

# Das Alterungsverhalten verschiedener Esterflüssigkeiten für Leistungstransformatoren

Stefan Tenbohlen, Prof. Dr.-Ing., Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Deutschland

Robert Seibold, Dipl.-Ing., Siemens AG, Energy Sector, PT D T DK R&D, Kirchheim-Teck, Deutschland

Maik Koch, Dr.-Ing., OMICRON GmbH, Klaus, Österreich

## Kurzfassung

Im Beitrag wird die Eignung von Pflanzenöl und synthetischem Ester als Isoliermedium in Leistungstransformatoren untersucht. Ein hoher Flammpunkt sowie die gute Umweltverträglichkeit sind zwei wichtige Vorteile gegenüber konventionellem Mineralöl als Isoliermedium.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass natürliche Ester aufgrund seiner elektrischen Eigenschaften durchaus im Transformatorenbereich einsetzbar ist.

- Im Gegensatz zum Mineralöl haben die natürlichen sowie der synthetische Ester ein deutlich höheres Wasserlösungsvermögen. Die Sättigungsfeuchte der natürlichen Ester beträgt temperaturabhängig etwa das Fünffache wie der von Mineralöl. Es ist daher ratsam, für vergleichende Untersuchungen stets die Angabe der relativen Feuchte heranzuziehen.
- Die Neutralisationszahl der gealterten Öle ist insbesondere bei den natürlichen Estern deutlich höher als beim Mineralöl.
- Bei Alterung von natürlichen Estern unter Lufteinfluss kommt es durch Oxidation zu einem starken Anstieg der Viskosität.
- Die natürlichen Ester haben bezüglich der Papieralterung ein deutlich besseres Verhalten als Mineralöl.

Die Durchschlagfestigkeit der natürlichen Ester für homogene Anordnungen nach VDE 0303 liegt mit über 80 kV für neue, trockenen Öle oberhalb der des Mineralöls. Im Allgemeinen zeigen die natürlichen Ester die gleiche Höhe und Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der relativen Feuchte wie Mineralöl. Auch nach der Alterung ist diese weiterhin als sehr gut anzusehen.

## 1 Einleitung

Die Verwendung von Pflanzenöl als Energieträger geht zurück bis ins Altertum, als aus Oliven Öl hergestellt wurde. Rudolf Diesel wies die Verwendung als Kraftstoff für Verbrennungsmaschinen. Die Idee zur Verwendung von Pflanzenöl als Isoliermedium in Transformatoren ist noch relativ jung, betrachtet man die Verwendung von Isolierölen auf Mineralölbasis, welche seit mehr als hundert Jahren als Isolier- und Kühlmittel in elektrischen Betriebsmitteln eingesetzt werden. In Transformatoren, Wandlern, Kondensatoren, in welchen diese alterungsbeständigen und niederviskosen Flüssigkeiten auf Mineralölbasis zum Einsatz kommen, müssen aufgrund der Einstufung in die Wassergefährdungskategorie 1 (schwach wassergefährdender Stoff) entsprechende Schutzmaßnahmen eingehalten werden. Pflanzliche Öle bieten somit eine ideale Alternative zu den konventionellen Isolierölen. Aufgrund ihrer Umweltverträglichkeit und biologischen Abbaubarkeit können sie als "nicht wassergefährdender Stoff" eingestuft werden [1, 2]. Ein weiterer Vorteil pflanzlicher Öle gegenüber konventionellen Isolierölen ist der wesentlich höhere Flammpunkt [3].

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen werden an Isolierölen auf pflanzlicher Basis nach DIN EN 61099 durchgeführt. Als Referenz wurde das Mineralöl Nynas Nytro 3000X ausgewählt. Die verwendeten Flüssigkeiten sind im Einzelnen:

- Sonnenblumenöl High Oleic 90 Plus® (T&T Oleochemie GmbH)
- Envirotemp® FR3TMFluid (Cooper Power Systems)
- Midel® eN (M&I Materials Ltd)
- Midel® 7131 (M&I Materials Ltd), synthetischer Ester
- Nynas Nytro 3000X, Mineralöl inhibiert

## 2 Allgemeine chemische Grundlagen

Ester bilden eine Stoffgruppe organischer Verbindungen, die formal oder tatsächlich durch die Reaktion einer Säure und eines Alkohols unter Abspaltung von Wasser entstehen. Es gibt Ester von organischen Säuren (z.B. Carbonsäuren, Sulfonsäuren) und solche von anorganischen Säuren (z.B. Phosphorsäure, Borsäure). Fette und Öle entstehen durch die Veresterung von Glycerin (Bezeichnung des dreiwertigen Alkohols Propantriol) und Fettsäuren. Die Bezeichnung „Fett-

säure“ ist ein Sammelbegriff für Monocarbonsäuren, welche aus einer Carboxylgruppe (-COOH) und aus einer unterschiedlich langen, aber fast ausschließlich unverzweigten Kohlenwasserstoffkette bestehen. Man unterscheidet gesättigte und ungesättigte Fettsäuren. Ungesättigte Fettsäuren haben im Gegensatz zu gesättigten eine oder mehrere Doppelbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen der Kette.

## 2.1 Alterungsmechanismen

Der Alterungsvorgang bei Pflanzenöl lässt sich durch die Oxidation und Verharzung der ungesättigten Bindungen (Kohlenstoff-Doppelbindungen) pflanzlicher Öle bei thermischer Belastung beschreiben. Maßgebend dafür sind im Wesentlichen drei Prozesse: hydrolytische Spaltung, Oxidation und oxidative Polymerisation.

### 2.1.1 Hydrolyse

Die Hydrolyse ist die Umkehrreaktion der Veresterung. Durch die Einwirkung von Wasser entstehen hierbei unvollständige Estermoleküle und freie Fettsäuren. Die Estermoleküle werden an ihren C-O-Bindungen aufgetrennt. Da die freien Fettsäuren selbst beschleunigend auf den Prozess der Hydrolyse wirken, wird diese auch als autokatalytische Reaktion bezeichnet. Eine weitere Beschleunigung tritt mit Zunahme des Wassergehalts, der Öltemperatur oder gelöster Metalle ein. Als Folge der Hydrolyse erhöht sich die Neutralisationszahl des Öls. Da die unvollständigen Estermoleküle zudem an ihren Trennpunkten polymerisieren, steigt auch die Viskosität an. Durch Zugabe von Additiven kann auf diesen Vorgang jedoch Einfluss genommen werden.

### 2.1.2 Oxidation

Durch die Reaktion von Sauerstoff mit den Kohlenstoff-Doppelbindungen bricht das Triglycerid auf. Hierbei werden Fettsäureteile bzw. ganze Fettsäuren abgespalten. Die Haltbarkeit des Öls wird durch die Anzahl der Doppelbindungen beeinflusst. Je mehr Doppelbindungen (ungesättigte Fettsäuren) vorhanden sind, desto weniger haltbar ist das Öl. Ein hoher Anteil an gesättigten Fettsäuren führt folglich zu einer hohen Stabilität des Öls unter Luft.

### 2.1.3 Eigenschaften der Fettsäuren

Wie schon erwähnt, wird zwischen gesättigten sowie einfach-ungesättigten, zweifach- und mehrfachungesättigten Fettsäuren unterschieden. Ein hoher Anteil an gesättigten Fettsäuren begünstigt zwar die chemische Stabilität, führt aber zu einem hohen Gefrierpunkt. Je höher der Anteil an dreifach ungesättigten Fettsäuren ist (Leinsamen/Tungöl), desto instabiler wird das Öl in der Luft. Ungesättigte Fettsäuren haben die Eigenschaft, bei niedrigen Temperaturen flüssig zu bleiben. Die häufigste einfach ungesättigte Fettsäure in Pflanzenöl ist die Olein-Säure mit 18 Kohlenstoffatomen. Entsprechend der allgemeinen Nomenklatur wird diese mit C18:1 bezeichnet. Die erste Zahl gibt

die Anzahl der Kohlenstoffatome wieder, die zweite den Grad der ungesättigten Fettsäuren. Tabelle 1 ist eine Übersicht über die Fettsäurezusammensetzung einiger Öle und Fette zu entnehmen.

	Ölsäure C18:1	Linolsäure C18:2	Linolensäure C18:3	Stearinsäure C18:0	Palmitinsäure C16:0
HOSO	80-92 %	3-10 %	0 %	1-4 %	4 %
HO-Raps	75-85 %	6-10 %	3 %	1-2 %	4 %
HO-Soja	75-82 %	7-10 %	1,5 %	2-3 %	6 %
Ölivenöl	73-78 %	9-11 %	0,5 %	3-5 %	10 %
Palmöl	36-40 %	10-12 %	0,3 %	4 %	44 %

**Tabelle 1:** Fettsäurezusammensetzung wichtiger Öle und Fette [4, 5]

## 2.2 Untersuchte Öle

### 2.2.1 Sonnenblumenöl

Herkömmliches Sonnenblumenöl ist aufgrund seines hohen Gehaltes an zweifach ungesättigten Fettsäuren nicht über längere Zeit thermisch belastbar. Hinzu kommt, dass es bei Raumtemperatur bereits nach relativ kurzer Zeit oxidiert. Bereits seit den 1980er Jahren werden gezielte Pflanzenzuchtversuche und Saatgutmodifikationen vorangetrieben. Dadurch konnte unter anderem ein Sonnenblumenöl entwickelt werden, welches in vielerlei Hinsicht technisch interessant ist. Wegen seines hohen Gehaltes an einfach ungesättigten Fettsäuren wird es auch als hochölsäurehaltiges oder High-Oleic Sonnenblumenöl bezeichnet. High Oleic Sonnenblumenöl 90 Plus® (HOSO) enthält über 90% Ölsäure und zeichnet sich daher durch eine hohe Oxidationsstabilität aus [6, 7].

Kaeb [4] beschreibt in seinem Artikel u.a. die Vorteile der Ölsäure sowie die der HO-Öle. Neben Oxidationsstabilität und thermischer Belastbarkeit werden hier auch gutes Tieftemperaturverhalten sowie ein reduzierter Reinigungsaufwand der HO-Öle bei der Herstellung genannt.

### 2.2.2 Envirotemp® FR3™

Envirotemp FR3 ist eine Mischung aus verschiedenen nichtwassergefährdenden Pflanzenölen gesättigter und ungesättigter Fettsäuren mit Kettenlängen zwischen 14 und 22 Kohlenstoffatomen [8]. FR3 wird seit einigen Jahren erfolgreich in Verteiltransformatoren eingesetzt.

### 2.2.3 Midel® eN

Bei Midel eN handelt es sich, ebenso wie bei FR3, um eine Mischung pflanzlicher Öle. Den Hauptbestandteil bildet hier Rapsöl. Bisher erfolgt der Einsatz als Hydraulik Flüssigkeit und Schmiermittel. Aufgrund seiner guten biologischen Abbaubarkeit [9] ist es auch für den Einsatz in Transformatoren durchaus interessant.

### 2.2.4 Midel 7131

Synthetische Ester sind chemisch hergestellte Verbindungen aus organischen Säuren und Alkoholen. Je nach gewünschter Eigenschaft des Esters können definierte Molekülstrukturen synthetisiert werden [10]. Synthetische Ester können dabei zum einen aus der

Modifizierung natürlicher Pflanzenöle, zum anderen auf der Basis petrochemischer Rohstoffe hergestellt werden.

Seit Mitte der 80er Jahre werden synthetische Isolierflüssigkeiten in Transformatoren eingesetzt. Aufgrund des bislang eher begrenzten Einsatzes waren damit unter anderem hohe Kosten verbunden. Für Midel 7131 existieren bereits seit einigen Jahren Untersuchungsergebnisse, auch im Einsatz kleinerer Verteiltransformatoren [11]. In diesen Arbeiten wurden unter anderem das Wasserlösungsvermögen, Durchschlagspannung und Verlustwinkel untersucht. Die Mischung dieser synthetischen Flüssigkeit mit Mineralöl und die daraus resultierenden elektrischen Eigenschaften bilden einen weiteren Forschungsschwerpunkt. Dies ist insbesondere bei einem Tausch des Isoliermediums interessant, da das bereits eingefüllte Mineralöl nicht vollkommen ersetzt werden kann. Bei Midel 7131 handelt es sich um Pentaerythritol-Tetraester, welcher zur Gruppe der organischen Ester zählt. Pentaerythrit ( $C(CH_2OH)_4$ ) ist ein vierwertiger Alkohol. Nach Dumke [12] ergeben sich die guten viskositären und elektrischen Eigenschaften von Midel 7131 durch die nahezu vollständige Veresterung der Moleküle des Alkohols Pentaerythrit. Dies sorgt vor allem auch für Beständigkeit gegen hydrolytische Zersetzungen, die bei anderen, nur unvollständig veresterten Flüssigkeiten nicht gegeben ist.

### 3. Untersuchung des Alterungsverhaltens

#### 3.1 Versuchsdurchführung

Um einerseits die realen Bedingungen in Transformatoren, als auch den Alterungsvorgang des Öls an sich zu untersuchen, kommen verschiedene Versuchsanordnungen zum Einsatz. Die Unterteilung der Versuche findet wie folgt statt: Es wird unterschieden zwischen Alterung ohne und mit Transformatormaterialien, sowie Alterung unter Luftzufuhr und Luftabschluss. Zum Einsatz kommt in allen Versuchen jeweils luftgesättigtes Öl. Für die Alterung unter Luftabschluss werden abgedichtete Behälter verwendet, in welche ein zusätzliches Gefäß eingebracht ist. Um den Effekt der katalytischen Wirkung von Metallen in Öl nachzustellen, wurde dem Öl im äußeren Behältnis Filtertüten mit Metallsubstanzen (Cu, Fe, Zn, Al) in einer Gesamtmenge von 6g/l zugesetzt. Die inneren Gefäße enthalten lediglich das zu untersuchende Öl ohne Zusätze. Die Alterungsdauer für das abgeschlossene System wird auf 1440 Stunden festgelegt, während der eingesetzte Behälter schon nach 164 h entnommen wird. Dies ist notwendig, um einen Vergleichswert für das unter Luft gealterte Öl (ohne Zusätze) zu bekommen - dies verbleibt mit der erwähnten Dauer von 164 h im Ofen.

Für die Alterungsuntersuchung unter Luftzufuhr werden 10 Edelstahlbecher mit jeweils 300 ml Öl befüllt.

Zwei Becher enthalten dieselbe Ölsorte, wobei jeweils einer Materialzusätze enthält. Für die Simulation der Papierisolierung ist sowohl Pressboard als auch Zellose enthalten. Dies wird im Massenverhältnis 1 : 10 (Papier : Öl) den Proben zugesetzt. Die Prüfdauer der Becher mit Zusätzen beträgt 1440 h.

Übersicht über die durchgeführten Alterungsexperimente:

- Test 0: Öle im Ursprungszustand
- Test 1: Alterung unter Luftzufuhr, ohne Materialzusätze, 164 h
- Test 2: Alterung im abgeschlossenen System, ohne Materialzusätze, 164 h
- Test 3: Alterung unter Luftzufuhr, mit Materialzusätzen, 1440 h
- Test 4: Alterung im abgeschlossenen System, mit Materialzusätzen, 1440 h

#### 3.2 Farbe und Aussehen

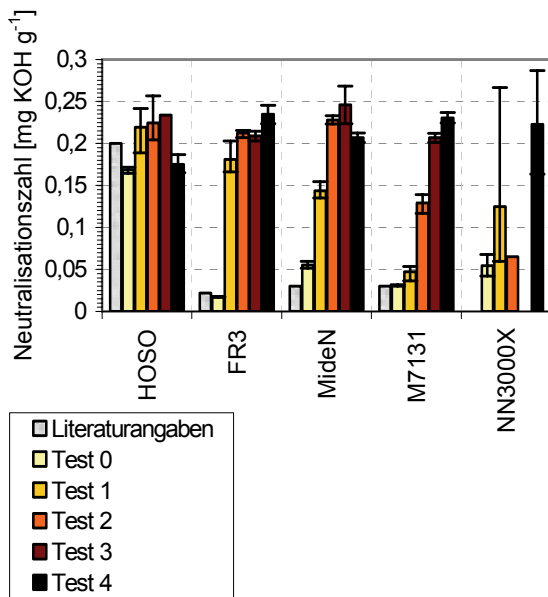
Nach Durchführung der Alterungsexperimente wird Farbzahl gemäß Farbtabelle nach VDEW Ölbuch bestimmt. Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der Farbzahlbestimmung dar. Die Proben der neuen Öle sind klar und frei von Schwebstoffen. Die lediglich 164 h gealterten Öle (Test 1/2) (gealtertes Öl ohne Zusätze) zeigen keine Veränderung gegenüber dem Neuzustand. Hingegen zeigen die Tests 3 und 4 (gealtert mit Zusätzen) eine deutliche Verschlechterung der Farbzahl. Die an Luft gealterten und mit Zusätzen versehenen Proben weisen die schlechteste Farbzahl auf; scheinen somit am stärksten oxidiert. Bei FR3 konnte bei der Alterung mit Luft und zugesetzten Trafomaterialien ein weiterer Effekt beobachtet werden. Nach einer Prüfdauer von 1440h waren Teile des Öls gelartig..

Bezeichnung	Farbzahl von neuem Öl	Farbzahl nach Alterung (Test 1&2) <sup>1,2</sup>	Farbzahl (Test 3) <sup>3</sup>	Farbzahl (Test 4) <sup>4</sup>
HOSO	1,5	1,5	4,5 (+200%)	2,5 (+67%)
FR3	0,5	0,5	6,5 (+1200%)	2,5 (+400%)
M7131	0,5	0,5	1,5 (+200%)	1,5 (+200%)
MideN	0,5	0,5	4,5 (+800%)	4,5 (+800%)
NN3000X	0,5	0,5	-	4,5 (+800%)

Tabelle 2: Farbzahl der Ölproben

#### 3.3 Neutralisationszahl

Die Neutralisationszahl wird mittels automatischer potentiometrischer Titration bestimmt. Hierzu steht der Titrator „Titrino SM 702 mit Exchange Unit 806“ der Firma Metrohm zur Verfügung. In Abbildung 1 sind die Messergebnisse der NZ-Messung dargestellt. Es sind dabei neben den Mittelwerten auch die Standardabweichungen angegeben. Auf der x-Achse sind von links nach rechts die Ergebnisse der einzelnen Proben aufgetragen, während in jeder „Sektion“ immer der erste Balken den Literaturwert angibt. Bei Nynas Nytro fehlt Test 3, da das Öl nach der Prüfdauer verdampft war.



**Abbildung 1:** Neutralisationszahlen nach Alterung

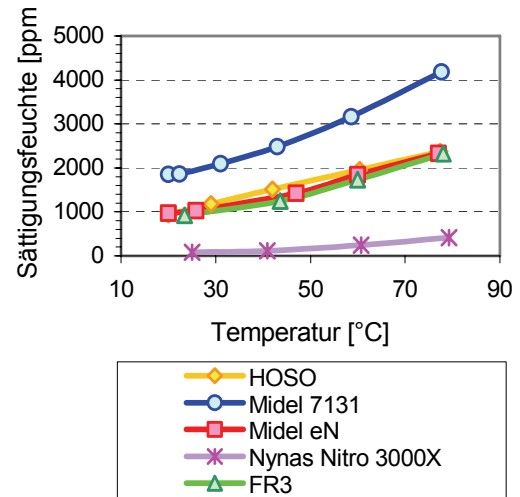
Überraschend ist nicht, dass die Neutralisationszahl der gealterten Öle deutlich höher liegt als im Neuzustand. Durch Oxidationsvorgänge mit Luft sowie hydrolytische Reaktionen mit zugesetzten Materialien werden durch Spaltung der Fettsäureketten Säuren freigesetzt. Das Sonnenblumenöl hat zwar im Vergleich zu den anderen Isolierölen schon von Grund auf eine sehr hohe Neutralisationszahl, erhöht sich aber durch die Alterung nur noch unwesentlich. Bei den übrigen untersuchten Isolierölen ist mit einer Verfünf- bis Verzehnfachung der Neutralisationszahl zu rechnen. Konkret werden diese Zahlen dann, wenn später das Wasserlösungsvermögen vor und nach der Alterung bestimmt wird. Mit der Neutralisationszahl lassen sich Rückschlüsse auf den Fortgang der Ölalterung schließen, zum Beispiel die hydrolytische Spaltung, bei der die Esterbindung gelöst wird. Der stärkste Anstieg ist bei den Tests im abgeschlossenen System mit Materialzusätzen (Test 4) festzustellen. Trotz der eingangs erwähnten guten Stabilität des synthetischen Ester Midel 7131 ist auch hier ein starker Anstieg der Neutralisationszahl festzustellen.

### 3.4 Wasserlösungsvermögen

Die Sättigungsfeuchte wird in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt. Dazu wird mittels eines HMP228 die relative Feuchtigkeit (auch als relativer Wassergehalt bezeichnet) und die Temperatur der Ölproben kontinuierlich bestimmt. Die Bestimmung der Gewichtsfeuchte (absoluter Wassergehalt) erfolgt mit dem Titrator Aqua 40.00 der Analytik Jena, welcher nach dem coulometrischen Verfahren arbeitet. Das Wasserlösungsvermögen (die Sättigungsfeuchte) lässt sich damit bestimmen zu

$$W_L = \frac{W_{abs}}{W_{rel}} \cdot 100\%$$

mit  $W_{rel}$  als dem relativen Wassergehalt und  $W_{abs}$  als dem absoluten Wassergehalt. Die Bestimmung des Wasserlösungsvermögens wurde sowohl bei neuem Öl als auch bei den gealterten Ölproben durchgeführt. Die ermittelten Messwerte des Wasserlösungsvermögens von neuem Öl, auch Sättigungsfeuchte genannt, sind in Abbildung 2 Abhängigkeit der Temperatur aufgetragen.

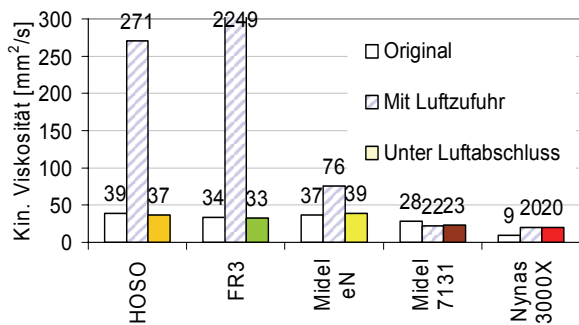


**Abbildung 2:** Wasserlösungsvermögen der nicht gealterten Öle

Während die natürlichen Ester im Wesentlichen ähnliches Wasserlösungsvermögen aufweisen, ist aus dem Diagramm ersichtlich, dass der synthetische Ester Midel 7131 im gesamten Temperaturbereich ein deutlich höheres Wasserlösungsvermögen besitzt. Chemisch lässt sich dies durch die Wasserbrückenbindungen der polaren Seitenvalenzen von Midel 7131 beschreiben, an welche die Wassermoleküle gebunden werden [12].

### 3.5 Viskosität

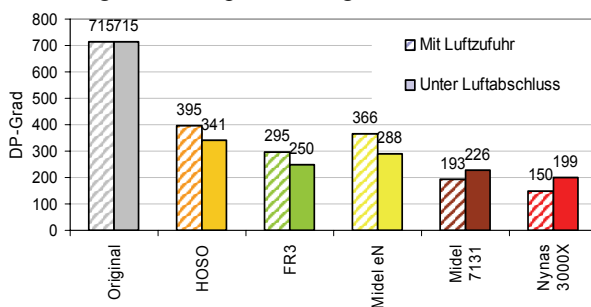
Die Viskosität ist die entscheidende Größe für die Kühleigenschaft der Isolierflüssigkeit. So kommt dieser Größe eine besondere Bedeutung zu. Schon die rein visuelle Untersuchung der unter Luftzufuhr gealterten natürlichen Ester zeigt den extremen Anstieg der Viskosität. In Abbildung 3 sind die mit einem Rotationsviskosimeter mit Kegel-Platte Geometrie bestimmten Viskositäten der verschiedenen Öle im neuen und gealtertem Zustand dargestellt. Für alle natürlichen Ester ist die Viskosität durch die Alterung mit Luftzufuhr so stark angestiegen, dass ein Einsatz im Transformator als Kühlmittel nicht mehr möglich ist. Durch Oxidation werden den Ester Moleküle in kleinere Bestandteile zerlegt. Durch Polymerisation der verbleibenden Moleküle wird die Viskosität stark erhöht. Bei Alterung unter Luftabschluss ist diese Steigerung der Viskosität nicht zu erkennen. Infolgedessen muss beim Betrieb von mit Pflanzenölen befüllten Transformatoren ein Kontakt des Öls mit Luft unterbinden werden.



**Abbildung 3:** Kinematische Viskosität bei 40°C in Abhängigkeit des Alterungszustandes

### 3.6 DP-Grad der Zellulose

Die in den verschiedenen Isolierölen gealterten Papierproben wurden auf ihren verbliebenen Depolymerisationsgrad (DP-Grad) hin untersucht. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung in Abhängigkeit der Ölart und des Luftabschlusses dargestellt. Im Vergleich zum ursprünglichen Zustand (DP-Grad: 715) hat sich der DP-Grad der gealterten Proben deutlich verschlechtert. Es zeigt sich aber auch, dass der DP-Grad der in den natürlichen Estern gealterten Proben erheblich höher ist als der im synthetischen Ester und im Mineralöl gealterten Proben. Die natürlichen Ester haben somit ein verbessertes Verhalten bezüglich der Papieralterung als Mineralöl.



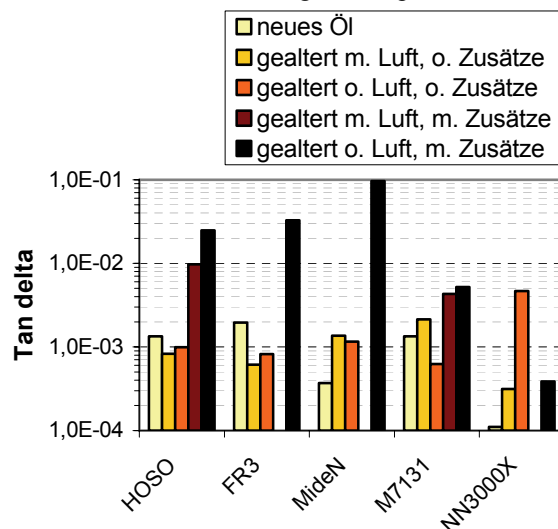
**Abbildung 4:** DP-Grad des Papier nach der Alterung

## 4 Dielektrische Eigenschaften

### 4.1 Verlustfaktor

Der Verlustfaktor Tangens Delta ist ein wichtiger Indikator für die elektrische Qualität und den Grad der Verunreinigung einer isolierenden Flüssigkeit. Alle Messungen wurden im Frequenzbereich zwischen 0,1 bis 1000 Hz mit dem Programm IDA 200 in einer Messzelle vorgenommen [13]. Die Spannung wurde auf 10 V eingestellt. Auf die Darstellung des kompletten Frequenzverhaltens wird hier verzichtet, sondern es sind für eine höhere Übersichtlichkeit nur die 50-Hz-Werte der  $\tan\delta$ -Messung in Abbildung 5 dargestellt. Es sind lediglich 2 der 5 Ölarten komplett vermessen worden. Nach Alterung unter Luft war die Probe von FR3 so zähflüssig (nahezu fest) geworden, dass auf die Messung verzichtet werden musste. Für

die Messung von Midel eN war nicht ausreichend Flüssigkeit vorhanden. Das Mineralöl Nynas Nytro ist während des Tests vollständig verdampft.



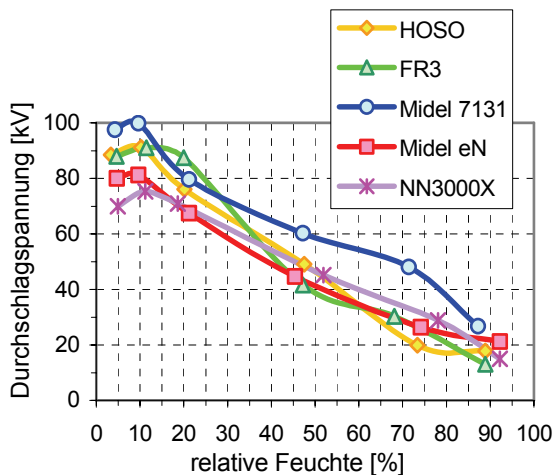
**Abbildung 5:** Einfluss der Alterung auf den Verlustfaktor  $\tan\delta$  bei 50 Hz

Weiterhin lässt sich feststellen, betrachtet man das Mineralöl, dass dessen Kurve einen niedrigeren  $\tan\delta$  als die natürlichen /der synthetische Ester aufweist. Generell ist ersichtlich, dass der  $\tan\delta$  von gealtertem Öl in der Regel höher ist als der von neuem. Das unter Luftabschluss und mit Zusätzen gealterte Öl (Test 4) weist bei allen untersuchten Flüssigkeiten den höchsten  $\tan\delta$ -Wert auf. Bei HOSO und FR3, gealtert ohne Zusätze, ist der  $\tan\delta$  nahezu unverändert. Midel eN zeigt auch hier eine Erhöhung des  $\tan\delta$  um eine Dekade. Obwohl HOSO bei der Neutralisationszahl und dem Wasserlösungsvermögen so gut wie keine Änderung zeigte, sind die  $\tan\delta$ -Werte dieser gealterten Öle deutlich erhöht. Man kann somit keine direkt Rückschlüsse dieser Werte auf die Ölalterung ziehen, sondern muss immer auch die anderen Messgrößen betrachten. Grundsätzlich lässt sich hier aber festhalten, dass mit zunehmender Ölalterung die Werte des  $\tan\delta$  ansteigen.

### 4.2 Durchschlagspannung

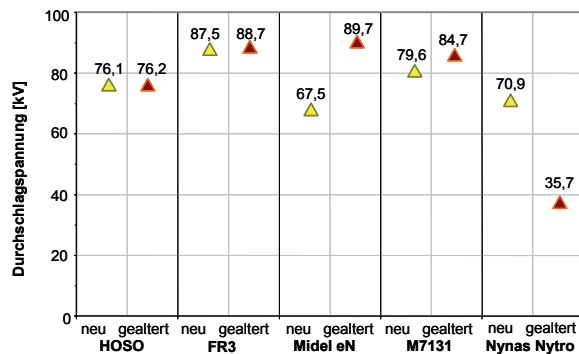
Die Messung der Durchschlagspannung erfolgt mit dem vollautomatischen Durchschlagmessgerät Baur DTA 100 nach DIN VDE 0303 mit Kugelkalotten von 2,5 mm Abstand. Um eine homogene Partikelverteilung zu erreichen, wird das Öl während der Messpausen mittels eines Rührers gemischt.

Abbildung 6 zeigt die Durchschlagspannung in Abhängigkeit von der relativen Feuchte. Die Resultate der Durchschlagspannung zeigen, dass die pflanzlichen Öle durchaus gutes Isoliervermögen aufweisen. Besonders im Bereich von 10% rF wurden mit über 80 kV sehr gute Ergebnisse erzielt. Gegenüber Mineralöl ist die Durchschlagfestigkeit der natürlichen Ester nicht verschlechtert.



**Abbildung 6:** Durchschlagspannung in Abhängigkeit von der rel. Feuchte

In Abbildung 7 ist die Durchschlagspannung des gealterten Öls abgebildet. Die Messungen erfolgten hier jeweils bei einer relativen Feuchte von 20%. Auch nach der Alterung blieb die Durchschlagfestigkeit der natürlichen Öle bzw. des synthetischen Ester erhalten. Scheinbar paradox ist die Situation bei Midel eN. Hier hat die gealterte Flüssigkeit eine deutlich höhere Durchschlagfestigkeit als die des neuen Öls. Ein Messfehler bei neuem Öl kann ausgeschlossen werden, da die Daten  $U_d = f(RS)$  konsistent sind. Eine Erklärung für diesen Anstieg lässt sich somit nur in chemischer Modifikation finden. Bei Mineralöl ist ein deutlicher Abfall der Durchschlagfestigkeit erkennbar.



**Abbildung 7:** Durchschlagspannung nach der Alterung bei 20 % rF

## 5. Zusammenfassung

Natürliche Ester sind im Gegensatz zu den gegenwärtig eingesetzten mineralölbasierten Flüssigkeiten als nachwachsende Rohstoffe biologisch schnell abbaubar, nicht wassergefährdend und schwerer entflammbar. Somit haben mit natürlichem Ester gefüllte Leistungstransformatoren einige Vorteile gegenüber der konventionellen Ausführung mit Mineralöl. Allerdings müssen beim Einsatz einige Besonderheiten beachtet werden.

Mittels Karl Fischer Titration und kapazitiver Sonden wurde die Wasserlöslichkeit verschiedener natürlicher

Ester bestimmt. Diese beträgt temperaturabhängig etwa das Fünffache wie von Mineralöl. Die Alterungsstabilität ist für den Betrieb von Leistungstransformatoren von entscheidender Bedeutung. Daher wurde ebenfalls die Alterung unter der Einwirkung von erhöhter Temperatur, Sauerstoff und Feuchtigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass bei Alterung unter Luftzufuhr die Viskosität der natürlichen Ester durch Oxidationsprozesse unzulässig erhöht wird. Durch Luftabschluss können diese Prozesse stark verringert werden. Hinsichtlich der Zersetzung der Zelluloseketten (DP-Grad) verhalten sich die natürlichen Ester deutlich unkritischer als Mineralöl. Die Durchschlagfestigkeit der natürlichen Ester für homogene Anordnungen nach VDE 0303 liegt mit über 80 kV für neue, trockenen Öle oberhalb der des Mineralöls. Im Allgemeinen zeigen die natürlichen Ester die gleiche Höhe und Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der relativen Feuchte wie Mineralöl.

## 6. Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Einstufung wassergefährdender Stoffe auf der Basis der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 17.05.1999, Dez 1999
- [2] M. Hemmer: Rapsöl als Isolier- und Kühlmedium in Transformatoren, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2004
- [3] K. Dumke; H. Borsi; E. Glockenbach: Fundamental investigations on the influence of temperature and water content on the electrical behavior of fluid impregnated insulating papers. In: Electrical Insulation, 1996, Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium Bd. 2, 1996, S. 542-545 vol.2
- [4] H. Käß: High- Oleic Öl: Industrierohstoff der Zukunft. In: Tagungsband 7. Symposium Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie, 2001, S. 99-105
- [5] A. Behr; A. Westfechtel: Katalytische Prozesse bei der Wertstoffgewinnung aus natürlichen Ölen und Fetten. In: Chemie Ingenieur Technik 79 (2007), Nr. 5, S. 621-636.
- [6] High Oleic – Vegetable Oils for the Industry, <http://www.high-oleic.de/> June 2007
- [7] B. Olbrich-Deusser; K.-H. Brunner: High-Oleic Sonnenblumenöl 90plus – ein außergewöhnliches Öl eröffnet neue Perspektiven, Tagungsband 7. Symposium Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie, 2001
- [8] Cooper Power Systems, Envirotemp FR3 Fluid – Bulletin 00092 Product Information, May 2001
- [9] M&I Materials Ltd – Vergleichsdaten Flüssigkeit Midel eN, Technisches Datenblatt Nr. 5, Januar 2007
- [10] M&I Materials Ltd – Product Overview Midel® 7131, Technical Datasheet No. 2, Februar 2007
- [11] H. Borsi: Esterflüssigkeit Midel 7131 als Ersatz für Mineralöl in Transformatoren. In: Elektrizitätswirtschaft 93 (1994), Nr. 24, S. 1523-1524, 1526-1528
- [12] K. Dumke: Untersuchungen an einer Esterflüssigkeit als Isolierstoff für Transformatoren, Universität Hannover, Diss., 1998
- [13] S. Tenbohlen, R. Seibold: Wasseraufnahmevermögen und Alterungsverhalten von Pflanzenölen für Leistungstransformatoren, Stuttgarter Hochspannungssymposium 2008