

Andrea Jany BSc

# **Das Alterungsverhalten von Transformatorölen und Transformatormaterialien**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Technische Chemie

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat Frank Uhlig

Institut für anorganische Chemie

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. Christof Sumereder

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

In Kooperation mit



FFG



**SIEMENS**

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

## **Danksagung**

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Betreuern Prof. Dr. Christof Sumereder und Prof. Dr. Frank Uhlig für ihre Hilfe, Geduld und Ratschläge bedanken.

Des Weiteren danke ich Dr. Roland Fischer und Dr. Georg Pukel für die Hilfe und Betreuung während der praktischen Arbeit.

Besonders bedanken will ich mich bei meiner Schwester Sandra Jany und Eva Haberfellner, ohne die ich wohl beim Schreiben der Arbeit verzweifelt wäre. Bedanken will ich mich auch bei Bettina Wieser und Getraud Kanzler für ihre Hilfe.

**DANKESCHÖN!**

## Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit Transformatorenölen und Transformatormaterialien und deren Verhalten bei thermischer Alterung.

Damit es beim Betrieb von Transformatoren zu keinen Störungen kommt, muss sichergestellt werden, dass Öle und Materialien über Jahre hinweg gute und stabile Werte aufweisen. Um diese Langzeitnutzung zu simulieren und um eventuelle Beeinträchtigungen im Laufe des Betriebs zu erkennen, werden verschiedene Öle und Materialien über zwei Wochen mit einem vorgegebenen Temperaturzyklus bei 140°C bzw. 120°C gealtert. Es werden Nytro 4000x (Mineralöl), Bec Fluid 9902 und Midel7131 (synthetische Ester) und Envirotemp FR3 und Biotemp (natürliche Ester) unter bestimmten Bedingungen thermisch gealtert. Weiters wird das Zusammenwirken dieser Öle mit den wichtigsten Transformatormaterialien (Papier, Metalle, Kunststoffe...) bei einer Alterung untersucht. Anschließend werden diese Materialien durch Zug- und Biegefestigkeit, Shorehärtemessung und durch eine Gitterschnittprüfung analysiert. Die Öle werden durch Messung der Dichte, Feuchte, Neutralisationszahl, Durchschlagspannung, Verlustfaktor, Relative Permittivitätszahl, spezifischer Widerstand, Grenzflächenspannung, UV/Vis- und IR-Spektroskopie bestimmt.

Danach werden die erhaltenen Ergebnisse ausgewertet und miteinander verglichen.

## **Abstract**

The topic of this master thesis is oils and materials used in transformers and their behavior during thermal aging.

To ensure failure free operation of transformers, the properties of the used materials and oils must remain stable over several years. Several oils are thermally aged to simulate this long term usage and identify potential alterations during operation. Nytro 4000x (mineral oil), Midel 7131 and Bec Fluid 9902 (synthetic esters) and Envirotemp FR3 and Biotemp (natural esters) are thermally aged under certain conditions and the interaction of these oils with the most abundant transformer materials (paper, metal, plastics...) are investigated. Afterwards the materials are analyzed using tensile strength, bending strength and shore hardness measurements and a cross cutting test

The oils are characterized by measuring their density, moistness, neutralization number, breakdown voltage, loss factor, relative permittivity, specific resistance and interfacial tension and by taking UV/Vis- and IR-spectra.

The yielded results are interpreted and the oils are compared to each other.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
2. Allgemeines.....	4
2.1 Öle/Ester .....	4
2.1.1 Mineralöl .....	5
2.1.2 Synthetische Ester.....	6
2.1.3 Natürliche Ester .....	7
2.2 Materialien.....	9
2.2.1 Einteilung.....	9
3. Alterungsreaktionen.....	11
3.1 Hydrolyse .....	11
3.2 Oxidation .....	12
3.2.1 Spaltung von Bindungen (durch Oxidation) .....	13
4. Messungen.....	15
4. 1 Materialmessungen .....	15
4.1.1 Zugprüfung .....	15
4.1.2 Biegeprüfung .....	15
4.1.3 Shorehärte.....	16
4.1.4 Gitterschnittprüfung.....	16
4.2 Ölmessungen .....	17
4.2.1 Feuchtemessung .....	18
4.2.1.1 Wassergehalt .....	18
4.2.1.2 Karl Fischer Titration - Absolute Feuchte .....	19
4.2.1.3 Relative Feuchte .....	20
4.2.2 Optisch/Farbe .....	21
4.2.3 Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ) .....	22
4.2.4 Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ ) .....	23
4.2.5 Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ).....	23
4.2.6 Grenzflächenspannung .....	24
4.2.7 Neutralisationszahl.....	24
4.2.8 Durchschlagspannung .....	25
4.2.9 Dichte .....	25
4.2.10 Spektroskopie .....	25
4.2.10.1 UV/Vis Spektroskopie .....	25
4.2.10.2 IR Spektroskopie.....	26
5. Laborversuche.....	30

5.1 Testläufe.....	33
5.1.1 Testlauf 1 .....	33
5.1.2 Testlauf 2.....	33
5.2 Alterungsversuche .....	34
5.2.1 Aluminium/Prepreg (Rohzustand) .....	34
5.2.2 Cu-Leiter (mit Epoxidharz)/Prepreg (ausgehärtet).....	35
5.2.3 Gummisack/Radiatorlack (auf Kesselstahl) .....	35
5.2.4 Kessellack (auf Kesselstahl)/ Synturit (auf Trafoblech) .....	35
6. Auswertung .....	36
6.1 Materialien.....	36
6.1.1 Testläufe.....	36
6.1.1.1 Optischer Vergleich.....	36
6.1.1.2 Zugprüfung .....	38
6.1.1.3 Biegeversuche .....	40
6.1.1.4 Shorehärte .....	40
6.1.2 Alterungsversuche .....	42
6.1.2.1 Aluminium & Prepreg (Rohzustand) .....	42
6.1.2.2 Cu-Leiter (mit Epoxidharz) & Prepreg (ausgehärtet).....	43
6.1.2.3 Gummisack & Radiatorlack (auf Kesselstahl).....	44
6.1.2.4 Gitterschnitte.....	45
6.2 Öle/Ester .....	46
6.2.1 Testläufe.....	47
6.2.2 Alterungsversuche .....	55
6.2.2.1 Aluminium & Prepreg (Rohzustand) .....	56
6.2.2.2 Cu mit Epoxidharz/Prepreg ausgehärtet.....	63
6.2.2.3 Gummisack/Radiatorlack .....	68
6.3 Photometrische Messungen des Öls .....	73
6.3.1 UV/VIS.....	73
6.3.2 IR-Spektroskopie .....	76
7. Zusammenfassung .....	80
Anhang.....	83
Tabellenverzeichnis.....	102
Abbildungsverzeichnis.....	103
Literaturverzeichnis .....	107



# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Transformatoren sind ein wichtiger Bestandteil im Energieversorgungsnetz. Das Öl in Transformatoren dient sowohl der elektrischen Isolierung der Wicklungen als auch der Kühlung bzw. dem Wärmeabtransport.

Seitens der Betreiber ist ein möglichst störungsfreier Betrieb angestrebt. Um dies zu garantieren, werden Versuche durchgeführt, um eventuelle Beeinträchtigungen oder im Laufe des Betriebs entstehende Schäden zu erkennen. Auch müssen bei einem entstandenen Schaden, negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt so gut wie möglich vermieden werden.

Diese Diplomarbeit ist eine Weiterführung von mehreren vorangegangenen Arbeiten, die zuvor an der TU Graz (in Zusammenarbeit mit Siemens Weiz) gemacht wurden. Diese Arbeiten sind:

Ernst Peter Pagger; Alternative Isolierflüssigkeiten im Vergleich zum klassischen Mineralöl, Dissertation, Graz 2013<sup>1</sup> Sandra Jany; Alterungsverhalten von biologischen und synthetischen Transformatorölen Diplomarbeit, Graz 2008<sup>2</sup> Irmela Kofler; Stabilitätsuntersuchungen an Transformatormaterialien, Diplomarbeit, Graz, 2007<sup>3</sup>

In den Arbeiten von Sandra Jany und Irmela Kofler wurden vor allem das Alterungsverhalten von verschiedenen Transformatorölen und weiters das Verhalten von in Öl gealterten Isolierpapieren auf Zellulosebasis und Isoliermaterialien auf Polyamidbasis untersucht.

Bei der Dissertation von Ernst Pagger wurden ebenfalls das Alterungsverhalten von Transformatorölen und Transformatormaterialien (v.a. Zellulosebasierende Materialien) behandelt. Darüber hinaus wurden Messungen zur genaueren Gas-in-Öl Analyse und zum Verhalten des Öls gegenüber Schwefelverbindungen gemacht.

In dieser Diplomarbeit werden verschiedene Transformatorenöle und Transformatormaterialien auf ihre Wechselwirkungen miteinander und deren Alterungserscheinungen getestet.

Es werden Mineralöl, synthetische Ester und natürliche Ester in Zusammenwirkung mit Transformatormaterialien gealtert und anschließend wird eruiert, inwieweit die

Öle als auch die Materialien Degradierungserscheinungen aufweisen und wie sie sich gegenseitig beeinflusst haben.

Die verwendeten Öle sind Nytro 4000x (Mineralöl), Midel 7131 (synthetischer Ester), Befuid 9902 (synthetischer Ester), Envirotemp FR3 (natürlicher Ester) und Biotemp (natürlicher Ester).

Um das Alterungsverhalten der Öle und Materialien nachzuahmen, werden in einem Silikonölbad Glasflaschen mit den fünf verschiedenen Ölen und diversen Materialien mittels eines vorgegeben Temperaturzyklus gealtert. Anschließend werden die Materialien auf mechanische, und die Öle auf spektroskopische, chemische und elektrische Eigenschaften untersucht.

Die Festmaterialien werden mittels folgender Prüfverfahren vermessen:

- Zugprüfung
- Biegeprüfung
- Shorehärtemessung

An den Ölen werden folgende Messungen durchgeführt:

- Physikalische Messungen:
  - Grenzflächenspannung
  - Dichte
  - IR-Spektroskopie
  - UV/Vis Spektroskopie
- Chemische Bestimmung:
  - Relative Feuchte
  - Absolute Feuchte
  - Neutralisationszahl
- Elektrische Messungen:
  - Dielektrischer Verlustfaktor ( $\tan \delta$ )
  - Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon$ )
  - Spezifischer Widerstand
  - Durchschlagspannung

Die Ergebnisse der verschiedenen Versuche werden ausgewertet und miteinander verglichen.

## 2. Allgemeines

Für den Einsatz in Transformatoren werden verschiedene Öle eingesetzt. Bei dieser Arbeit werden fünf dieser Öle gealtert und vermessen. Darunter befinden sich ein Mineralöl, zwei synthetische Ester und zwei natürliche Ester. Diese lassen sich durch ihren chemischen Aufbau und ihre physikalischen Eigenschaften unterscheiden.

### 2.1 Öle/Ester

Die verwendeten Öle können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Mineralöl
- Synthetische Ester
- Natürliche Ester

Diese Öle weichen in ihren Eigenschaften voneinander ab. In Tabelle 1 sind nach definierten Normen allgemeine Vergleichsdaten zu entnehmen. In Tabelle 4 (siehe Seite 46, Kapitel 6.2) können für die verwendeten Öle weitere, selbst gemessene Daten (VERBUND) nachgelesen werden.

**Tabelle 1: Einige Vergleichsdaten der verschiedenen Öle<sup>2</sup>**

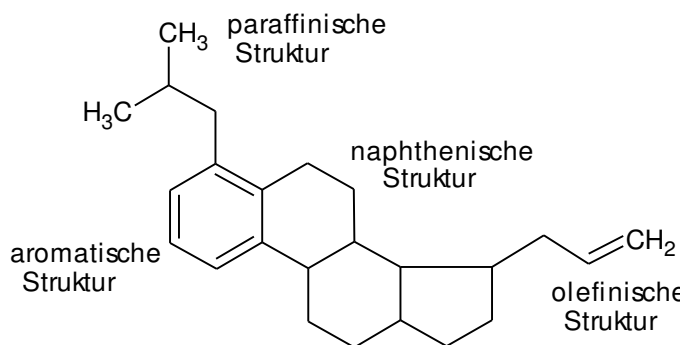
Eigenschaften	Einheit	Vorschrift	Mineralöl	Künstlicher Ester	Natürlicher Ester
Durchschlagspannung	kV	IEC 156	60	55	50
Verlustfaktor (tan δ)	°	IEC 247	$<10 \cdot 10^{-4}$	$10-30 \cdot 10^{-4}$	$10-30 \cdot 10^{-4}$
Permittivitätszahl (ε)		IEC 247	2,2	3,3	3,2
Pourpoint	°C	ISO 3016	- 40	- 50	- 15 bis – 25
Flammpunkt	°C	ISO 2592	135 -145	257	310 – 325
Brennpunkt	°C	ISO 2719	150 – 175	310	354 – 360
Kinematische Viskosität (40°C)	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	20	30	33 – 45
Dichte (20°C)	kg/m <sup>3</sup>	ISO 3675	900	960	920

### 2.1.1 Mineralöl

Mineralöle werden im Allgemeinen aus Erdöl gewonnen. Sie setzen sich hauptsächlich aus paraffinischen (Alkane), naphthenischen (Cycloalkane) und aromatischen (Ringverbindungen mit  $4n+2$  Elektronen) Verbindungen zusammen.

Die naphthenischen und paraffinischen Verbindungen bestimmen die Größen wie Dichte, Viskosität und das Temperaturverhalten.

Die aromatischen Anteile des Öls sind ausschlaggebend für die Oxidationsbeständigkeit, Gaseigenschaften und Durchschlagfestigkeit des Öls.



**Abbildung 1: Beispiele der möglichen Verbindungen in Mineralöl**

Mineralöle sind im Neuzustand sehr trockene Öle (ca. 30ppm  $H_2O$ ) und in weiterer Behandlung sehr empfindlich gegenüber Feuchtigkeit. Ihr Brenn- und Flammpunkt ist im Gegensatz zu den anderen Ölen niedrig (ca.  $140^\circ$  bzw.  $160^\circ C$ ) und weiters sind sie schlecht umweltverträglich. Die Vorteile von Mineralöl sind die niedrige Viskosität, geringe Dichte und gute, preiswerte Verfügbarkeit.<sup>2</sup>

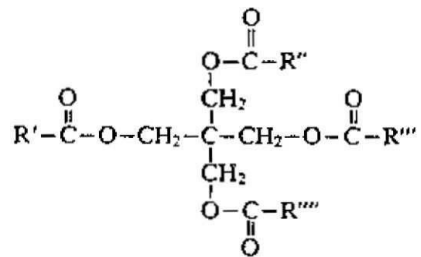
#### Nytro 4000x (Nynas)

Nytro 4000x ist vollinhibiert, hochraffiniert und besitzt einen hohen Anteil an naphthenischen Verbindungen. Dies hat die Vorteile, dass Oxidationsprodukte besser löslich sind, eine gesteigerte Kühlwirkung ermöglicht und ein besseres Tieftemperaturverhalten erzielt wird.<sup>4</sup>

### 2.1.2 Synthetische Ester

Synthetische Ester werden chemisch aus Carbonsäuren und Alkoholen unter Abspaltung von Wasser hergestellt, die je nach Art der Ausgangsverbindungen stark variieren können.

Bei den hier verwendeten synthetischen Estern wird Pentaerythrit als Alkohol und verschiedene Fettsäuren verwendet, weiters sind sie halogenfrei.



**Abbildung 2: Pentaerythrittetrafettsäureester**

Synthetische Ester weisen eine gute chemische Stabilität auf, sind umweltfreundlich und nicht wassergefährdend. Sie werden für Hochtemperaturanwendungen verwendet, da sie einen wesentlich höheren Flamm- und Brennpunkt (260°C und 310°) haben als Mineralöl. Weiters sind synthetische Ester relativ tolerant gegenüber Feuchtigkeit. Sie können wesentlich höhere Wassermengen als Mineralöl aufnehmen ohne dass es zu einer Verminderung seiner Isolationseigenschaften kommt. Es führt jedoch zu einer rascheren Alterung des Öls.<sup>5</sup>

Die Nachteile der synthetischen Ester sind die hohen Herstellungskosten und die hohe Viskosität, was zu Schwierigkeiten bei der Kühlung führen kann.<sup>2</sup>

#### Bec Fluid 9902 (Elantas)

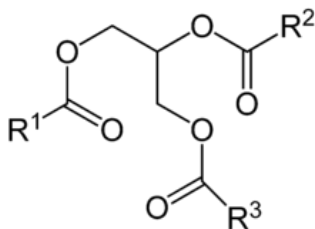
Becfluid ist ein biologisch abbaubarer (OECD 301), nicht wassergefährdender (Umweltbundesamt) künstlicher Ester, dessen Fettreste aus verschiedenen Pflanzen hergestellt werden können. Es weist ähnlich gute Wärmeleitfähigkeit wie Mineralöl auf und besitzt einen hohen Brennpunkt (über 300°C).<sup>6</sup>

### Midel 7131 (M&I)

Midel 7131 ist eine umweltfreundlicher, biologisch abbaubarer und nicht wasserschädlicher (Umweltbundesamt) künstlicher Ester. Es besitzt einen hohen Brennpunkt (322°C), einen niedrigen Gehalt an gelösten Gasen und seine Wärmeleitfähigkeit ist vergleichbar mit der eines Mineralöls.<sup>7</sup>

#### 2.1.3 Natürliche Ester

Natürliche Ester (Pflanzenöle) sind meist Verbindungen aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin und drei Fettsäuren.



**Abbildung 3: Glycerin mit verschiedenen Fettsäureresten (R1-R3)**

Natürliche Transformatoröle können aus verschiedenen Pflanzenölen gewonnen werden, aber die Sorten die hauptsächlich verwendet werden, sind Raps-, Soja- und Sonnenblumenöl, da sie leicht erhältlich und günstig sind.

Pflanzenöle enthalten Einfach-, Zweifach- und Dreifachbindungen, und daher müssen die Öle in bestimmten Verhältnissen gemischt und behandelt werden, um die gewünschten Eigenschaften eines Trafoöls zu erhalten.

Da zu viele ungesättigte Bindungen sich negativ auf Oxidations- und Temperaturverhalten auswirken, werden Pflanzen gezüchtet, die vorwiegend einfach ungesättigte Fettsäuren enthalten. Diese Pflanzenöle werden als hochölsäurehaltige bzw. Higholeic Sonnenblumenöl bezeichnet.

Natürliche Ester haben ein wesentlich höheres Wasserlösungsvermögen und sind daher toleranter gegenüber Feuchtigkeit als Mineralöle, aber weniger als dies bei synthetischen Estern der Fall ist.

Gleichzeitig kommt es durch die erhöhte Feuchtigkeitsmenge zu einer rascheren Alterung des Öls und dadurch zu einem Anstieg der Neutralisationszahl. Durch Oxidation wird die Viskosität erhöht.<sup>8</sup>

Transformatoröle, die auf Pflanzenölen basieren, sind biologisch abbaubar, umweltfreundlich und besitzen einen höheren Flammpunkt als Mineralöle. Dadurch können weitere Schutzeinrichtungen weggelassen werden und die Errichtung in dicht besiedelten Gebieten ist möglich (gilt auch für synthetische Ester).

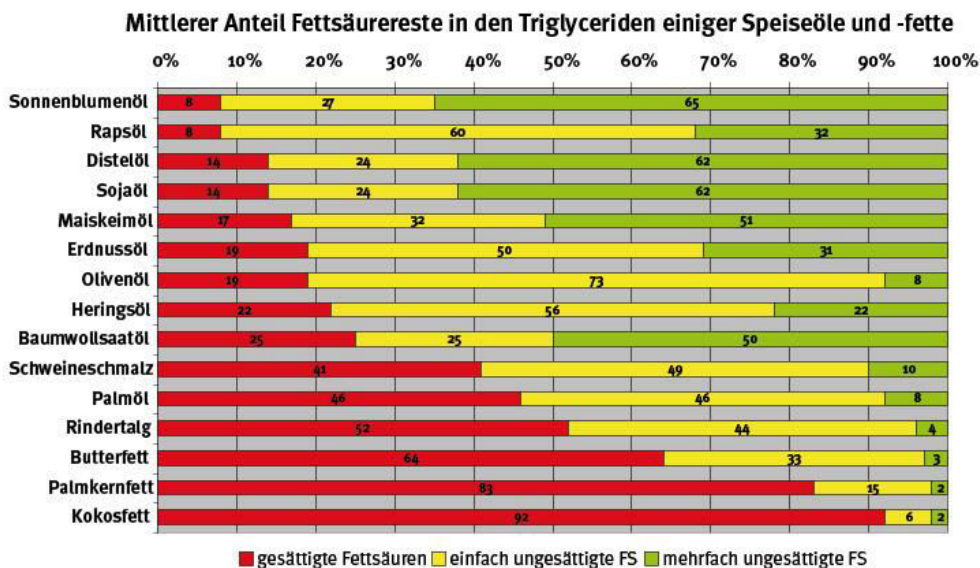


Abbildung 4: Verschiedene Öle und ihre Bindungen<sup>9</sup>

### Envirotemp FR3 (Cooper)

Envirotemp FR3 setzt sich aus verschiedenen Pflanzenölen zusammen. Die enthaltenen Fettsäuren sind sowohl gesättigt oder ungesättigt und besitzen eine Verbindungslänge von 14 bis 22 Kohlenstoffatomen.

Es ist nicht wassergefährdend und verfügt über eine hohe Wasserlöslichkeit in Öl.

Es besitzt einen sehr hohen Brenn- und Flammpunkt (360°C und 330°C) und weist einen hohen Zündwiderstand auf. Es ist ungiftig und enthält kein Petroleum, Halogene, Silikone und Schwefel.

Sein CO<sub>2</sub> Fußabdruck ist im Vergleich zu Mineralöl sehr gering. Auch gegenüber Midel 7131 besitzt es geringere Emissionswerte<sup>10</sup>



## Biotemp (ABB)

Biotemp ist ein natürlicher Ester, der aus Sonnenblumen oder Färberdistel gewonnen werden kann. Diese weisen einen hohen Ölsäuregehalt (über 75%) auf. Es verfügt über einen sehr hohen Brenn- und Flammpunkt (347°C und 314°C) und ist zu 97% biologisch abbaubar (in 21 Tagen). Es ist nicht wassergefährdend und besitzt ein hohes Wasseraufnahmevermögen (bis 1100 ppm bei Raumtemperatur).<sup>11</sup>

## **2.2 Materialien**

Es kommen viele verschiedene Materialien in einem Transformator zum Einsatz. In den Versuchsreihen wird nur ein Teil davon untersucht.

### **2.2.1 Einteilung**

Der Großteil der untersuchten Transformatormaterialien lässt sich in wenigen Gruppen einteilen.

Diese Materialien werden im Anschluss an die Alterung im Öl durch Zug- und Biegefestigkeit, Shorehärtemessung und durch eine Gitterschnittprüfung analysiert.

Die meisten der untersuchten Materialien werden nicht separat gealtert und werden daher in Laufe der Arbeit bei den Wechselwirkungen mit Öl auch nicht näher besprochen.

### Papier/Holz/Zellstoff

- Blockspan (mit verschiedenen Klebern möglich)
- Prepreg (Papier; mit verschiedenen Verklebungen möglich)
- Hartpapier (Phenol-Formaldehyd-Kunstharz-Hartpapier)
- Pressholz
- Faserpapier (Isolierband mit Glasfadeneinlagen)
- Naturkork
- HGW-Plättchen (Phenol-Baumwoll-Hartgewebe)

### Metalle

- Kupfer (blank, lackiert)
- Verzinkter Stahl
- Aluminium/Alukrepp

## Kunststoffe/Lacke

Gummisack (Polyamid mit einer NBR Beschichtung)  
Polyamidringe  
Kabelbinder (verschiedene Kunststoffe möglich)  
Dichtungsringe (verschiedene Kunststoffe möglich)  
Viton-O-Ringe (Fluorelastomer)  
NBR-O-Ringdichtungen  
Centellen (Aramid)  
Treibstifte (Polyamid)  
Kunstkork  
Nomex-Lochband (Aramid)  
Polyesterband  
GFK-Leisten  
Kessellack (auf Kesselstahl)  
Synturit (auf Trafoblech)  
Radiatorlack (Polyvinylbutyral)

Zwischen den verschiedenen Materialgruppen und den Ölen kann es zu Wechselwirkungen kommen, die sowohl Einfluss auf die Öle als auch auf die Materialien haben.

Bei den Materialien, die sich aus Zellulose zusammensetzen, kann man davon ausgehen, dass es bei der Alterung zu einer Reaktion der OH-Gruppen der Zellulose kommt, die zusammen mit den vorhandenen Fettsäuren einen Ester bilden.

Metalle können bei der Alterung als Katalysator wirken. Dadurch kann es zu einer Beschleunigung der Alterung des Öls kommen, und es können mehr polare Verbindungen darin entstehen.

Bei den Kunststoffmaterialien kann es vor allem bei den Elastomeren bei der thermischen Alterung in Estern zu einer Beeinträchtigung des Materiales und des Öls kommen. Dies kann zu einer Quellung und Versprödung der Elastomere führen.

Die verschiedenen Wechselwirkungen der Materialien mit Öl werden in den folgenden Kapiteln genauer besprochen.

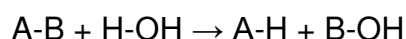
### 3. Alterungsreaktionen

Zu (beschleunigten) Alterungsprozessen kann es durch verschiedene Ursachen kommen, die unterschiedlich starken Einfluss auf das Öl haben. Hierzu gehören zum Beispiel Faktoren wie Temperatur, Wassergehalt und Sauerstoff, die dazu führen, dass es zu chemischen Reaktionen im Öl und zwischen Öl und Materialien kommt.

Diese Reaktionen führen in den meisten Fällen zu einer Veränderung und Verschlechterung der chemischen und elektrischen Eigenschaften.

#### 3.1 Hydrolyse

Die Hydrolyse beschreibt eine Reaktion mit Wasser und einen dadurch entstehenden Bindungsbruch einer Verbindung. Es bindet sich der Wasserstoff an den einen Teil der gespaltenen Verbindung und das entstandene  $\text{OH}^-$  Ion an den anderen Teil.



Es kann zwischen einer sauren und basischen Hydrolyse unterschieden werden

Da es bei der Alterung des Esters zu einer Reaktion mit Wasser und den entstandenen Säuren kommt wird als Beispiel in Abbildung 5 die saure Esterhydrolyse gezeigt.

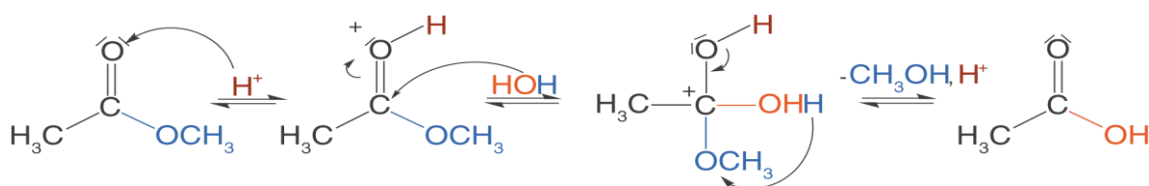


Abbildung 5: Saure Esterhydrolyse<sup>12</sup>

Es kommt bei der sauren Esterhydrolyse durch eine Säure zur Spaltung des Esters in eine Carbonsäure und Alkohol.

Zu Beginn wird der Carbonyl-Sauerstoff protoniert und aktiviert. Dadurch kann das vorhandene Wasser nukleophil angreifen und es kommt zu einem tetraedrischen Zwischenzustand. Anschließend wird Alkohol und Wasserstoff abgespalten und es entsteht eine Carbonsäure.

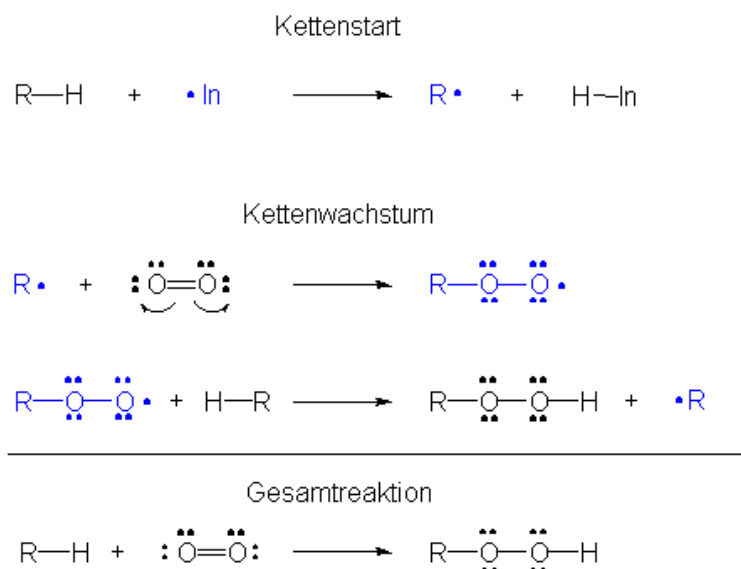
Beschleunigt wird diese Reaktion durch steigenden Wassergehalt und Temperatur.

### 3.2 Oxidation

Durch die Aufnahme von Sauerstoff aus der Umgebungsluft (Autooxidation) kommt es im Öl zu einer Beschleunigung der Alterung.

Die Oxidation kann durch ein entstandenes Radikal (z.B.: Temperatur) initiiert werden. Dieses verbindet sich im Anschluss mit einem Wasserstoff des Kohlenwasserstoffes (R), wodurch die Kohlenwasserstoffverbindung zu einem Kohlenwasserstoffradikal wird.

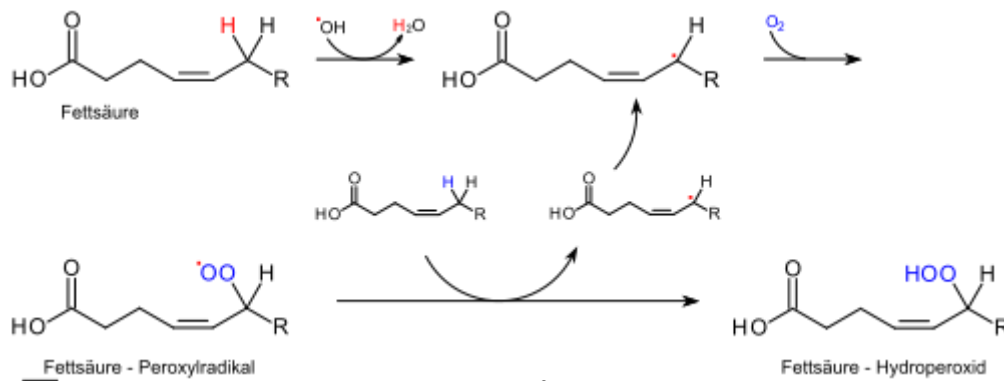
Anschließend reagiert dieses Radikal mit weiterem Sauerstoff und bildet ein Peroxidradikal. Dieses kann in weiterer Folge mit anderen Kohlenwasserstoffverbindungen reagieren, wodurch Peroxid und ein neues Kohlenwasserstoffradikal entsteht.



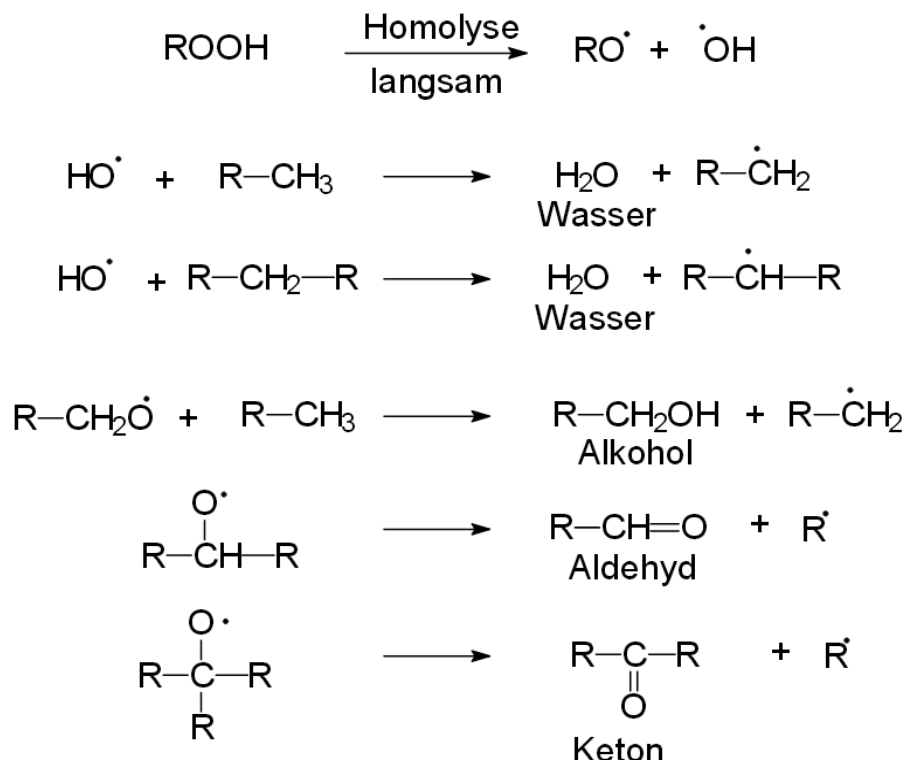
**Abbildung 6: Reaktionen der Autoxidation<sup>13</sup>**

Diese Reaktion kann so lange weiter ablaufen bis es zu einer Kettenabbruchreaktion kommt, indem zwei Radikale aufeinandertreffen (z.B.:  $\text{R}\cdot + \text{R}\cdot$ )

Da in den natürlichen Estern zum Teil auch ungesättigte Fettsäuren zum Einsatz kommen, sind vor allem diese Ölsorten von der Alterung durch Autooxidation betroffen. Dies liegt daran, dass Methylengruppen, die neben Doppelbindungen liegen reaktiver sind und durch den Angriff von Sauerstoff zu Hydroperoxid reagieren können.

Abbildung 7: Peroxidation von Fettsäuren<sup>9</sup>

Durch die Autooxidation von Kohlenwasserstoffen entstehen also Hydroperoxide, die anschließend zu Alkoholen, Ketonen und Aldehyden ( $\rightarrow$ Carbonsäuren) weiterreagieren können.

Abbildung 8: Folgereaktionen von Hydroperoxiden<sup>14</sup>

### 3.2.1 Spaltung von Bindungen (durch Oxidation)

Durch die elektrischen und thermischen Beanspruchungen des Öls kann es zu Bindungsbrüchen und Entstehung von Gasen kommen. Es können zum Beispiel Ionen oder Radikale entstehen, wodurch es zu einer Neubildung von Verbindungen kommen kann.

Weiters ist es möglich, dass es durch Polymerisationsprozesse zur Entstehung von hochmolekularen Verbindungen kommt, die im Öl unlöslich sind und als Schlamm ausfallen können (Mineralöl).

Bei der Entstehung von Gasen werden aus dem Öl Spaltgase gebildet, die im Öl gelöst oder auch nicht gelöst sind. Dadurch kann es zu Bildung von „bubbles“ kommen, die einen negativen Einfluss auf das Öl haben, da sie die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlags erhöhen.<sup>2</sup>

Weiters können eine große Menge an entstandenen Spaltgasen den Trafo zur Explosion bringen. Gase, die in einem Transformator entstehen können, sind unter anderem  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$ .<sup>15</sup>

Bei einer thermischen Alterung bei der Zellulose eingesetzt wird, kommt es zur Entstehung von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid durch einen thermisch oxidativen Abbau der Zellulose.<sup>16</sup>

## 4. Messungen

### 4.1 Materialmessungen

Durch die Messungen wie Zug- bzw. Biegeversuche und das Feststellen der Shorehärte kann anschließend ermittelt werden, ob und wie sehr das Altern des Materials in Öl Auswirkungen auf die einzelnen Proben hat. Des Weiteren wird auch ein Gitterschnitt durchgeführt, der eine Aussage darüber liefert, wie gut eine Beschichtung oder Lackierung auf dem Zweitmaterial haftet.

#### 4.1.1 Zugprüfung

Bei der Zugprüfung werden die eingespannten Proben so lange gleichmäßig gestreckt bis es zum Reißen des Werkstücks kommt. Während des Dehnens des Materials wird die angewandte Kraft, die dafür nötig ist, und die Verschiebung gemessen.



Abbildung 9: Gerät für Zug- und Biegeprüfungen<sup>17</sup>

#### 4.1.2 Biegeprüfung

Bei der Biegeprüfung werden die Proben mit einem bestimmten Druck belastet. Dieser Druck steigt kontinuierlich und gleichmäßig an bis es zum Brechen des Materials kommt. Durch die Spannungs-Dehnungs-Kurve kann der Punkt (Bruchpunkt) der Zerstörung erkannt werden.<sup>18</sup>

### 4.1.3 Shorehärte

Die Shorehärte wird vor allem für Elastomere zur Feststellung ihrer Härte verwendet. Sie wird bestimmt indem man die Eindringtiefe in die Probe misst. Es wird ein Eindringkörper (Indenter) durch Federkraft in die Probe gedrückt. Die Strecke die der Indenter in die Probe eintritt, gibt an, welche Shorehärte ein Körper besitzt.

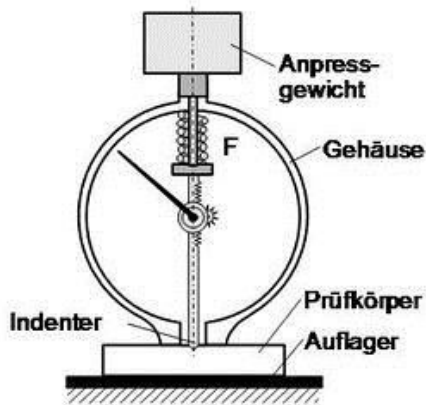


Abbildung 10: Gerät zur Feststellung der Shorehärte <sup>19</sup>

### 4.1.4 Gitterschnittprüfung

Die Gitterschnittprüfung wird nach EN ISO 2409:2007 durchgeführt. Hierfür wird ein Mehrschneidengerät (6 Schneiden mit Führung- und Schneidspitzen) benutzt und gleichmäßig über die Fläche geschnitten. Anschließend wird ein Klebeband über die geschnittene Fläche angebracht und nach einiger Zeit wieder entfernt. Danach wird beurteilt wie sehr die Beschichtung sich gelöst bzw. abgeplatzt ist, und kann damit Rückschlüsse über die Haftung der Beschichtung ziehen.



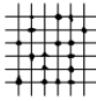
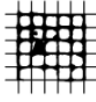
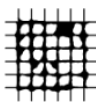

Gitterschnitt-Kennwert	Beschreibung	Aussehen der Oberfläche im Bereich des Gitterschnittes, an der Abplatzung aufgetreten ist (Beispiel für sechs parallele Schnitte)
0	Die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.	—
1	An den Schnittpunkten der Gitterlinien sind kleine Splitter der Beschichtung abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche nicht größer als 5 % der Gitterschnittfläche.	
2	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer und/oder an den Schnittpunkten der Gitterlinien abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 5 %, aber nicht größer als 15 % der Gitterschnittfläche.	
3	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer teilweise oder ganz in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind teilweise oder ganz abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 15 %, aber nicht größer als 35 % der Gitterschnittfläche.	
4	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind ganz oder teilweise abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 35 %, aber nicht größer als 65 % der Gitterschnittfläche.	
5	Jedes Abplatzen, das nicht mehr als Gitterschnitt-Kennwert 4 eingestuft werden kann.	—

Abbildung 11: Einstufung der Prüfungsergebnisse <sup>20</sup>

## 4.2 Ölmessungen

Es werden viele verschiedene Ölmessungen durchgeführt. Diese werden zum Teil von der Firma Verbund Umwelttechnik durch Ernst Pagger durchgeführt.

Aus Tabelle 2 können die Normen für die Ölmessungen (die von der Firma Verbund gemacht wurden) entnommen werden.

Tabelle 2: Chemisch Physikalische Analyse gemäß IEC 60422 und ÖVE Merkblatt 5

	Einheit	Normen
Durchschlagspannung $U_d$	kV/2,5mm	IEC 60156
Wassergehalt KFT gemessen	mg H <sub>2</sub> O/kg Öl	IEC 60814
Wassergehalt @ 20°C berechnet	mg H <sub>2</sub> O/kg Öl	IEC 60422
Neutralisationszahl NZ	mg KOH/g Öl	IEC 62021-1
Verlustfaktor tan d	1	IEC 60247
Grenzflächenspannung $\sigma$	mN/m	ISO 6295
Spezifischer Widerstand 90°C	GΩm	IEC 60422

## 4.2.1 Feuchtemessung

Die Feuchtemessungen können auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Dabei kann die relative Feuchte oder die absolute Feuchte bestimmt werden.

### 4.2.1.1 Wassergehalt

Wasser kommt in Transformatorenöle durch mehrere Ursachen vor. Eine Möglichkeit ist, dass es von Anfang an in den Ölen enthalten ist, da eine Restfeuchte immer im Öl verbleibt. Diese (absolute) Menge ist bei den synthetischen und natürlichen Estern um ein Vielfaches höher als dies bei Mineralöl der Fall ist. Weiters kann der Wassergehalt auch durch die Alterung der Zellulose-Isolierstoffe (z.B. Papier), durch die eigentliche Ölalterung (Hydrolyse, Oxidation...) oder durch fehlerhafte Dichtungen und Luftentfeuchter steigen.<sup>14, 2</sup>

Höherer Wassergehalt/nicht im Öl gebundenes Wasser lässt das Öl stärker altern. Zusätzlich kann es dadurch zur verstärkten Korrosion von Metallbauteilen und Zersetzung der Zellulose kommen kann. Weiters werden die Eigenschaften des Öls negativ beeinflusst.<sup>21</sup>

Die höchste Menge, die ein Öl an Feuchtigkeit aufnehmen kann, nennt man Sättigungspunkt. Ist dieser erreicht bzw. überschritten, wird das weitere Wasser in einer eigenen Schicht/als Tropfen abgeschieden.<sup>22</sup>

Die maximale Wasserlöslichkeit lässt sich wie folgt ermitteln:<sup>23</sup>

$$C_{w,s} = C_{öl} * e^{-B/T}$$

$C_{w,s}$  .....maximale Wasserlöslichkeit

$C_{öl}$ ,  $B$  ..... ölspezifische Konstanten, alterungsabhängig

$T$  ..... Temperatur

Wie man aus der Formel erkennen kann, ist die Wasserlöslichkeit von der Temperatur und der Art des Öls abhängig. Weitere Einflussfaktoren sind Alter des Öls und der herrschende Druck.

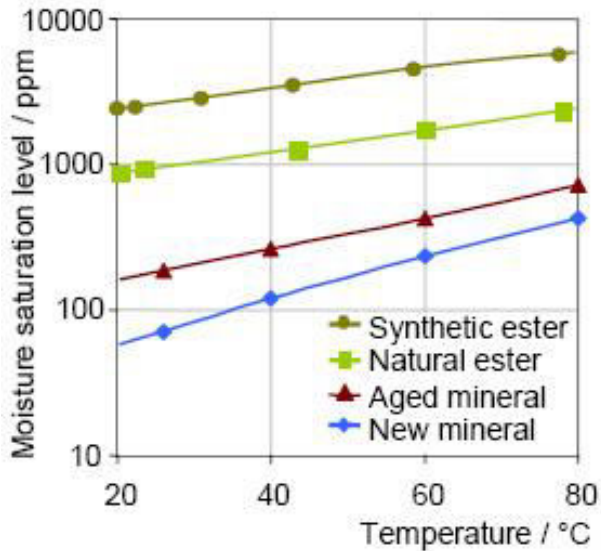


Abbildung 12: Wassersättigungswerte der verschiedenen Öle<sup>24</sup>

#### 4.2.1.2 Karl Fischer Titration - Absolute Feuchte

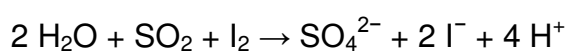


Abbildung 13: Karl Fischer Coulometer<sup>25</sup>

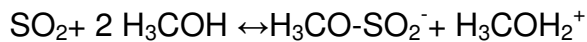
Dieser Coulometer misst den Wassergehalt beruhend auf dem Titrationsprinzip nach Karl-Fischer. Bei dieser Methode wird der absolute Feuchtwert des Öls in ppm angegeben.

Es kommt hier zu einer Titration von Wasser mit einer wasserfreien Methanollösung, die Iod und Schwefelsäure (mit Puffer) enthält.

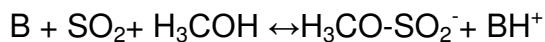
In Gegenwart von Wasser reagiert Iod und Schwefeldioxid zu Sulfat und Iodid



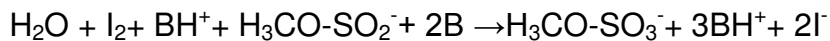
Da noch Methanol in der Lösung ist, bildet sich in einem vorherigen Gleichgewicht mit  $\text{SO}_2$  ein Monomethylsulfite-Ion



Anschließend wird durch eine Base (z.B.: Pyridin, Imidazol) das Gleichgewicht der Reaktion nach rechts verschoben (B=Base)



Bei der Titration wird das Methylsulfite-Anion in Anwesenheit von Wasser durch Iod zu Methylsulfat oxidiert. Gleichzeitig wird Iod zu Iodid reduziert.



Die absolute Feuchte ist die Wassermenge, die tatsächlich im Öl gelöst ist (gemessen in ppm).<sup>26,9</sup>

#### 4.2.1.3 Relative Feuchte



Abbildung 14: Messgerät für relative Feuchte<sup>22</sup>

Bei dieser Messung werden kapazitive Sensoren eingesetzt, die den Feuchtegehalt durch die Wasseraktivität bestimmen. Sie besitzen 2 Elektroden und ein, aus einem hygroskopischen Polymer bestehendes, Dielektrikum. Es diffundieren Wassermoleküle des Öls durch die Elektroden in das Dielektrikum und verändern dessen Kapazität. Dieser Vorgang ist abhängig von der relativen Feuchte.<sup>9</sup>

Die Vorteile dieser Messmethode sind die Unabhängigkeit der Messungen vom Öltyp und die schnelle und einfache Messung mit einer qualitativen Einschätzung des Wassergehalts.

Die relative Feuchte lässt sich aus dem Verhältnis der tatsächlich im Öl enthaltenen Menge gelösten Wassers zur maximal möglichen Menge an der Sättigungsgrenze bestimmen (zum Teil hohe Abweichungen)

$$\Phi = \rho_w / \rho_{w,max} * 100\%$$

$\Phi$ .....relative Feuchte

$\rho_w / \rho_{w,max}$ ....gelöstes Wasser/max.gelöstes Wasser an der Sättigungsgrenze

Bei Werten von 0% ist das Öl absolut trocken und bei 100% gibt es eine vollständige Wassersättigung.<sup>27</sup>

Eine vereinfachte, aber etwas ungenaue Methode ist:

$$\text{Relative Feuchte (RH)} = a_w * 100\%<sup>28</sup>$$

#### 4.2.2 Optisch/Farbe

Eine schnelle Methode, die es ermöglicht, das Alterungsverhalten ohne viel Aufwand zu analysieren, ist es, die Farbe oder die Farbänderung des Öls zu betrachten. Die Farbskalawerte reichen von 1 – 8.

Neuöl ist im Allgemeinen farblos bis gelblich (Ausnahme Biotemp) und frei von Verunreinigungen bzw. Schwebstoffen. Kommt es zu einer Dunkelfärbung (Skala 4 – 8) und möglicherweise auch zu Partikeln in der Probe, kann man davon ausgehen, dass die Öle stärker gealtert sind.

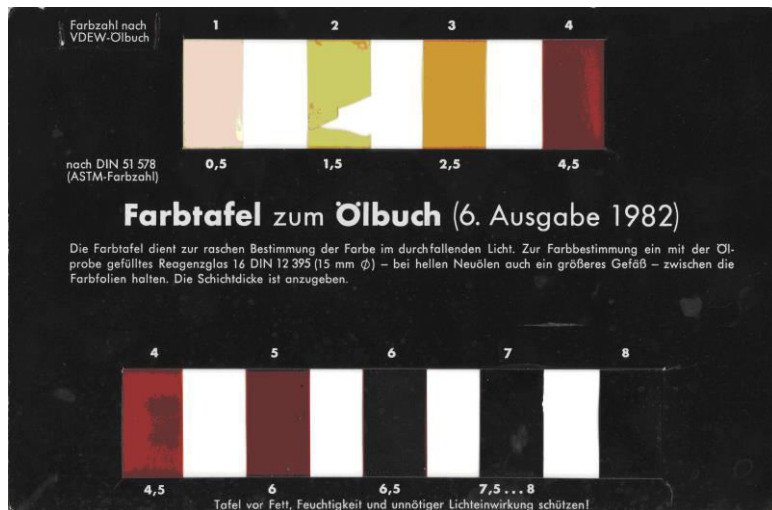


Abbildung 15: Farbtafel für Öle

Der Farbvergleich wird mit Hilfe einer Farbtafel nach DIN 51 578 durchgeführt

Abbildung 16: Öl-Farbvergleichsproben<sup>29</sup>

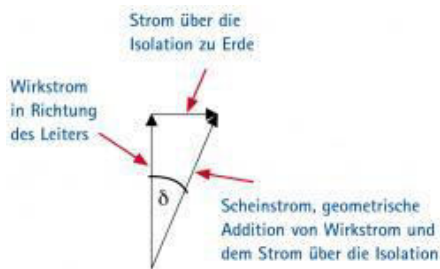
#### 4.2.3 Verlustfaktor ( $\tan \delta$ )

Der dielektrische Verlustfaktor ist eine Materialgröße und wie die Permittivitätszahl von Frequenz und Temperatur abhängig. Es wird ermittelt, wie viel Energie in z.B. Wärme umgewandelt wird und dadurch verloren geht.

Legt man an ein Dielektrikum Wechselspannung, so eilt im idealen Fall der Strom der Spannung um  $90^\circ$  vor. Reale Dielektrika weisen jedoch Verluste auf, wie Polarisations- und Leitfähigkeitsverluste, wodurch sich ein Verlustwinkel ergibt.

Bei der  $\tan \delta$  Messung wird die Fließrichtung des Stroms dargestellt, wobei die Wirkrichtung und die austretende Richtung durch die Isolation (Scheinstrom)

dargestellt ist. Der Winkel, der sich daraus ergibt, ist der delta Winkel. Wird nun der Tangens davon genommen, so stellt er die Qualität der Isolation dar.<sup>30</sup>



**Abbildung 17: delta Winkel<sup>30</sup>**

Kommt es zu einer Alterung des Öls oder zu Verunreinigungen, so steigt der Verlustfaktor an und der Widerstand im Öl sinkt. Je kleiner der Verlustfaktor desto besser. Er wird stark von leitfähigen und polaren Verbindungen beeinflusst.

#### 4.2.4 Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ )

Die Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl) ist materialabhängig und zeigt an wie durchlässig ein Material für ein elektrisches Feld ist. Es kommt durch polarisierbare Ladungen zu Abschwächung des elektrischen Feldes.

#### 4.2.5 Spezifischer Widerstand ( $\rho$ )

Der spezifische Widerstand ist eine material- und temperaturabhängige Größe.

Für die Messung wird der elektrische Widerstand über ein definiertes Areal zwischen zwei Elektroden bei angelegter Spannung gemessen.

$$R \sim d$$

$$R \sim 1/A$$

$$R \sim d/A \Rightarrow R = \rho \cdot d/A$$

R....Widerstand

d.....Abstand zwischen Elektroden

A....Areal

$\rho$  ....Spezifischer Widerstand

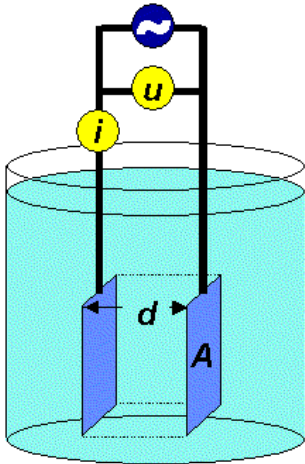


Abbildung 18: Versuchsaufbau für das Messen des spezifischen Widerstands von Flüssigkeiten<sup>31</sup>

Der Kehrwert des spezifischen Widerstands ist die elektrische Leitfähigkeit.

Bei Transformatorölen sind hohe Widerstandswerte zu bevorzugen.<sup>32</sup>

#### 4.2.6 Grenzflächenspannung

Die Grenzflächenspannung gibt die Spannung an, die an der Grenze von zwei verschiedenen Phasen auftritt. Die Größe kann entweder negative oder positive Werte annehmen. Bei negativen Zahlen wird angezeigt, dass versucht wird, die Phasengrenzfläche zu vergrößern (z.B. Kapillarwirkung), und bei positiven Werten kommt es zum umgekehrten Effekt.<sup>33</sup>

Da beim Alterungsprozess polare Verbindungen bzw. freie Elektronen entstehen, kommt es zum Sinken der Grenzflächenspannung.

Also je höher die Werte desto besser ist der Zustand des Öls.<sup>34</sup>

#### 4.2.7 Neutralisationszahl

Die Neutralisationszahl gibt die Menge an sauren (oder alkalischen) Verbindungen im Öl an. Sie wird gemessen indem der Verbrauch an Kaliumlauge für 1g Säure gemessen wird. Da es durch die Alterung zum Anstieg von sauren Verbindungen kommt, steigt folglich auch die Neutralisationszahl.

Je niedriger die Neutralisationszahl desto besser sind die Eigenschaften des Öls.<sup>35</sup>



### 4.2.8 Durchschlagspannung

Bei der Durchschlagspannung wird zwischen zwei Elektroden eine Spannung angelegt und permanent erhöht. Bei Überschreiten der dielektrischen Festigkeit kommt es zum elektrischen Durchschlag. Die Durchschlagspannung ist somit ein Maß wie gut das Öl einer elektrischen Belastung standhalten kann.<sup>36</sup>

Sie wird stark durch den Feuchtegehalt und der Reinheit des Öls beeinflusst.

Bei niedrigen Durchschlagspannungswerten kann man davon ausgehen, dass das Öl nicht mehr in optimalen Zustand ist. Dies kann sowohl an erhöhten Feuchtigkeitswerten oder an darin befindlichen Partikeln liegen.

### 4.2.9 Dichte

Die Dichte gibt die Masse pro Volumeneinheit an. Die SI Einheit der Dichte ist  $\text{kg/m}^3$ . Im Allgemeinen ist die Dichte vom Ort abhängig  $\rho(\mathbf{r}) = \text{dm}/\text{dV}$  und durch das Integral

$$m = \int_V \rho(\mathbf{r}) \text{d}v \text{ gegeben.}$$

Sie ist von der Temperatur und bei Gasen auch vom Druck abhängig.

Die konstante Dichte ist gegeben durch  $m = \int_V \rho_0 \text{d}V = \rho_0 V_{18}$

### 4.2.10 Spektroskopie

#### 4.2.10.1 UV/Vis Spektroskopie

Das Prinzip der UV/Vis Spektroskopie basiert auf der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit einer Probe.

Es wird ein Molekül durch elektromagnetische Wellen im UV (ultraviolett; 100 nm bis 380 nm) oder sichtbaren (visible; 380 nm bis 780 nm) Bereich bestrahlt, wobei Valenzelektronen (Elektronen der äußersten Orbitale) angeregt werden, und dadurch in ein höheres Energieniveau wechseln.

Durch die Energieabsorption, die benötigt wird, kann man Rückschlüsse auf die Bindungsverhältnisse im Molekül erhalten.

Die *Einstein-Bohr Gleichung* zeigt die Zusammenhänge der Wellenlänge des absorbierten Lichts und der nötigen Energie, die aufgewendet werden muss, um ein

Elektron von einem besetzten Orbital (HOMO, highest occupied MO) auf ein unbesetztes höheres Orbital anzuheben (LUMO, lowest unoccupied MO): <sup>37,18</sup>

$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \quad (\text{Einstein Bohr Gleichung})$$

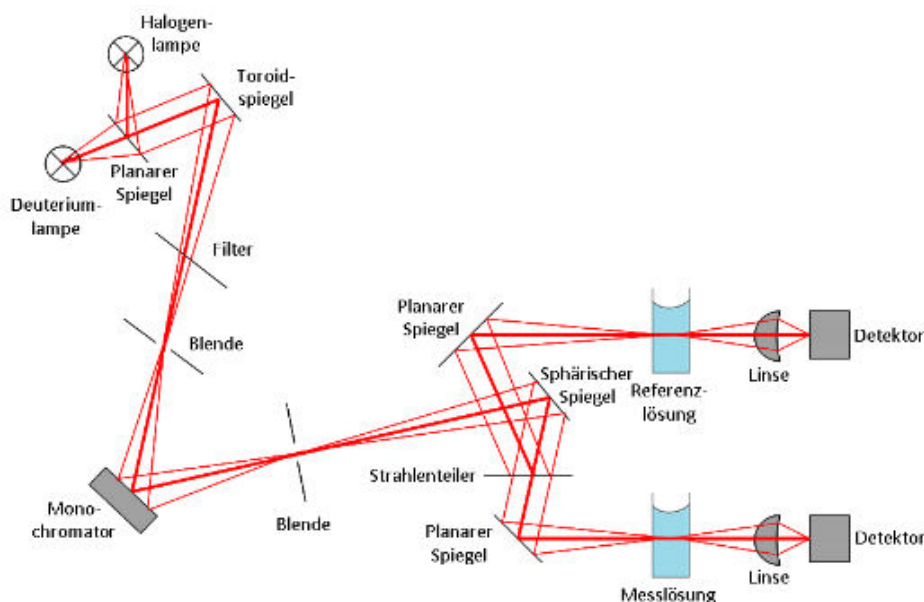
E.....Energie

h.....Plancksche Wirkungsquantum

f.....Frequenz

c.....Lichtgeschwindigkeit

$\lambda$ .....Wellenlänge



**Abbildung 19: Prinzip eines Zweistrahl-Spektrometers**

Die Lichtquelle strahlt Licht (200-800nm) aus, welches anschließend auf den Monochromator trifft. Dieser zerlegt das einfallende Licht und bestimmt die zu messenden Wellenlängen. Der Strahl fällt danach auch einen Sektorspiegel, der das Licht abwechselnd auf die Küvetten der Referenz- und Messprobe wirft. Die entstehenden Lichtstrahlen werden vom Detektor registriert. <sup>37,18</sup>

#### 4.2.10.2 IR Spektroskopie

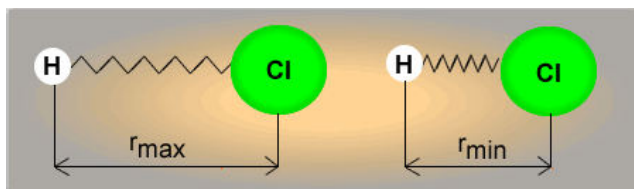
Die IR (Infrarot) Spektroskopie ist eine gute Methode um allgemeine Kenntnisse über die angewendeten Öle und zu bekommen.

Das Infrarotspektrum weist in etwa eine Wellenzahl ( $1/\text{cm}$ ) von ca.  $4000$  bis  $400\text{ cm}^{-1}$  auf. Dies entspricht einer Wellenlänge von  $25$  bis  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ .

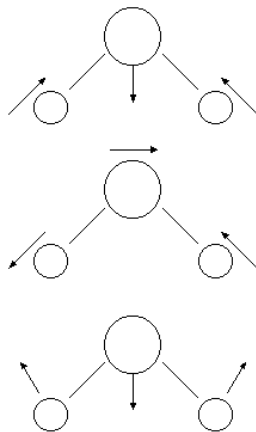
Durch die Absorption von Infrarot-Strahlung kommt es zur Anregung von Molekülschwingungen und Molekülrotationen. Jedoch muss zur Absorption von IR Strahlung das Molekül bei seiner Schwingung eine Änderung des Dipolmoments erfahren, ansonsten findet keine Reaktion mit der elektromagnetischen Strahlung statt.

Wird nun die IR Strahlung absorbiert, können Atome im Molekül in verschiedene Richtungen schwingen.

Um dies zu erklären, wird im Allgemeinen auf klassische Mechanik zurückgegriffen. Es werden die Atome als Kugeln und die Bindungen als eine elastische Feder dargestellt.<sup>38,13</sup>



**Abbildung 20: Schwingungen der Atome bzw. Kugeln durch Absorption von IR-Strahlen**<sup>13</sup>



In Abbildung 21 wird als Beispiel für verschiedene Schwingungen, die von einem Molekül ausgeführt werden können, Wasser dargestellt.

In der ersten Abbildung ist eine symmetrische, in der zweiten eine asymmetrische Valenzschwingung zu erkennen. Die dritte Abbildung zeigt die bei Wasser mögliche Deformationsschwingung.

**Abbildung 21: Schwingungsmöglichkeiten von Wasser**<sup>13</sup>

Um die Energie einer Schwingung zu berechnen, kann das Modell eines harmonischen Oszillators genutzt werden. Weiters kann dadurch die Schwingungsfrequenz eines 2-atomigen Moleküls ausgerechnet werden (basierend auf mechanischen Modell):

$$v_{\text{Osc}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

$v_{\text{Osc}}$ ...Schwingungsfrequenz harm. Oszillator

$k$ .....Kraftkonstante

$\mu$ .....reduzierte Masse

Aus dieser Formel kann man erkennen, je stärker die Bindung ist (äquivalent zu großer Kraftkonstante) und je kleiner die Masse des Atoms desto höher die Schwingungsfrequenz und desto höher ist die Schwingungsfrequenz.<sup>38</sup>

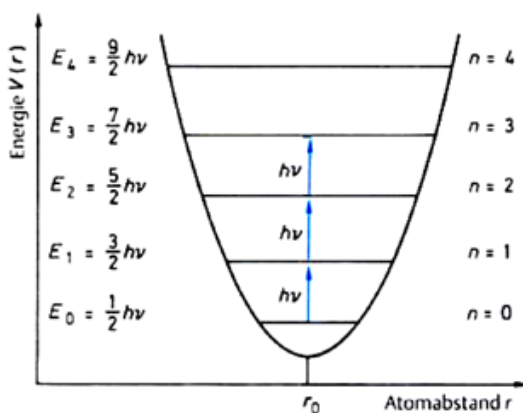


Abbildung 22: Harmonischer Oszillator – Potentialkurven<sup>39</sup>

Da das Modell des harmonischen Oszillators nicht alle Aspekte von Molekülen erklären kann, muss ein besseres Modell gefunden werden. Dieses lässt sich im anharmonischen Oszillator finden. Bei diesen kommt es zu einer Verschiebung der Potentialkurve und einer Änderung der Schwingungsniveaus.

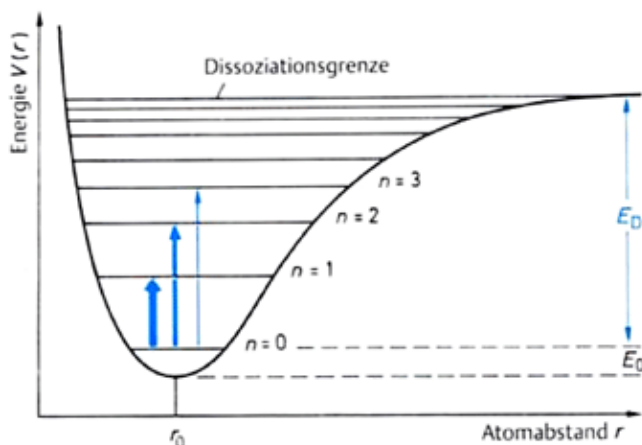


Abbildung 23: Anharmonischer Oszillator – Potentialkurven<sup>39</sup>

Kommt es zu einer Absorption eines Lichtquants steigt das Molekül vom Schwingungszustand  $n$  zu einem höheren auf z.B.:  $n+1$ . Der Energieunterschied zwischen den zwei Zuständen entspricht genau der Energie des Lichtquants.

Beim Model des anharmonischen Oszillators ändern sich die Schwingungsnivaus und werden mit steigender Quantenzahl ( $n$ ) kleiner bis die Dissoziationsgrenze erreicht ist.<sup>38</sup>

### Aufbau IR-Spektrometer

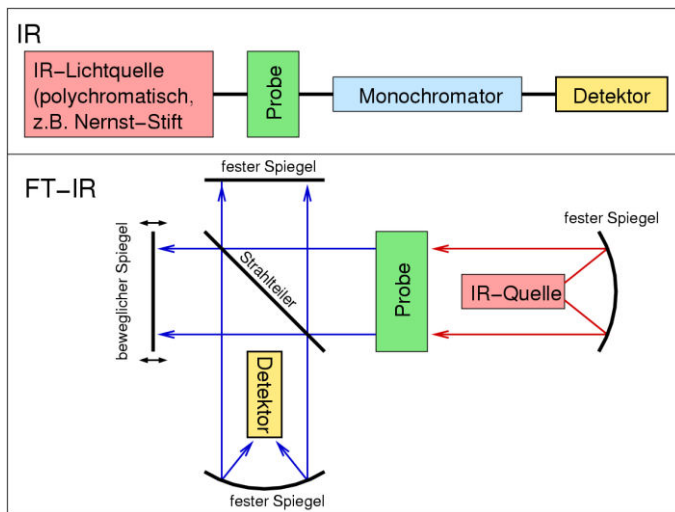


Abbildung 24: Aufbau von IR-Spektrometern<sup>40</sup>

## 5. Laborversuche

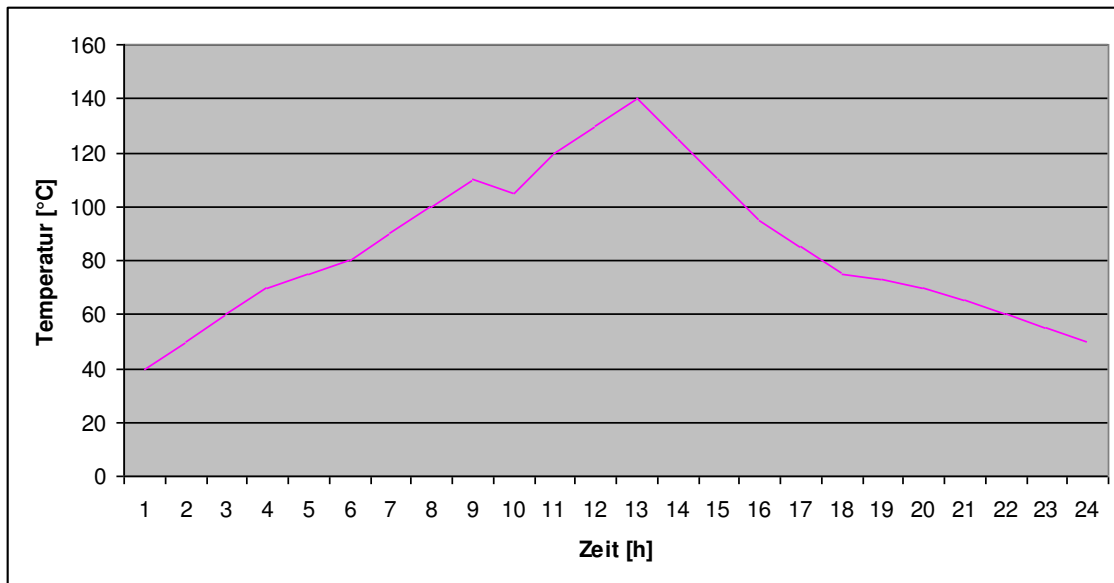
Bei den Laborversuchen werden die Materialien in den verschiedenen Ölen in 1l Glasflaschen (Duran) mit einem Temperaturzyklus bis 120°C bzw. 140°C in einem Silikonölbad für ca. 2 Wochen offen gealtert. Gleichzeitig wird für jedes Öl auch eine Referenzprobe mitlaufen gelassen. Dafür werden auf die Flaschen Verschlüsse mit Spritzen, die mit Glaswolle und Trockenmittel befüllt waren, gegeben. Die Temperatur wird mittels Multimeter kontrolliert.



Abbildung 25: Versuchsaufbau (offenes Altern – Spritzenaufsatz mit 1l Duranflaschen)



Abbildung 26: Verschluss für offenes Altern (Spritzenaufsatz mit Glaswolle und Trockenmittel)



**Abbildung 27: Temperaturzyklus der 140°C Messungen (tägliches Erhitzen auf ca. 140°C und Abkühlen auf ca. 40°C)**

Nach 2 Wochen werden die Proben abgekühlt, die Materialien gesäubert und fotografiert. Die Öle werden für weitere Messungen in Aluminiumflaschen abgefüllt und an die Firma Verbund nach St. Andrä/Kärnten geschickt.

Danach werden die Materialien in den verschiedenen Ölen optisch und durch Biege- und Zugfestigkeitsprüfungen und Shorehärtemessung verglichen.

**Tabelle 3: Auflistung der Alterungsdurchläufe**

Durchlauf	Temperatur [°C]	Materialien
Testlauf 1	140	HGW-Plättchen, Verzinkter Stahl, Hartpapier B, Araldit, Prepreg verklebt, Naturkork, Kunstkork, Blockspan F, Kupferleiter, Pressholz, Blockspan W, Blockspan P, Nomex-Lochband, Alukrepp, Kupfer-Lametta, Faserpapier, Isolierband (mit Glasfadeneinlagen), Polyesterband vom Gitterbandleiter, Blockspan D, Kupferleiter mit Epoxidlack und Papier, GFK-Leisten, Hartpapier A
Testlauf 2	120	Kessellack, Synturit, Gummisack, Verzinkter Stahl, Blockspan W, Polyamidringe, Kabelbinder, Dichtungsringe, Viton-O-Ringe, Kupferleiter blank, NBR-O-Ringdichtungen, Centellen, Treibstifte
Aluminium/Prepreg (Rohzustand)	140	Aluminium Prepreg (Rohzustand)
Cu-Leiter (mit Epoxidharz)/ Prepreg (ausgehärtet)	140	Kupferleiter (mit Epoxidharz) Prepreg (ausgehärtet)
Gummisack/Radiatorlack	120	Gummisack Radiatorlack
Für Gitterschnittsprüfung	120	Kessellack (auf Kesselstahl)/ Synturit (auf Trafoblech)

In Tabelle 3 werden die Alterungsdurchläufe mit den enthaltenen Materialien und der Temperatur, bei der gealtert wird, aufgelistet.



## 5.1 Testläufe

Es werden zwei Testläufe mit den fünf Ölen mit den verschiedenen Materialien und einer zusätzlichen Blindprobe durchgeführt. Diese Testläufe sollen darauf hinweisen, ob und wie sich die verschiedenen Öle bzw. Transformatormaterialien unter den vorhandenen Bedingungen ändern. Anschließend werden sowohl Öle als auch Materialien analysiert.

### 5.1.1 Testlauf 1

Der erste Alterungs-Testlauf wird bei 140°C über 2 Wochen durchgeführt. Dieser Testlauf beinhaltet traforelevante Materialien, die bei dieser Temperatur keine großen Veränderungen zeigen sollten. Diese Materialien werden in jedem einzelnen Öltyp gemeinsam gealtert (mit Ausnahme der Blindprobe).

Der erste Testlauf beinhaltete folgende Materialien (siehe Tabelle 3, Abbildung 28):

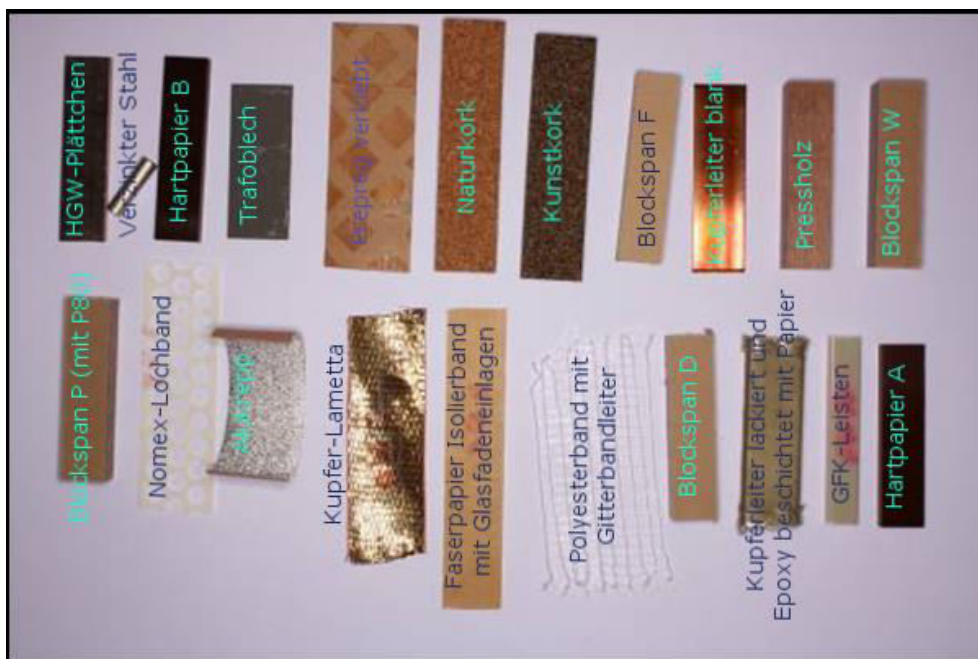


Abbildung 28: Testmaterialien, die bis zu 140°C in den Ölen gealtert werden

### 5.1.2 Testlauf 2

Der zweite Alterungs-Testlauf wird bei 120°C über 2 Wochen durchgeführt. Bei diesem Testlauf werden Materialien gealtert, die temperaturempfindlicher sind, als

die zuvor bei 140°C gealterten Proben. Diese Materialien werden in jedem einzelnen Öltyp gemeinsam gealtert (mit Ausnahme der Blindprobe).

Der zweite Testlauf beinhaltet Materialien, die in Abbildung 29 dargestellt sind.

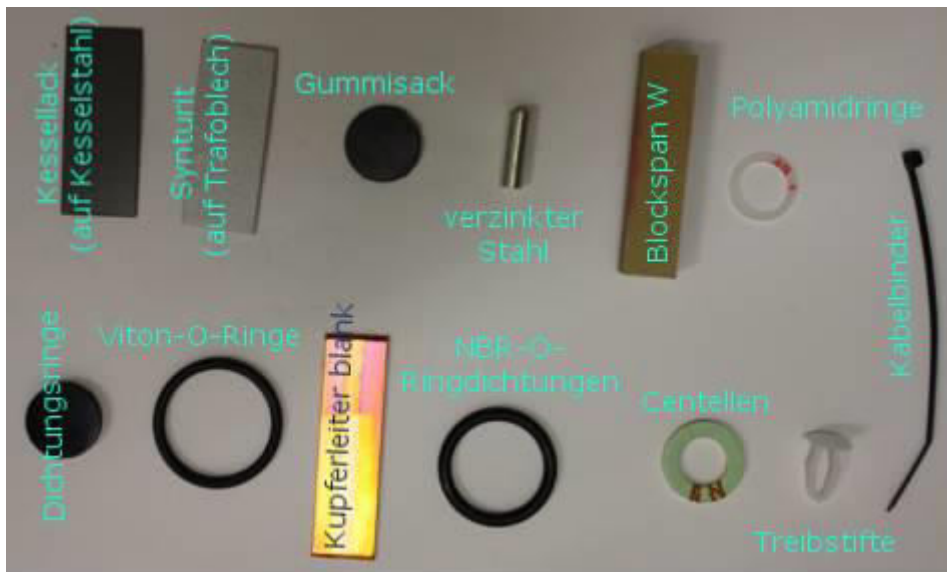


Abbildung 29: Testmaterialien, die bis zu 120°C in den Ölen gealtert werden

## 5.2 Alterungsversuche

Durch die zuvor durchgeführten Versuche kann nun ermittelt werden, welche Materialien ein weiteres Mal gealtert werden sollten. Zusätzlich werden Materialien gemessen, die im Verdacht stehen, starken Einfluss auf die Öle während der Alterung zu haben

Die Versuchsabläufe erfolgen auf dieselbe Weise wie die Testläufe mit Ausnahme, dass die jeweiligen Probenoberflächen ca. 300 cm<sup>2</sup> pro 1l Öl betragen sollten. Danach werden dieselben Öl-Messungen wie zuvor durchgeführt.

Zusätzlich werden noch zwei weitere Materialien gealtert, die anschließend mittels einer Gitterschnittprüfung auf die Haftfähigkeit ihrer Beschichtung geprüft werden.

### 5.2.1 Aluminium/Prepreg (Rohzustand)

Die fünf Öle werden mit Aluminium und separat mit Prepreg (Rohzustand) gealtert. Zusätzlich wird eine Blindprobe mitgealtert. Die Alterung geschieht bei 140°C über 2 Wochen.

### **5.2.2 Cu-Leiter (mit Epoxidharz)/Prepreg (ausgehärtet)**

Die fünf Öle werden mit Kupferleiter, die mit Epoxidharz verklebt sind, und separat mit Prepreg (ausgehärtet) gealtert. Zusätzlich wird eine Blindprobe mitgealtert. Die Alterung geschieht bei 140°C über 2 Wochen.

### **5.2.3 Gummisack/Radiatorlack (auf Kesselstahl)**

Die fünf Öle werden mit Gummisackproben und separat mit Radiatorlack, der auf Kesselstahl aufgetragen ist, gealtert. Zusätzlich wird eine Blindprobe mitgealtert. Die Alterung geschieht bei 120°C über 2 Wochen.

### **5.2.4 Kessellack (auf Kesselstahl)/ Synturit (auf Trafoblech)**

Die fünf Öle werden mit Kessellack, der auf Kesselstahl aufgetragen ist, und separat mit Synturit, der auf Trafoblech aufgetragen ist, gealtert. Zusätzlich wird eine Blindprobe mitgealtert. Die Alterung geschieht bei 120°C über 2 Wochen.

Diese Proben werden nicht weiter vermessen, sondern es wird lediglich eine Gitterschnittprüfung durchgeführt.

## 6. Auswertung

Bei der Auswertung werden die Materialien und die Öle separat behandelt.

### 6.1 Materialien

Für die Bewertung der Materialien werden ein optischer Vergleich, Zug- und Biegeprüfung und Shorehärtemessungen durchgeführt.

#### 6.1.1 Testläufe

##### 6.1.1.1 Optischer Vergleich

Bei dem optischen Vergleich der Materialien, die in Öl gealtert werden, können keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden (weitere Abbildungen im Anhang).

140°C:

Alukrepp:



Abbildung 30: Alukrepp Proben

Blockspan D:



Abbildung 31: Blockspan D Proben

Prepreg verklebt:

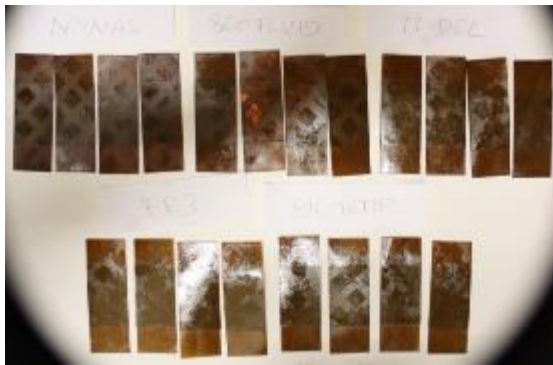


Abbildung 32: Verklebte Prepreg Proben

Pressholz:



Abbildung 33: Pressholz Proben

Verzinkter Stahl:

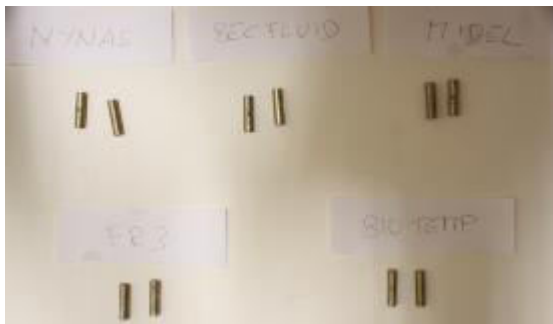


Abbildung 34: Verzinkter Stahl Proben

120°C:

Blockspan:



Abbildung 35: Blockspan Proben

Centellen:



Abbildung 36: Centellen Proben

Kupferleiter blank:

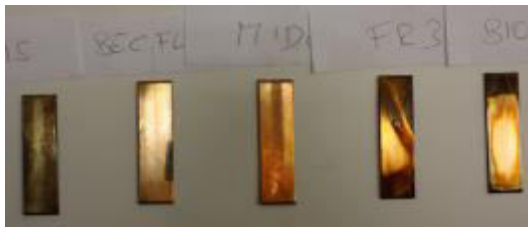


Abbildung 37: Kupferleiter blank Proben

Gummisack:



Abbildung 38: Gummisack Proben

### 6.1.1.2 Zugprüfung

Es wird ein Vergleich zwischen den in den verschiedenen Ölen gealterten Proben und ungealterten/neuen Proben erstellt. Bei vielen gealterten Proben kann kein signifikanter Unterschied zwischen in Öl gealterten Proben und nicht gealterten Proben erkannt werden (weitere Ergebnisse im Anhang)

Die Ausnahmen sind die Vergleiche der Alukrepp, NBR und der Prepreg Probe. Hier kommt es zu starken Abweichungen zwischen den Messungen der ungealterten und der in Öl gealterten Proben

### Alukrepp:

Bei den Alukrepp-Proben ist zu erkennen, dass die gealterten Materialien bei wesentlich geringerer Kraftereinwirkung zerstört werden, bei ca. 10-30% des Originalwertes. Weiters ist zu sehen, dass die natürlichen Ester-Materialproben höhere Kraftbeanspruchung zulassen, als es bei den restlichen Proben der Fall ist.

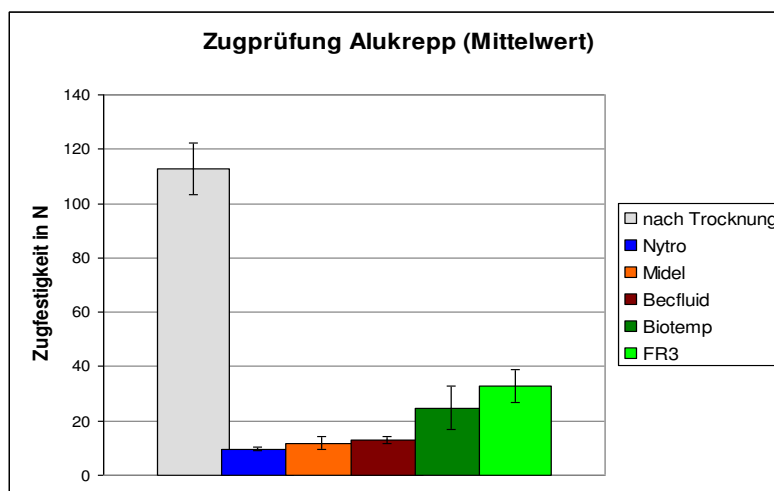


Abbildung 39: Zugprüfung Alukrepp in N (Mittelwert)

### O-Ringdichtungen, NBR:

Bei den NBR Proben kann man sehen, dass die synthetischen Ester einen eindeutigen negativeren Einfluss auf die Zugfestigkeitswerte haben, als dies bei den natürlichen Estern oder Mineralöl der Fall ist. Die Zugfestigkeit der Mineralölprobe ist zwar etwas niedriger als die für neue Proben, jedoch in etwa doppelt so hoch wie es bei den synthetischen Estern der Fall ist.

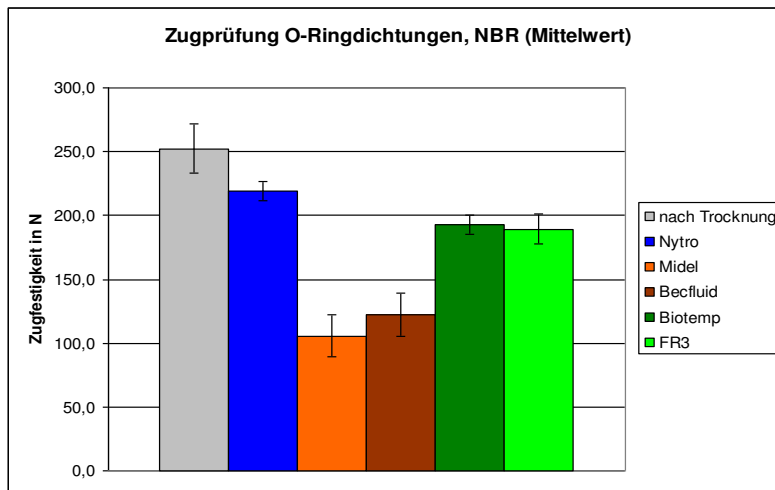


Abbildung 40: Zugprüfung NBR in N (Mittelwert)

### Prepreg:

Bei Prepreg sind die Neuprobenwerte um ca. 1/3 bis 1/5 höher als dies bei den gealterten Proben der Fall ist. Bei den gealterten Proben schneiden die in natürlichen Estern gealterten Proben am besten ab.

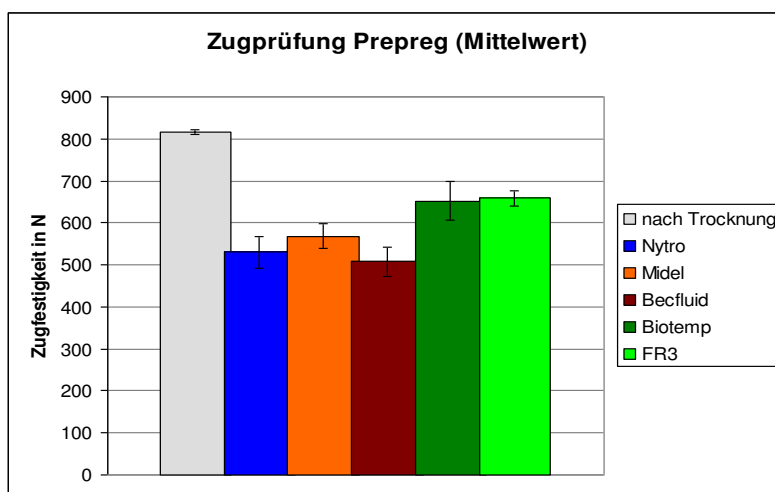


Abbildung 41: Zugprüfung Prepreg in N (Mittelwert)

### 6.1.1.3 Biegeversuche

Bei den Biegeversuchen sind generell keine starken Abweichungen zwischen den ungealterten und den in Öl gealterten Proben zu erkennen (weitere Ergebnisse im Anhang).

#### Blockspan D:

Am Beispiel für Blockspan D zeigt sich nur eine geringe Veränderung von etwa 5-10% in Unterschied zwischen neuen und gealterten Proben. Am schlechtesten schneidet das in Nytro gealterte Material ab.

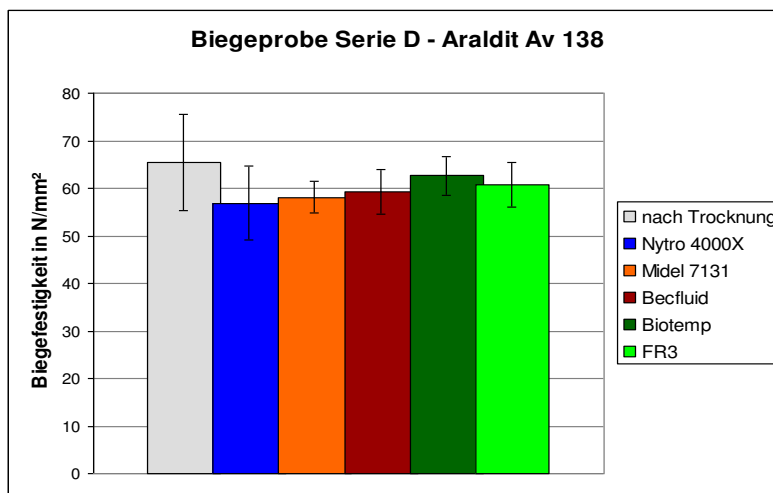


Abbildung 42: Biegeprüfung in N/mm (Mittelwert)

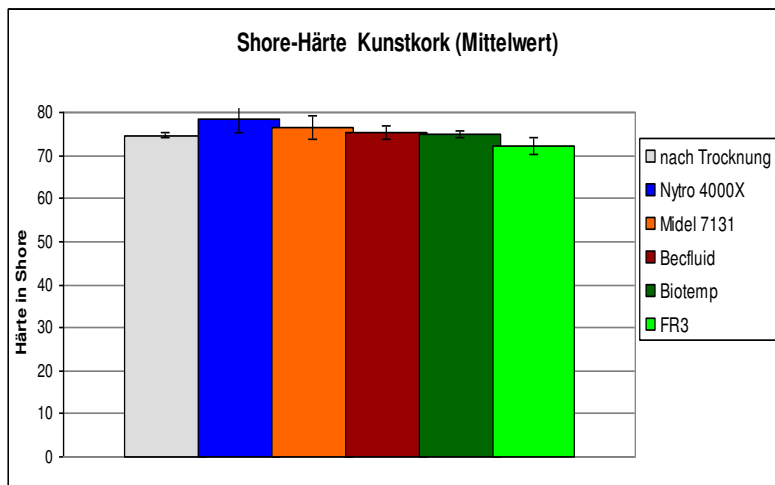
### 6.1.1.4 Shorehärte

Auch bei der Shorehärte Messungen gibt es keine großen Abweichungen zwischen den ungealterten und den in Öl gealterten Proben (weitere Ergebnisse im Anhang).

Bei den Proben für die Shorehärtemessung bei Kunstkork sind kaum Abweichungen zwischen den neuen und den gealterten Materialien zu erkennen. Es kommt zu keiner weiteren Versprödung der Materialien durch die Alterung.

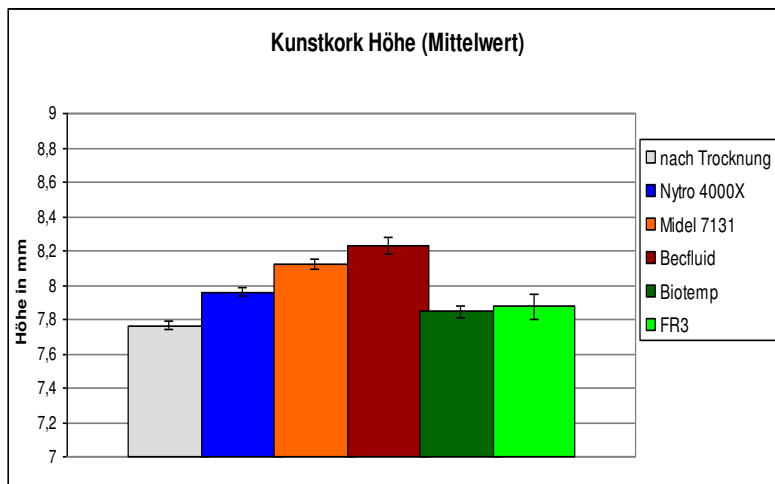


## Kunstkork:



**Abbildung 43: Shorehärte Kunstkork (Mittelwert)**

Jedoch sieht man bei der Höhenmessung, besonders bei den synthetischen Estern, eine Steigerung der Werte. Man kann daraus schließen, dass es zu einer Quellung des Materials durch die Alterung kommt.



**Abbildung 44: Höhemessung Kunstkork (Mittelwert)**

## 6.1.2 Alterungsversuche

### 6.1.2.1 Aluminium & Prepreg (Rohzustand)



Abbildung 45: Aluminium/Prepreg (Rohzustand) unbehandelt



Abbildung 46: Aluminium 140°C



Abbildung 47: Prepreg (Rohzustand) 140°C

Es ist keine deutliche Veränderung bei den Materialien durch die Alterung sichtbar. Auch zwischen den einzelnen Ölen und deren Materialien ist wenig Unterschied zu erkennen. Ein geringer Unterschied ist bei Prepreg zu erkennen. Hier scheint es so als wäre die Struktur bei Nytro 4000x nach der Alterung besser erhalten (Epoxidharzecken), als bei den anderen Ölen und es hat den Anschein, dass Biotemp das Papier etwas unflexibler gemacht hat.

### 6.1.2.2 Cu-Leiter (mit Epoxidharz) & Prepreg (ausgehärtet)



Abbildung 48: Cu mit Epoxid/Prepreg (ausgehärtet) unbehandelt



Abbildung 49: Cu mit Epoxidharz



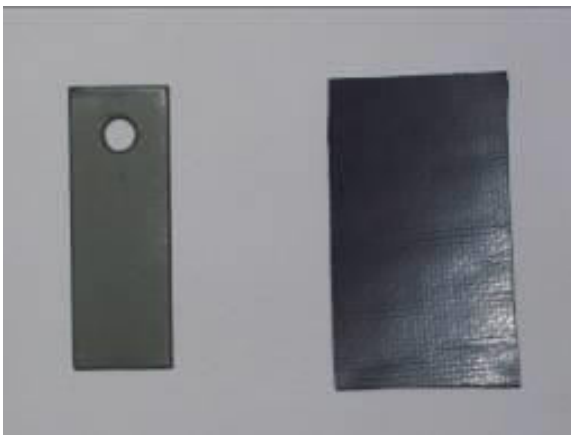
Abbildung 50: Prepreg (ausgehärtet) Nytro/Becfluid/FR3



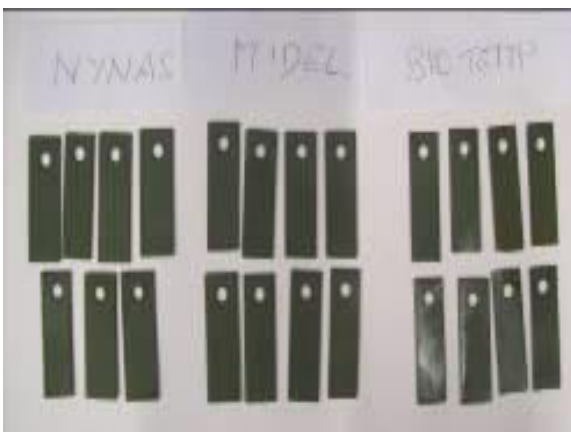
**Abbildung 51: Prepreg (ausgehärtet) Midel/Biotemp**

Sowohl bei Kupfer mit Epoxidharz als auch bei Prepreg (ausgehärtet) sind im Allgemeinen keine Unterschiede zwischen den in verschiedenen Ölen gealterten Proben zu erkennen, außer dass bei Nytro 4000x die Struktur des Prepregs besser erhalten bleibt.

### **6.1.2.3 Gummisack & Radiatorlack (auf Kesselstahl)**



**Abbildung 52: Radiatorlack/Gummisack unbehandelt**



**Abbildung 53: Radiatorlack Nynas/Midel/Biotemp 120°C**



Abbildung 54: Gummisack vorne Midel/FR3/Biotemp



Abbildung 55: Gummisack hinten Midel/FR3/Biotemp

Bei den Radiatorlack und den Gummisack Proben ist zwischen den einzelnen Proben der verschiedenen Öle kein Unterschied zu erkennen. Auch hat es den Anschein, dass es zu keiner Veränderung zum ungealterten Material gibt.

#### 6.1.2.4 Gitterschnitte

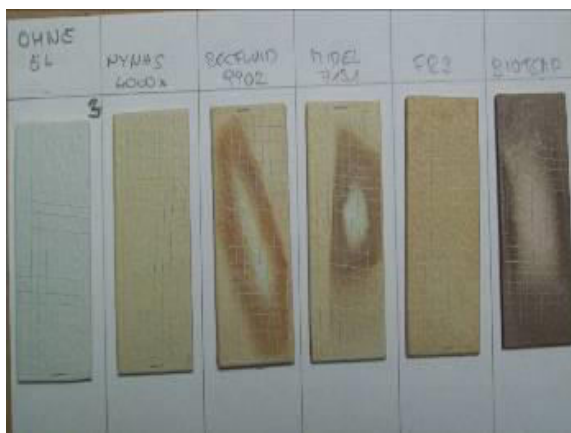
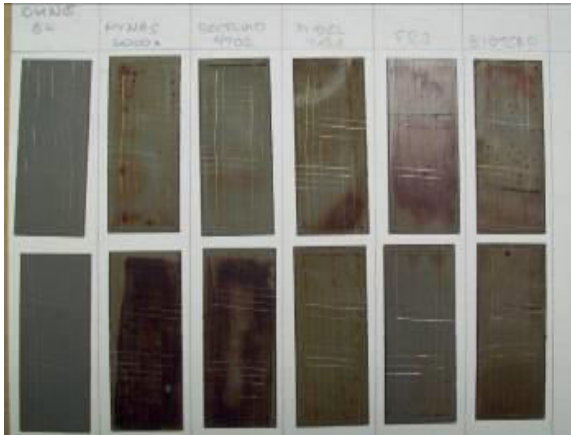


Abbildung 56: Gitterschnitt Kessellack (auf Kesselstahl)



**Abbildung 57: Gitterschnitt Synturit (auf Trafoblech)**

Eine Gitterschnittprüfung wird nur bei zwei verschiedenen Materialien durchgeführt: Kessellack, der auf Kesselstahl aufgetragen ist, und Synturit, das auf Trafoblech aufgetragen ist. Es handelt sich hier um beschichtete Materialien, die auch separat gealtert werden.

Die Beschichtungen bei den zwei geprüften Materialien weisen einen guten Halt auf. Bei den zwei Gitterschnitten, die durchgeführt wurden, kann kein oder nur sehr wenig Abplatzen der Beschichtung der Gitterlinien erkannt werden. Die beiden Gitterschnitte sind bei dem Kennwert 0 – 1 einzustufen (Vergleich Kapitel 4.1.4).

## 6.2 Öle/Ester

In Tabelle 4 sind die Werte für die neuen, ungealterten Öle zu entnehmen. Die Öle wurden vor der Messung direkt einem Kanister entnommen und nicht weiter aufbereitet. Diese Proben wurden von der Verbund Umwelttechnik vermessen.

**Tabelle 4: Werte für neue, ungealterte Öle (VERBUND)**

	Dichte (17°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [ppm]	Neutral.- zahl [mg KOH/g]	Durchschlag- spannung [kV <sub>eff.</sub> ]	Tan delta [10 <sup>-3</sup> ]	relative Permittivitäts- zahl (90°C)	Spezif. Widerstand (90°C) [GΩm]	Grenzflächen- spannung (17°C) [mN/m]
Nytro	0,882	6	0,093	85	0,95	2,08	613,5	38,6
Midel7131	0,965	829	0,483	50	50,3	2,97	3,4	26,7
Becfluid	0,975	112	0,284	81	20,74	3,01	10	30,2
Biotemp	0,916	147	0,280	88	21,49	2,83	8,2	22,0
FR3	0,919	178	0,728	82	37,34	2,86	5,6	16,4

Es sollte beachtet werden, dass der Wassergehalt für Midel 7131 in Neuzustand relativ hoch ist und daraus folgend die Durchschlagspannung und der Widerstand relativ niedrig und der Verlustfaktor relativ hoch sind.

### 6.2.1 Testläufe

Für die Testläufe werden folgende Messungen durchgeführt:

#### Feuchtemessung:

Bei der Feuchtemessung werden die relative (Wasseraktivität,  $a_w$ ) und die absolute (Karl-Fischer) Feuchtigkeit gemessen. Bei der Karl Fischer Messung werden jedes Mal 3 Messungen gemacht und davon der Mittelwert genommen. Die Messergebnisse sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Bei einem Wert von  $a_w = 0$  ist das Öl wasserfrei, während  $a_w = 1$  ein mit Wasser gesättigtes Öl darstellt.<sup>28</sup>

**Tabelle 5: Relative und absolute Feuchte der Testläufe bei 140°C**

	Relative Feuchte [%]		Absolute Feuchte (ppm)	
	Gealtert (Blindprobe)	Gealtert (mit Probe)	Gealtert (Blindprobe)	Gealtert (mit Probe)
Nytro 4000x	59,2 ( $a_w = 0,592$ )	29,8 ( $a_w = 0,298$ )	35,0	17,0
Becfluid	5,6 ( $a_w = 0,056$ )	11,4 ( $a_w = 0,114$ )	94,5	239,9
Midel 7131	7,1 ( $a_w = 0,071$ )	11,3 ( $a_w = 0,113$ )	106,0	186,8
FR3	15,7 ( $a_w = 0,157$ )	14,6 ( $a_w = 0,146$ )	133,9	129,9
Biotemp	17,6 ( $a_w = 0,176$ )	16,1 ( $a_w = 0,161$ )	165,7	156,8

**Tabelle 6: Relative und absolute Feuchte der Testläufe bei 120°C**

	Relative Feuchte [%]		Absolute Feuchte (ppm)	
	Gealtert (Blindprobe)	Gealtert (mit Probe)	Gealtert (Blindprobe)	Gealtert (mit Probe)
Nytro 4000x	34,2 ( $a_w = 0,342$ )	35,0 ( $a_w = 0,350$ )	8,9	10,8
Becfluid	15,8 ( $a_w = 0,158$ )	21,9 ( $a_w = 0,219$ )	210,0	324,2
Midel 7131	10,3 ( $a_w = 0,103$ )	14,3 ( $a_w = 0,143$ )	99,4	157,2
FR3	23,8 ( $a_w = 0,238$ )	24,1 ( $a_w = 0,241$ )	181,2	159,2
Biotemp	16,1 ( $a_w = 0,161$ )	25,2 ( $a_w = 0,252$ )	107,0	157,8

Aus Tabelle 5 und Tabelle 6 ist zu erkennen, dass die Messung für relative und absolute Feuchte gut übereinstimmen, wobei die Umrechnung von Wasseraktivität in

relative Feuchte eine etwas ungenaue Methode darstellt (Vergleich siehe Kapitel 4.2.1.3). Die einzige Ausnahme bildet hier die bei 120°C gealterte FR3 Probe. Möglicherweise liegt hier ein Messfehler vor.

Bei den weiteren Daten ist gut zu erkennen, dass bei den 120°C Proben, die mit Probe gealterten Öle einen höheren Feuchtwert (Ausnahme FR3) aufweisen als es bei den gealterten Blindproben der Fall ist. Daraus kann man schließen, dass die Materialien, oder das darin ungebundene Wasser (nicht zuvor getrocknet), mit dem Öl wechselwirken. Welche Materialien davon genau betroffen sind, kann man durch die Menge an verschiedenen Materialien nicht sagen.

Aus den Daten der Messung bei 140°C kann man erkennen, dass es bei der gealterten Blindprobe bei Nytro 4000x zu einer Halbierung der Feuchtwerte kommt. Ebenfall ist ein leichter Rückgang bei FR3 und Biotemp zu erkennen.

### Farbvergleich (Farbskala)

Der Farbvergleich wird mit Hilfe einer Farbtafel nach DIN 51 578 durchgeführt und in folgenden Tabellen mit Zahlen der Farbskala angegeben.

**Tabelle 7: Farbvergleich der ungealterten Öle**

	Nytro	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
Ungealtert	0 - 1	0 - 1	0 - 1	1	3



**Abbildung 58: Farbvergleich Ungealterte Ölproben**

**Tabelle 8: Farbvergleich der Öl bei 140°C mit(ohne Proben**

	Nytro	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
gealtert	3	1 - 2	1 - 2	2	4
gealtert mit Proben	4	3	3	3 - 4	6





Abbildung 59: Nynas ohne/mit Proben 140°C



Abbildung 60: Becfluid ohne/mit Proben 140°C



Abbildung 61: Midel ohne/mit Proben 140°C



Abbildung 62: FR3 ohne/mit Proben 140°C



Abbildung 63: Biotemp ohne/mit Proben 140°C

Bei den 140°C gealterten Ölen ist eine deutliche Farbänderung zu erkennen. Die Dunkelfärbung der Proben ist bei den ohne Material gealterten Ölen wesentlich geringer als bei den Ölen, die mit Materialien gealtert wurden. Daraus kann man schließen, dass ein Teil oder alle Materialien starken Einfluss auf die Öle haben. Es

ist ebenfalls ein Unterschied zwischen den bei 140°C oder 120°C gealterten Proben zu erkennen. Die Blindproben bei der 120°C Alterung sind weniger stark verfärbt, als dies bei 140°C der Fall ist. Man kann folglich sagen, dass es bei höheren Temperaturen auch zu einer stärkeren Beeinflussung des Öls kommt. Bei Biotemp ist es bei der Probe mit Materialien zu einer starken Verharzung gekommen. Dies ist auch in geringem Maße bei der FR3 (mit Materialien) Probe zu erkennen. Es ist auch zu erwähnen, dass man bei den hohen Temperaturen davon ausgehen kann, dass ein Teil der enthaltenen Materialien überstrapaziert werden (z.B.: Gummi), was Auswirkungen auf die Ölproben haben kann.

**Tabelle 9: Farbvergleich gealterte Öle mit/ohne Proben 120°C**

	Nytra	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
gealtert ohne Probe	0 - 1	0 - 1	0 - 1	2	4 - 5
gealtert mit Probe	2	2 - 3	2	3	5



**Abbildung 64: Nynas ohne/mit Proben 120°C**



**Abbildung 65: Becfluid ohne/mit Proben 120°C**



**Abbildung 66: Midel ohne/mit Proben 120°C**



**Abbildung 67: FR3 ohne/mit Proben 120°C**



Abbildung 68: Biotemp ohne/mit Proben 120°C

Tabelle 10: Messergebnisse der Testläufe ohne und mit Proben (120°C und 140°C) (gemessen VERBUND)

Temperatur (°C)	Dichte (20°C) [g/cm <sup>3</sup> ]		NZ [mg KOH/g]		tan δ [* 10 <sup>-3</sup> ]		Permittivitäts- zahl (ε <sub>r</sub> )		Spez. Widerstand ρ [90°C] [GΩm]		Grenzflächenspannung (20°C) [mN/m]	
	120	140	120	140	120	140	120	140	120	140	120	140
<b>Nynas (ohne)</b>	0,867	0,882	0,008	0,102	1,08	9,14	2,09	2,11	495,5	29	39	22,5
<b>Nynas (mit)</b>	0,868	0,87	0,02	0,177	3,65	18,48	2,09	2,11	100,3	15	23,1	10,8
<b>FR3 (ohne)</b>	0,919	0,919	0,615	0,695	35,76	51,1	2,86	2,88	4	3,5	24	22,1
<b>FR3 (mit)</b>	0,922	0,919	0,207	0,596	247,6	310,9	2,89	2,87	0,6	0,5	19,5	9,9
<b>Biotemp (ohne)</b>	0,914	0,914	0,266	0,312	55,1	60,6	2,83	2,86	3,4	3	23,9	22,5
<b>Biotemp (mit)</b>	0,914	0,913	0,164	0,434	171,4	180,9	2,83	2,85	0,9	0,9	22,1	15,2
<b>Midel7131 (ohne)</b>	0,965	0,964	0,093	0,191	46,8	56,3	2,97	3	3	3,7	30,9	26,8
<b>Midel7131 (mit)</b>	0,962	0,965	0,139	0,471	480,5	317,2	2,97	3	0,4	0,6	26,3	9,7
<b>Becfluid (ohne)</b>	0,971	0,959	0,934	0,936	54	108,1	3,06	3,02	2,7	1,7	32,2	25,5
<b>Becfluid (mit)</b>	0,971	0,966	0,282	0,986	898,5	717	3,03	3,05	0,2	0,2	26,9	8,1

Die Messergebnisse aus Tabelle 10 werden in folgenden Seiten miteinander und mit den Werten für die vermessenen Neuöle (Tabelle 4) verglichen und besprochen.

Dichte:

Es kommt kaum zu Veränderungen der Dichte unabhängig davon, ob mit oder ohne oder bei 120°C oder 140°C der Alterungsprozess stattfindet.

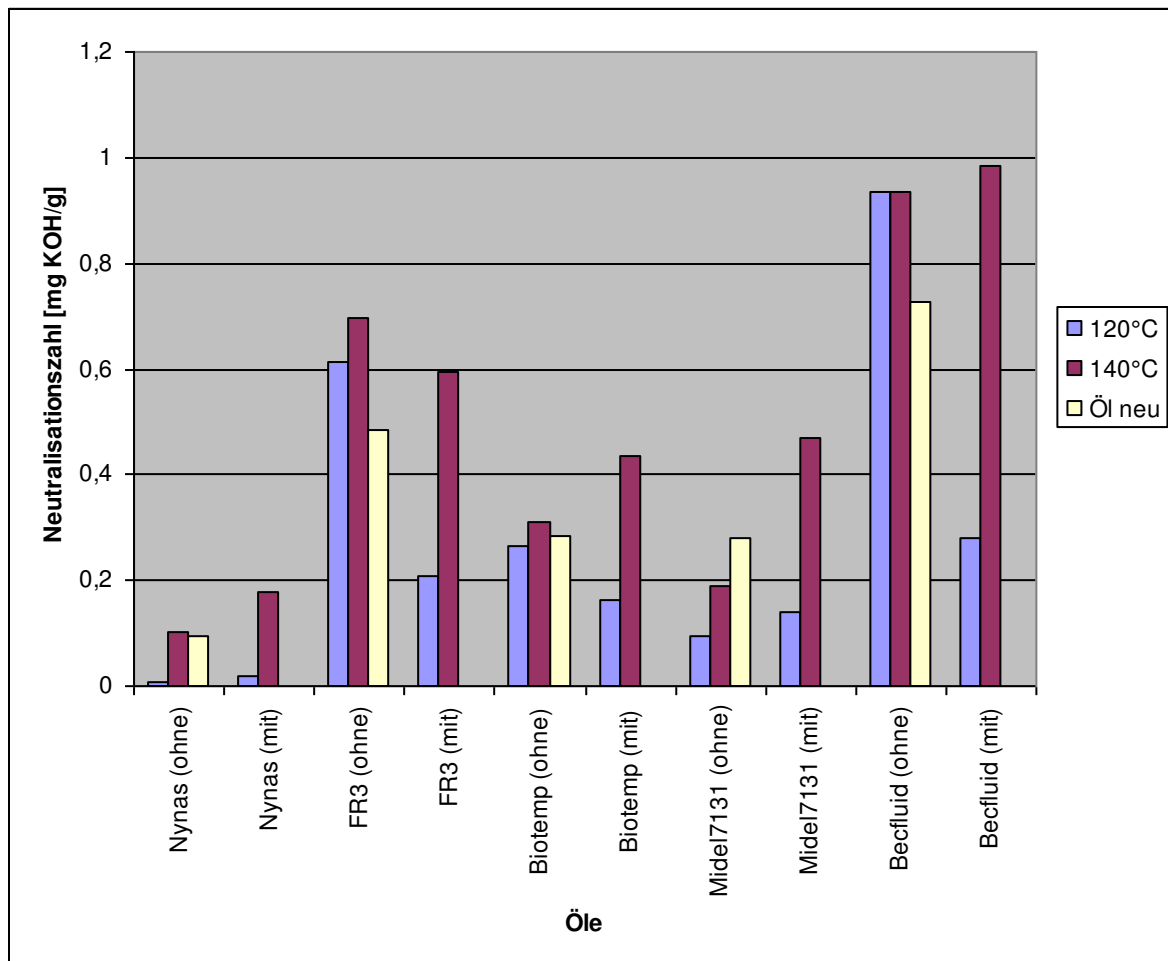
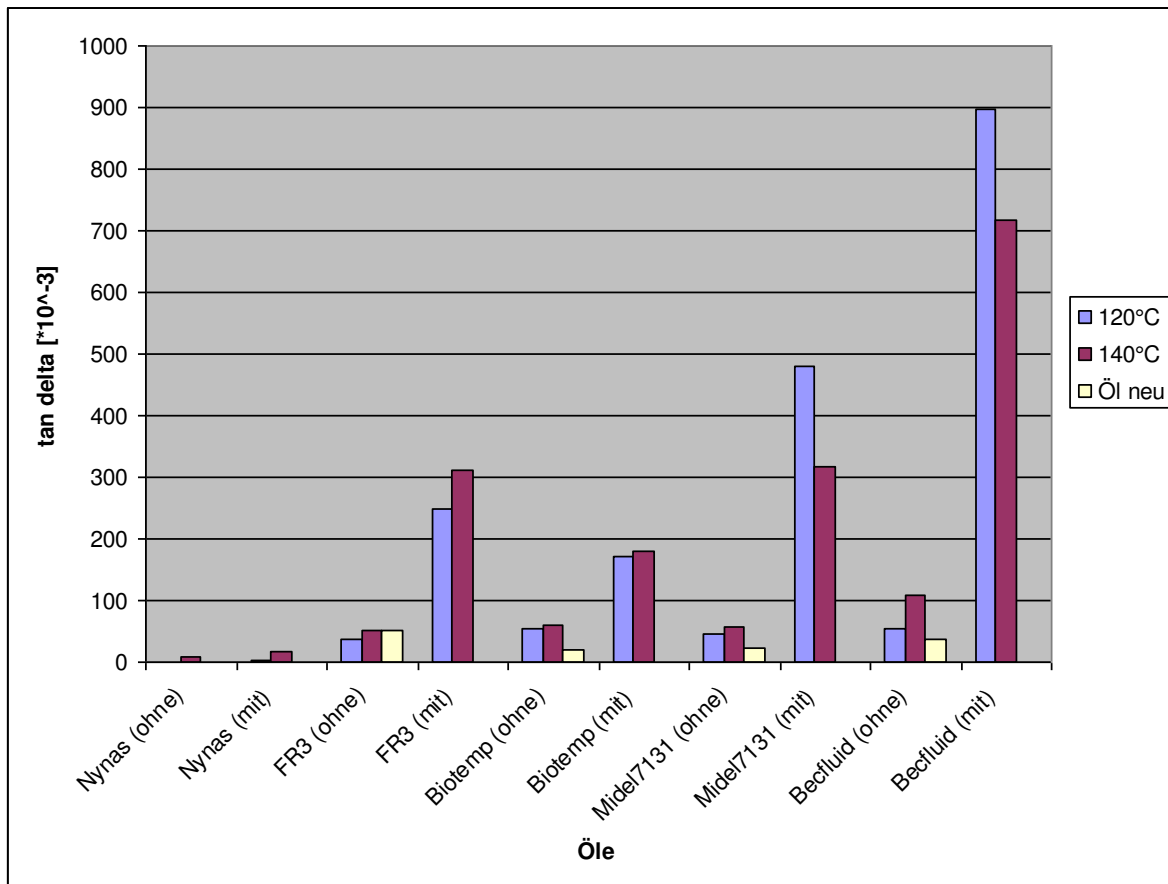
Neutralisationszahl:

Abbildung 69: Neutralisationszahl Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Proben

Es ist klar zu erkennen, dass die Neutralisationszahl bei 120°C wesentlich geringer ist als bei 140°C. Am deutlichsten ist dies bei Nynas zu erkennen. Hier steigt die Neutralisationszahl auf das ca. Zehnfache an, trotzdem besitzt es die niedrigsten Werte aller gemessenen Öle.

Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ):

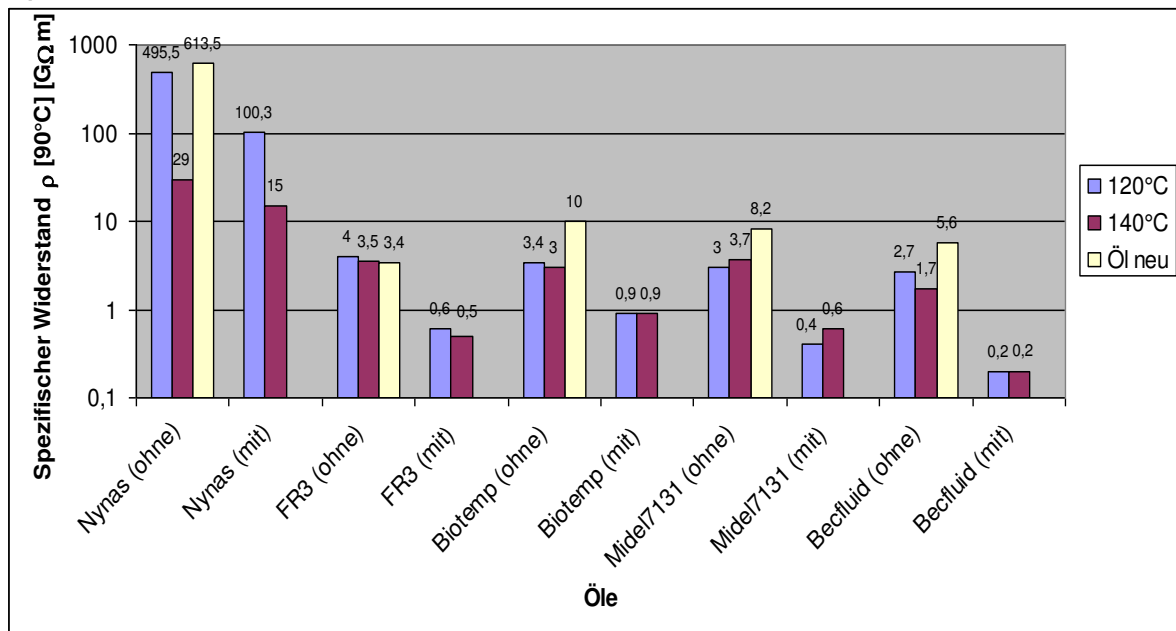
**Abbildung 70: Verlustfaktor Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Proben**

Mit Ausnahme der Messung von Nytro zeigen die Verlustfaktormessungen, dass hier die Proben mehr Einfluss auf das Öl haben als es die unterschiedliche Temperatur hat. Die Proben tragen also in diesem Fall mehr zu Alterung des Öls bei als es die Temperatur tut, aber für die meisten Proben zeigt sich auch hier, dass die höhere Temperaturen zu einer Erhöhung des Verlustfaktors führt.

Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ ):

Die Permittivitätszahl zeigt kaum eine Änderung unabhängig davon, ob es nun eine Temperaturänderung von 120° auf 140°C gibt oder Proben zugesetzt werden oder nicht. Aus diesen Messungen sind keine weiteren Kenntnisse zu gewinnen.

### Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ):



**Abbildung 71: Spezifischer Widerstand Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Proben**

Bei den meisten Ölen ist der spezifische Widerstand bei der Blindprobe (ohne) um ein Vielfaches höher als dies bei den Ölen mit Materialeinlage der Fall ist.

Bei Nytro sieht man, dass sowohl Temperatur als auch Probeninhalt starke Auswirkungen auf den spezifischen Widerstand haben. Die Blindprobe bei 120°C weist einen ca. 20mal so hohen Wert auf als die Blindprobe bei 140°C und einen über 30mal höheren Wert als die Probe mit Material bei 140°C. Der Neuölwert der meisten Öle beträgt das Doppelte bis das Dreifache der gealterten Öle ohne Materialzugaben (ohne).

### Grenzflächenspannung:

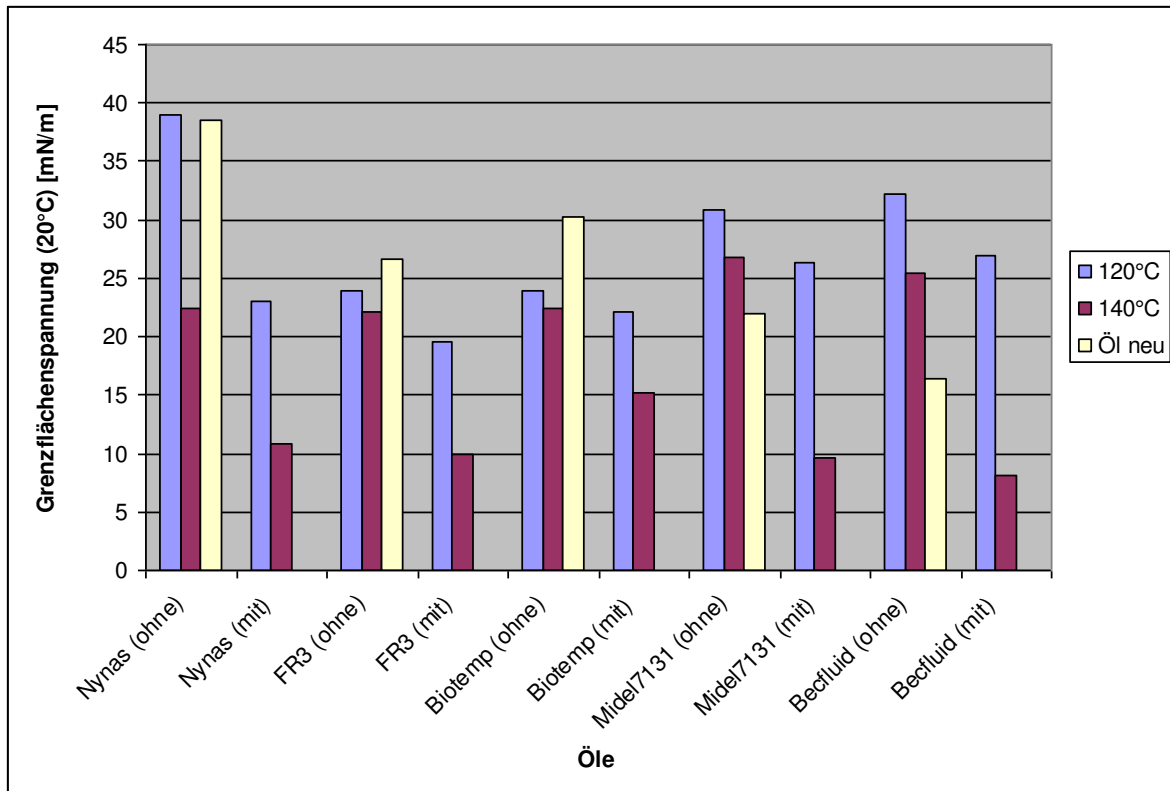


Abbildung 72: Grenzflächenspannung Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Proben

Bei der Grenzflächenspannung ist deutlich zu erkennen, dass die Temperatur einen wesentlich höheren Einfluss hat, als der Materialinhalt. Die höchsten Werte liegen jeweils bei den 120°C Blindproben bzw. den Neuölen und die niedrigsten bei den 140°C Proben mit Materialzugabe.

Da die Neutralisationszahl und die Grenzflächenspannung in etwa indirekt proportional zueinander sind, sollten die Werte übereinstimmen.<sup>41</sup>

Dies trifft auf die meisten Ölmessungen auch zu, mit Ausnahme der Neuölprobe von Nytro und Becfluid.

### 6.2.2 Alterungsversuche

Bei den weiteren Alterungsversuchen werden mehrere Materialien vermessen. Diese werden hier nun in eigenen Flaschen jeweils separat in den Ölen gealtert.

### 6.2.2.1 Aluminium & Prepreg (Rohzustand)

Bei diesen Ölmessungen werden folgende Messungen durchgeführt:

#### Farbvergleich (Farbskala):

**Tabelle 11: Farbvergleich der Öle Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe**

	Nytro	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
Blindprobe	4	2 - 3	2	3	6
Prepreg	5	3	3	3	7
Aluminium	4	2 - 3	2	4	7



**Abbildung 73: Nytro Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C**



**Abbildung 74: Becfluid Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C**





Abbildung 75: Midel Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C



Abbildung 76: FR3 Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C



Abbildung 77: Biotemp Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C

Im Allgemeinen sind die gealterten Blindproben gleich oder etwas heller als die Öle, die mit Proben gealtert wurden. Bei den Biotemp Proben kommt es bei der Ölprobe mit Prepreg zu leichten Verharzungen. Die dunkelsten Proben sind am häufigsten bei den Ölen mit Prepreg zu finden mit Ausnahme der FR3 Proben. Es ist davon

auszugehen, dass es zu einer Reaktion mit dem Wasser im Papier bzw. mit dem darauf befindlichen Epoxidharz kommt. Dadurch kommt es auch zu einer Beeinflussung des Aussehens des Öls.

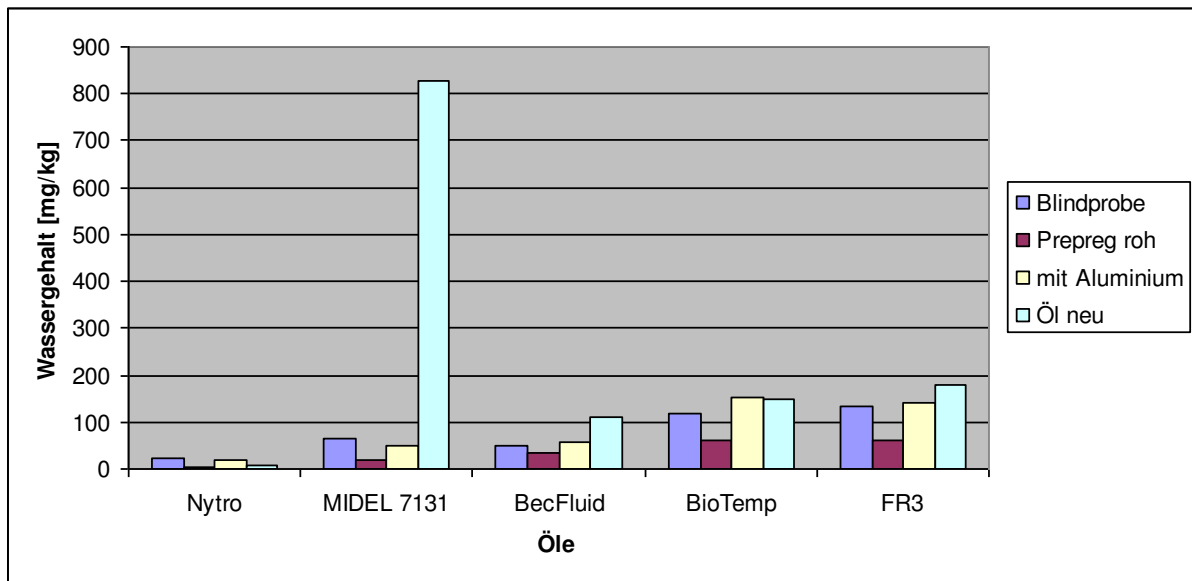
**Tabelle 12: Messwerte Prepreg (Rohzustand = roh)/Aluminium/Blindprobe (gemessen VERBUND)**

		Dichte (20°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	Wasser- gehalt [mg/kg]	Neutral- zahl [mg KOH/g]	Durch- schlag- spannung [kV <sub>eff.</sub> ]	Tan delta [10 <sup>-3</sup> ]	relative Permittivität s- zahl (90°C)	Spezif. Widerstand (90°C) [GΩm]	Grenzflächen- spannung (20°C) [mN/m]
Nytro	Blind probe	0,868	22,0	0,062	62	6,13	2,11	45,4	23,3
Nytro	Prepreg roh	0,868	3,2	0,063	> 90	3,23	2,10	104,0	22,2
Nytro	mit alu	0,868	17,5	0,077	55	5,20	2,11	65,9	22,4
MIDEL 7131	Blind probe	0,967	65,5	0,125	83	19,95	2,99	9,5	28,3
MIDEL 7131	Prepreg roh	0,967	19,3	0,070	71	33,29	2,97	6,0	28,1
MIDEL 7131	mit alu	0,967	49,9	0,121	62	21,33	2,97	9,1	28,1
BecFluid	Blind probe	0,973	49,4	0,442	82	47,35	3,03	3,4	28,3
BecFluid	Prepreg roh	0,973	33,8	0,240	72	58,85	3,01	2,6	25,8
BecFluid	mit alu	0,973	58,4	0,439	38	52,85	3,02	3,1	25,9
BioTemp	Blind probe	0,915	119,7	0,278	90	100,10	2,82	2,0	21,9
BioTemp	Prepreg roh	0,915	59,8	0,239	89	86,70	2,84	2,3	20,0
BioTemp	mit alu	0,915	152,3	0,235	86	138,10	2,82	1,5	22,1
FR3	Blind probe	0,921	132,6	0,693	> 90	35,20	2,88	4,6	21,3
FR3	Prepreg roh	0,921	61,8	0,468	> 90	40,19	2,87	3,8	19,9
FR3	mit alu	0,921	141,0	0,602	57	49,10	2,88	3,4	21,0

Die Messergebnisse aus Tabelle 12 werden in folgenden Seiten miteinander und den Werten für die vermessenen Neuöle (Tabelle 4) verglichen und besprochen.

### Dichte:

Es kommt kaum zu Veränderungen der Dichte unabhängig davon, ob mit oder ohne oder bei 120°C oder 140°C der Alterungsprozess stattfindet.

Wassergehalt:

**Abbildung 78: Wassergehalt Vergleich Prepreg (Rohzustand)/Aluminium/Blindprobe**

Bei den Werten für den Wassergehalt in den verschiedenen Ölen ist auffällig, dass der Wassergehalt in den Prepreg-Ölen deutlich niedriger ist als bei den anderen zwei Proben. Bei der Nytro-Probe ist der Wassergehalt ca. 1/7 so hoch wie bei der Blindprobe und beim Öl mit dem geringsten Unterschied (Becfluid) liegt der Wert auch noch ca. 1/3 niedriger.

Man kann davon ausgehen, dass es zu einer Reaktion der OH-Gruppen des Prepregs kommt, die zusammen mit den vorhandenen Fettsäuren einen Ester bilden. Da es auch zu einer Hydrolyse des Esters kommt, werden Carbonsäuren erzeugt, die wiederum mit den OH-Gruppen des Prepregs reagieren. Diese Reaktionen führen dazu, dass der Wassergehalt und die Neutralisationszahl bei Estern sinken.

Offenbar hat bei der Nytro Prepreg-Probe das Papier das Wasser aufgenommen, wodurch es ebenfalls zu einem Absinken des Wassergehalts kommt.

Bei dem Vergleich zwischen der Aluminium Probe, der Blindprobe und den Neuölen gibt es keinen erkennbaren Trend. Die Ausnahme bildet hier Midel 7131, da das Neuöl anscheinend in einem feuchten Kanister gelagert wurde, und daher stark erhöhte Werte ausweist.

## Neutralisationszahl

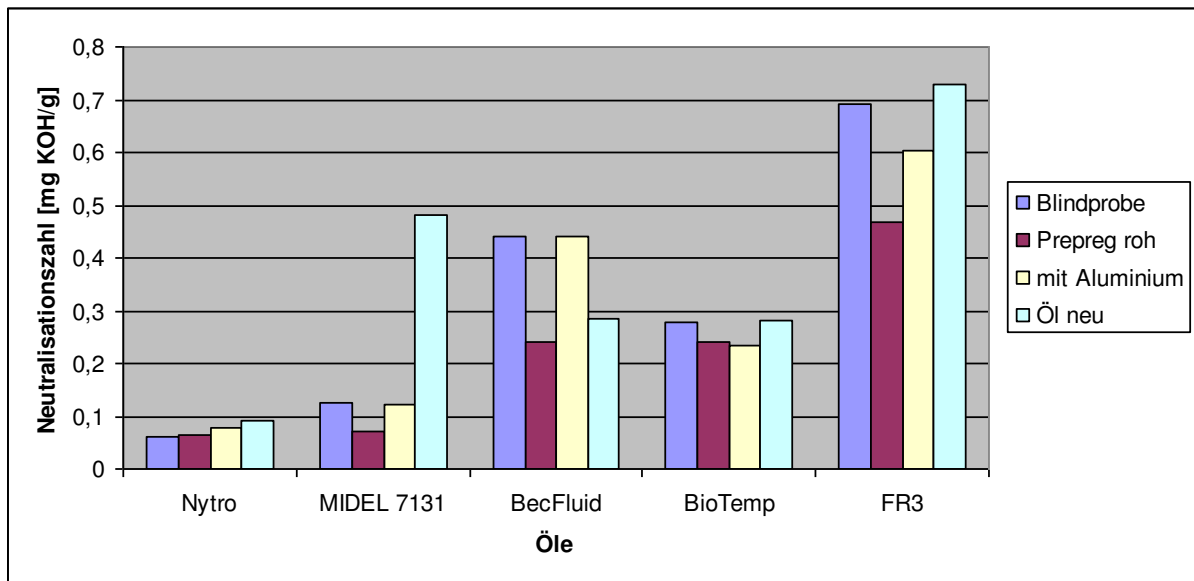


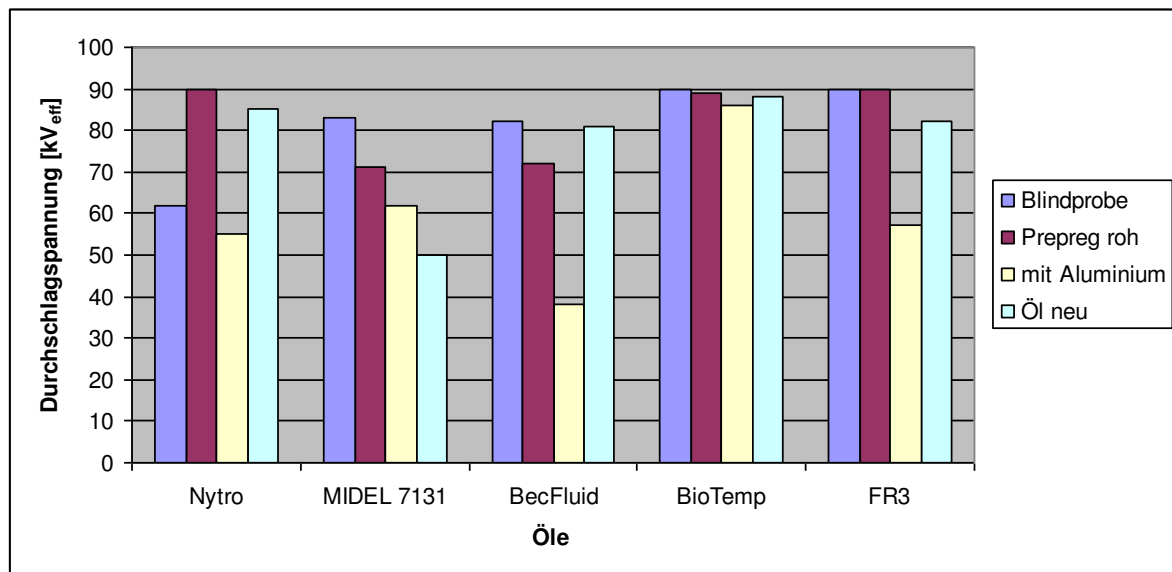
Abbildung 79: Neutralisationszahl Vergleich Prepreg (Rohzustand)/Aluminium/Blindprobe

Mit Ausnahme von Biotemp und Nytro (bei diesen zwei ca. gleich) ist die Neutralisationszahl bei den Prepreg-Ölen durchgehend niedriger als bei den anderen Proben.

Wie zuvor schon erwähnt, kommt es zu einer Reaktion der Hydroxyl-Gruppen des Prepregs mit den entstandenen Fettsäuren, was in weiterer Folge zu einem Sinken der Neutralisationszahl bei Estern führt.

Die Aluminium-Ölproben weisen in etwa die gleichen Neutralisationszahlen auf wie die Blindproben und die Neuölproben. Die Ausnahme bildet hier wieder Midel 7131, das anscheinend durch falsche Lagerung erhöhte Werte aufweist.

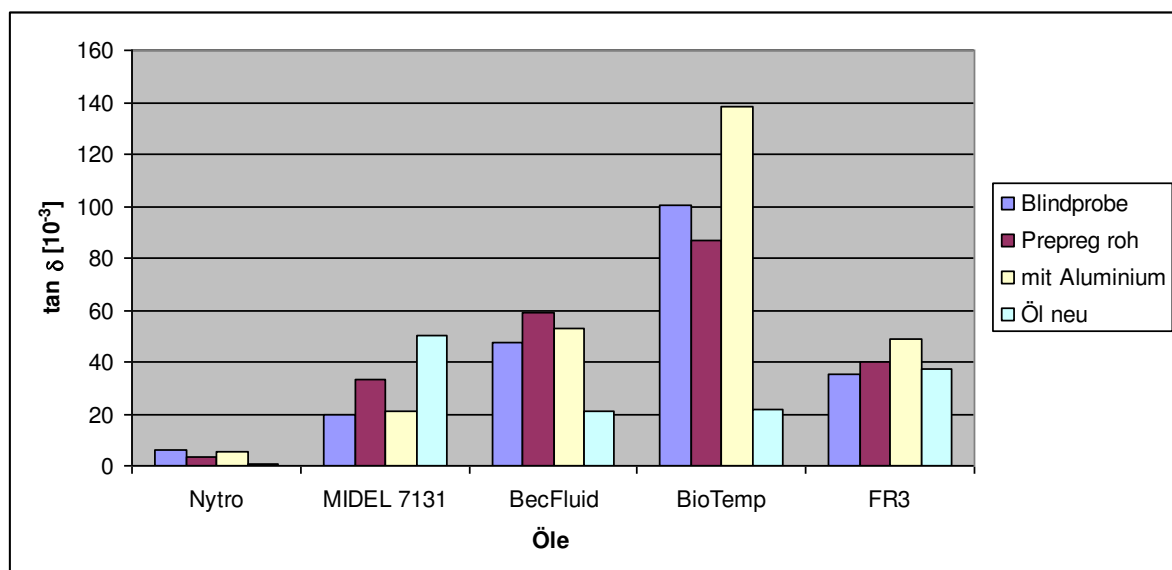
### Durchschlagspannung:



**Abbildung 80: Durchschlagspannung Vergleich Prepreg (Rohzustand)/Aluminium/Blindprobe**

Bei den Ergebnissen zur Durchschlagspannung ist zu erkennen, dass die Aluminium-Öle die geringsten Werte aufweisen (Ausnahme Midel7131 Neuöl, vermutlich aufgrund des hohen Wasserwertes). Möglicherweise kommt es zu minimalen Ablösen der Aluminiumoberfläche oder es sind an der Oberfläche Aluspäne vorhanden, die sich ablösen und zu einer erniedrigten Durchschlagspannung führen. Interessant ist hier, der sehr hohe Wert der Nytro Prepreg-Probe. Dies ist durch den sehr niedrigen Wassergehalt zu erklären.

### Verlustfaktor (tan δ):



**Abbildung 81: Verlustfaktor Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe**

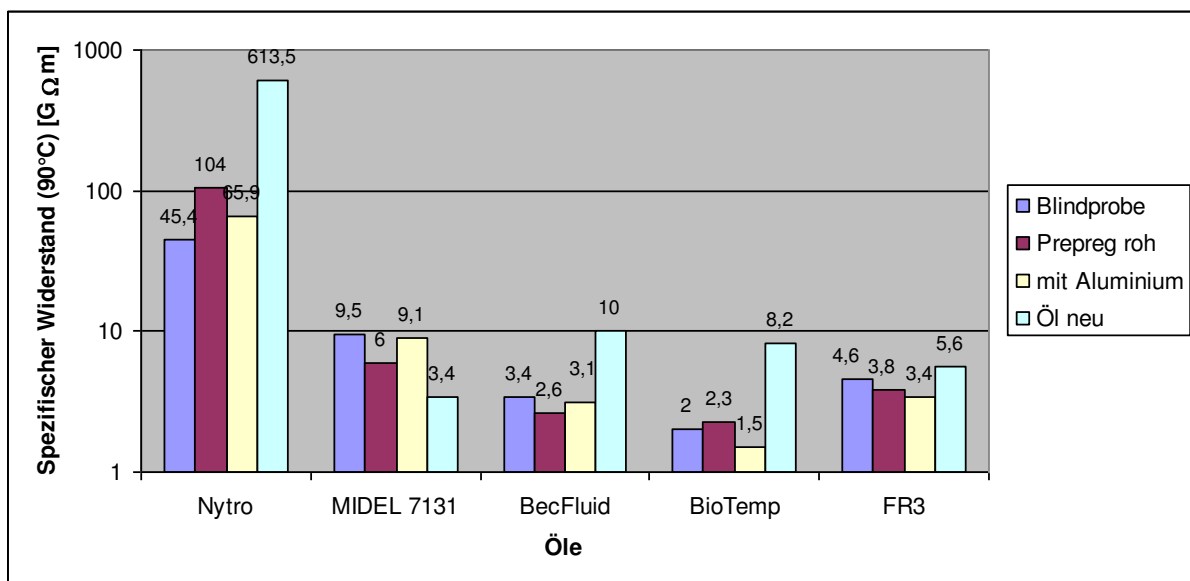
Aus den Verlustfaktormessungen ist kein allgemeiner Trend herauszulesen.

Auffällig ist hier aber, dass bei den synthetischen Estern die Prepreg- Öle die höchsten Werte aufweisen (Ausnahme Midel 7131 Neuöl), obwohl diese sowohl bei der Neutralisationsmessung, als auch beim Wassergehalt die niedrigsten Werte besitzen. Eine Erklärung hierfür wäre, dass es zu einer Reaktion mit dem Papier bzw. den Epoxidharz und Estern kommt (inklusive FR3).

### Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ ):

Die Permittivitätszahl weist keine besonderen Auffälligkeiten bei den einzelnen Proben auf. Die Werte sind für die verschiedenen Öle relativ gleichmäßig. Es sind keine Kenntnisse über die Alterung der verschiedenen Ölproben aus diesen Werten zu erhalten.

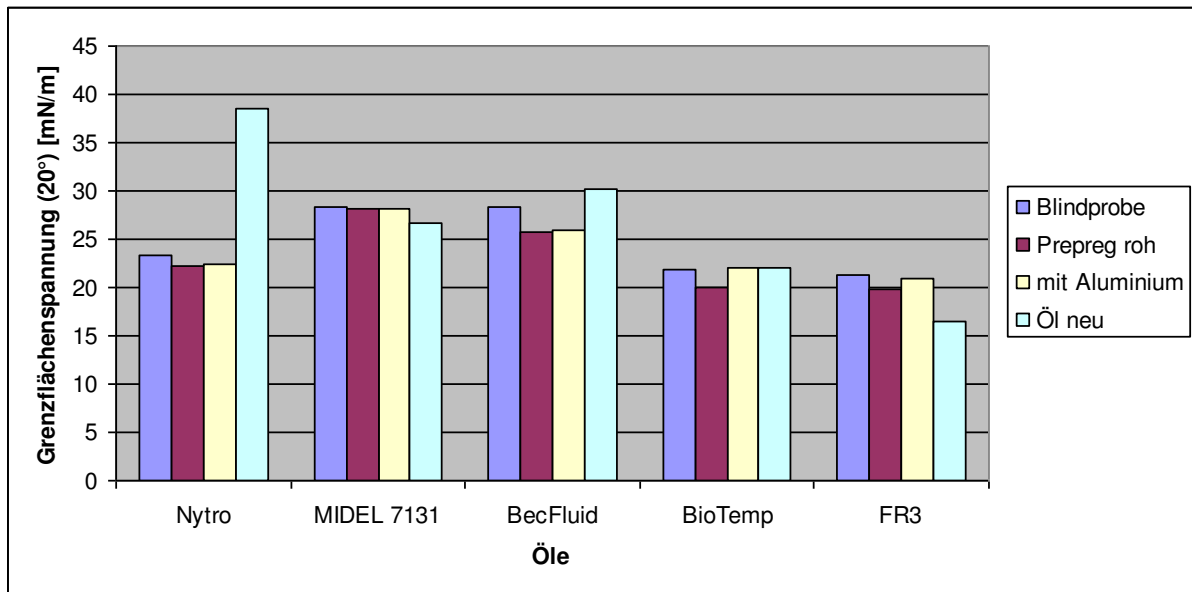
### Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ):



**Abbildung 82: Spezifischer Widerstand Vergleich Prepreg (Rohzustand)/Aluminium/Blindprobe**

Die synthetischen Ester zeigen für die Prepreg-Öle und die natürlichen Ester für die Aluminium-Öle die niedrigsten Werte. Da der spezifische Widerstand mit den  $\tan \delta$  Werten einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang bilden, sind die Ergebnisse zu erwarten. Durch die spezifischen Widerstandswerte der verschiedenen Öle kann ausgesagt werden, dass die Werte der Neuöle für alle Öle (Ausnahme Midel 7131) die höchsten Werte aufweisen.

### Grenzflächenspannung:



**Abbildung 83: Grenzflächenspannung Vergleich Prepreg (Rohzustand)/Aluminium/Blindprobe**

Die Werte der Grenzflächenspannung weichen innerhalb der einzelnen Ölsorten kaum voneinander ab. Auch sind die Werte der synthetischen Ester und die der natürlichen Estern untereinander sehr ähnlich.

Da die Neutralisationszahl und die Grenzflächenspannung in etwa indirekt proportional zueinander sind, sollten die Werte übereinstimmen.<sup>36</sup>

Dies trifft allerdings nicht zu. Bei den Neutralisationszahlen gab es starke Unterschiede zwischen den synthetischen und natürlichen Estern zueinander.

#### **6.2.2.2 Cu mit Epoxidharz/Prepreg ausgehärtet**

Bei diesen Ölmessungen werden folgende Messungen durchgeführt:

### Farbvergleich (Farbskala):

**Tabelle 13: Farbvergleich der Öle mit Cu mit Epoxidharz/Prepreg (ausgehärtet)**

	Nytro	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
Blindprobe	6	3	2	3	6-7
Kupfer	6	3	2	4	8
Prepreg	5	2-3	2	3	7



**Abbildung 84: Ölproben Cu mit Epoxidharz/Prepreg (ausgehärtet) – Reihenfolge: Blindprobe-Cu mit Epoxidharz-Prepreg (ausgehärtet)**

Die Farben der Proben sind innerhalb des gleichen Öls sehr ähnlich. Am ehesten ist eine leicht dunklere Farbe bei den Ölen mit Kupfereinlage zu erkennen. Durch den Farbvergleich sind kaum Erkenntnisse zu den verschiedenen Alterungsverhalten zu gewinnen.

**Tabelle 14: Meßwerte Cu mit Epoxid/Prepreg (ausgehärtet)/Blindprobe (gemessen VERBUND)**

		Dichte (20°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	Wasser- gehalt [mg/kg]	Neutral- zahl [mg KOH/g]	Durch- schlag- spannung [kV <sub>eff.</sub> ]	Tan delta [10 <sup>-3</sup> ]	relative Permittivitäts- zahl (90°C)	Spezif. Widerstand (90°C) [GΩm]	Grenzflächen- spannung (20°C) [mN/m]
Nyro	Blindprobe	0,867		0,066		6,55	2,11	43,0	24,2
Nyro	prepreg ausgehärtet	0,868		0,059		3,75	2,11	100,9	22,1
Nyro	mit cu	0,868		0,073		5,48	2,11	62,4	23,2
MIDEL 7131	Blindprobe	0,968		0,118		24,03	2,99	8,2	28,7
MIDEL 7131	prepreg ausgehärtet	0,968		0,085		30,53	2,99	6,3	27,8
MIDEL 7131	mit cu	0,968		0,111		39,24	3,00	4,5	28,7
BecFluid	Blindprobe	0,973	50,9	0,352	89	46,00	3,02	3,3	27,3
BecFluid	prepreg ausgehärtet	0,973	34,7	0,241	76	43,04	3,02	3,4	25,6
BecFluid	mit cu	0,973	55,5	0,393	90	75,60	3,05	2,1	27,2
BioTemp	Blindprobe	0,915		0,284		125,40	2,86	1,7	21,2
BioTemp	prepreg ausgehärtet	0,915		0,227		101,70	2,86	2,1	21,4
BioTemp	mit cu	0,915		0,224		310,90	2,86	0,7	21,8
FR3	Blindprobe	0,920		0,563		34,65	2,89	4,8	20,9
FR3	prepreg ausgehärtet	0,920		0,458		30,52	2,87	5,2	20,1
FR3	mit cu	0,920		0,564		89,10	2,87	1,7	20,9

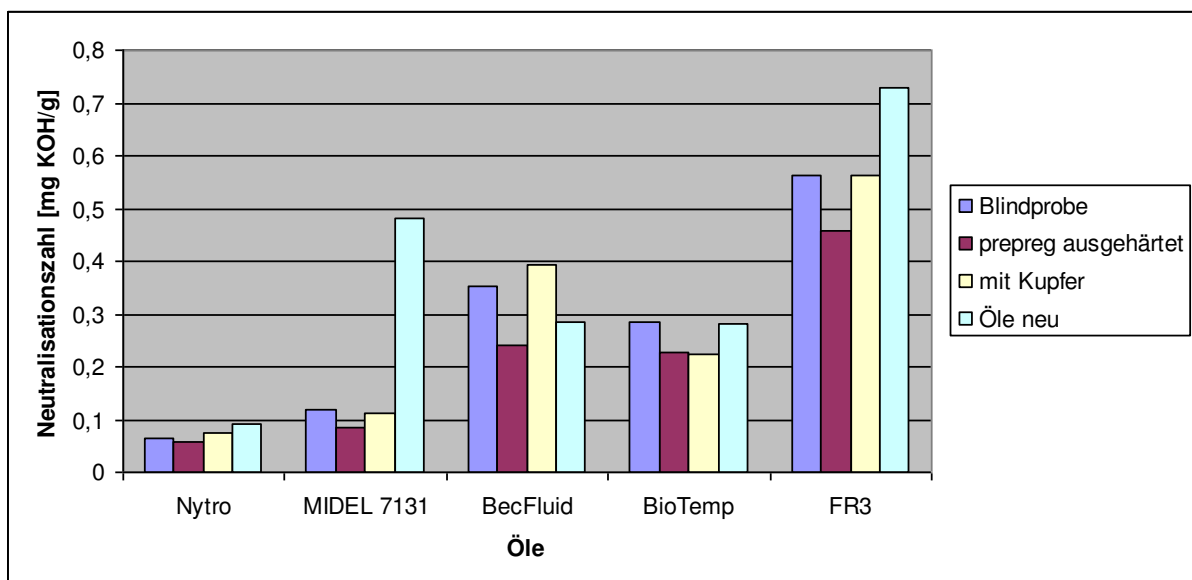


Die Messergebnisse aus Tabelle 14 werden in folgenden Seiten miteinander und mit den Werten für die vermessenen Neuöle (Tabelle 4) verglichen und besprochen. Da sowohl für die Wassergehalt- als auch für die Durchschlagspannung-Messungen kaum vergleichbare Öldaten vorhanden sind, werden diese Werte nicht weiter behandelt.

### Dichte:

Die Dichte der einzelnen Öle weicht auch mit verschiedenen Materialeinlagen so gut wie nicht voneinander ab.

### Neutralisationszahl:

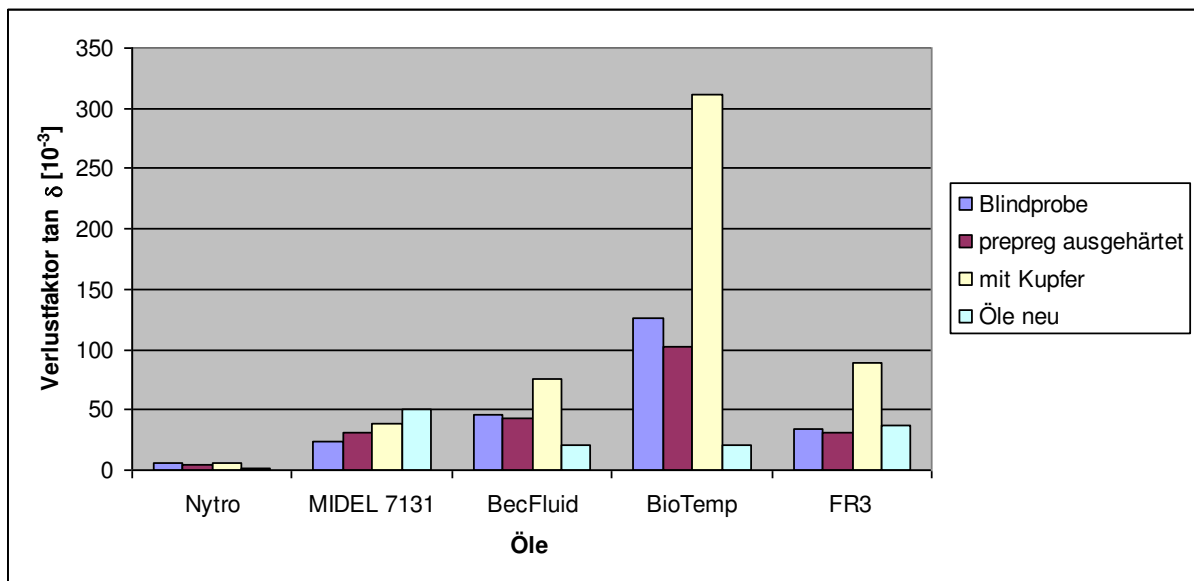


**Abbildung 85: Neutralisationszahl Vergleich Cu mit Epoxid/Prepeg (ausgehärtet)/Blindprobe**

Die Neutralisationszahl ist mit Ausnahme von Biotemp (ca. gleiche Werte) bei den Prepeg-Ölen niedriger als bei den anderen Proben.

Wie zuvor schon bei den Prepeg (Rohzustand)-Proben erwähnt, kommt es zu einer Reaktion der Hydroxyl-Gruppen des Prepregs mit den entstandenen Fettsäuren, was in weiterer Folge zu einem Sinken der Neutralisationszahl von Estern führt.

### Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ):



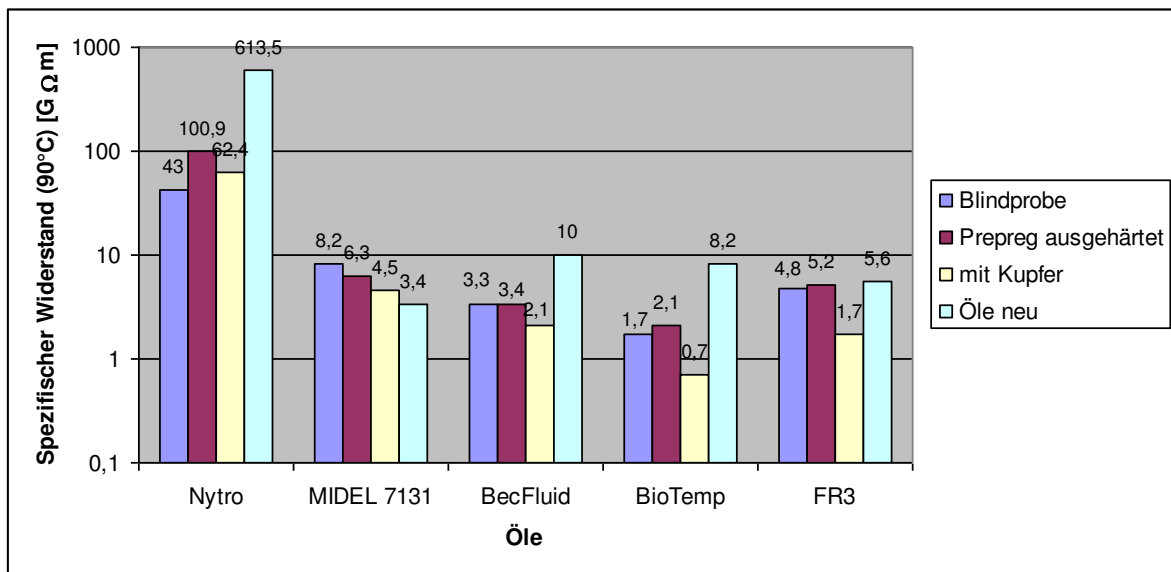
**Abbildung 86: Verlustfaktor Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg (ausgehärtet)/Blindprobe**

Die Kupferproben zeigen (Ausnahme Midel 7131 Neuöl) den höchsten Verlustfaktorwert. Dies lässt sich damit erklären, dass es zu einer schnelleren Alterung kommt, da Kupfer als Katalysator wirkt, und dadurch mehr polare Verbindungen entstehen. Auffällig sind auch die allgemeinen hohen Werte von Biotemp im Gegensatz zum Neuölwert.

### Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ ):

Die einzelnen Permittivitätszahlen zeigen innerhalb eines Öls kaum Abweichungen voneinander. Die verschiedenen Materialien haben so gut wie keinen Einfluss auf diesen Wert.

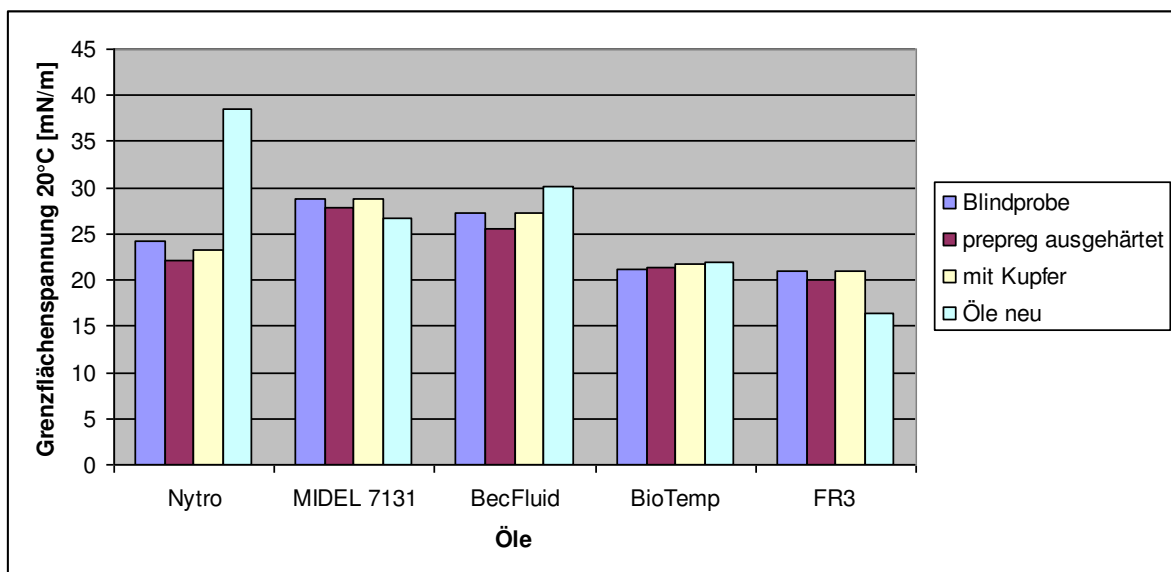
### Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ):



**Abbildung 87: Spezifischer Widerstand Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg (ausgehärtet)/Blindprobe**

Bei den spezifischen Widerstandswerten ist zu erkennen (Ausnahme Nytro), dass die Kupferproben die niedrigsten Werte aufweisen. Daraus kann man schließen, dass es zu einer schnelleren Alterung kommt und dadurch mehr polare Verbindungen entstehen

### Grenzflächenspannung:



**Abbildung 88: Grenzflächenspannung Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg (ausgehärtet)/Blindprobe**

Die Werte der Grenzflächenspannung weichen innerhalb der einzelnen Ölsorten kaum voneinander ab. Auch sind die Werte der synthetischen Ester und die der natürlichen Ester untereinander sehr ähnlich.

Da die Neutralisationszahl und die Grenzflächenspannung indirekt proportional zueinander sind, sollten die Werte übereinstimmen. <sup>41</sup>

Dies trifft wie auch schon zuvor nicht zu. Bei den Neutralisationszahlen gab es starke Unterschiede zwischen den synthetischen und natürlichen Esterflüssigkeiten zu einander.

### 6.2.2.3 Gummisack/Radiatorlack

Da bei diesem Messdurchgang nicht mehr genug Öl der Sorten Becfluid und FR3 zur Verfügung standen, sind die Messungen dieser Öle auf die Blindprobe und die Gummisackprobe beschränkt (Becfluid Gummisackprobe nur Neutralisationszahl bestimmt).

Bei diesen Ölmessungen werden folgende Messungen durchgeführt:

### Farbvergleich (Farbskala):

**Tabelle 15: Farbvergleich der Öle mit Gummisack/Radiatorlack**

	Nytro	Becfluid	Midel	FR3	Biotemp
Blindprobe	1	1	1	2	6
Gummisack	1		1	2	6
Radiatorlack	1		1		7



**Abbildung 89: Alle Ölproben Gummisack/Radiatorlack. Reihenfolge: Blindprobe-Gummisack-Radiatorlack**

Bei diesen Proben ist durch die Alterung kaum ein Unterschied zwischen den jeweiligen Ölen erkennbar. Auch der Unterschied zu den ungealterten Proben ist farblich nicht stark ausgeprägt (Ausnahme Biotemp). Es ist zu erkennen, dass der Alterungsprozess bei 120°C optisch geringere Auswirkungen hat, als es bei 140°C der Fall ist.

**Tabelle 16: Meßwerte Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe (gemessen VERBUND)**

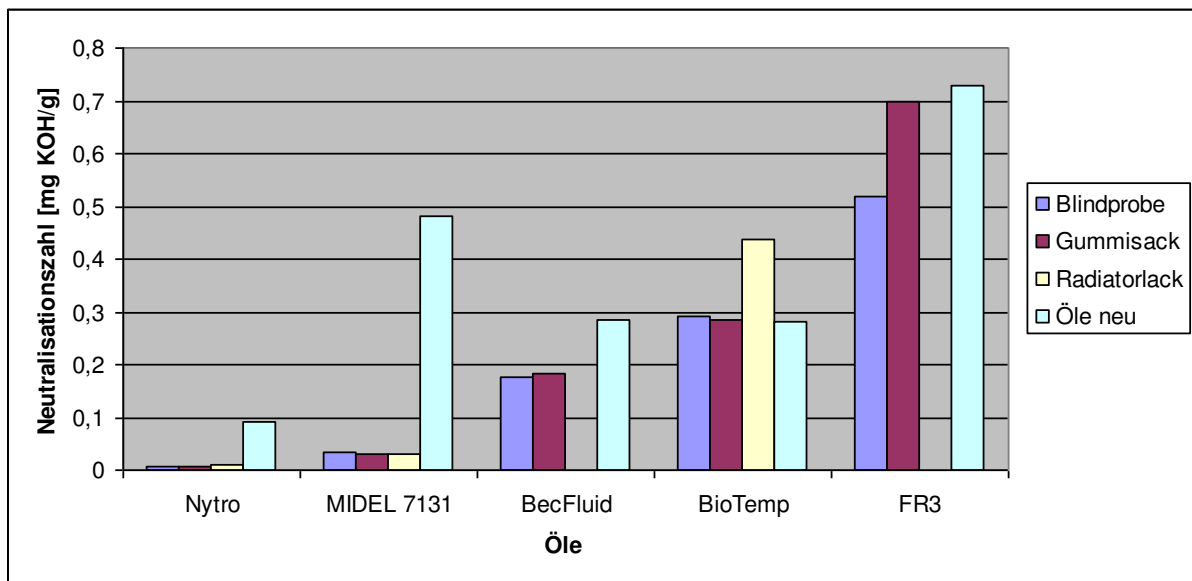
		Dichte (20°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	Wasser- gehalt [mg/kg]	Neutral.- zahl [mg KOH/g]	Durch- schlag- spannung [kV <sub>eff.</sub> ]	Tan delta [10 <sup>-3</sup> ]	relative Permittivitäts- zahl (90°C)	Spezif. Widerstand (90°C) [GΩm]	Grenzflächen- spannung (20°C) [mN/m]
Nyro	Blindprobe	0,868		0,007		0,74	2,09	335,4	33,9
Nyro	gummisack	0,868		0,006		0,67	2,09	280,7	23,1
Nyro	radiatorlack	0,868		0,009		3,37	2,09	110,6	33,8
MIDEL 7131	Blindprobe	0,967		0,033		24,03	2,99	7,8	28,8
MIDEL 7131	gummisack	0,967		0,031		35,44	3,00	4,6	27,0
MIDEL 7131	radiatorlack	0,967		0,031		34,33	2,99	5,4	28,5
BecFluid	Blindprobe	0,972		0,176		19,75	3,05	7,6	28,0
BecFluid	gummisack	-		0,184		-	-	-	-
BioTemp	Blindprobe	0,915	163,0	0,292	90	83,55	2,86	2,5	21,1
BioTemp	gummisack	0,915	156,5	0,286	90	109,60	2,83	1,7	19,6
BioTemp	radiatorlack	0,915	163,6	0,438	90	119,50	2,86	1,8	19,8
FR3	Blindprobe	0,921		0,517		27,36	2,89	5,6	18,5
FR3	gummisack	0,921		0,700		46,80	2,89	3,1	18,3

Die Messergebnisse aus Tabelle 15 werden in folgenden Seiten miteinander und mit den Werten für die vermessenen Neuöle (Tabelle 4) verglichen und besprochen. Da sowohl für die Wassergehalt- als auch für die Durchschlagspannung-Messungen kaum vergleichbare Öldaten vorhanden sind, werden diese Werte nicht weiter behandelt. Weiters sind die Daten schwierig zu interpretieren, da es durch geringe Messwerte (vor allem Radiatorlack) wenig Vergleichsmöglichkeiten gibt.

### Dichte

Die Dichtewerte der einzelnen Öle ändern sich durch die verschiedenen Materialien nicht.

### Neutralisationszahl:

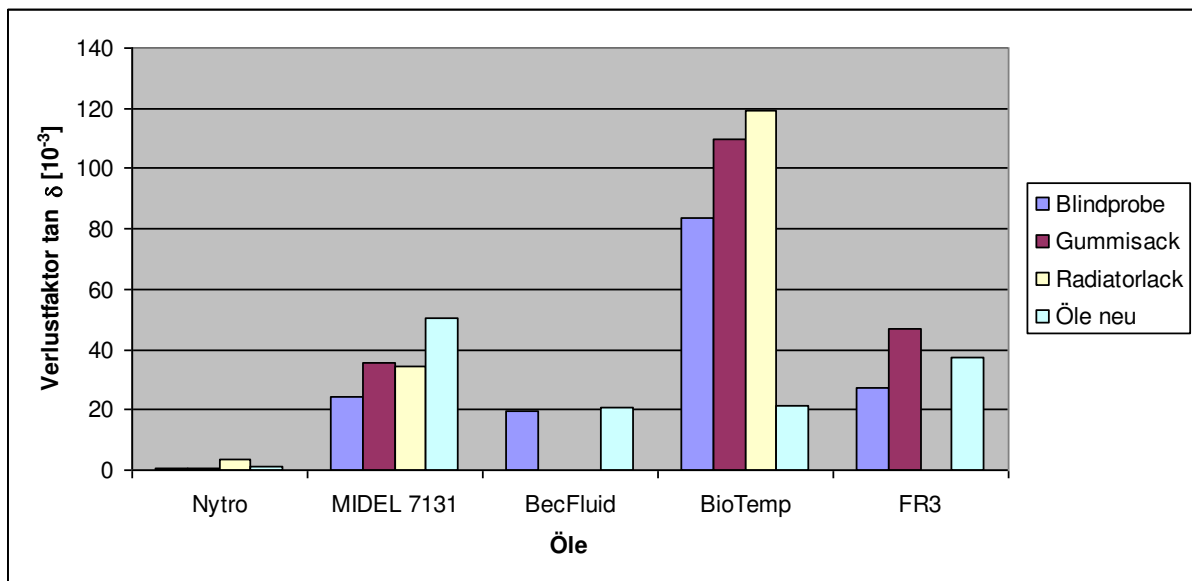


**Abbildung 90: Neutralisationszahl Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C**

Bei der Neutralisationszahl lässt sich keine einheitliche Aussage über die verschiedenen Proben machen. Aber gut zu erkennen ist, dass Nytro sehr niedrige Werte gegenüber den Neuöl aufweist. Noch deutlicher ist dies bei Midel 7131 zu sehn, aber da es bei diesem Öl bei den Neuölmessungen zu starken Feuchtigkeitseinfluss kam, sind die Daten schlecht vergleichbar.

### Durchschlagspannung:

Bei der Durchschlagprüfung lässt sich keine Aussage darüber machen, ob die Materialien Einfluss auf das Öl haben, da alle drei Öle ein messbares Maximum erreichen/überschreiten und zu wenig Messwerte vorhanden sind.

Verlustfaktor (tan delta):

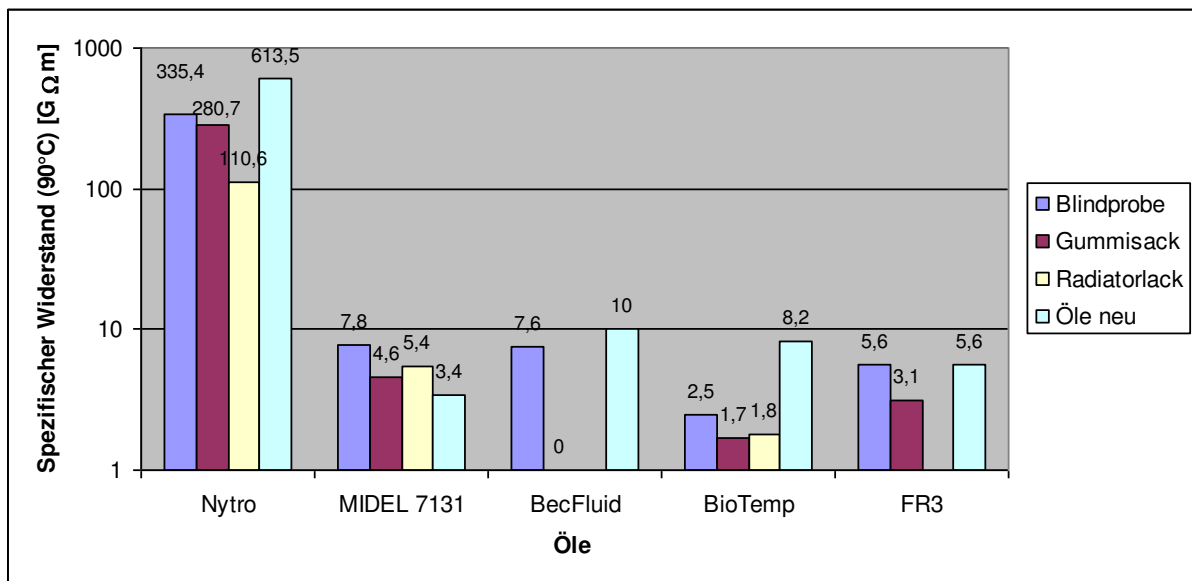
**Abbildung 91: Verlustfaktor Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C**

Bei den Messungen ist zu erkennen, dass alle Messungen mit Radiatorlack und auch alle Messungen (mit Ausnahme von Nytro) mit Gummisack höhere Werte als die Blindprobe aufweisen. Interessant ist der Unterschied der Biotemp-Proben zu dessen Neuölwerten. Die Neuölwerte betragen hier nur  $\frac{1}{6}$  bis  $\frac{1}{4}$  der anderen Biotemp-Proben. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Öl mit dem Gummi oder Lack reagiert.

Relative Permittivitätszahl ( $\epsilon_r$ )

Die Werte der einzelnen Öle sind fast identisch und weichen trotz verschiedener Materialien kaum voneinander ab.

### Spezifischer Widerstand ( $\rho$ ):



**Abbildung 92: Spezifischer Widerstand Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C**

Bei diesen Werten ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Gummisack als auch die Radiatorlack-Proben einen niedrigeren spezifischen Widerstandswert aufweisen als die Blindprobe und das Neuöl (Ausnahme Midel 7131).

Für die Gummisackproben kann man davon ausgehen, dass es zu einer Beeinträchtigung des Gummis bei einer Alterung in Estern kommt. Da der Gummisack aus Polyamid mit einer NBR (Nitril-Butadien-Kautschuk) Beschichtung besteht, kann davon ausgegangen werden, dass es bei 120°C in Estern zu einem Angriff des Materials kommt, was wiederum Auswirkungen auf die verschiedenen Ester hat.

Der Hauptbestandteil des Radiatorlacks ist PVB (Polyvinylbutyral). Dieses Material sollte eigentlich stabil gegenüber Mineralöl und Estern sein. Möglicherweise kommt es durch zu hohe Säureanteile und Wassergehalt zu einer Zersetzung des Lacks.



## Grenzflächenspannung:

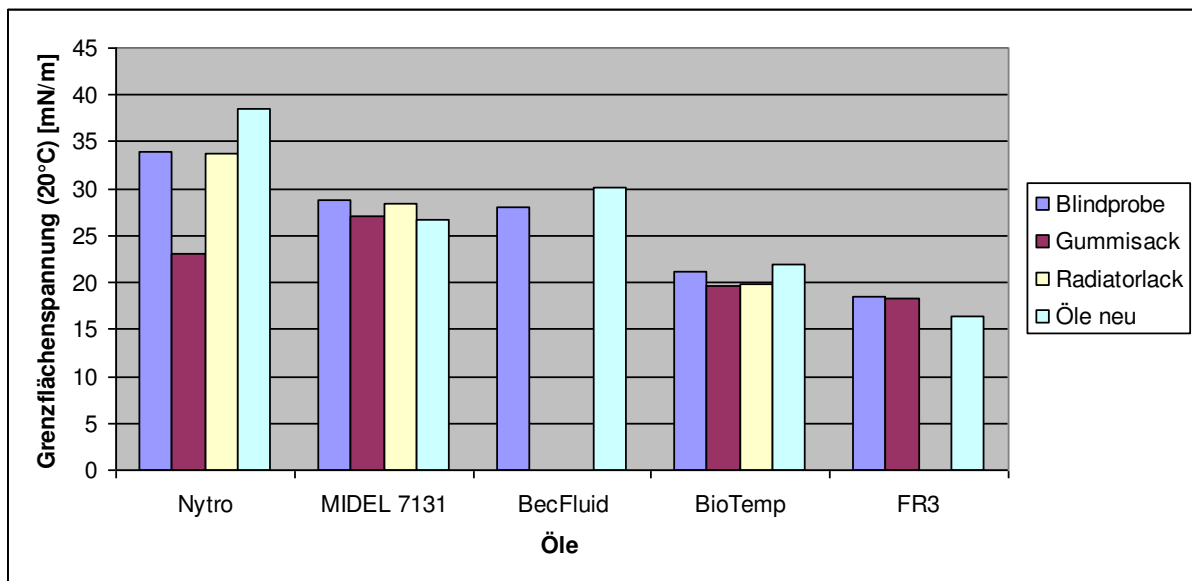


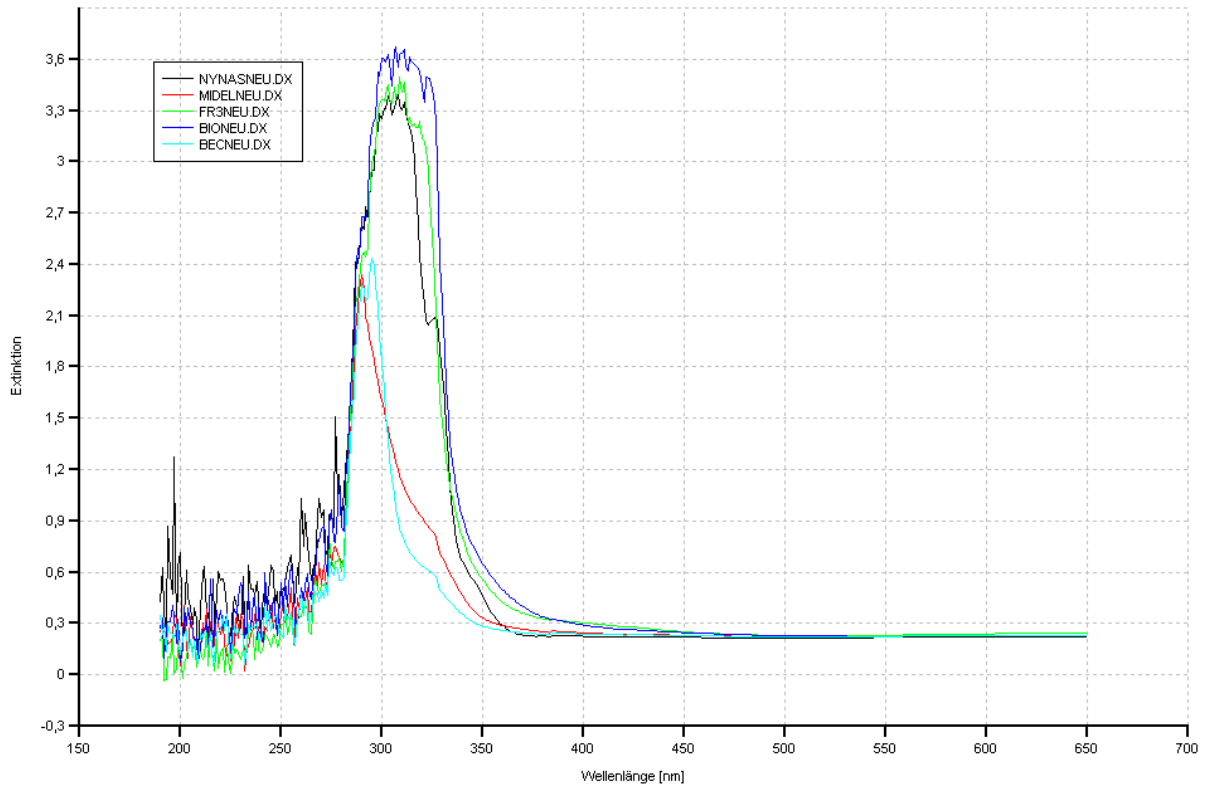
Abbildung 93: Grenzflächenspannung Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C

Die Messwerte für die Grenzflächenspannung sind bei den einzelnen Ölen für die verschiedenen Materialien sehr ähnlich. Die einzige Ausnahme bildet Nytro bei dem die Werte für die Gummisack-Probe niedriger sind als die Vergleichs-Öle.

## 6.3 Photometrische Messungen des Öls

### 6.3.1 UV/Vis Spektroskopie

Durch die Messungen der Proben mittels UV/Vis Spektroskopie können kaum neue Erkenntnisse über die Proben erhalten werden. Es ist zwar zwischen den verschiedenen Ölen im Neuzustand Abweichungen zu erkennen, aber zwischen den Alterungsproben des gleichen Öls können so gut wie keine Unterschiede erkannt werden.



**Abbildung 94: Spektren aller ungealterten Öle**

In Abbildung 94 der ungealterten Öle erkennt man die Ähnlichkeit der zwei synthetischen Ester – Becfluid und Midel 7131. Die anderen drei Öle scheinen kaum Unterschiede aufzuweisen, obwohl es sich hier um zwei natürliche Ester und ein Mineralöl handelt.

Als Beispiel wird hier je eine gealterte Mineralöl-, synthetische Ester- und natürliche Ester-Probe dargestellt:

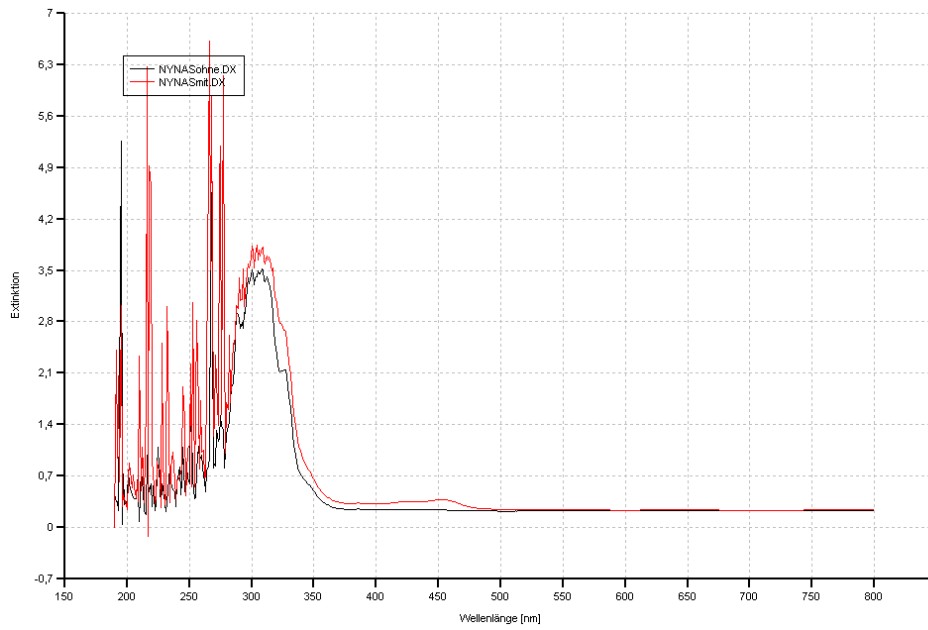


Abbildung 95: UV/Vis-Spektren Nytro ohne (Blindprobe)/mit Probe 120°C

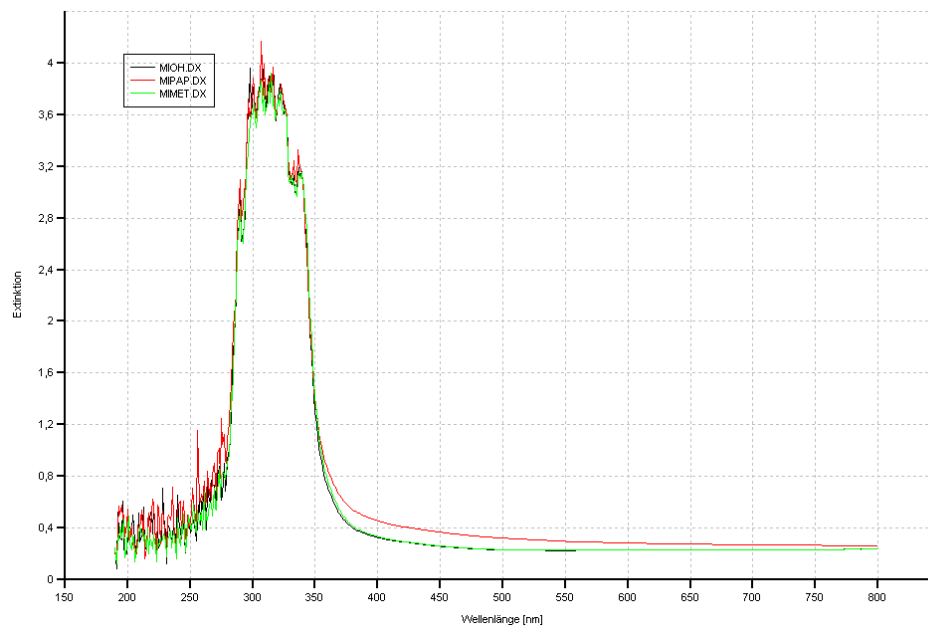
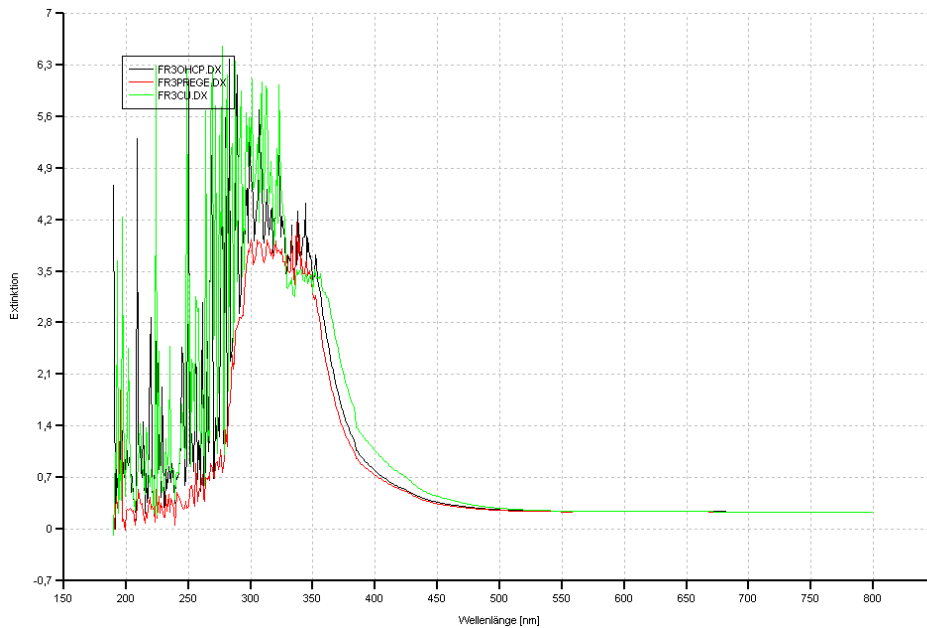


Abbildung 96: UV/Vis-Spektren Midel 7131 Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°



**Abbildung 97: UV/Vis-Spektren FR3 Cu mit Epoxidharz/Prepreg (ausgehärtet)/Blindprobe 140°C**

Aus diesen 3 Abbildungen wird deutlich, dass aus den UV/Vis-Messungen so gut wie keine Informationen über den Alterungsprozess der verschiedenen Öle erkannt werden kann.

Die einzelnen Spektren des jeweiligen Öltyps sind fast identisch und zeigen, obwohl andere Materialien in den Ölen enthalten waren, so gut wie keine Unterschiede in ihren Banden.

Im Anhang sind weitere Ergebnisse der UV/Vis-Spektroskopiemessung zu finden.

### 6.3.2 IR-Spektroskopie

Es werden von allen Ölproben IR-Spektren aufgenommen und miteinander verglichen.

Zuerst werden die Neuöle gemessen und gemeinsam in einer Grafik dargestellt.

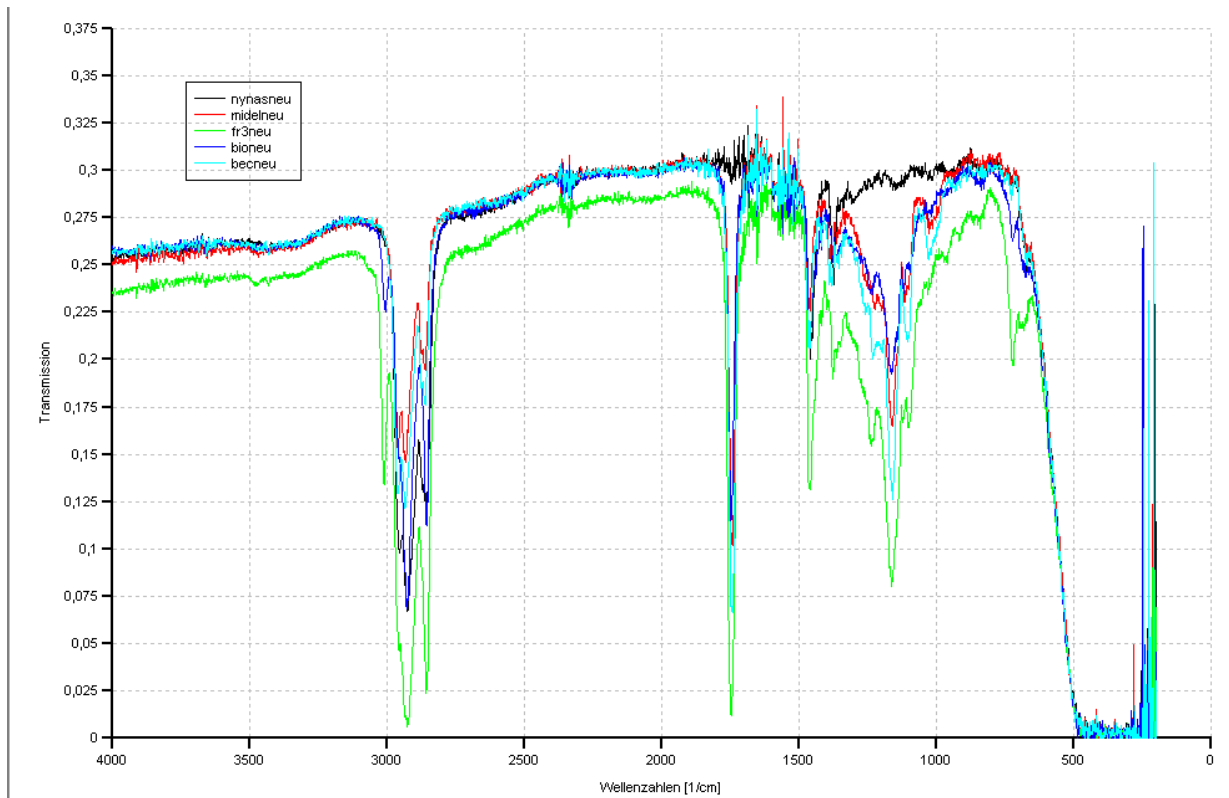


Abbildung 98: IR-Spektren aller ungealterten Öle

Bei dem Vergleich der ungealterten Ölproben (Abbildung 98) sieht man die wichtigsten Peaks um vor allem die verschiedenen Ester von Mineralöl zu unterscheiden.

Da davon ausgegangen werden kann, dass sich die natürlichen Ester und die synthetischen Ester untereinander ähneln, wundert es nicht, dass es zu sehr ähnlichen Spektren dieser Öle kommt. Jedoch sind alle vier Spektren fast identisch.

Da aus dem Datenblatt von Nytro 4000x zu entnehmen ist, dass als Inhibitor Dibenzylparakresol (2,6-Di-tert-Butyl-4-Methylphenol) verwendet wird, wird diese Verbindung auch bei den Spektren berücksichtigt. Weiters ist DBPC auch in FR3 enthalten.<sup>1</sup>

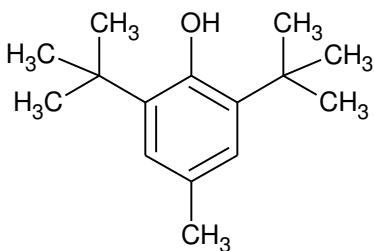


Abbildung 99: Dibenzylparakresol (2,6-Di-tert-Butyl-4-Methylphenol)

Aus Tabelle 17 lassen sich die wichtigsten IR-Banden der verschiedenen Öle entnehmen.

**Tabelle 17: Bereiche der Banden und deren Vorkommen in Ölen** <sup>38,1</sup>

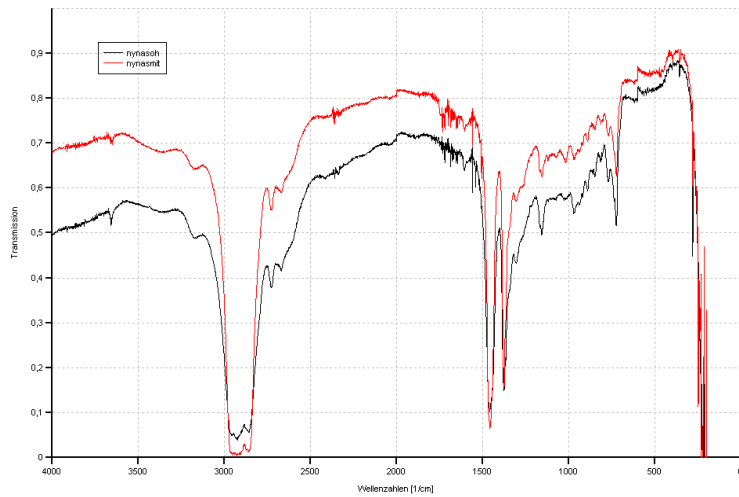
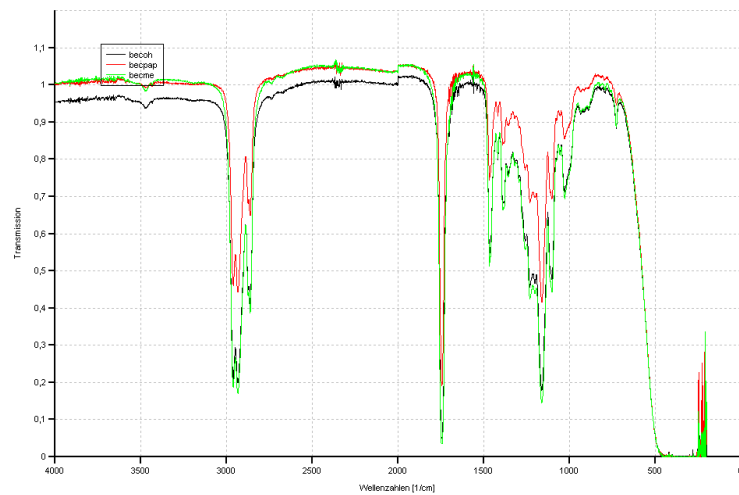
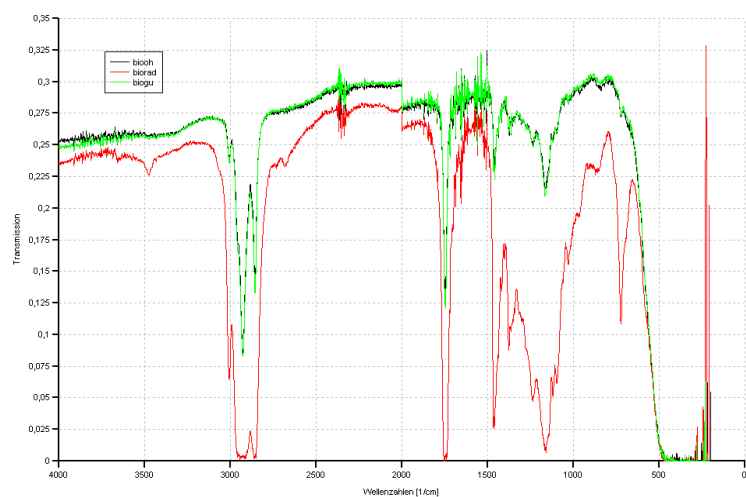
Wellenzahl [ $\text{cm}^{-1}$ ] der vorhandenen Banden	Öle, die diese Banden aufweisen	Bemerkungen zu den Banden
3400 - 3600	Alle	OH-Valenzschwingungen DBPC
2800 - 3000	Alle	Valenzschwingungen - Gesättigte Kohlenwasserstoffe (CH, <b>CH<sub>2</sub></b> , CH <sub>3</sub> )
1700 - 1750	Esterflüssigkeiten	Valenzschwingungen Carbonylverbindungen (C=O)
1450 - 1500	Alle	Deformationsschwingungen (CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> )
1100 - 1250	Esterflüssigkeiten	(C-O)-Valenzschwingungen

Wenig überraschend besteht bei den Esterflüssigkeiten bei der Wellenzahl zwischen  $1750 \text{ cm}^{-1}$  und  $1700 \text{ cm}^{-1}$  eine Anhäufung von Peaks, die auf Carbonylgruppen hinweisen. Weiters sind noch ausgeprägte Banden bei  $1100 \text{ cm}^{-1}$  -  $1250 \text{ cm}^{-1}$  zu sehen, die auf typische (C-O)-Valenzschwingungen schließen lassen.

Ähnliches gilt für das Mineralöl. Hier weist der Peak zwischen  $1480 \text{ cm}^{-1}$  und  $1425 \text{ cm}^{-1}$  auf die im Mineralöl häufig vorkommende Stoffgruppe (Alkane, Methylenverbindungen) hin.

Bei den weiteren Spektrenmessungen bei denen die gealterten Ölproben analysiert werden, sind kaum Unterschiede in den Banden erkennbar, obwohl andere Materialien in den Ölen enthalten waren.

Als Beispiel wird hier je eine gealterte Mineralöl-, synthetische Ester- und natürliche Ester-Probe dargestellt:

**Abbildung 100: IR-Spektren Nytro ohne/mit Probe 140°C****Abbildung 101: Spektren Becfluid Aluminium/Prepreg (Rohzustand) 140°C****Abbildung 102: Spektren Biotemp Radiatorlack/Gummisack/Blindprobe 120°C**

Im Anhang sind weitere Ergebnisse der UV/Vis-Spektroskopiemessung zu finden.

## 7. Zusammenfassung

Durch die thermischen Alterungsversuche von Mineralöl (Nynas 4000x), synthetischen Estern (Becfluid, Midel 7131) und natürlichen Estern (FR3, Biotemp) sowie verschiedenen Transformatormaterialien und deren anschließenden Analyse können folgende Aussagen geliefert werden:

Bei vielen der Materialmessungen ist ersichtlich, dass alle Öle Einfluss auf die Biege- und Zugfestigkeit und die Shorehärte haben. Die Neuproben weisen im Allgemeinen bessere/höhere Werte bei den Festigkeitsprüfungen aus. Nur bei manchen Kunststoffproben weisen die gealterten Proben etwas höhere Werte auf als die Neuproben.

Natürliche und synthetische Ester sind in der Lage wesentlich höhere Mengen an Wasser aufzunehmen als Mineralöle. Das hat vor allem beim Einsatz von Papier den Vorteil, dass es zu einer langsameren Alterung des Papiers kommt, da durch das Wasseraufnahmevermögen des Öls weniger Feuchtigkeit in das Papier übergeht. Gleichzeitig kommt es zwischen den Estern und dem Papier zu chemischen Reaktionen, die nicht nur das Absinken des Wassergehaltes, sondern auch die Verminderung der Neutralisationszahl bewirken.

Die Durchschlagspannungsmessungen liegen für Neuöl bei Mineralöl und den Estern in etwa im gleichen Bereich. Hier ist ein deutlicher Vorteil der Ester, dass sich die verschiedenen Wasserwerte auf die Durchschlagspannung nicht besonders stark auswirken im Gegensatz zu Mineralöl. Hier kann man beobachten (Versuch Prepreg Rohzustand/Aluminium), dass bei steigendem Wassergehalt die Durchschlagspannung sinkt

Die Werte des Verlustfaktors sind bei Mineralöl um vieles niedriger und die spezifischen Widerstandswerte um vieles höher als für Ester. Jedoch kommt es bei der thermischen Alterung zu einem starken Abfall dieser Werte. Ebenfalls gibt es bei den  $\tan \delta$  Werten einen relativ starken Anstieg und bei den spezifischen Widerstandswerten einen relativ starken Abfall der Werte bei den mit Kupfer gealterten Estern. Weiters sind die Werte von Biotemp (natürlicher Ester) auffällig, da



es bei fast allen Messungen zu einer drastischen Verschlechterung des Öls im Vergleich zum Neuzustand bezogen auf diese zwei Messgrößen kommt

Aus den Ergebnissen der Testläufe können nur die Materialtests weiteren Aufschluss auf das Verhalten des Öls geben, aber es können kaum Erkenntnisse aus den Ergebnissen der Ölmesswerte gewonnen werden, da man davon ausgehen kann, dass mehrere im Öl vorhandenen Materialien mit dem Öl wechselgewirkt haben, und man dadurch keine Rückschlüsse auf ein bestimmtes Material ziehen kann.

Man kann sagen, dass bei der Anwendung in Transformatoren Ester eine gute Alternative zu Mineralöl darstellen können.

Die wesentlich höhere Aufnahmemöglichkeit von Wasser (vor allem bei synthetischen Estern) und dadurch auch die bessere Verträglichkeit mit Papier, den höheren Flammpunkt und die gute Umweltverträglichkeit machen die Ester zu einem geeigneten Ersatz für Mineralöl. Jedoch muss beachtet werden, dass Mineralöle bedeutend niedrigere Neutralisationszahlen und Verlustfaktorwerte und bei weitem höhere spezifische Widerstandswerte aufweist.

Bei einem Vergleich der natürlichen Ester untereinander, kann man bei einem überwiegenden Teil der Messwerte erkennen, dass FR3 gegenüber Biotemp überlegen ist. FR3 weist zwar eine höhere Neutralisationszahl auf, aber dafür besitzt es durchgehend niedrigere Verlustfaktor- und höhere Widerstand-Werte.

Stellt man die synthetischen Ester Midel 7131 und Becfluid gegenüber, sieht man, dass Midel 7131 bei fast allen Messungen Becfluid überlegen ist (mit Ausnahme der Neuölwerte bei denen es bei Midel 7131 durch die viel zu hohen Wassergehaltswerte zu schlechten Ergebnissen kam). Nur bei der Durchschlagspannungsmessung weisen beide sehr ähnliche Werte auf.

Bei einem Vergleich zwischen natürlichen und synthetischen Estern kann man sagen, dass bei den thermischen Alterungsmessungen Midel 7131 in den meisten Messwerten den anderen Ölen überlegen ist. Am schlechtesten schneidet Biotemp ab, da es zwar niedrigere Neutralisationswerte aufweist als Becfluid und FR3, aber schlechtere Werte bei den Verlustfaktor- und Widerstandswerten besitzt.

Außerdem kommt es bei Biotemp bei der thermischen Alterung oft zur Verharzung des Öls, was bei Transformatoren zu Beeinflussung des Betriebes führt.

Ob nun ein Ester (v.a. Midel 7131) oder Mineralöl in einem Transformator verwendet wird, sollte dadurch entschieden werden für welche Anwendung der Transformator benötigt wird und welche Mindestanforderungen an das Öl gestellt werden.

## Anhang

### I. Verwendete Materialien und Geräte

#### Materialienübersicht

Roth – Silica Gel Orange 1-3mm, Indikator, Perlform

Silica Gel, ohne Indikator, Perlform

Glaswolle

#### Geräteübersicht

IR Spektrometer - Perkin-Elmer Model 883

UV/Vis Spektrometer – Perkin Elmer instruments – Lambda 35

Karl Fischer Coulometer – 831 Metrohm

Rührer: 728 Stirrer – Metrohm

Lösungen: Fluka Analytical – Hydranal Coulomat CG – 34840 – 50ML-R

Fluka Analytical – Hydranal Coulomat AG – H – 34843 – 500ML

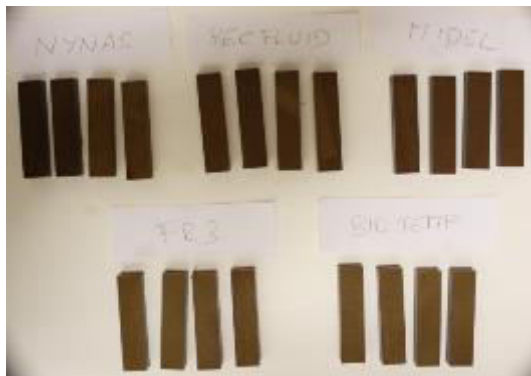
Relative Feuchte (Moisture and Temperature Transmitter for Oil) – Vaisala HMP228

### II. Bilder und Abbildungen zu Kapitel 6

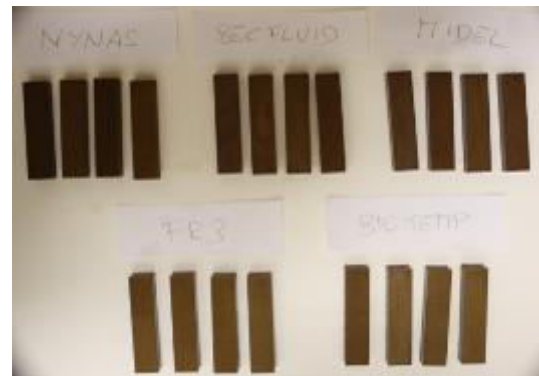
#### Ila. Optischer Vergleich der Materialien

140°C

Blockspan F:



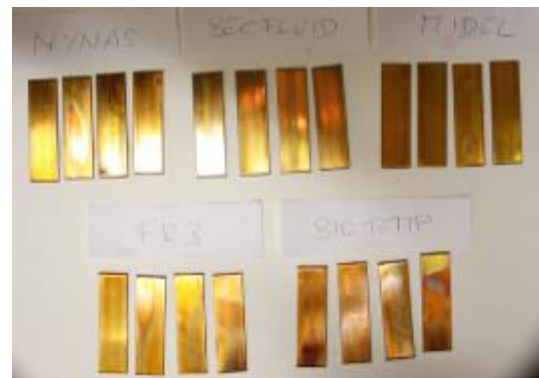
Blockspan P:



Blockspan W:



Kupferblech blank:



Kupferlametta:



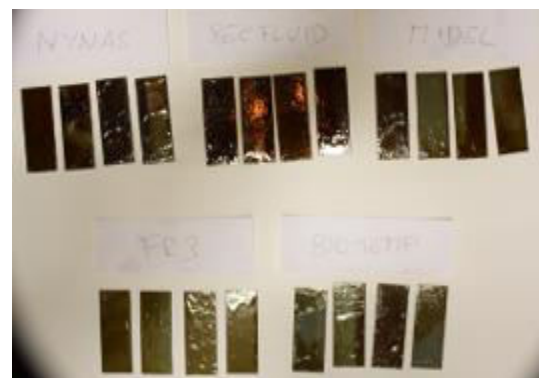
Kupferleiter lackiert/Epoxy beschichtet mit Papier



Faserpapier:



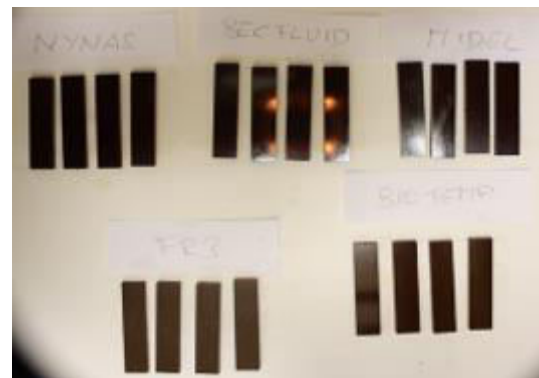
Gestelllack:



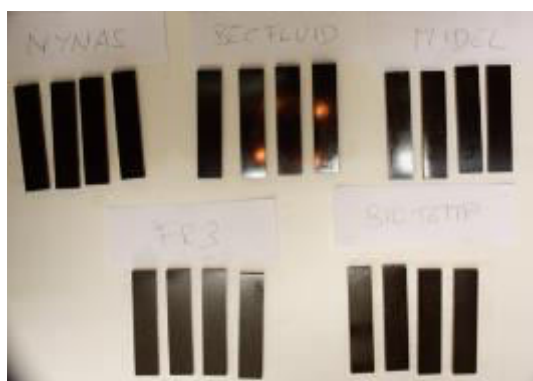
GFK-Leisten:



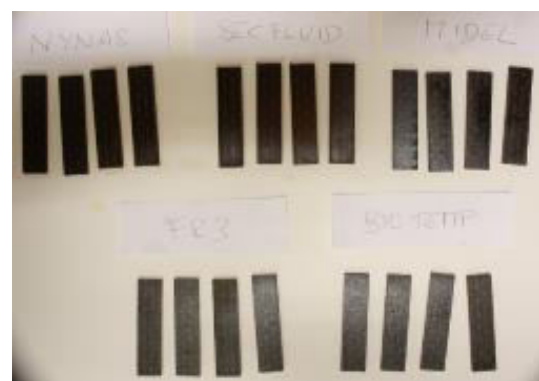
Hartpapier:



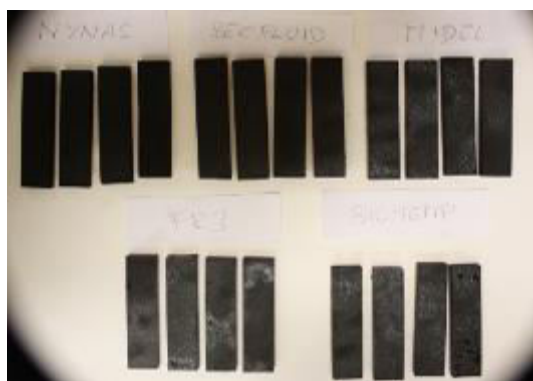
Hartpapier B:



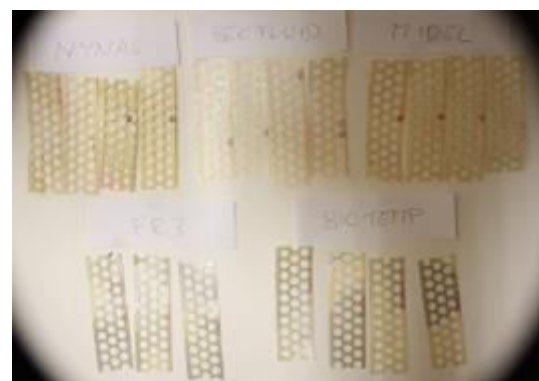
HGW-Plättchen:



Kunstkork:



Lochband:



Naturkork:



Polyesterband:



120°C

Kabelbinder:



Kessellack:



NBR-O-Ringdichtungen:



Polyamidringe:



Synturit:



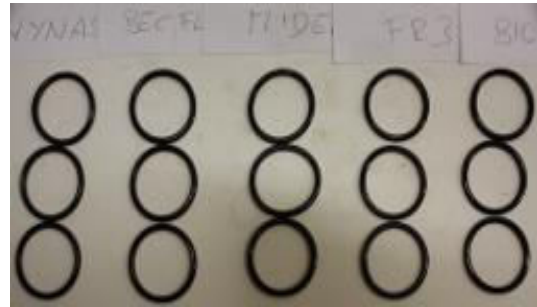
Treibstifte:



Verzinkter Stahl:

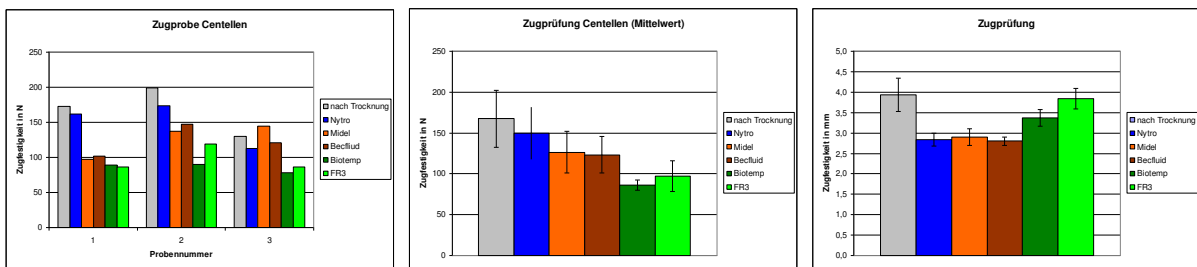


Viton-O-Ringe:

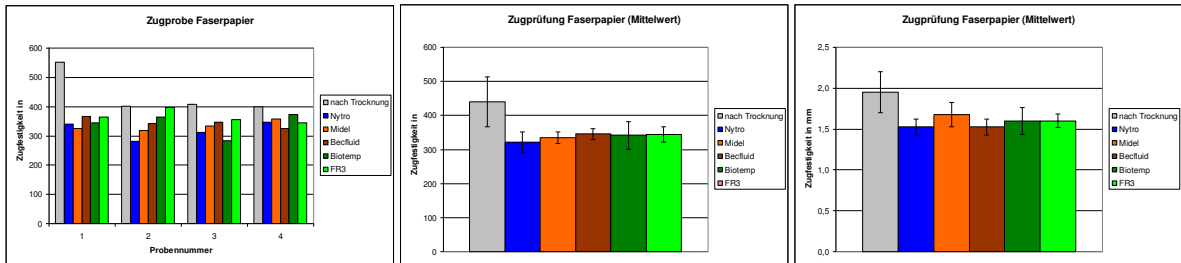


IIb. Zugversuche

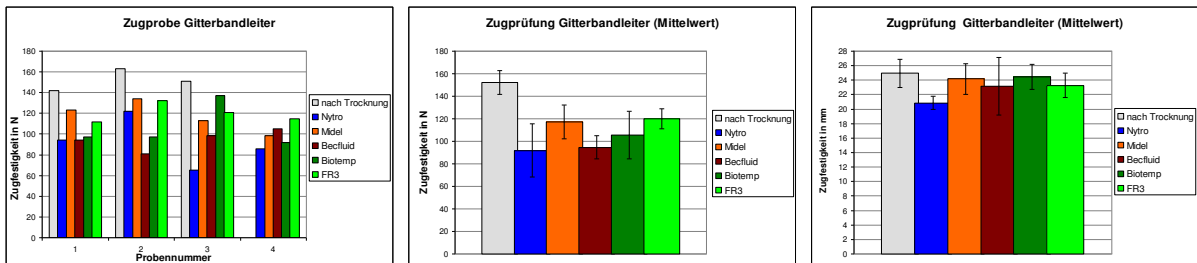
Centellen:



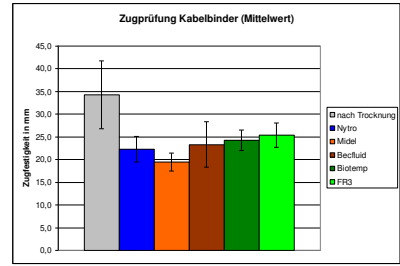
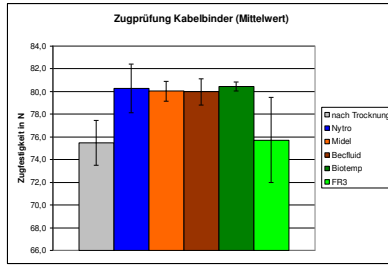
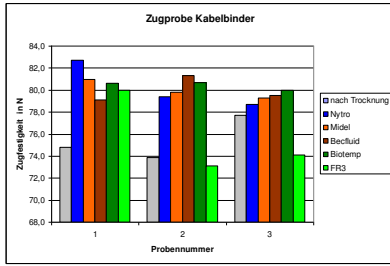
Faserpapier:



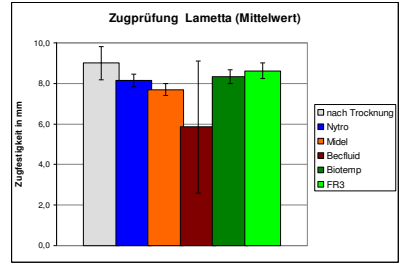
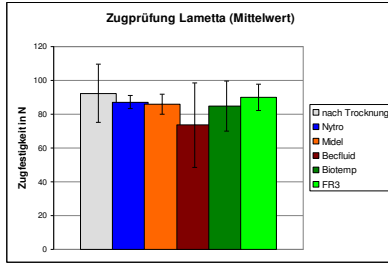
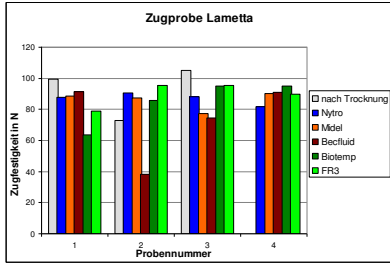
Polyesterband vom Gitterbandleiter:



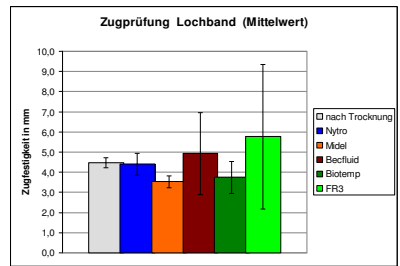
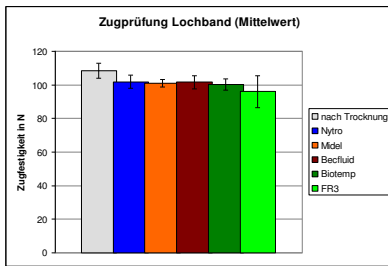
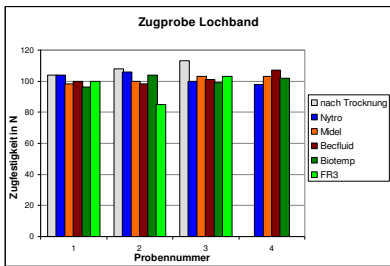
Kabelbinder:



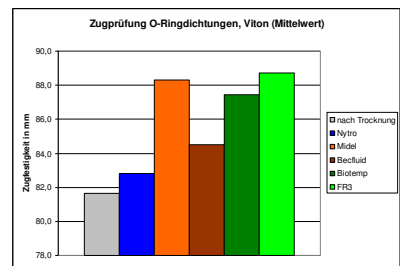
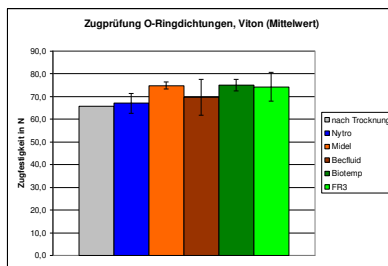
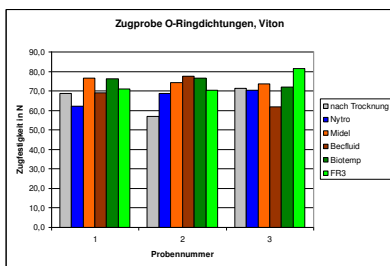
Lametta:



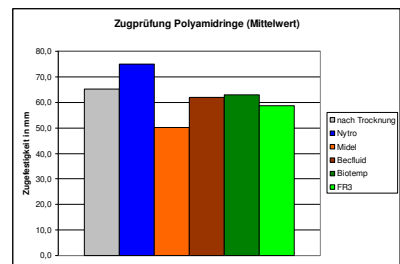
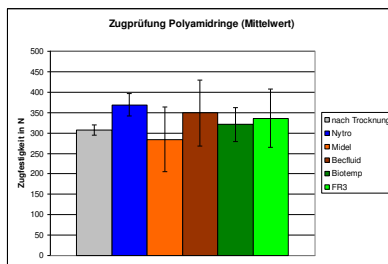
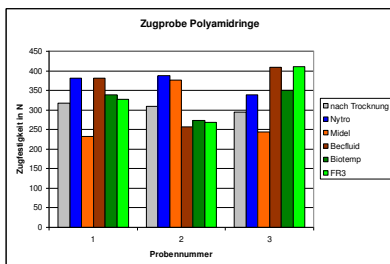
Lochband:



O-Rinddichtungen, Viton:

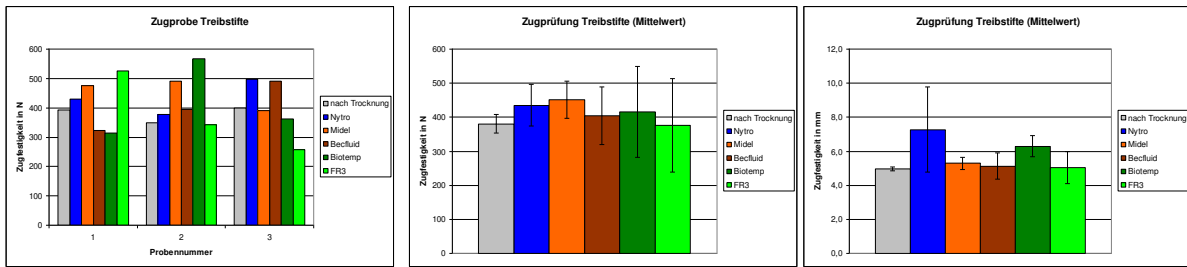


Polyamidringe:



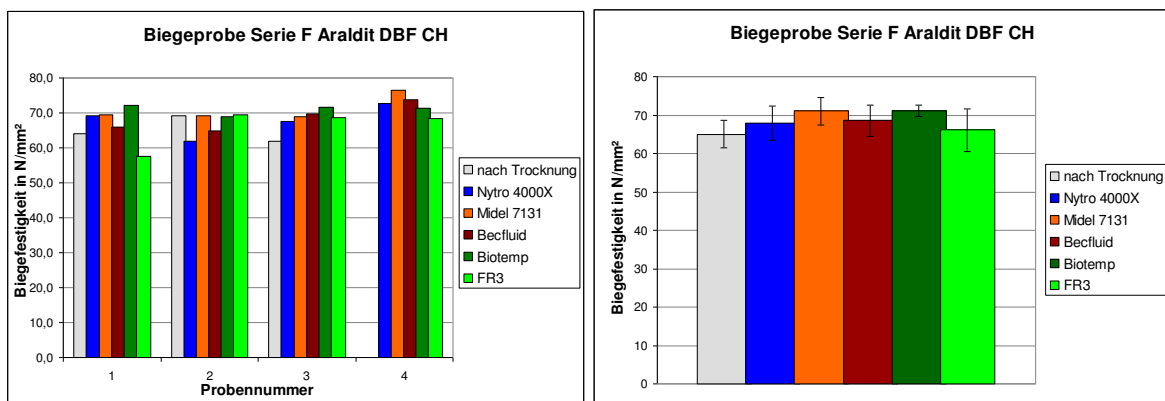


Treibstifte:

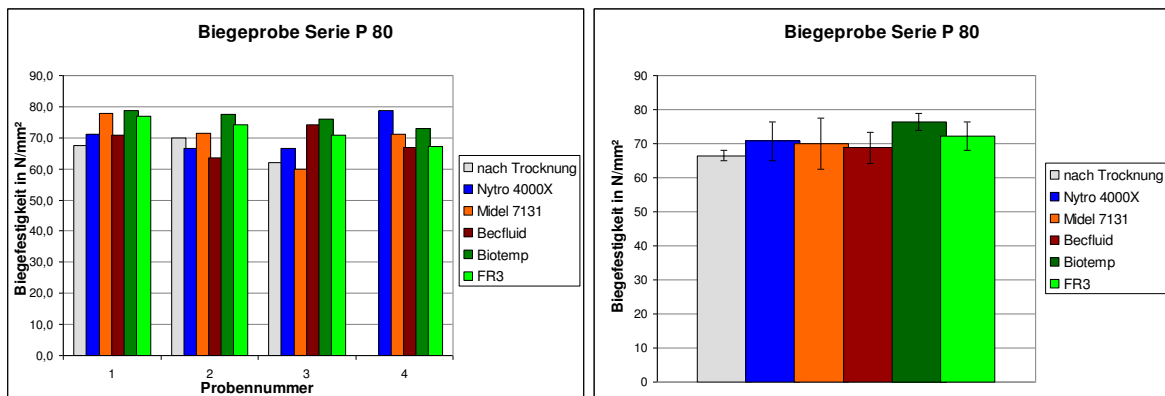


IIc. Biegeversuche

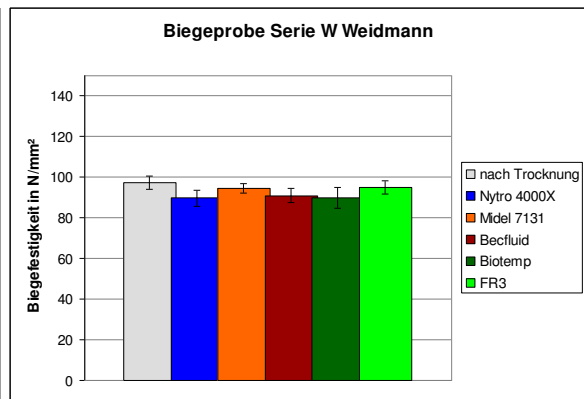
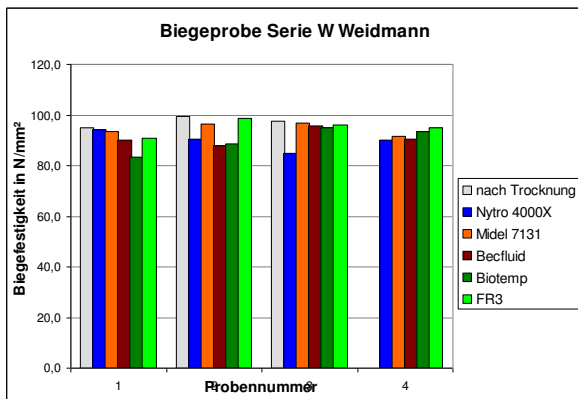
Blockspan F:



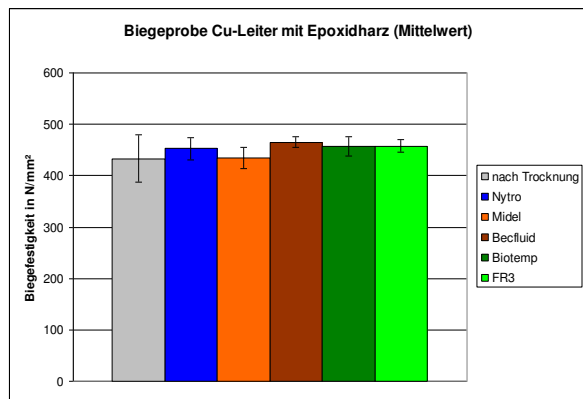
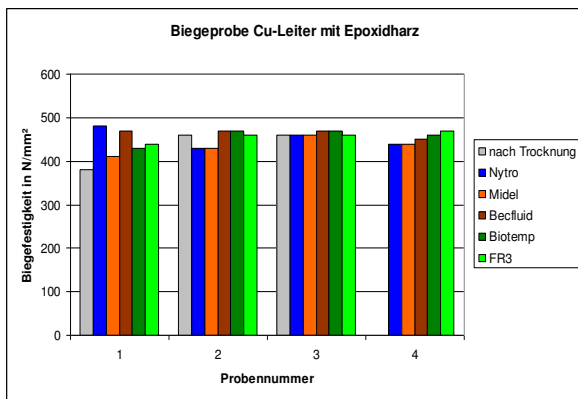
Blockspan P:



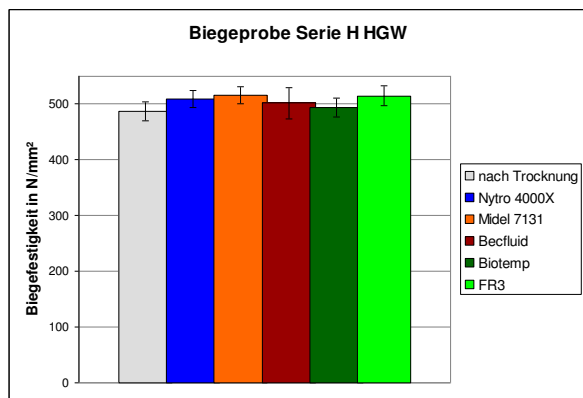
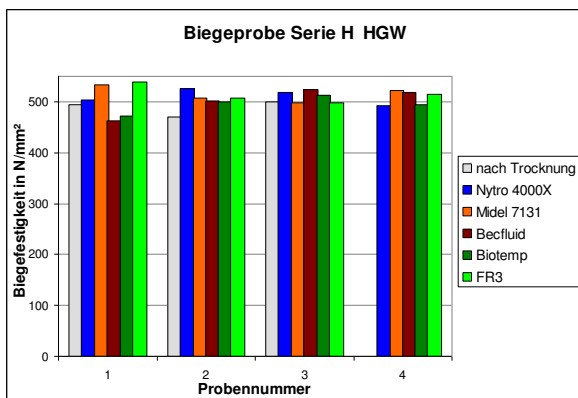
Blockspan W:



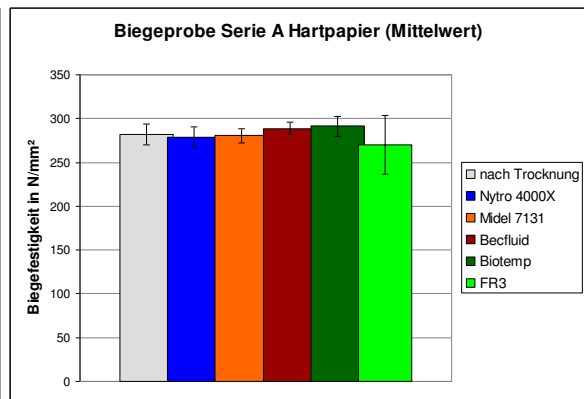
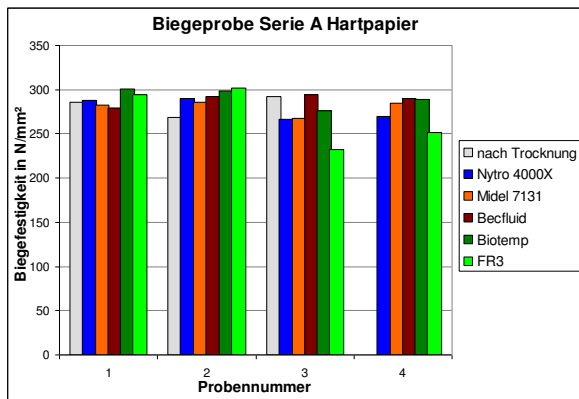
Cu-Leiter mit Epoxidharz:



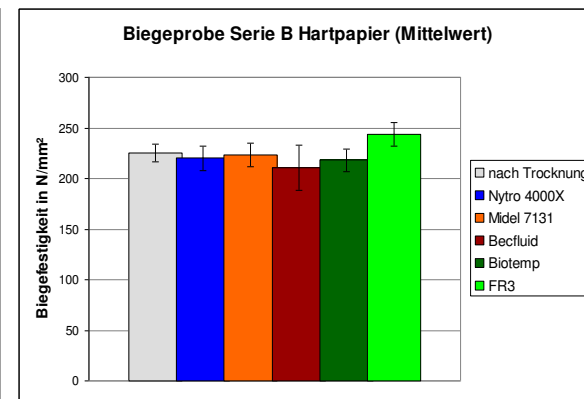
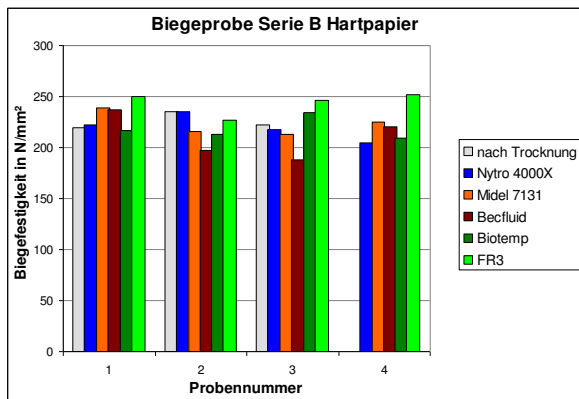
HGW-Plättchen:



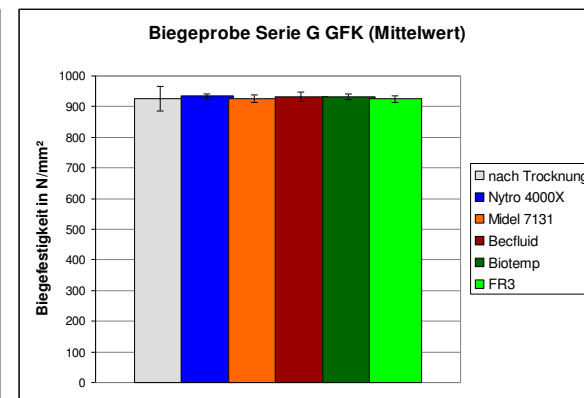
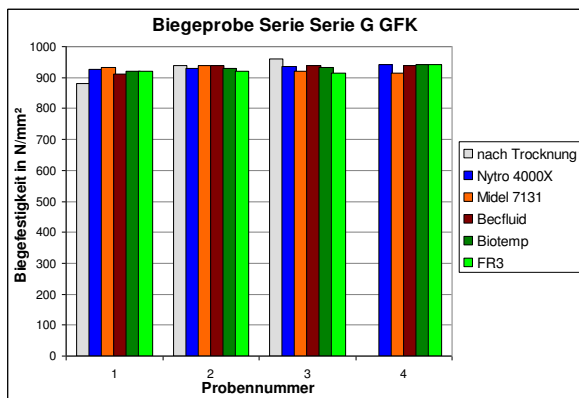
Hartpapier A:



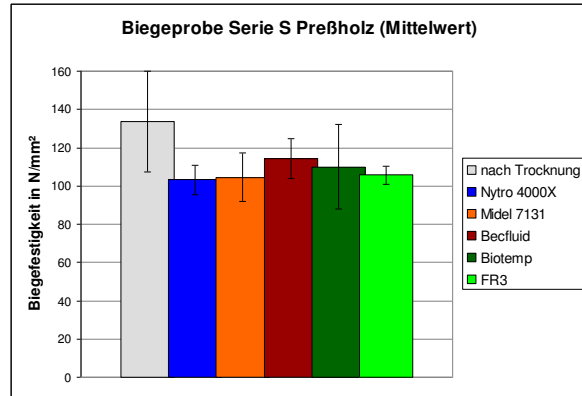
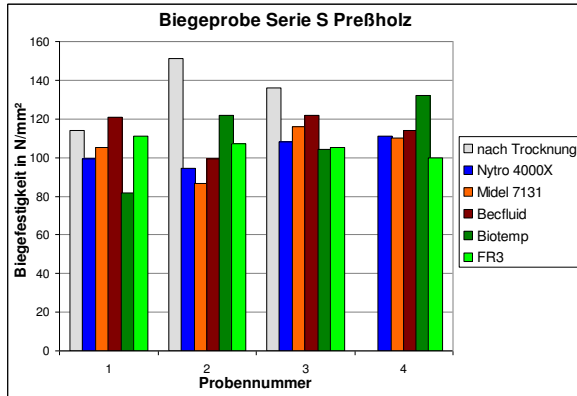
Hartpapier B:



GFK-Leisten:

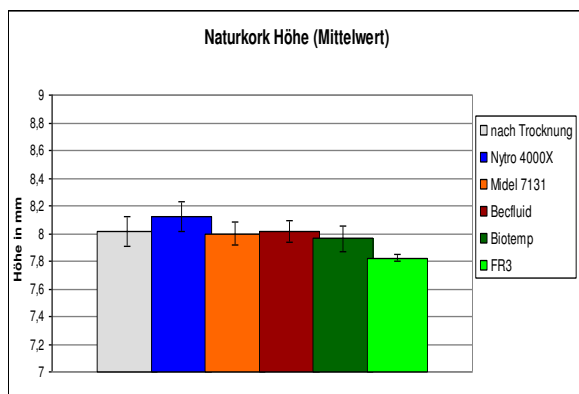
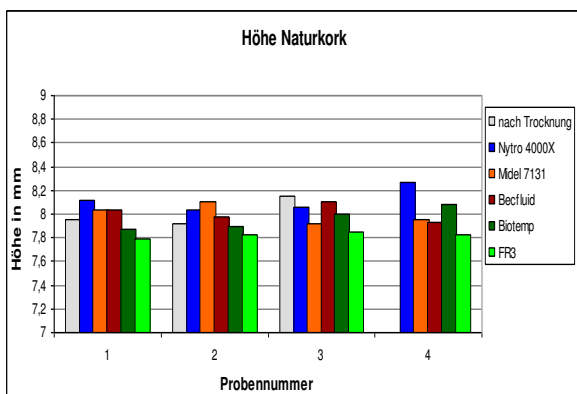
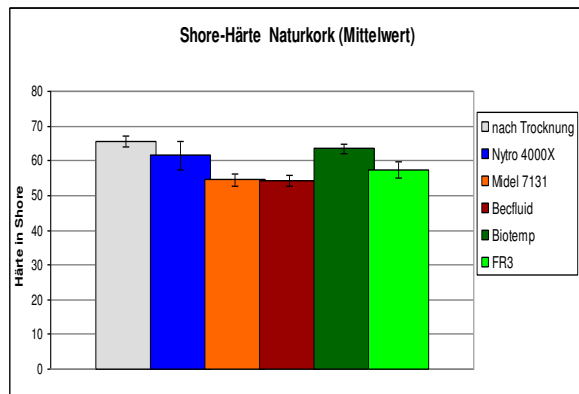
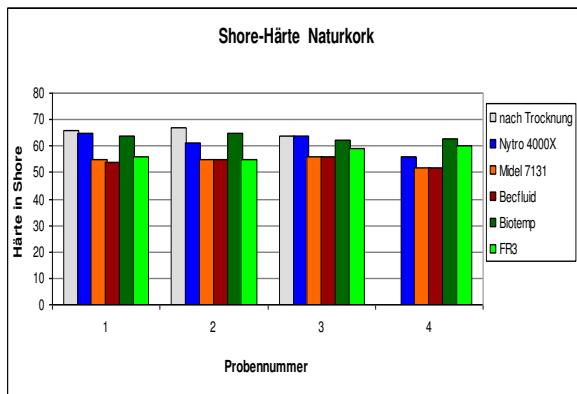


Preßholz:



IId. Shorehärteversuche

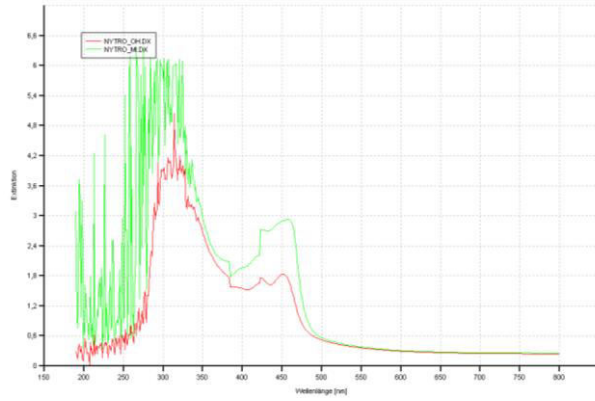
Naturkork:



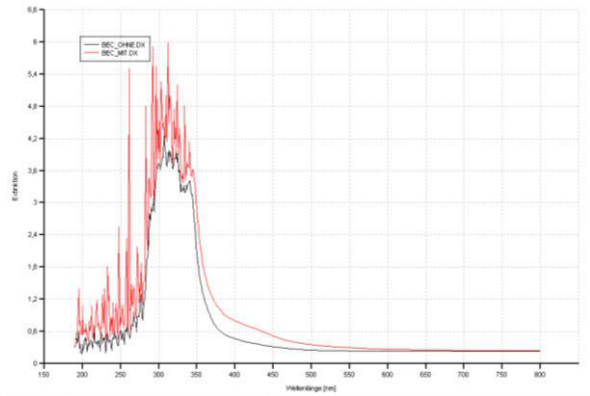
## Ile. UV/Vis Spektroskopie

Ohne/mit Proben bei 140°C:

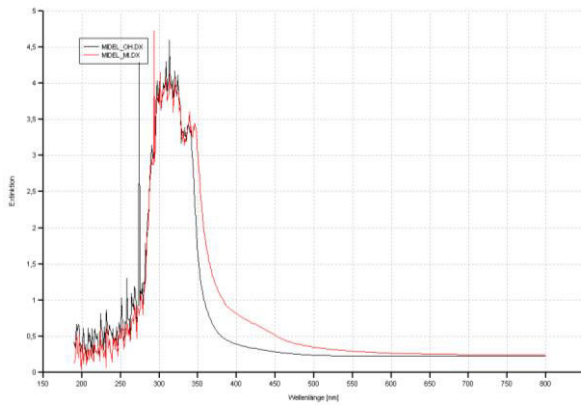
Nytro 4000x



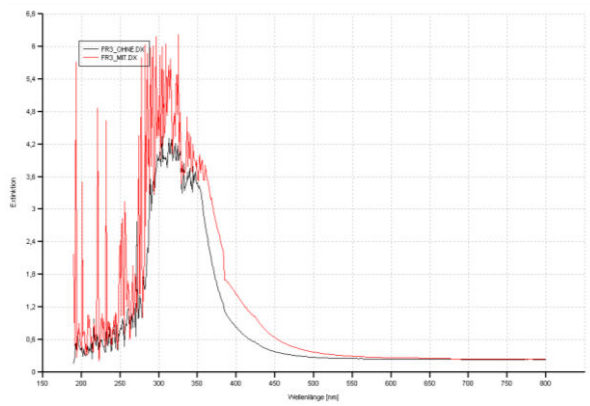
Becfluid



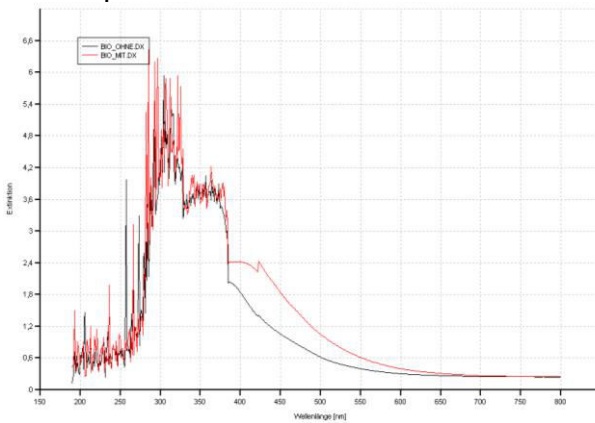
Midel 7131



FR3

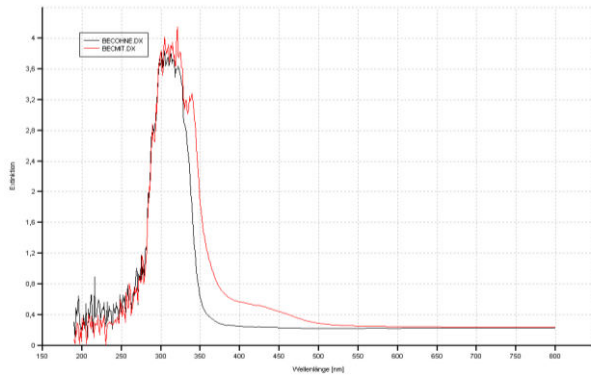


Biotemp

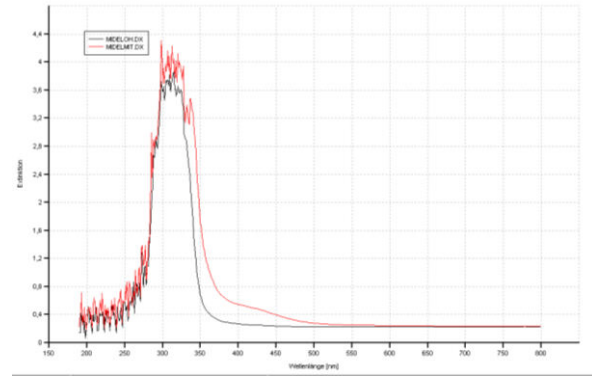


Ohne/mit Proben bei 120°C

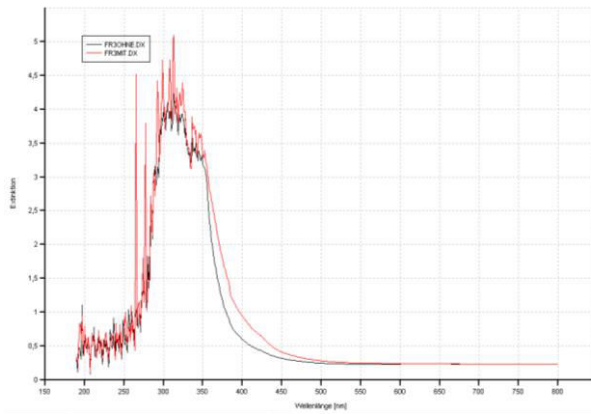
Becfluid



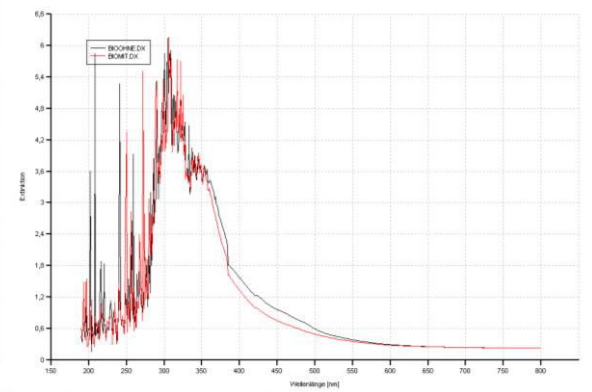
Midel 7131



FR3

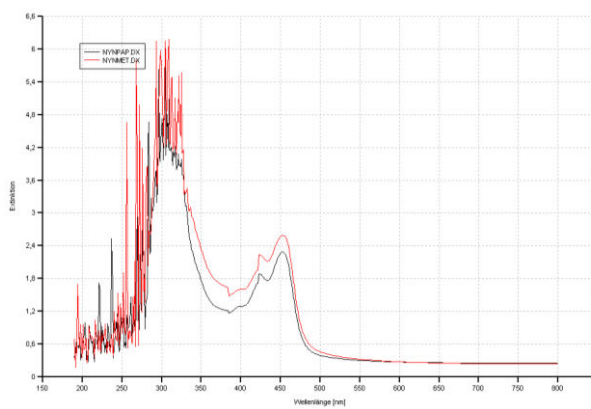


Biotemp

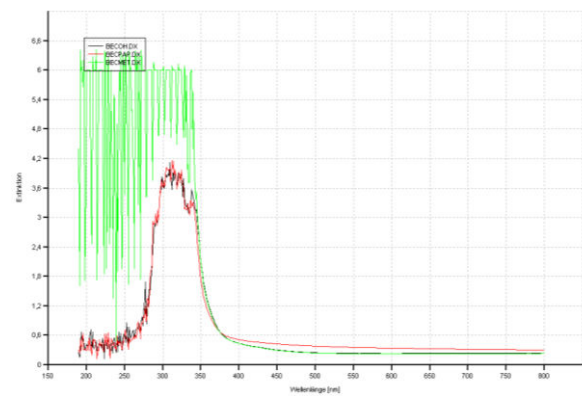


Aluminium/Prepreg

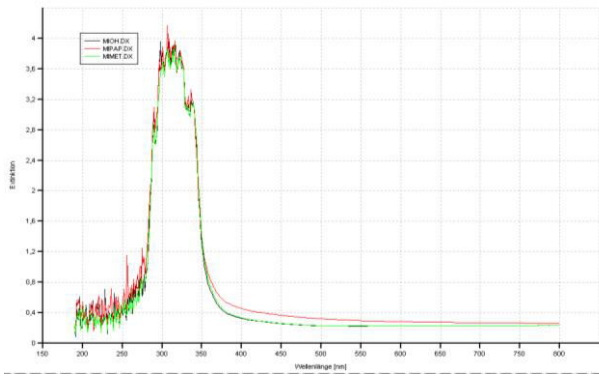
Nytro 4000x



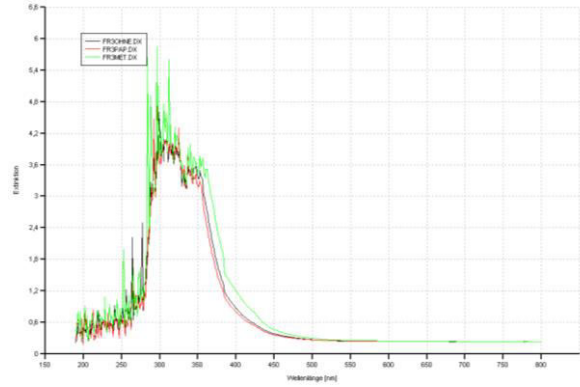
Becfluid



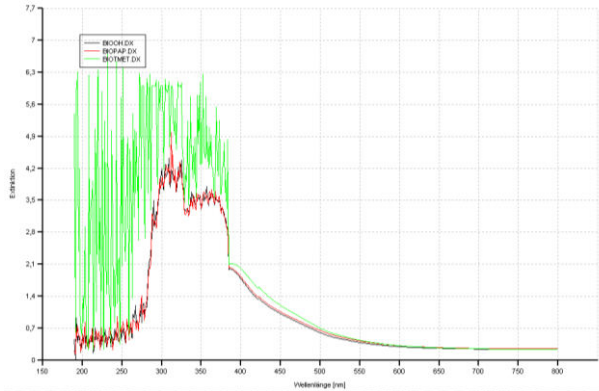
Midel 7131



FR3

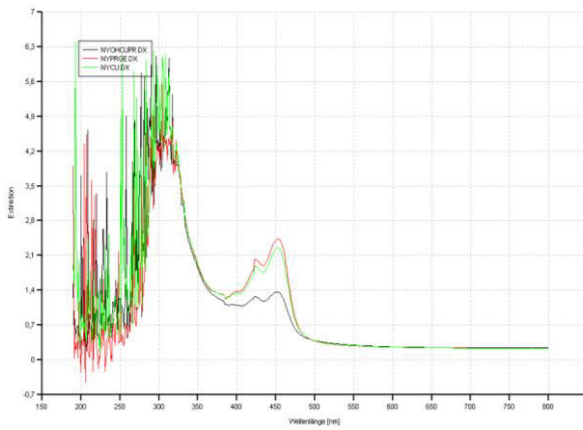


Biotemp

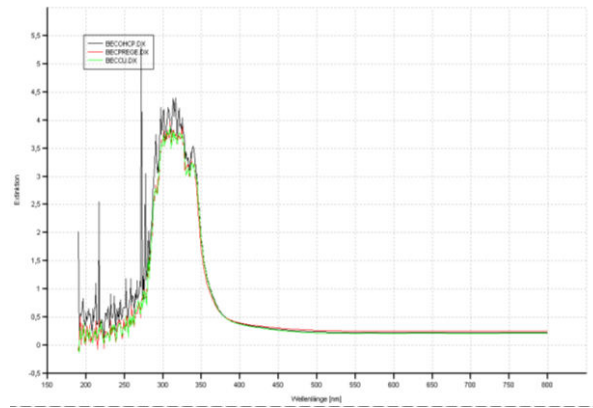


Cu mit Epoxidharz/Prepreg ausgehärtet

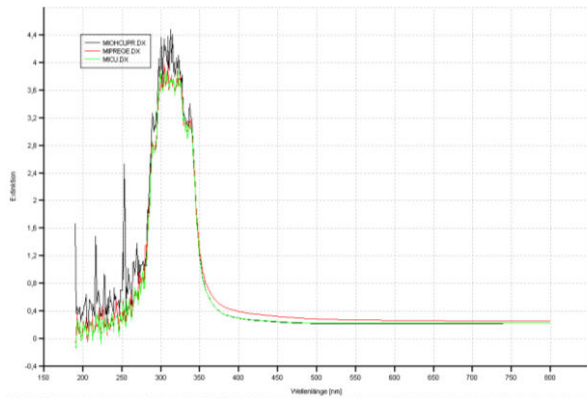
Nytro



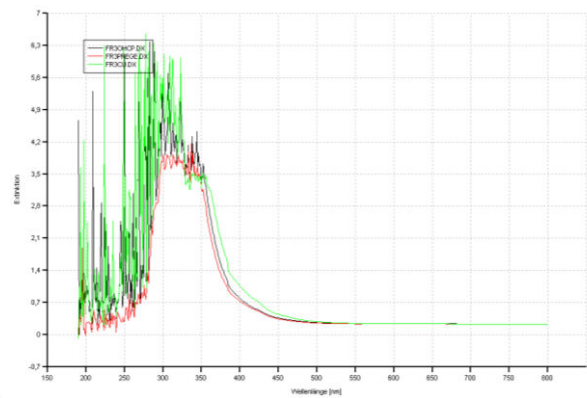
Becfluid



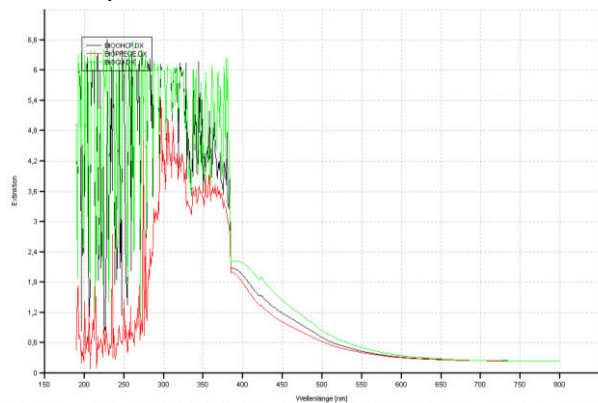
### Midel 7131



### FR3

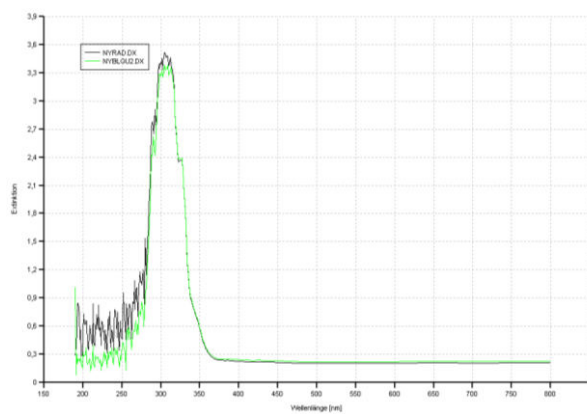


### Biotemp

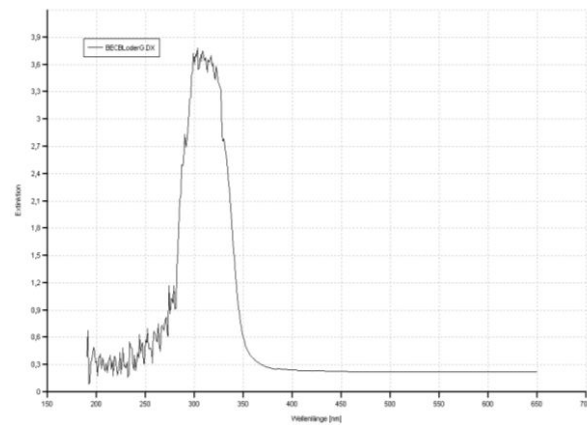


### Radiatorlack/Gummisack

#### Nytro 4000x

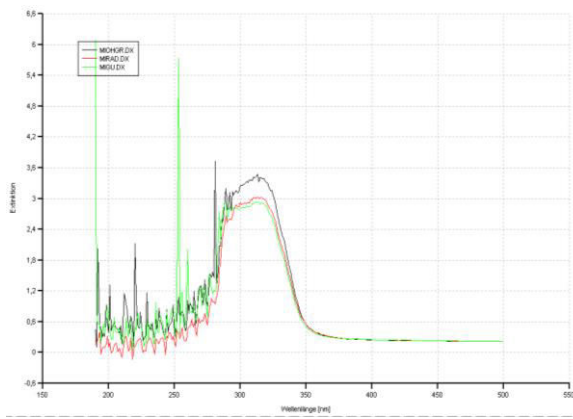


#### Becfluid

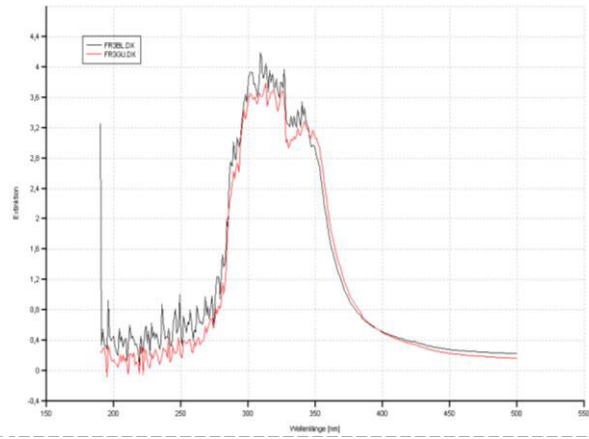




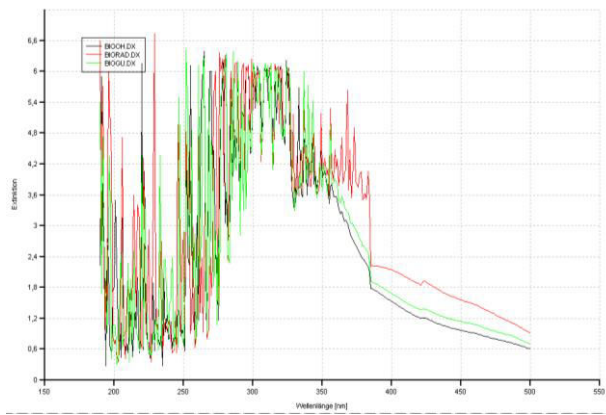
Midel 7131



FR3



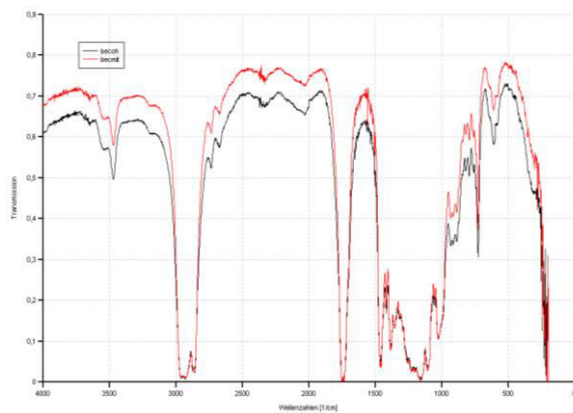
Biotemp



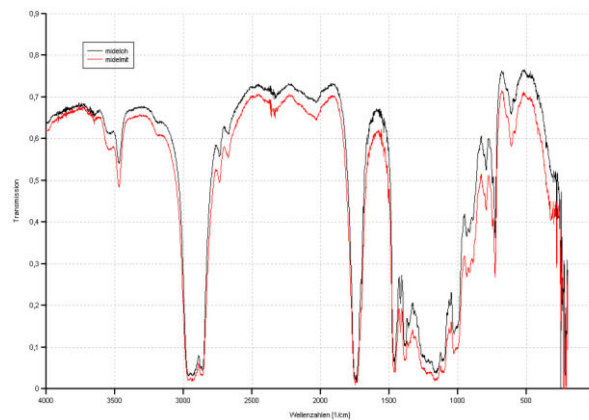
Ilf IR-Spektroskopie

Ohne/mit Proben bei 140°C

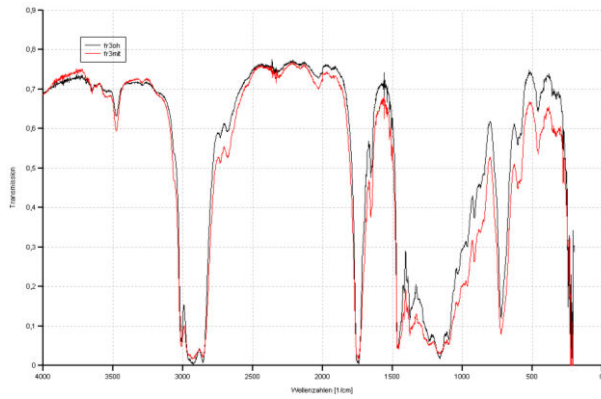
Becfluid



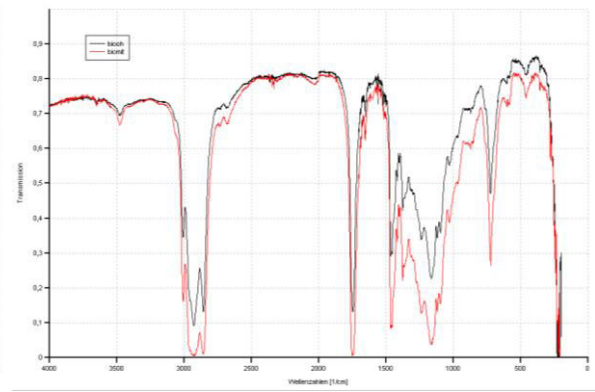
Midel 7131



FR3

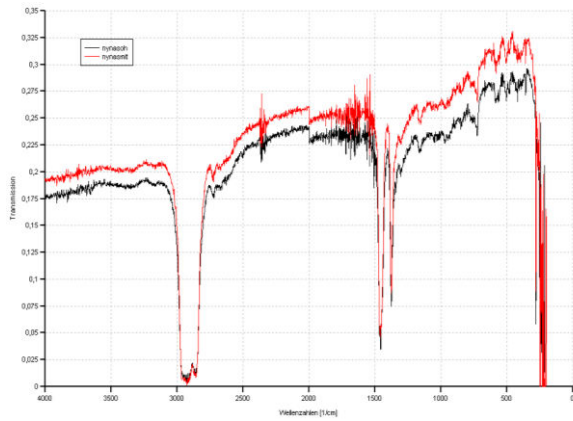


Biotemp

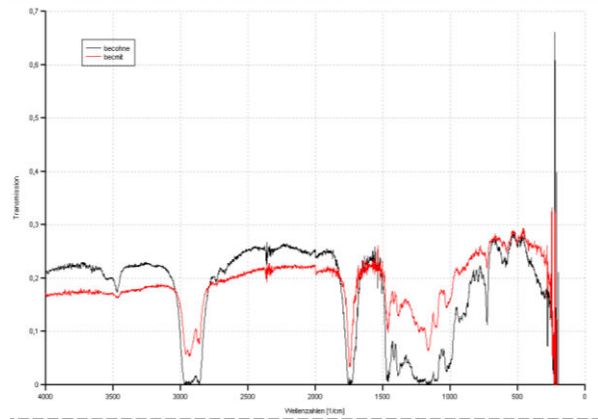


Ohne/mit Proben bei 120°C

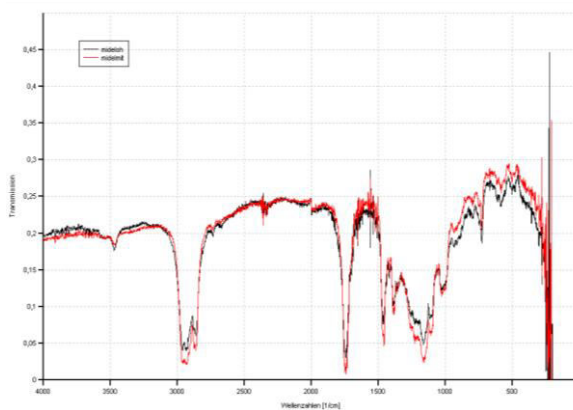
Nytro 4000x



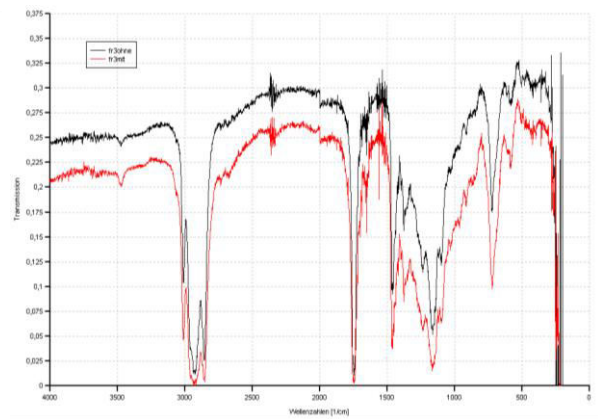
Becfluid



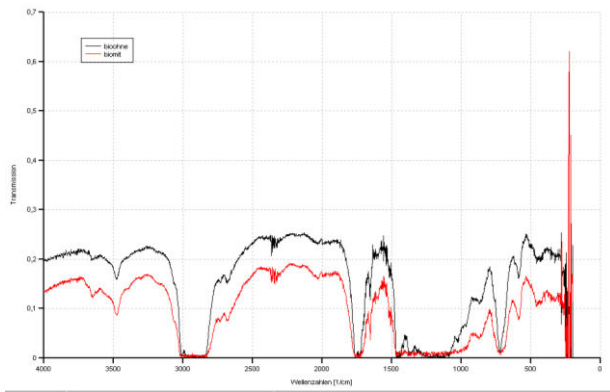
Midel 7131



FR3

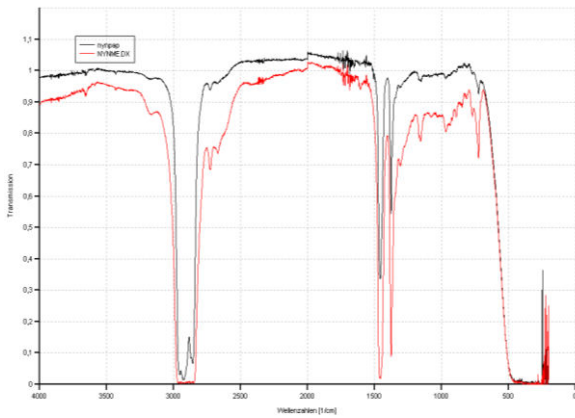


### Biotemp

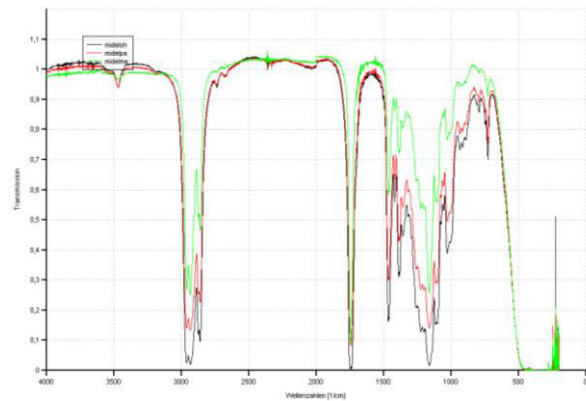


### Aluminium/Prepreg

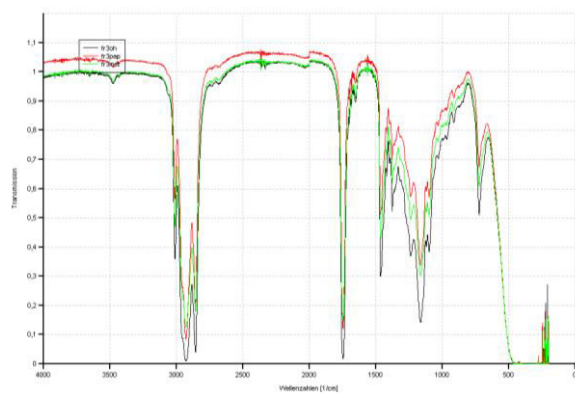
#### Nytrö 4000x



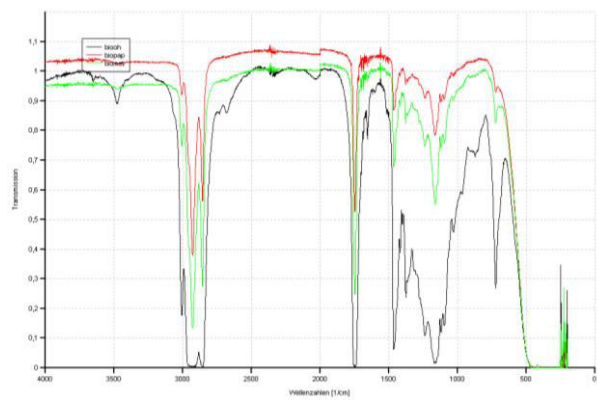
#### Midel 7131



#### FR3

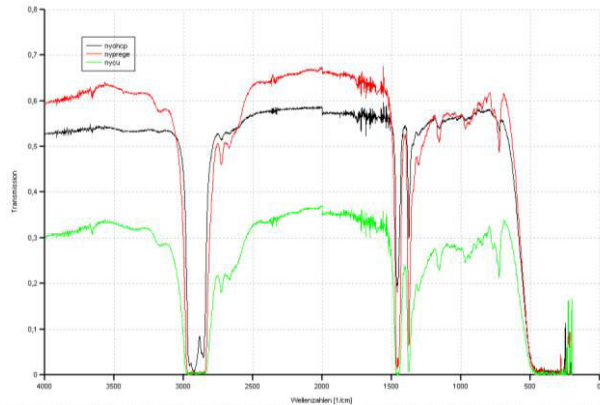


#### Biotemp

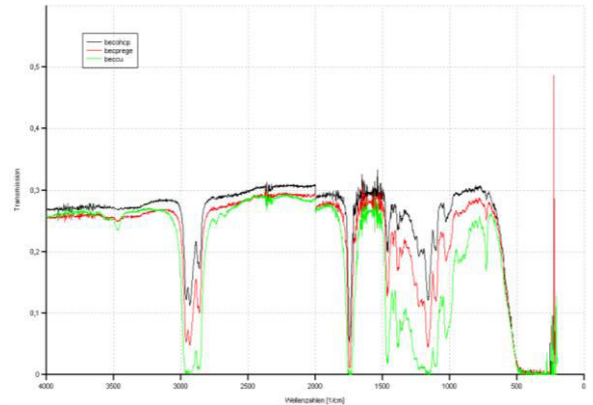


Cu mit Epoxidharz/Prepreg ausgehärtet

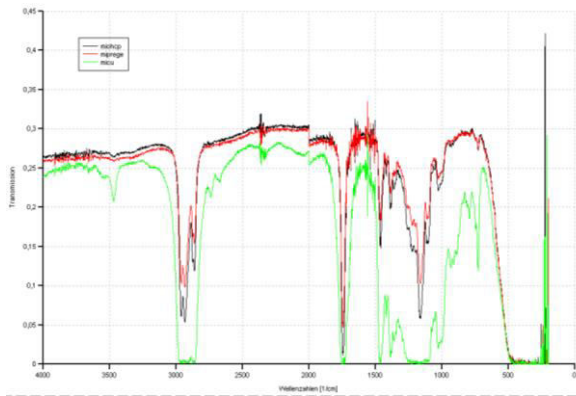
Nytro 4000x



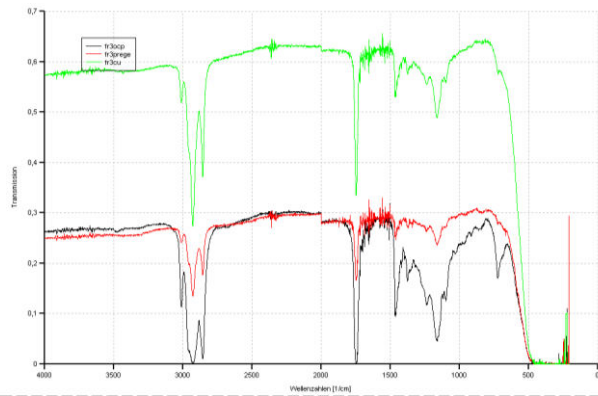
Becfluid



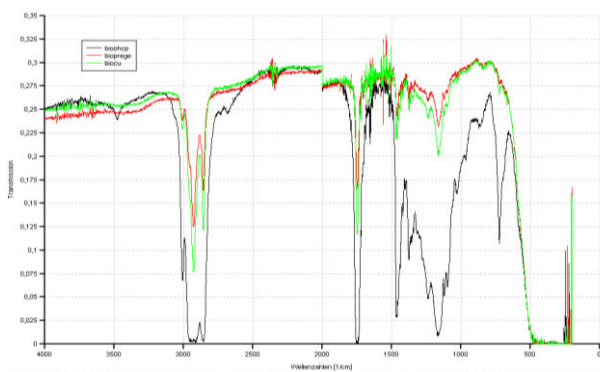
Midel 7131



FR3

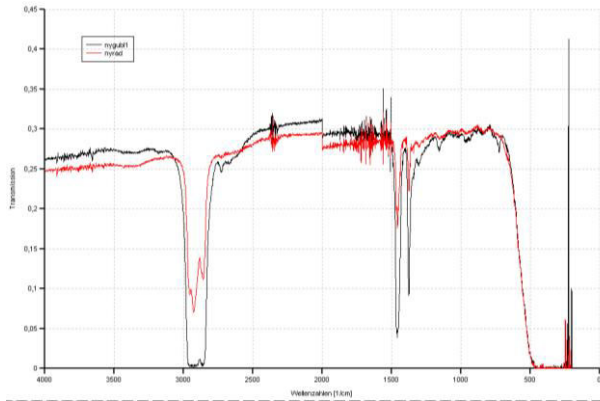


Biotemp

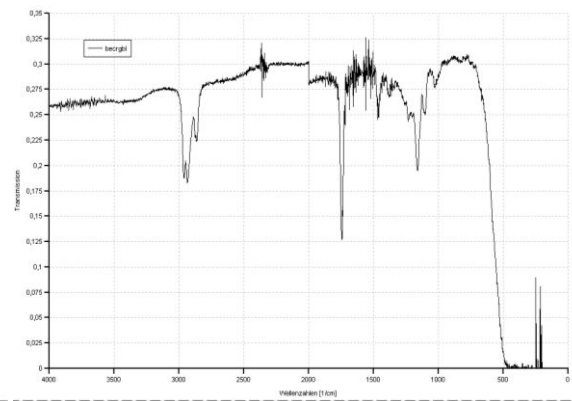


Gummisack/Radiatorlack

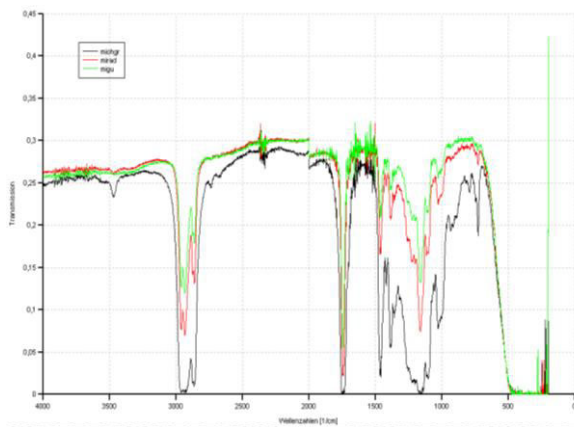
Nytro 4000x



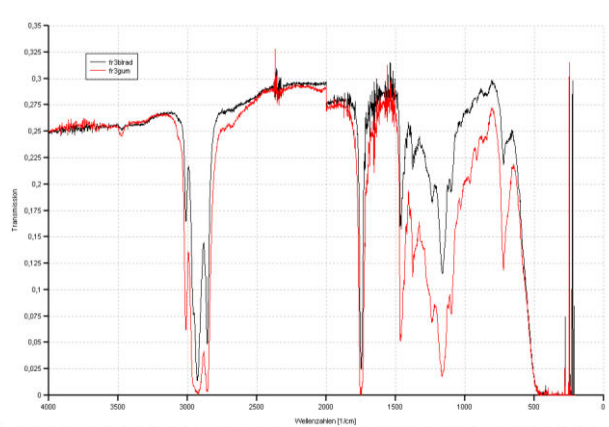
Becfluid



Midel 7131



FR3



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einige Vergleichsdaten der verschiedenen Öle .....	4
Tabelle 2: Chemisch Physikalische Analyse gemäß IEC 60422 und ÖVE Merkblatt 5 .....	17
Tabelle 3: Auflistung der Alterungsdurchläufe .....	32
Tabelle 4: Werte für neue, ungealterte Öle.....	46
Tabelle 5: Relative und absolute Feuchte der Testläufe bei 140°C .....	47
Tabelle 6: Relative und absolute Feuchte der Testläufe bei 120°C .....	47
Tabelle 7: Farbvergleich ungealterte Proben.....	48
Tabelle 8: Farbvergleich der Testläufe bei 140°C gealterten Proben .....	48
Tabelle 9: Farbvergleich der bei 120°C gealterten Proben .....	50
Tabelle 10: Messergebnisse der Testläufe (120°C und 140°C) (gemessen VERBUND).....	51
Tabelle 11: Farbskala Aluminium/Prepreg Rohzustand/Blindprobe.....	56
Tabelle 12: Meßwerte Prepreg Rohzustand (roh)/Aluminium/Blindprobe (gemessen VERBUND).....	58
Tabelle 13: Farbskala Cu mit Epoxidharz/Prepreg ausgehärtet .....	63
Tabelle 14: Meßwerte Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet/Blindprobe (gemessen VERBUND).....	64
Tabelle 15: Farbskala Gummisack/Radiatorlack .....	68
Tabelle 16: Meßwerte Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe (gemessen VERBUND) .....	69
Tabelle 17: Bereiche der Banden und deren Vorkommen in Ölen <sup>39</sup> , .....	78

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele der möglichen Verbindungen in Mineralöl .....	5
Abbildung 2: Pentaerythritetrafettsäureester .....	6
Abbildung 3: Glycerin mit verschiedenen Fettsäureresten (R1-R3) .....	7
Abbildung 4: Verschiedene Öle und ihre Bindungen .....	8
Abbildung 5: Saure Esterhydrolyse .....	11
Abbildung 6: Reaktionen der Autoxidation.....	12
Abbildung 7: Peroxidation von Fettsäuren <sup>7</sup> .....	13
Abbildung 8: Folgereaktionen von Hydroperoxiden .....	13
Abbildung 9: Gerät für Zug- und Biegeprüfungen .....	15
Abbildung 10: Gerät zur Feststellung der Shorehärte .....	16
Abbildung 11: Einstufung der Prüfungsergebnisse .....	17
Abbildung 12: Wassersättigungswerte der verschiedenen Öle.....	19
Abbildung 13: Karl Fischer Coulometer .....	19
Abbildung 14: Messgerät für relative Feuchte .....	20
Abbildung 15: Farbtafel für Öle.....	22
Abbildung 16: Öl-Farbvergleichsproben .....	22
Abbildung 17: delta Winkel .....	23
Abbildung 18: Versuchsaufbau für das Messen des spezifischen Widerstands von Flüssigkeiten.....	24
Abbildung 19: Prinzip eines Zweistrahl-Spektrometers .....	26
Abbildung 20: Schwingungen der Atome bzw. Kugeln durch Absorption von IR.Strahlen <sup>32</sup> .....	27
Abbildung 21: Schwingungsmöglichkeiten von Wasser <sup>32</sup> .....	27
Abbildung 22: Harmonischer Oszillator – Potentialkurven .....	28
Abbildung 23: Anharmonischer Oszillator – Potentialkurven <sup>40</sup> .....	28
Abbildung 24: Aufbau von IR-Spektrometern .....	29
Abbildung 25: Versuchsaufbau (offenes Altern – Spritzenaussatz mit 1l Duranflaschen) .....	30
Abbildung 26: Verschluss für offenes Altern (Spritzenaufsatz mit Glaswolle und Trockenmittel).....	30
Abbildung 27: Temperaturzyklus der 140°C Messungen (tägliches Erhitzen auf ca. 140°C und Abkühlen auf ca. 40°C).....	31

Abbildung 28: Testmaterialien, die bei bis zu 140°C in den Ölen gealtert werden ...	33
Abbildung 29: Testmaterialien, die bis zu 120°C in den Ölen gealtert werden .....	34
Abbildung 30: Alukrepp Proben	
Abbildung 31: Blockspan D proben .....	36
Abbildung 32: Verklebte Prepreg Proben	
Abbildung 33: Pressholz Proben .....	37
Abbildung 34: Verzinkter Stahl Proben .....	37
Abbildung 35: Blockspan Proben	
Abbildung 36: Centellen Proben .....	37
Abbildung 37: Kupferleiter blank Proben	
Abbildung 38: Gummisack Proben .....	38
Abbildung 39: Zugprüfung Alukrepp in N (Mittelwert) .....	38
Abbildung 40: Zugprüfung NBR in N (Mittelwert) .....	39
Abbildung 41: Zugprüfung Prepreg in N (Mittelwert) .....	39
Abbildung 42: Biegeprüfung in N/mm (Mittelwert) .....	40
Abbildung 43: Shorehärte Kunstkork (Mittelwert) .....	41
Abbildung 44: Höhemessung Kunstkork (Mittelwert) .....	41
Abbildung 45: Aluminium/Prepreg (Rohzustand) unbehandelt .....	42
Abbildung 46: Aluminium 140°C	
Abbildung 47: Prepreg Rohzustand 140°C .....	42
Abbildung 48: Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet unbehandelt .....	43
Abbildung 49: Cu mit Epoxidharz .....	43
Abbildung 50: Prepreg (ausgehärtet) Nytro/Becfluid/FR3 .....	43
Abbildung 51: Prepreg (ausgehärtet) Midel/Biotemp .....	44
Abbildung 52: Radiatorlack/Gummisack unbehandelt .....	44
Abbildung 53: Radiatorlack Nynas/Midel/Bio. 120°C .....	44
Abbildung 54: Gummisack vorne Midel/FR3/Biotemp .....	45
Abbildung 55: Gummisack hinten Midel/FR3/Biotemp .....	45
Abbildung 56: Gitterschnitt Kessellack (auf Kesselstahl) .....	45
Abbildung 57: Gitterschnitt Synturit (auf Trafoblech) .....	46
Abbildung 58: Farbvergleich Ungealterte Ölproben .....	48
Abbildung 59: Nynas ohne/mit Proben 140°C	
Abbildung 60: Becfluid ohne/mit Proben 140°C .....	49



Abbildung 61: Midel ohne/mit Proben 140°C	
Abbildung 62: FR3 ohne/mit Proben 140°C .....	49
Abbildung 63: Biotemp ohne/mit Proben 140°C .....	49
Abbildung 64: Nynas ohne/mit Proben 120°C	
Abbildung 65: Becfluid ohne/mit Proben 120°C .....	50
Abbildung 66: Midel ohne/mit Proben 120°C	
Abbildung 67: FR3 ohne/mit Proben 120°C .....	50
Abbildung 68: Biotemp ohne/mit Proben 120°C .....	51
Abbildung 69: Neutralisationszahl Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Probe .....	52
Abbildung 70: Verlustfaktor Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Probe .....	53
Abbildung 71: Spezifischer Widerstand Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Probe .....	54
Abbildung 72: Grenzflächenspannung Vergleich aller Öle bei 120°C/140°C und mit/ohne Probe .....	55
Abbildung 73: Nytro Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C .....	56
Abbildung 74: Becfluid Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C .....	56
Abbildung 75: Midel Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C .....	57
Abbildung 76: FR3 Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C .....	57
Abbildung 77: Biotemp Aluminium/Prepreg (Rohzustand)/Blindprobe 140°C .....	57
Abbildung 78: Wassergehalt Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe	59
Abbildung 79: Neutralisationszahl Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe .....	60
Abbildung 80: Durchschlagspannung Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe .....	61
Abbildung 81: Verlustfaktor Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe .	61
Abbildung 82: Spezifischer Widerstand Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe .....	62
Abbildung 83: Grenzflächenspannung Vergleich Prepreg Rohzustand/Aluminium/Blindprobe .....	63
Abbildung 84: Ölproben Cu mit Epoxidharz/Prepreg (ausgehärtet) – Reihenfolge: Blindprobe-Cu mit Epoxidharz-Prepreg (ausgehärtet) .....	64

Abbildung 85: Neutralisationszahl Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet/Blindprobe .....	65
Abbildung 86: Verlustfaktor Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet/Blindprobe .....	66
Abbildung 87: Spezifischer Widerstand Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet/Blindprobe .....	67
Abbildung 88: Grenzflächenspannung Vergleich Cu mit Epoxid/Prepreg ausgehärtet/Blindprobe .....	67
Abbildung 89: Alle Ölproben Gummisack/Radiatorlack. Reihenfolge: Blindprobe-Gummisack-Radiatorlack.....	68
Abbildung 90: Neutralisationszahl Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C .....	70
Abbildung 91: Verlustfaktor Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C .	71
Abbildung 92: Spezifischer Widerstand Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C.....	72
Abbildung 93: Grenzflächenspannung Vergleich Gummisack/Radiatorlack/Blindprobe 120°C .....	73
Abbildung 94: Spektren aller ungealterten Öle .....	74
Abbildung 95: UV/Vis-Spektren Nytro ohne (Blindprobe)/mit Proben bei 120°C .....	75
Abbildung 96: UV/Vis-Spektren Midel 7131 Alu/Prepreg Rohzustand/Blindprobe 140° .....	75
Abbildung 97: UV/Vis-Spektren FR3 Cu mit Epoxidharz/Prepreg.aus.gehärtet /Blindprobe140°C .....	76
Abbildung 98: IR-Spektren aller ungealterten Öle .....	77
Abbildung 99: Dibenzylparakresol (2,6-Di-tert-Butyl-4-Methylphenol) .....	77
Abbildung 100: IR-Spektren Nytro ohne/mit 140°C .....	79
Abbildung 101: Spektren Becfluid Aluminium/Prepreg (Rohzustand) 140°C.....	79
Abbildung 102: Spektren Biotemp Radiatorlack/Gummisack/Blindprobe 120°C .....	79

## Literaturverzeichnis

---

- <sup>1</sup>PAGGER, E.P.: Alternative Isolierflüssigkeiten im Vergleich zum klassischen Mineralöl, Dissertation, Graz 2013
- <sup>2</sup>JANY, S.: Alterungsverhalten von biologischen und synthetischen Transformatorölen, Diplomarbeit, Graz 2008
- <sup>3</sup>KOFLER, I.: Stabilitätsuntersuchungen an Transformatormaterialien, Diplomarbeit, Graz, 2007
- <sup>4</sup>[www.barth-gmbh.at](http://www.barth-gmbh.at), Datum des Zugriffs: 17.5.2015
- <sup>5</sup>BOCHE, T.: Isolierflüssigkeiten für Transformatoren Erfahrungen mit dem Einsatz von synthetischem und natürlichem Ester als Isolier-und Kühlflüssigkeit, Hamburg: VE L-ABB 11. Mai 2007
- <sup>6</sup>[www.positron.se/filer/BecFluid\\_9902.eng.pdf](http://www.positron.se/filer/BecFluid_9902.eng.pdf), Datum des Zugriffs: 4.3.2015
- <sup>7</sup>[www.midel.com](http://www.midel.com), Datum des Zugriffs: 2.2.2015
- <sup>8</sup>TENBOHLEN, S., SEIBOLD, R., KOCH, M.: Das Alterungsverhalten verschiedener Esterflüssigkeiten für Leistungstransformatoren; <http://www.uni-stuttgart.de>. Datum des Zugriffs: 5.4.2015
- <sup>9</sup>Wikipedia.org, Datum des Zugriffs: 10.4.2015
- <sup>10</sup>[www.cargill.com](http://www.cargill.com), Datum des Zugriffs: 4.6.2015
- <sup>11</sup>[www09.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/ab98a99b11328029c1257a250033a466/\\$file/48-54%20m222\\_DE\\_72dpi.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/ab98a99b11328029c1257a250033a466/$file/48-54%20m222_DE_72dpi.pdf), Datum des Zugriffs: 17.4.2015
- <sup>12</sup>[www.schullv.de](http://www.schullv.de) Datum des Zugriffs: 28.3.2015

- 
- <sup>13</sup>[www.chemgapedia.de](http://www.chemgapedia.de), Datum des Zugriffs: 20.2.2015
- <sup>14</sup>WERNER, M.: Das Betriebs- und Alterungsverhalten biologisch schnell abbaubarer Hydrauliköle, Dissertation, Aachen 2000
- <sup>15</sup>FISCHER, M., ARAGÓN J., PATIL J., TENBOHLEN, S.: Interpretation der Gas-in-Öl-Analysen von Leistungstransformatoren durch Einsatz von Fuzzy Logik mit dem Ziel einer präziseren IT-gestützten Zustandserfassung . Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Stuttgart, 2006
- <sup>16</sup>[www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com), Datum des Zugriffs: 4.2.2015
- <sup>17</sup>[www.hsu-hh.de](http://www.hsu-hh.de), Datum des Zugriffs: 5.4.2015
- <sup>18</sup>[www.chemie.de](http://www.chemie.de), Datum des Zugriffs: 27.12.2014
- <sup>19</sup>[wiki.polymerservice-merseburg.de](http://wiki.polymerservice-merseburg.de), Datum des Zugriffs: 2.2.2015
- <sup>20</sup><http://211.67.52.20:8088/xitong/bz%5CDIN-EN-ISO-2409-2007.pdf>, Datum des Zugriffs: 5.5.2015
- <sup>21</sup>[www.energy.siemens.com/hq/de/services/stromuebertragung/transformatoren-prueflabor/wassergehalt.htm](http://www.energy.siemens.com/hq/de/services/stromuebertragung/transformatoren-prueflabor/wassergehalt.htm), Datum des Zugriffs: 5.3.2015
- <sup>22</sup>[www.vaisala.com/](http://www.vaisala.com/), Datum des Zugriffs: 28.4.2015
- <sup>23</sup>KOCH, M.: Machbarkeitsstudie zur experimentellen Untersuchung der Online Bestimmung der Papierfeuchte in Leistungstransformatoren, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, 2004

- 
- <sup>24</sup>KOCH, M., KRÜGER, M., TENBOHLEN, S.: Moderne Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in Leistungstransformatoren, Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2008
- <sup>25</sup>[www.metrohm.de](http://www.metrohm.de), Datum des Zugriffs: 3.6.2015
- <sup>26</sup>[www.ipc.uni-jena.de/downloads/Lehre/Pharmazie/IAII/Praktikum/IAII\\_12\\_Karl-Fischer-Titration.pdf](http://www.ipc.uni-jena.de/downloads/Lehre/Pharmazie/IAII/Praktikum/IAII_12_Karl-Fischer-Titration.pdf), Datum des Zugriffs: 19.4.2015
- <sup>27</sup>[www.ifm.com](http://www.ifm.com), Datum des Zugriffs: 30.3.2015
- <sup>28</sup><http://www.uni-stuttgart.de>, Datum des Zugriffs: 14.5.2015
- <sup>29</sup><http://www.jbisscientific.com>, Datum des Zugriffs: 27.5.2015
- <sup>30</sup><http://www.ldw.de/service-diagnostik-tangens-delta-messung.html>, Datum des Zugriffs: 27.5.2015
- <sup>31</sup><http://www.chemgapedia.de>, Datum des Zugriffs: 22.4.2015
- <sup>32</sup><http://www.elektronik-kompodium.de>, Datum des Zugriffs: 25.3.2015
- <sup>33</sup>[http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/grenzfl\\_00228chenspannung.gloss.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/grenzfl_00228chenspannung.gloss.html), Datum des Zugriffs: 5.4.2015
- <sup>34</sup><http://www.energy.siemens.com/hq/de/services/stromuebertragung/transformatoren-prueflabor/grenzflaechenspannung.htm>, Datum des Zugriffs: 5.3.2015
- <sup>35</sup><http://www.energy.siemens.com/hq/de/services/stromuebertragung/transformatoren-prueflabor/neutralisationszahl.htm>, Datum des Zugriffs: 5.3.2015
- <sup>36</sup><http://www.energy.siemens.com/hq/de/services/stromuebertragung/transformatoren-prueflabor/durchschlagsspannung.htm>, Datum des Zugriffs: 5.3.2015

---

<sup>37</sup>[www.spektrum.de](http://www.spektrum.de), Datum des Zugriffs: 6.3.2015

<sup>38</sup>HESSE, M., MEIER, H., ZEEH, B.: Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie; Thieme Verlag, 6. Auflage; Stuttgart, New York; 2002

<sup>39</sup><http://analytik.pharmaziestudenten-hd.de/ir/theorie>, Datum des Zugriffs: 20.7.2015

<sup>40</sup>[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/methoden\\_I\\_7.xhtml](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/methoden_I_7.xhtml), Datum des Zugriffs: 20.7.2015

<sup>41</sup>[www.weidmann-solutions.cn/.../oil\\_the\\_four\\_rs.pdf](http://www.weidmann-solutions.cn/.../oil_the_four_rs.pdf), Datum des Zugriffs: 20.6.2015