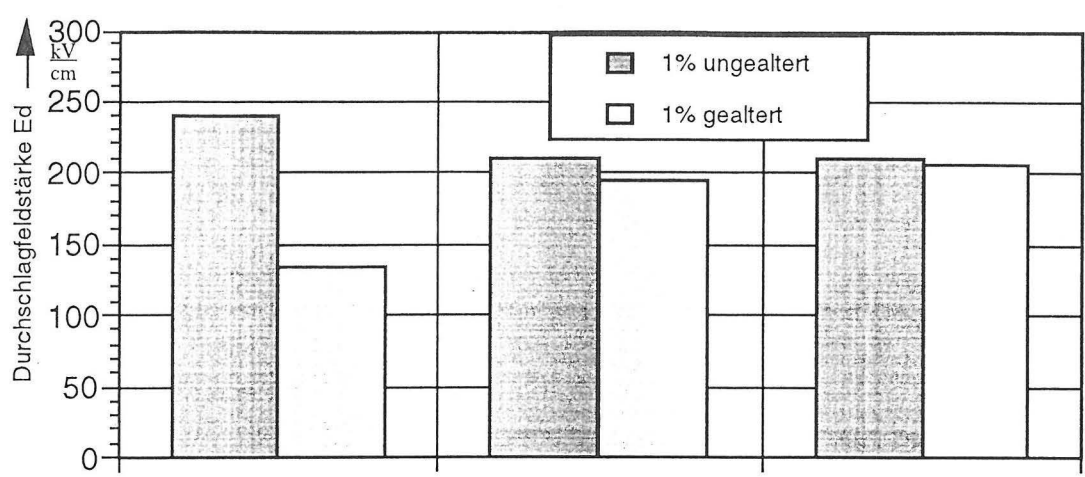


a)

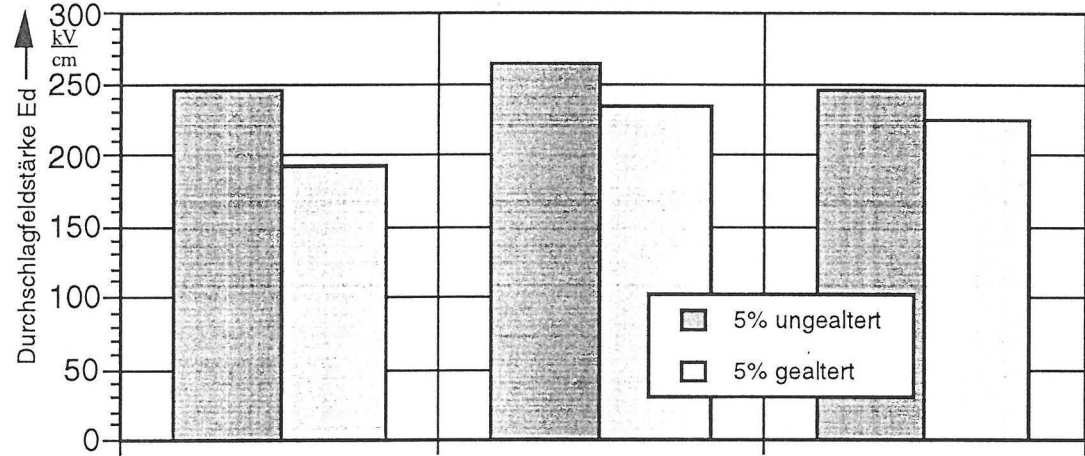


b)

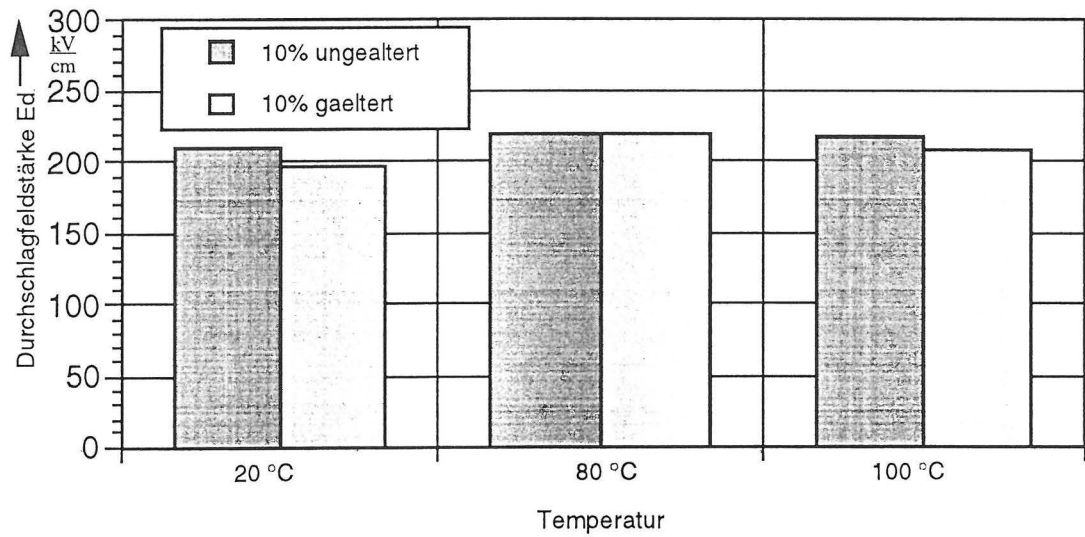
Bild 21: Durchschlagfeldstärke von MIDEL 7131 mit 1%, 5% und 10 % Mineralölanteil bei 20 ppm (a) und 300 ppm (b) Wassergehalt über der Temperatur.



a)



b)



c)

Bild 22: Durchschlagfeldstärke Ed von natürlich gealtertem und ungealtertem Midel 7131 bei 1% (a), 5% (b) und 10% (c) Mineralölgehalt.

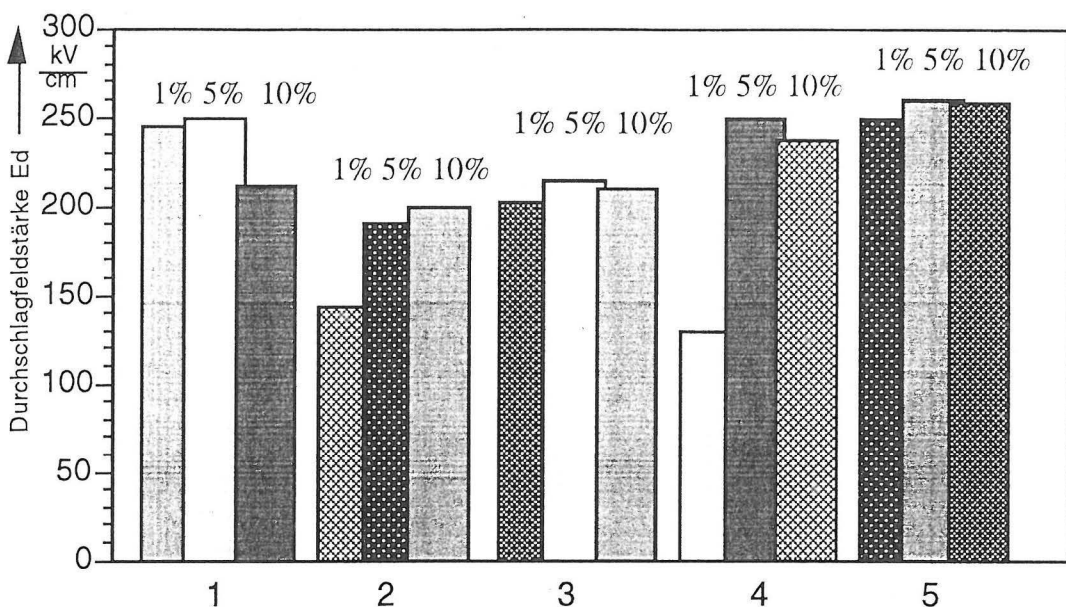


Bild 23: Durchschlagfeldstärke von MIDEL 7131 mit 1%, 5% und 10 % Mineralölanteil nach verschiedenen Alterungen (1000 Stunden) bei Raumtemperatur.

- 1 = MIDEL 7131 ungealtert
- 2 = MIDEL 7131 natürlich gealtert
- 3 = MIDEL 7131 thermisch gealtert
- 4 = MIDEL 7131 elektrisch gealtert
- 5 = MIDEL 7131 thermisch-elektrisch gealtert

b) Stoßspannungsfestigkeit

Bei der Ermittlung der Stoßspannungsfestigkeit der reinen und der mit Mineralöl vermischten Esterflüssigkeit konnte kein signifikanter Einfluß des Mineralölanteiles auf die Festigkeit erkannt werden. Die Werte bei positiver Blitzstoßspannungspolarität liegen insgesamt für alle untersuchten Ölanteile und Wassergehalte etwa um 35 kV niedriger als die Werte bei negativer Polarität. Ein zunehmender Wassergehalt bewirkt innerhalb des untersuchten Bereiches nur eine geringe Abnahme der Stoßspannungsfestigkeit. Sie sinkt im Bereich von 20 - 1000 ppm um ca. 5 kV.

c) Teilentladungsverhalten

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde das TE-Verhalten des mit verschiedenen Anteilen von Mineralöl gemischten Midel untersucht. Es wurden jeweils Midelproben mit 1%, 5% und 10% Mineralölanteil zugrundegelegt. Der Wassergehalt der Proben betrug jeweils 20 ppm, 300 ppm und 1000 ppm. Die Temperatur betrug dabei 20 °C bzw. 80 °C. Bild 24 zeigt die zeitlichen Verläufe der TE-Impulsrate N und die mittlere Ladung q der TE-Impulse über der Zeit für Midelproben mit 0%, 1 %, 5 % und 10 % Mineralölanteilen.

Die Messungen erfolgten bei einer Schlagweite von 50 mm, einer Spannung von 31,8 kV und einem Spitzenradius von 5 µm.

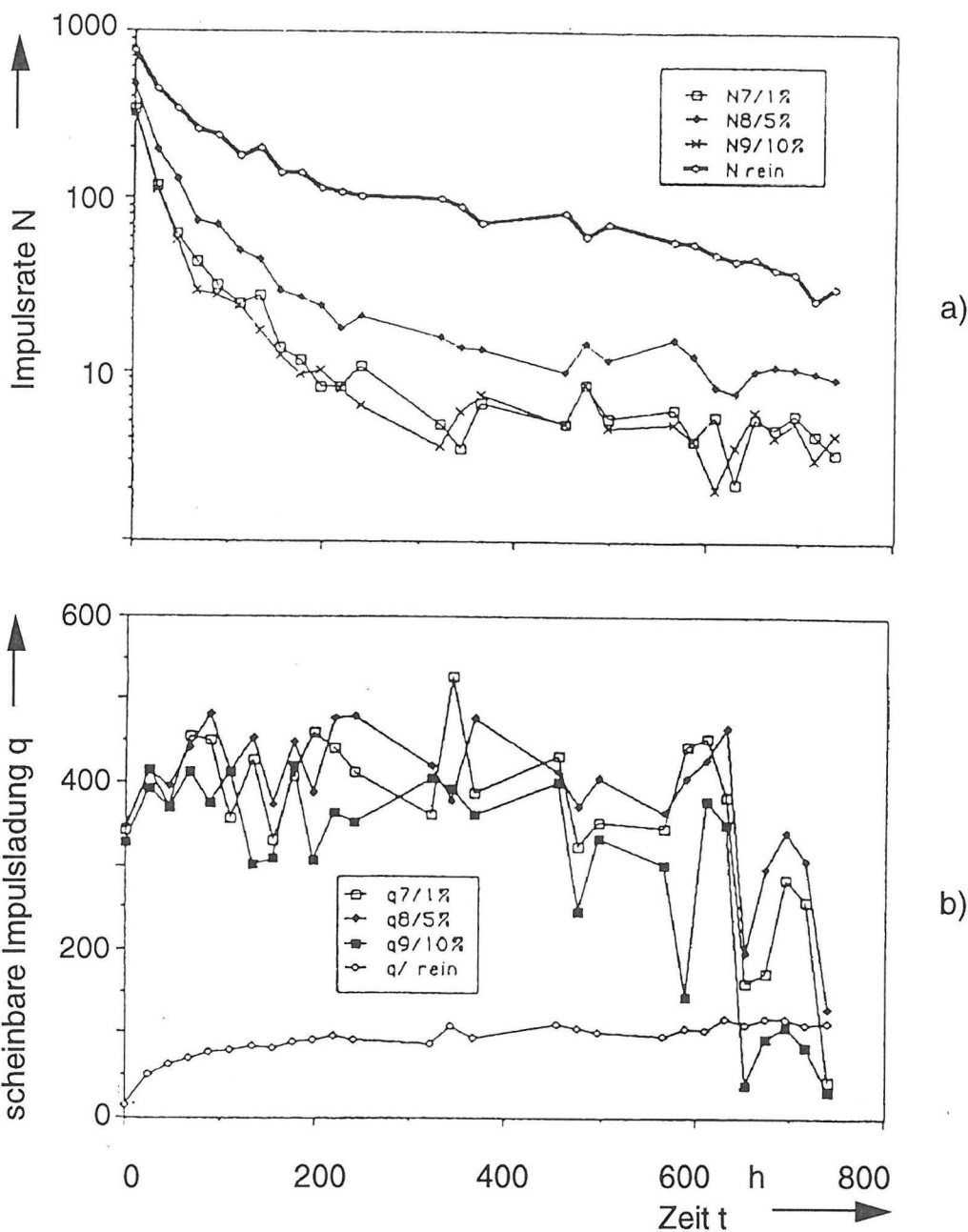


Bild 24: Teilentladungsimpulsrate (a) und Ladung der TE-Impulse (b) für MIDEL 7131 mit verschiedenen Mineralölanteilen in Abhängigkeit von der Zeit.

Wie Bild 24a zu entnehmen ist, sinkt die TE-Anzahl, ähnlich wie bei reinem Mineralöl, über der Zeit sehr stark ab. Weiterhin ist ersichtlich, daß eine Beimischung von Mineralöl zu einer Verringerung der TE-Aktivität führt. Ein signifikanter Einfluß des Anteils von Mineralöl kann jedoch nicht festgestellt werden. Den Ladungsinhalt der TE-Impulse über der Zeit zeigt Bild 24b. Es ist ersichtlich, daß im Unterschied zur TE-Anzahl die TE-Ladung durch die Beimischung von Mineralöl steigt.

Neben der TE-Anzahl und der TE-Ladung stellt die TE-Einsatzspannung eine sehr wichtige Kenngröße zur Beurteilung des TE-Verhaltens von flüssigen Isolieranordnungen dar. Es wurden daher an Nadel-Kugel-Prüfanordnungen nach IEC 628 bei einer Schlagweite von 50 mm

und einem Spitzenradius von 3 mm die TE-Einsetzspannungen von Midel 7131 sowie von der Mischung aus 95 % Midel und 5 % Shell Diala D ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 25 zusammengestellt.

Die TE-Einsetzspannung von Shell Diala D liegt um ca. 24 % höher als die von Midel. Eine Beimischung von 5 % Mineralöl zu Midel bewirkt eine Erhöhung der TE-Einsetzspannung um 14 %.

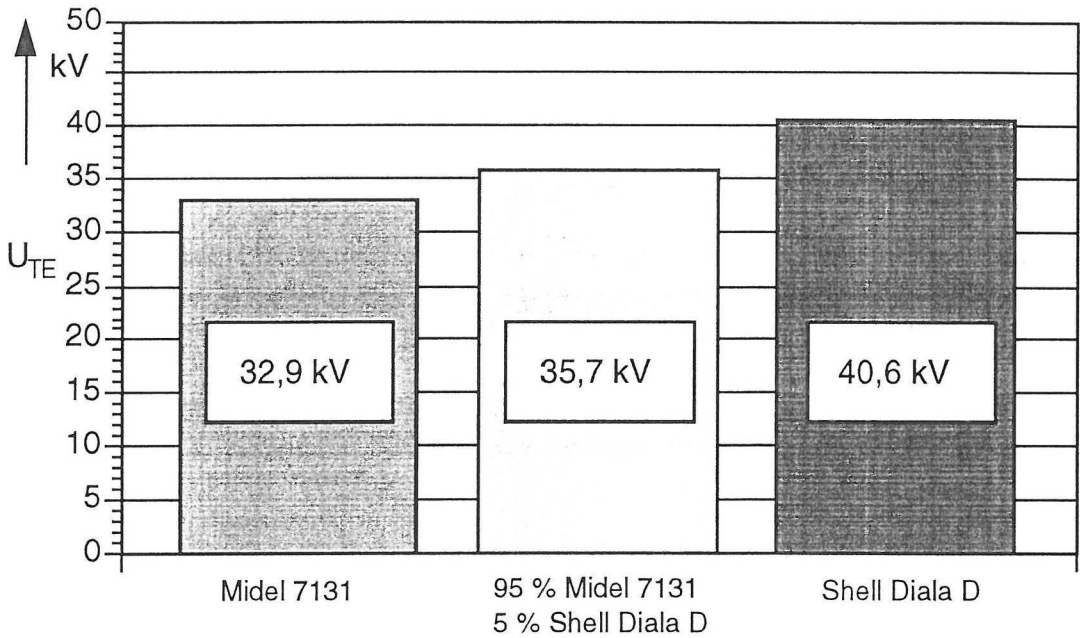


Bild 25: TE-Einsetzspannung verschiedener Flüssigkeiten.

8.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Betrieb von mineralölgefüllten Transformatoren an bestimmten Orten muß aus Gründen des Umweltschutzes und der Brandgefahr neu überdacht werden. Eine wirtschaftlich und umwelttechnisch sinnvolle Möglichkeit scheint durch das Umfüllen des Transformators mit anderen Isolierflüssigkeiten gegeben zu sein. Midel 7131 ist eine schwerentflammbare Isolierflüssigkeit (K-Flüssigkeit), welche in WGK 0 eingestuft ist. Dazu weist diese Flüssigkeit ein gutes elektrisches Verhalten sowie günstige Alterungseigenschaften auf. Bei einem Umfüllen eines mineralölgefüllten Transformators mit Midel 7131 gelangen Reste des Mineralöls aus dem Aktivteil und anderen Bereichen des Transformators in die Isolierflüssigkeit Midel. Diese können die Eigenschaften von Midel beeinflussen. Einige wesentliche Ergebnisse dieser Untersuchungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Eine Beimischung von Mineralöl bis zu 10% bei Wassergehalten 20 ppm, 300 ppm und 1000 ppm bewirkt keine signifikante Beeinflussung der elektrischen Festigkeit im Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C.
2. Anteile von Mineralöl im Midel bewirkten eine Verringerung der Alterungseinflüsse.

3. Die TE-Aktivität wird durch eine Beimischung von Mineralöl verringert, während die mittlere scheinbare Ladung der TE-Impulse bei der reinen Midelflüssigkeit niedriger ist. Die umgesetzte TE-Energie bei reinem Midel 7131 liegt teilweise höher.
4. Die TE-Einsetzspannung von Midel 7131 wird durch eine Beimischung von 5% Mineralöl um etwa 14% erhöht.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß durch eine Beimischung von geringen Mengen Mineralöl zu Midel die Durchschlagfestigkeit nicht negativ beeinflusst wird. Zudem wirkt Mineralöl in Midel alterungshemmend, während das Teilentladungsverhalten von Midel durch die Beimischung von Mineralöl nicht negativ beeinflusst wird.

8.2 Mischung der Isolierflüssigkeiten Midel 7131 und Transclene

Neben den bisher beschriebenen Austauschflüssigkeiten für PCB wurde und wird auch Perchlorethylen wie z.B. Transclene (Handelsname) eingesetzt. Da es als Waschflüssigkeit schon lange bekannt ist und auch gute elektrische und dielektrische Werte aufweist, sollte hiermit das PCB aus dem Kern und den Windungen sowie der Isolation des Transformators herausgelöst werden. Gestiegene Umwelt- und Arbeitsschutzanforderungen lassen jedoch die weitere Verwendung des als Karzinogen bekannten Perchlorethylens nicht zu, so daß auch dieses gegen unbedenklichere Flüssigkeiten wie Midel ausgetauscht werden muß.

8.2.1 Vorbereitung und Mischung der Isolierflüssigkeiten

Nach den Erfahrungen eines Anwenders von mit Perchlorethylen (Transclene) gefüllten Transformatoren bleiben bei der Umfüllung je nach Konstruktion des Transformators etwa 3 bis 8% des gesamten Isolierflüssigkeitsvolumens in verschiedenen Teilen des Transformators zurück. Um die realen Verhältnisse zu simulieren, wurden die Mischungsverhältnisse 3% und 8% gewählt. Es wurden zusätzlich Mischungen mit 1% Transcleneanteil untersucht, um auch den Einfluß des Perchlorethylens bei geringen Gehalten (z.B. nach einer Transformatorreinigung) ermitteln zu können.

Zusätzlich zu den Untersuchungen im neuen Zustand wurden auch Untersuchungen nach einer intensiven Alterung durchgeführt. Hierzu wurde jeweils 3g Aluminium, Eisen, Kupfer und Zink als feinkörniges Pulver je Liter der zu untersuchenden Flüssigkeitsmischung beigegeben. Nach der Alterung mit den feinen Metallpartikeln ist sicherzustellen, daß diese vollständig aus der Isolierflüssigkeit entfernt werden, da sie aufgrund ihrer Größe und Geometrie einen erheblichen Einfluß auf die durchzuführenden Untersuchungen besitzen. Eine vollständige Abfilterung sich frei in der Isolierflüssigkeit befindlicher Metallteile ist nicht absolut zu gewährleisten, weshalb die Katalysatormetalle in einer Hülle aus Filterpapier mit einem Porendurchmesser < 2µm in die Flüssigkeit eingebracht wurden. Die Proben wurden dann unter Vermeidung von Staubeintrag in Bechergläsern in einem Umluftofen eingelagert, wo sie für 2000 Stunden bei 100 °C gealtert wurden. Dabei stand die Isolierflüssigkeitsmischung frei mit der Umgebungsluft in Kontakt.

Die Isolierflüssigkeiten sind bei Raumtemperatur ohne Probleme miteinander mischbar. Durch einfaches Umrühren mit einem Glasstab vermischen sich die Flüssigkeiten, ohne daß nach dem

Rühren eine Trennung oder Schlierenbildung beobachtet werden kann. Es treten auch nach längerer Standzeit keine Trennungsvorgänge, Ausfällungen oder Farbveränderungen auf

Um die Ergebnisse der in der Folge mit den Mischungen durchzuführenden Untersuchungen mit Referenzwerten vergleichen zu können, wurden die an den gealterten Proben durchgeführten Untersuchungen parallel zur Alterung an ungealterten Isolierstoffproben durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse sind im folgenden beschrieben.

8.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen-TE- Einsetzspannungen der ungealterten Isolierflüssigkeiten

Für die Messung der TE- Einsetzspannung wurde eine Nadel-Platte Elektrodenkonfiguration mit einem Elektrodenabstand von 50 mm gewählt. Der Spitzenradius der Hochspannungs-Nadelelektrode betrug 5µm.

Einige Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind beispielhaft aus Bild 26 zu ersehen, wo die Teilentladungseinsetzspannungen über der Temperatur für die verschiedenen Isolierflüssigkeitsmischungen dargestellt sind. Die einzelnen Daten stellen jeweils den arithmetischen Mittelwert aus fünf Messungen dar.

Die Nomenklatur der in den folgenden Bildern dargestellten Untersuchungsergebnisse ist wie folgt zu verstehen: Der erste Buchstabe kennzeichnet die Isolierflüssigkeit (M=Midel 7131). Die erste Zahl kennzeichnet den zugefügten Anteil an Transclene (in Prozent). Die zweite Zahl schließlich kennzeichnet die Feuchte in ppm. So bedeutet zum Beispiel die Kennung M/3/20 eine Mischung aus Midel 7131 mit 3% Transclene bei einer Feuchte von 20 ppm.

Ein ähnliches Verhalten wurde für alle anderen Zusammensetzungen festgestellt. Aus dem Bild 26 ist zu erkennen, daß die TE-Einsetzspannung mit steigender Feuchte leicht fällt, ohne daß ein signifikanter Einfluß des zugefügten Transclenes für die ungealterten Isolierflüssigkeitsmischungen festzustellen ist. Bild 27 zeigt den Einfluß der Zufügung des Transclenes noch einmal bei konstanter Feuchte, hier bei 20 ppm.

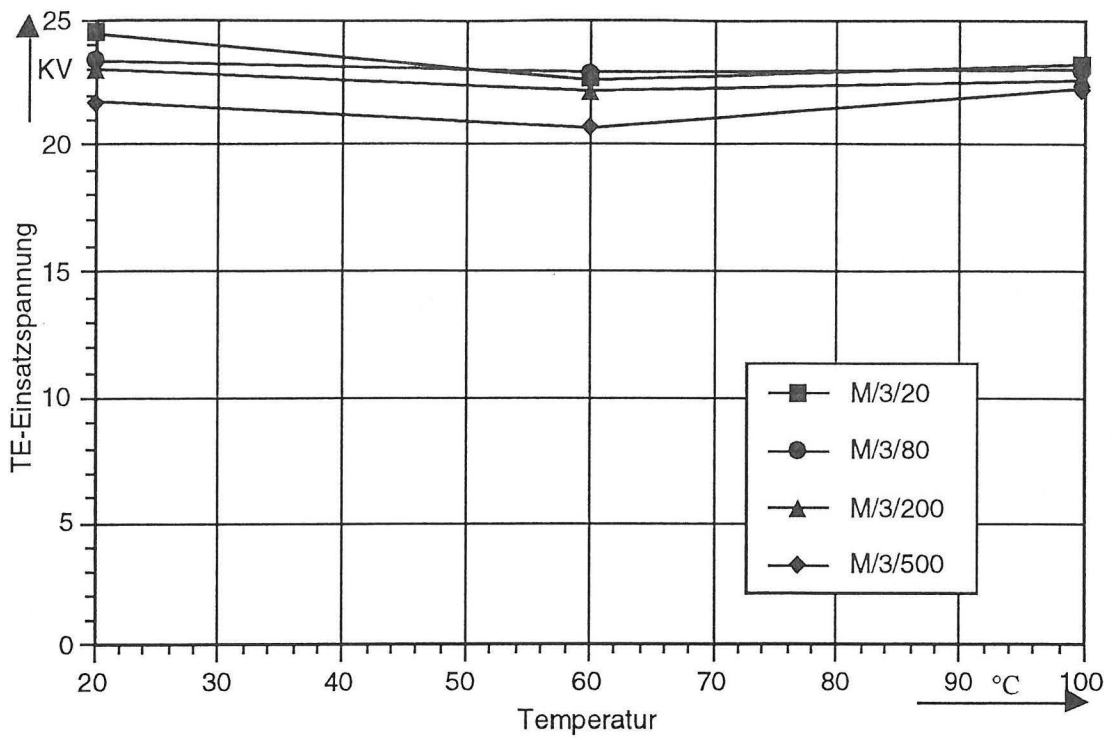


Bild 26: TE-Einsatzspannung für Midel 7131 mit 3 % Transcene bei verschiedenen Feuchten in Abhängigkeit von der Temperatur.

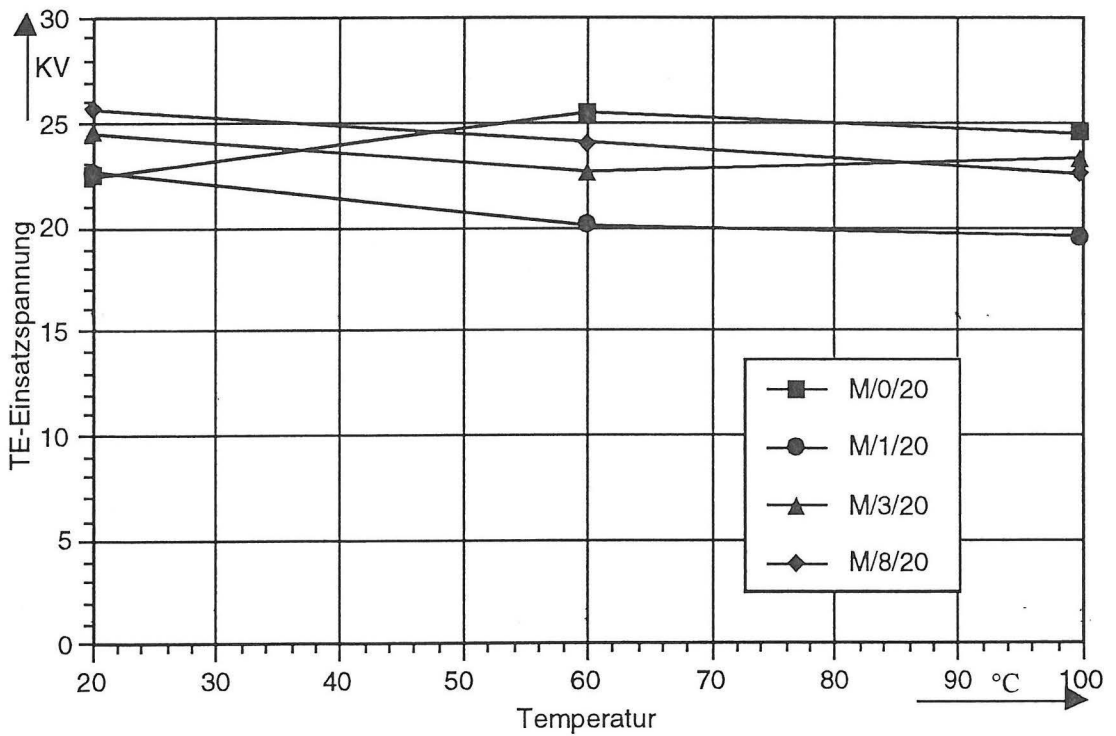


Bild 27: TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit von der Temperatur für Midel 7131 mit und ohne Transcene-Beimischungen bei 20 ppm Feuchte.

8.2.3 Verlustfaktor der ungealterten Isolierflüssigkeiten

Die Messungen der Dielektrizitätszahl sowie des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Isolierflüssigkeitsmischung sowie der Temperatur wurden mit einer Schering-Meßbrücke mit Wagnerschem Hilfszweig durchgeführt. Die Meßbrücke ist vom Typ Tettex 2801. Tettex ist auch der Hersteller des Wagnerschen Hilfszweiges (Typ 2906). Der Abgleich erfolgte mit einem oszillografischen Nullindikator. Der prinzipielle Schaltungsaufbau ist aus Bild 28 zu ersehen.

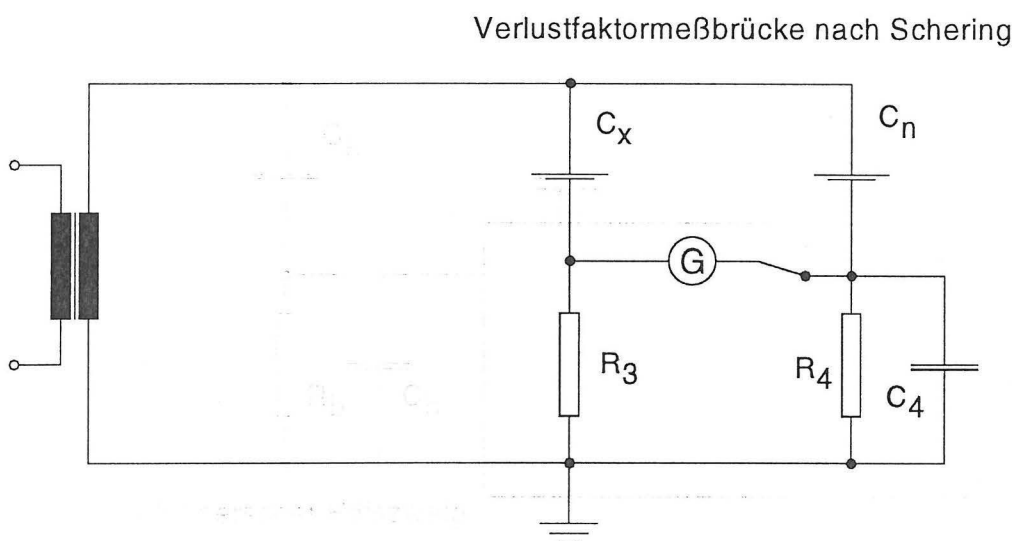


Bild 28: Schering-Meßbrücke mit Wagnerschem Hilfszweig zur Messung des Verlustfaktors sowie der Dielektrizitätszahl.

Die Abhängigkeit des Verlustfaktors $\tan\delta$ sowie der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r von der Temperatur ist beispielhaft auf den Bildern 29 und 30 dargestellt. Es sind dabei jeweils die verschiedenen Isolierflüssigkeitsmischungen bei gleicher Feuchte illustriert.

Die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r zeigt durch hinzufügen von Transclene eine leichte Abnahme. Transclenebeimischungen bewirken somit eine Reduzierung der Dielektrizitätszahl. Über der Temperatur ist eine fallende Tendenz zu beobachten. Die Variation liegt jedoch stets unter 10% des Absolutwertes.

Bei den Meßwerten für Midel 7131 fällt auf, daß der Verlustfaktor bei höheren Temperaturen stark ansteigt. Dieses Verhalten ist bekannt und wird auch durch das zugefügte Transclene nur unwesentlich verändert.

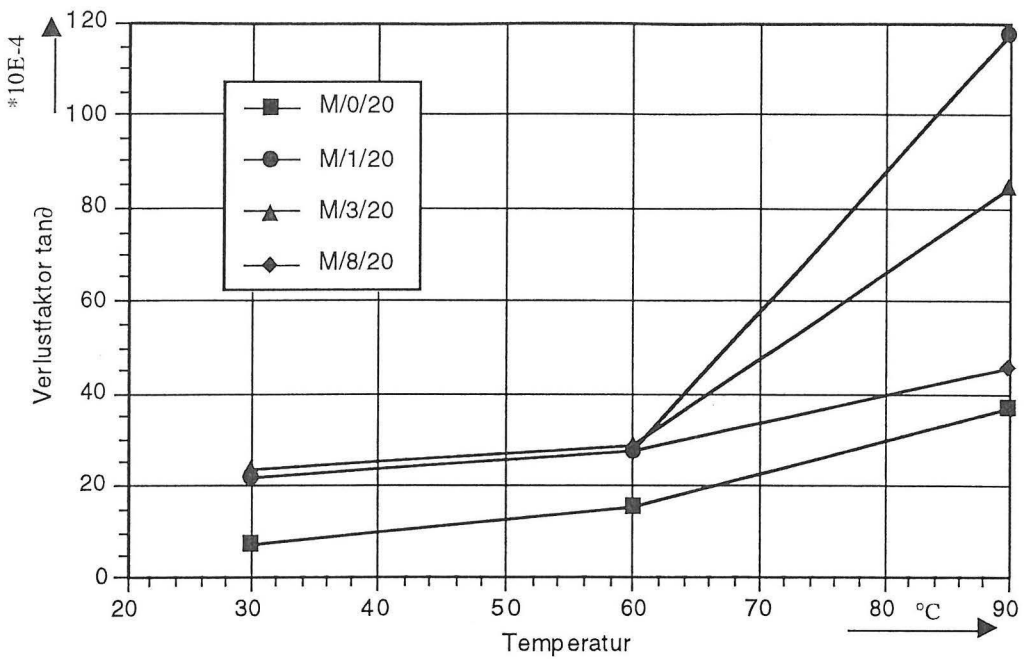


Bild 29: Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Temperatur für Midel 7131 mit und ohne Transclene-Beimischungen bei 20 ppm Feuchte.

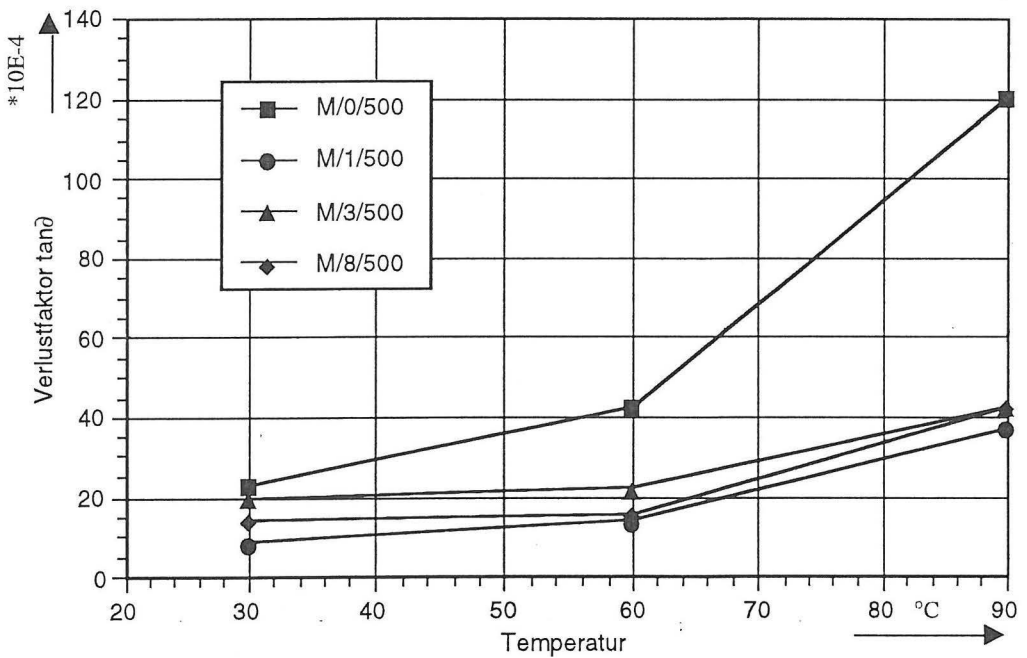


Bild 30: Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Temperatur für Midel 7131 mit und ohne Transclene-Beimischungen bei 500 ppm Feuchte.

8.2.4 Durchschlagspannungen der ungealterten Isolierflüssigkeiten und Isolierflüssigkeitsmischungen

Die Untersuchungen zum Einfluß des Transclenes auf das Durchschlagspannungsverhalten wurden mit den der Norm DIN-VDE 0370 entsprechenden VDE- Kugelkalotten bei einem Elektrodenabstand von 2,5 mm durchgeführt.

Um die Kondensation von Luftfeuchte auf der Prüfgefäßoberfläche und die damit verbundene Herabsetzung der Überschlagspannung bei niedrigen Temperaturen zu vermeiden, wurden alle Messungen der Durchschlagspannungen in einen Kühlraum durchgeführt. Die Abkühlung erfolgte über die Umgebungsluft, wohingegen die Erwärmung des Prüfgefäßes über einen Mantel um das Prüfgefäß und einen Heizkreislauf erfolgte. Es wurden Messungen bei 0 °C, 20 °C, 60 °C und 90 °C durchgeführt, um sowohl einen im Betrieb bei unterschiedlichen Lasten laufenden Transformator zu simulieren, als auch den Fall eines „Kaltstarts“, also des Einschaltens bei niedrigen Temperaturen im Winter.

Auf den Bildern 31 bis 34 sind die Durchschlagspannungen von Midel 7131 mit verschiedenen Transclenegehalten bei Variation der Feuchte dargestellt. Während reines Midel, wie aus Bild 31 ersichtlich, unabhängig von der Temperatur ein weitgehend konstantes Durchschlagverhalten zeigt, bei dem die Durchschlagspannung mit zunehmender Feuchte nur geringfügig sinkt, ist durch die Zufügung des Transclenes bei steigenden Temperaturen ein Absinken der Durchschlagspannung zu beobachten (Bilder 32 - 34). Die Senkung der Durchschlagspannung steigt mit anwachsendem Transcleneanteil. Der Minimalwert von etwa 32 kV wird, entsprechend Bild 34, für eine Mischung von Midel mit 8 % Transclene bei einer Feuchte von 80 ppm erreicht.

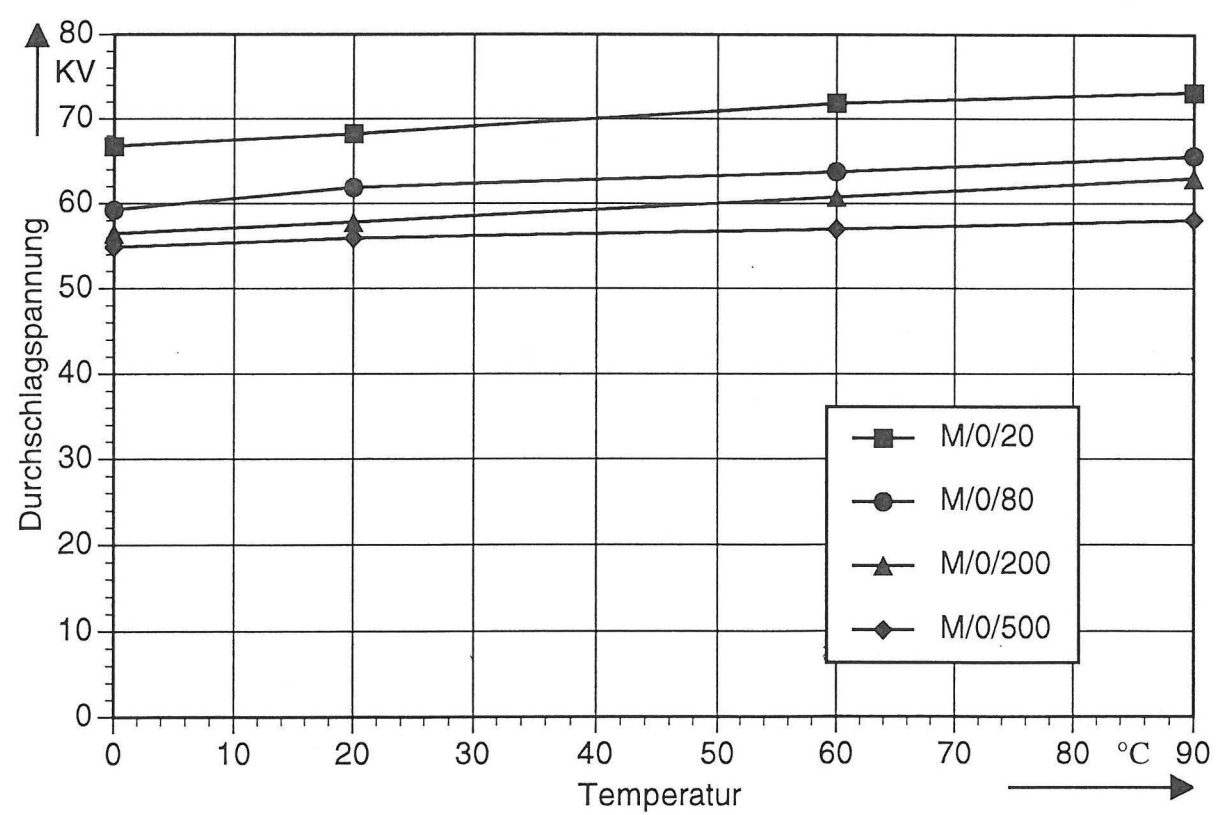


Bild 31: Durchschlagspannung von Midel 7131 ohne Additive.

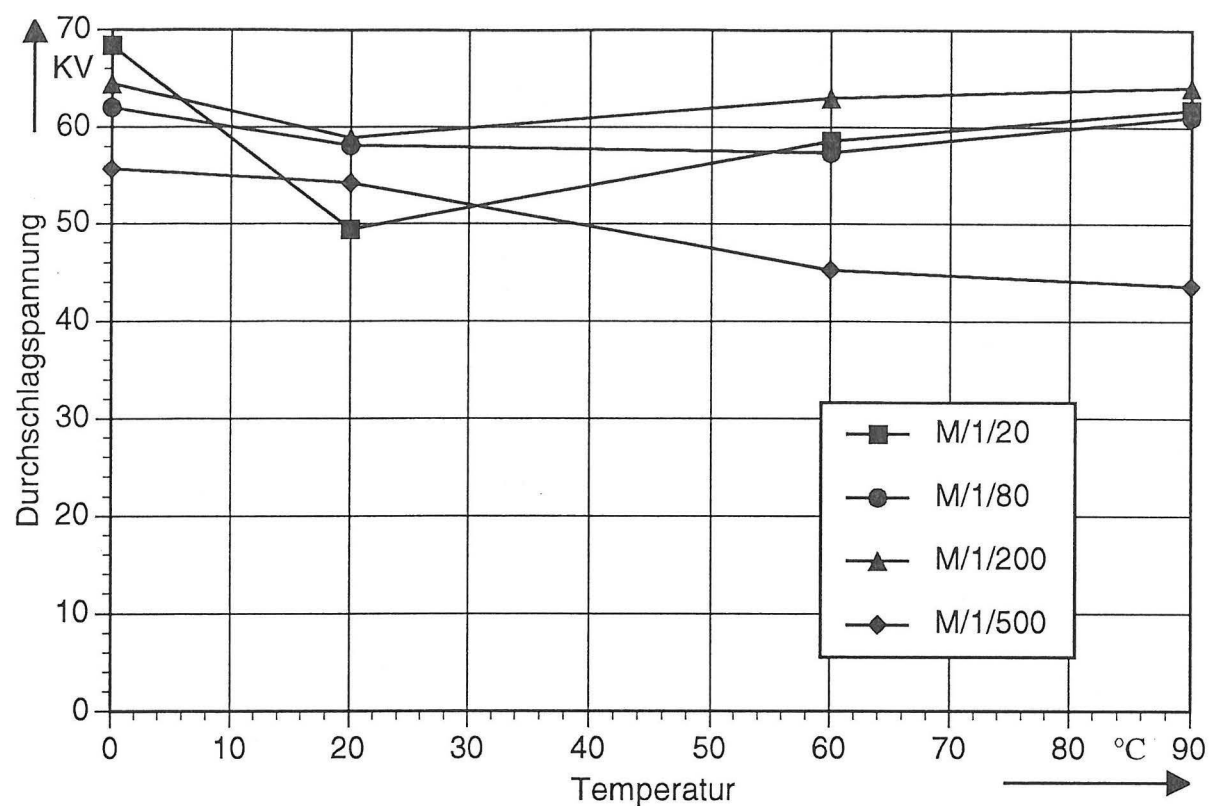


Bild 32: Durchschlagspannung von Midel 7131 mit 1 % Translene.

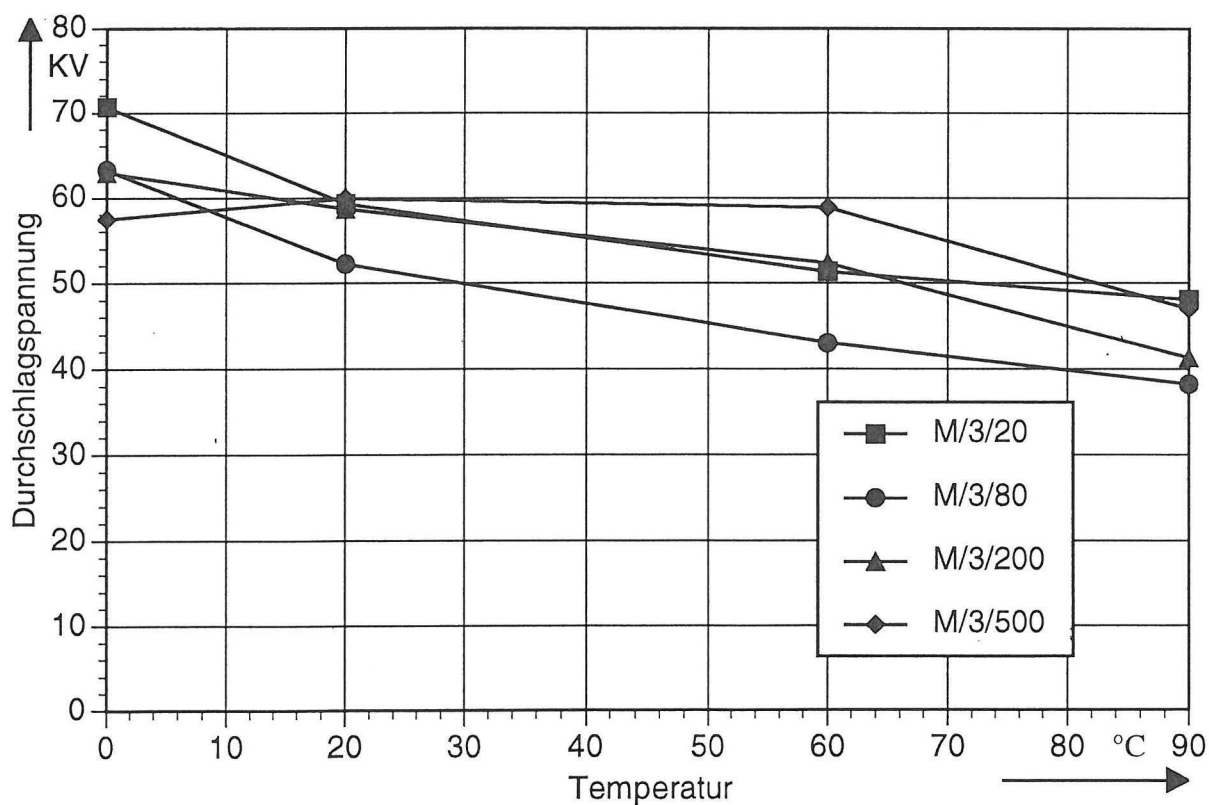


Bild 33: Durchschlagspannung von Midel 7131 mit 3 % Translene.

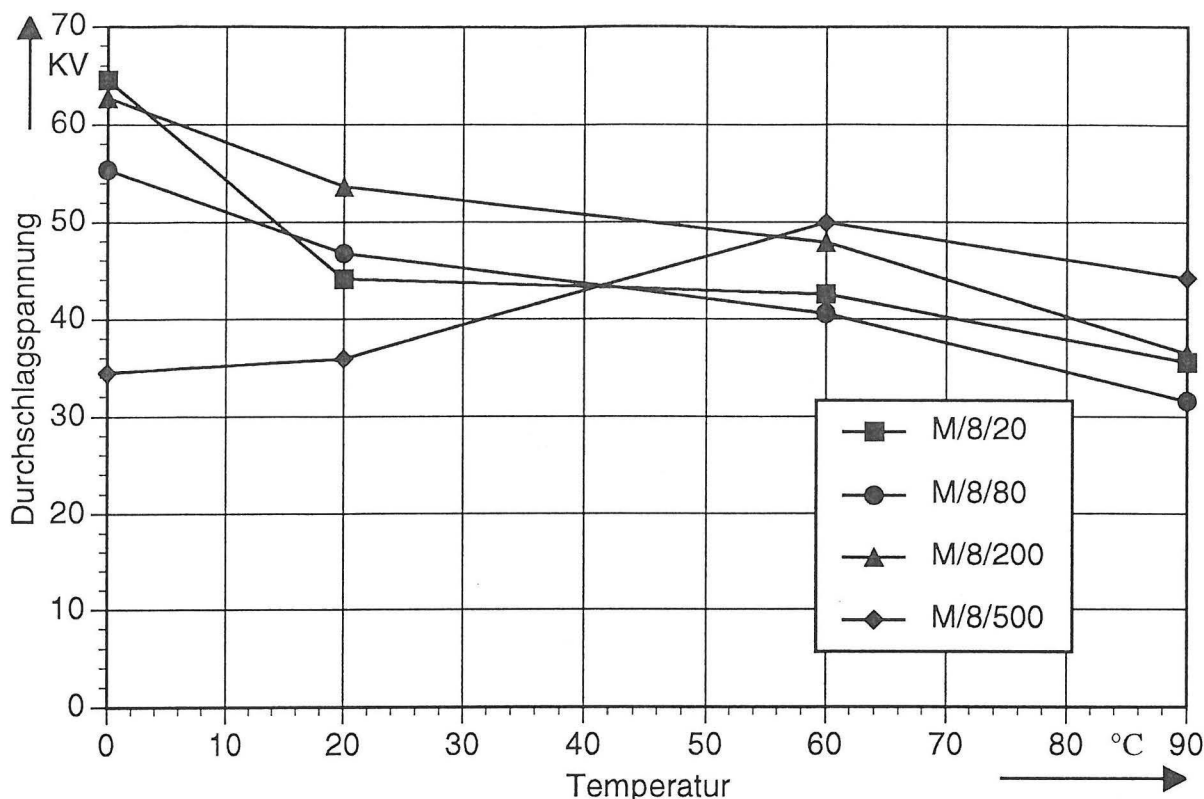


Bild 34: Durchschlagspannung von Midel 7131 mit 8 % Transcene.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden einige Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen auf den Gebieten der Isolierflüssigkeiten und der damit imprägnierten Isolierpapiere präsentiert. Bei den untersuchten Isolierflüssigkeiten für Transformatoren wurde das Mineralöl Shell Diala D, die Esterflüssigkeit Midel 7131, die Silikonflüssigkeit Baysilone M50 El sowie Mischungen dieser Flüssigkeiten behandelt. Weiterhin wurden Mischungen von Midel 7131 sowie Mineralöl mit Perchlorethylen untersucht. Als Isolierpapier wurde neben der Zellulose Aramidpapier verwendet. Einige der wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die elektrische Festigkeit von Mineralöl verhält sich im Temperaturbereich -25 °C bis 25 °C über der relativen Feuchte ähnlich wie das bereits aus der Literatur bekannte Verhalten im Bereich 25 °C bis 100 °C. Lediglich bei einem Wassergehalt von 5 ppm bleibt die elektrische Festigkeit im gesamten untersuchten Temperaturbereich unabhängig von der Temperatur konstant.

Die Silikonflüssigkeit Baysilone M 50 El zeigt im Temperaturbereich - 25°C bis 25 °C ein ähnliches Verhalten wie Mineralöl.

Im Unterschied zu den beiden Isolierflüssigkeiten zeigt Midel 7131 im Temperaturbereich - 25°C bis 25 °C ein nahezu temperaturunabhängiges Verhalten. Dabei verringert sich die elektrische Festigkeit mit dem Wassergehalt.

Mineralöl mit einem Wassergehalt von bis zu 5 ppm und Silikonflüssigkeit mit einem Wassergehalt von 10 ppm zeigen ähnlich wie bei der Esterflüssigkeit bei verschiedenen Wassergehalten in dem betrachteten Temperaturbereich über der Temperatur ein konstantes Verhalten.

2. Die elektrische Festigkeit des mit verschiedenen Isolierflüssigkeiten imprägnierten Zellulosepapiers zeigt über der Temperatur im Bereich 20 °C bis 100 °C einen Abfall. Die Festigkeitswerte der mit Silikonflüssigkeit imprägnierten Proben liegen im gesamten Temperaturbereich unterhalb denen von Mineralöl und Esterflüssigkeit. Die Feuchte der Flüssigkeit bewirkt eine Verringerung der elektrischen Festigkeit der Mischdielektrika. Diese Abnahme ist bei Mineralöl am geringsten.
3. Eine 1000stündige thermische Alterung der Flüssigkeit-Papier-Mischdielektrika bewirkt keine signifikante Verringerung der elektrischen Festigkeit, während eine thermisch elektrische Alterung eine Verringerung der Festigkeitswerte zur Folge hat. Der Einfluß der Alterung ist bei mineralölimprägnierten Papieren am größten.
4. Bei einem Austausch der Isolierflüssigkeit eines Transformators können je nach dem Aufbau und der Behandlung des Transformators bis zu 10% der alten Isolierflüssigkeit im Transformator bleiben. Diese Restflüssigkeit mischt sich im Laufe des Betriebs mit der neuen Isolierflüssigkeit. Das Verhalten der neu entstandenen Isolierflüssigkeit kann sich von dem der reinen Isolierflüssigkeiten unterscheiden.

Es müssen daher die physikalischen, elektrischen und Alterungseigenschaften der Mischisolierflüssigkeiten vor einem Umtausch der Isolierflüssigkeit von Transformatoren untersucht werden.

9 Literaturverzeichnis

- | | | |
|-----|----------------------------|---|
| /1/ | Pfeiffer, R.
Soldner, K | <i>Askareelgefüllte Transformatoren - Betriebsrisiko oder Zwang zur Substitution ?</i>
etz, Jg. 83 (1984), Heft 7 |
| /2/ | Potthof, K. | <i>Transformatoren mit Askareel-Kühlung</i>
Elektrizitätswirtschaft 67 (1968), S. 214 - 215 |
| /3/ | Liebscher, F. | <i>Leistungskondensatoren für tiefe und hohe Temperaturen</i>
Elektrizitätswirtschaft 56 (1957) S. 245-250 |
| /4/ | Beyer, M.
Borsi, H. | <i>Comparison for the electric and dielectric behaviour of different insulating fluids</i>
Conference Record of the 10 th Internationale Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Grenoble 1990, pp. 524-528 |
| /5/ | Borsi, H. | <i>Esterflüssigkeit Midel 7131 als Ersatz für Mineralöl in Transformatoren</i>
Elektrizitätswirtschaft Jg. 93 (1994), Heft 24, S. 1523-1528 |

- /6/ Bendel, W. *Isolierstoffe für flüssigkeitgefüllt und trockenisierte Transformatoren*
Molitor, W
etz, Bd. 105 (1984), Heft 9, S. 438-442
- /7/ Dumke, K. *A Synthetic Insulating Liquid for Application in Transformers*
Borsi, H.
Gockenbach, E.
9th International Symposium on High Voltage Engineering
Beitrag 1025
- /8/ N.N. *Technisches Datenblatt für Midel 7131*
BASF/Dr. Beck
- /9/ Soldner, K. *Substitute für Transformatorenaskarele auf PCB-Basis*
Bendel, W.
Altmann
ETG-Fachberichte 16/85, S. 73 ff
- /10/ Hegemann, G. *PCB-Problematik und Midel 7131 - eine umweltfreundliche Isolierflüssigkeit*
Chemiker Zeitung 110 (86), S. 69-72
- /11/ Claiborne, C. C. *Transformer Fluids*
Pearce, H. A.
IEEE Elektrical Insulation Magazine Juli/August 1989-Vol. 5, No. 4 S. 16-19
- /12/ Hegemann, G. *Toxikologische und ökologische Aspekte beim Einsatz von Midel 7131*
Beck Isoliertechnik 57, BASF Farben und Lacke, Hamburg
36. Jahrgang 1988
- /13/ Hegemann, G. *Umweltfreundlich und brandsicher: Synthetische Ester*
Sonderdruck aus Elektrische Energietechnik 4/85 S. 54-55
- /14/ Preiss, P. *Siliconöle in Transformatoren*
etz, Bd. 102 (1981), Heft 7
- /15/ Beyer, M. *Die Vakuumtrocknung von Isolierflüssigkeiten und Papierisolationen und ihr Einfluß auf deren elektrische Eigenschaften*
Sonderdruck des VDI- Bildungswerkes BW 2192,1971
- /16/ Beyer, M. *Aufbereitung und Entgasung von nieder- und hochviskosen Isolierölen*
VDI-Bildungswerk (1970) Sonderdruck BW 877
- /17/ Beyer, M. *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung*
Boeck, W.
Möller, K.
Zaengl, W.
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1986