

ELANTAS Technische Präsentationen

INDUCTICA Konferenz

Berlin 2008

Inhalt

Sicherheits- und Umweltaspekte bei der Verwendung von Tränkmitteln

Dr. Majdi Al-Masri: Diplom (1995) und Promotion (1998) in Polymerchemie an der Universität Hamburg. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für technische und Macromolekulare Chemie der Universität. Danach ESTA e. K. in Hamburg. Er trat bei ELANTAS Beck GmbH im August 2008 ein. Dr. Al-Masri ist Leiter des Imprägniermittellabors.

Die Bedeutung des Temperaturindexes und die Beziehung zur Wärmeklasse von Stoffen und Systemen

Gunther Baumgarten: geboren 1960, in Uetersen, Deutschland
1982 – 1986 Hamburg, Fachhochschulstudium, Abschluß Diplomingenieur Chemie
seit 1986 für ELANTAS Beck GmbH tätig, derzeitige Position: Leiter Meß- und Prüflabor,
Normungsaktivitäten national (Mitglied DKE) und international (Mitglied IEC, TC15-WG1)

Fortschritte in der Technologie der monomerenfreien ungesättigten Polyester

Michael Glomp: geboren 1971, Michael Glomp besuchte die Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg, Deutschland, Abschluß 2001 als Dipl. Ing. Verfahrenstechnik. In 2008 erreichte er den Abschluß Dipl. Wirtschaftsingenieur an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Magdeburg, Deutschland. Er trat 2001 bei ELANTAS Beck GmbH ein und startete im Bereich Anwendungstechnik. Derzeit ist Michael Glomp als Vertriebsingenieur für das Unternehmen tätig und verantwortlich für verschiedene Kunden in Europa.

BecFluid 9902 – eine neue Isolierflüssigkeit auf Esterbasis

Thomas Jonat: besuchte die Fachhochschule Hamburg, Abschluß 2000 als Dipl. Chemieingenieur. Im Zeitraum von 2000 bis 2003 war er verantwortlich für die technische Beratung von Wasseraufbereitungs- und Warmwasserbereitungsanlagen in Deutschland. Von 2003-2006 arbeitet er im Bereich Vertrieb obiger Anlagen in Niedersachsen. Seit 2006 ist Thomas Jonat für ELANTAS Beck GmbH tätig und ist verantwortlich für den Vertrieb von Imprägnierharzen und -lacken und die Isolier- und Kühlflüssigkeit BecFluid 9902 in Deutschland und Europa.

Alle Vorträge sind einzeln erhältlich und stehen auf unserer Homepage zum Download bereit.

www.elantas.com/beck

Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

Einleitung

Die Sekundärisolation von elektrischen Geräten wie Motoren und Transformatoren ist aus verschiedenen Gründen wichtig, zum Beispiel für die mechanische Stabilität, die elektrische Isolation und den Schutz der Spulenwicklung gegen Staub, Feuchtigkeit und Chemikalien. Dadurch lassen sich Leckströme und Kurzschlüsse vermeiden, so dass sichere und zuverlässige Elektroprodukte hergestellt werden können. Daher verwenden die Hersteller solcher Geräte diese Tränkmittel für die Sekundärisolation (SI) und wandeln sie mit Hilfe eines chemischen Härtingsprozesses um, in dessen Verlauf flüssige Stoffe zu einem festen duroplastischen Kunststoff werden. Die für diesen Zweck vorgesehenen Lacke oder Harze sind mehr oder weniger hoch reaktive Stoffe. Sie sind instabil und haben die Tendenz, sich in einen stabilen Zustand zu verwandeln. Diese Umwandlung kann spontan und heftig ausfallen. Solche Tränkmittel können entweder lösemittelhaltige Lacke oder aber Harze mit weniger Lösemitteln sein.

Neben den Risiken, die aus einer spontanen Reaktion resultieren, haben die Stoffe selbst auch ein bestimmtes Risikopotenzial. Dieses ist in den Material Sicherheitsdatenblättern (MSDS) beschrieben. Dieser Aufsatz soll zeigen, wo die Risiken liegen und wie sie minimiert werden können.

Risiken

Es gibt zwei konventionelle Klassen von SI-Stoffen, die zu Duroplasten gehärtet werden können.

Lacke: Sie enthalten Polymere, die normalerweise frei von Gefahrstoffen sind und die in einem Lösemittel gelöst sind. Lösemittel sind normalerweise die gefährlichen Komponenten von Lacken.

Harze: Harze sind der Definition nach 100%-Systeme, obwohl sie dennoch etwas Lösemittel enthalten. Harze werden sehr häufig für SI aus ungesättigtem Polyester verwendet. Sie bestehen aus einer Lösung aus polymerem ungesättigtem Polyester und einem Comonomer, welches diejenige Komponente ist, die das Gefahrenpotenzial bestimmt. Andere Harze sind Epoxidharze und Polyurethanharze und die zugehörigen Härtingsverbindungen, die häufig beide als Gefahrstoffe zu deklarieren sind.

Außerdem können inerte Füllstoffe weitere Substanzen wie Katalysatoren, Härter, Beschleuniger, Inhibitoren, Stabilisatoren und Additive für verschiedene Wirkungen enthalten. Alle diese Stoffe können möglicherweise ebenfalls als Gefahrstoffe klassifiziert sein. Relevante Informationen dazu sind im Allgemeinen im MSDS zu finden.

Je nach dem aktuellen Zustand der SI-Stoffe kann es verschiedene Arten von Risiken geben.

Herstellung

Risiken während der Herstellung dieser Stoffe sind nicht Gegenstand dieses Aufsatzes, weil sie in dem herstellenden Chemiewerk vermieden werden müssen, und der jeweilige Hersteller ist für die Elimination dieser Risiken verantwortlich. Außerdem ist der Chemikalienhersteller verpflichtet, Informationen über jegliche bekannten und erwarteten Risiken in Bezug auf die Stoffe zu liefern und darauf hinzuweisen, wie diese zu vermeiden sind.

Wie oben erwähnt können sich die Risiken und Gefahren je nach dem Zustand der Stoffe und nach der Art und Weise, wie sie gelagert und verwendet werden, unterscheiden.

Transport

Nach dem Herstellungsprozess muss das Produkt zum Kunden transportiert werden. Das geschieht meistens per Bahn oder Lkw. In diesem Fall entsteht die Hauptgefahr durch Kollisionen bei Verkehrsunfällen, bei denen die flüssigen Isolierstoffe durch Beschädigung der Behälter freigesetzt werden.

Da die meisten flüssigen Isolierstoffe einen Flammpunkt haben, besteht ein hohes Brand- oder sogar Explosionsrisiko. Außerdem besteht ein Gesundheitsrisiko für Menschen, die Hilfe leisten, zum Beispiel Mitglieder der Feuerwehr. Und schließlich gibt es große Risiken für die Umwelt, insbesondere für Oberflächengewässer und deren Bewohner (Mikroorganismen und Fische) sowie für das Grundwasser, insbesondere wenn es zur Wasserversorgung für die Menschen verwendet wird.

Es gibt viele behördliche Regelungen, Vorschriften und Gesetze, die sich mit dem Transport von gefährlichen Gütern befassen. Sie beginnen bei der Art der Behälter, den Begleitdokumenten und der Kennzeichnung von Behältern und dem Lkw und reichen über die Konstruktion und Überwachung des technischen Zustands der Lkws und deren Spezialvorrichtungen, spezielle Schulungen für Fahrer und Überwachung der Fahrzeiten mit Hilfe von speziellen, registrierten Geräten bis hin zu Regelungen zur Lenkung von Routen und Verkehrszeiten, wie z.B. die Vermeidung von Tunneln, die während der Hauptverkehrszeiten nicht durchfahren werden dürfen, hinaus. Bei schlechten Wetterbedingungen kann der Transport von Gefahrgütern sogar verboten werden. Es gibt auch behördliche Auflagen, nach denen bestimmte Substanzen nicht gemeinsam in gleichen Lkw transportiert werden dürfen, da sie bei einem Unfall zusammen reagieren könnten.

Alle diese Vorschriften dienen dazu, Unfälle zu vermeiden und die Folgen zu minimieren, falls trotz aller Sicherheitsvorkehrungen ein Unfall passiert.

Aber potenzielle Unfälle passieren nicht nur auf der Straße. Es gibt noch eine andere Gefahrenquelle: Das ist der verfrühte Beginn der Gelierung und Härtung des transportierten Stoffes. Unter warmen Wetterbedingungen und in warmen Regionen im Allgemeinen kann die Temperatur im Laderaum eines Lkws leicht 50 bis 60°C erreichen. Die Lagerzeit bei einer solchen Temperatur kann sehr kurz sein, und falls der Transport zu lange dauert, kann die Härtungsreaktion spontan einsetzen, auch ohne dass ein Härtemittel zugesetzt wird. Das ist sehr gefährlich, weil solche Reaktionen große Mengen an Wärme produzieren. Sie führen zu einem Anstieg des Drucks und schließlich dem Bersten des Behälters. Die aufgrund einer hohen Temperatur freigesetzten Dämpfe können toxisch sein und sich entzünden. Außerdem würden auch andere Behälter durch dieses Feuer erhitzt und könnten bersten. Daher müssen manche Produkte in gekühlten Lkws transportiert werden, oder alternativ ist der Transport während der Nacht vorzusehen.

Lagerung

Wenn der Stoff seinen Bestimmungsort erreicht hat, muss er normalerweise gelagert werden. Auch hier ist der verfrühte Beginn des Gelier- und Härteprozesses in den Behältern ein wesentliches Problem zu diesem Zeitpunkt. Die Gründe dafür sind die gleichen wie bei der Reaktion, die im Laufe des Transports eintreten kann. Deshalb sollte die Lagerung an einem kühlen Ort, möglichst weit entfernt von anderen entflammenden Stoffen erfolgen. Die vom Hersteller garantierte Lagerzeit kann durch kühle Lagerung verlängert werden. Eine Reduzierung der Umgebungstemperatur der SI-Stoffe während der Lagerung um 10°C kann die angegebene Haltbarkeitsdauer verdoppeln.

Es sollte immer auf die garantierte Lagerzeit geachtet werden, weil die Wahrscheinlichkeit für einen verfrühten Härtevorgang nach deren Ablauf von Tag zu Tag wächst. Deshalb sollten Stoffe mit abgelaufener garantierter Lagerzeit vom Lagerplatz entfernt und entsorgt werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Wahrscheinlichkeit für das oben für den Transport beschriebene Szenario wächst, mit viel schwerwiegenderen Folgen für die gesamte Fabrik. Daher ist die Regel „First in – First out“ konsequent zu befolgen. Da die meisten SI-Stoffe in flüssigem Zustand mehr oder weniger entflammbar sind, sind die Gefahren eines externen Feuers umso stärker, wenn diese Stoffe mit betroffen sind. Deshalb sollten sie an einem Ort gelagert werden, der außer Reichweite eines möglicherweise entstehenden Brandes ist. Das trägt auch dazu bei, die Ausbreitung eines im Harzlager entstandenen Feuers zu verhindern.

Anwendung

Die verfrühte Härtereaktion ist außerdem ein Risiko im Anwendungsstadium, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Ein Grund kann darin liegen, dass der Flüssigkeitsumschlag des Tränkbades zu gering ist, so dass die Gelierzeit möglicherweise so kurz geworden ist, dass die Topfzeit bei Umgebungstemperatur dadurch so verkürzt ist, so daß das gesamte Harz zu gelieren beginnt. Die Gründe für die Reduzierung der Gelierzeit könnten darin liegen, dass der Gehalt an Inhibitoren und Stabilisatoren stark herabgesetzt ist aufgrund der Tatsache, dass der Inhalt des Bades zu alt ist. Ein weiterer Grund für ein verfrühtes Härten können katalytische Effekte von Substanzen sein, die unabsichtlich in das Bad gelangen, zum Beispiel Blankkupfer, Kupferlegierungen wie z.B. Bronze und Messing, insbesondere in Form von feinen Spänen mit frischen Oberflächen. Außerdem kann Eisenoxid in der Form von Rost die Gelierung eines aktivierten ungesättigten Polyesterharzes beschleunigen.

Dem Risiko der Gelierung eines Tränkbades kann mit regelmäßigen Tests der Gelierzeit des Harzes begegnet werden. Es sollte ein Plan vorliegen, wie der Badinhalt durch Zugabe von Inhibitoren zu stabilisieren ist, ohne das Harz unbrauchbar zu machen. Die Hersteller dieser Harze können solche Pläne festlegen und dem Anwender den erforderlichen Inhibitor liefern.

Im Anwendungsstadium beruht das Brandrisiko auf möglichen externen Zündquellen. Da die Tränkmittel meistens einen Flammpunkt haben, ist es notwendig, die Dämpfe von den Lösemitteln oder Comonomeren abzuleiten, so dass in der Umgebung der Tränkanlage nicht die untere Explosionsgrenze erreicht wird. Außerdem sollten alle elektrischen Vorrichtungen der Tränkanlage selbst und in der Umgebung so ausgewählt werden, dass sie die Anforderungen der Vorschriften für Schutzsysteme zur Verwendung in potenziell explosiven Atmosphären einhalten.

Eine weitere Quelle für Funken, welche die Dämpfe eines Tränkmittels entzünden könnten, ist statische Elektrizität. Die Quelle für solche Funken kann unerwartet sein, zum Beispiel isolierende Gummisohlen von Schuhen, aber auch statische Elektrizität, die beim Auffüllen des Bades mit dem Harz erzeugt wird.

Besondere Beachtung ist dem Härteofen zu schenken. Das Lösemittel des Tränklackes oder Teile der Comonomere der ungesättigten Polyesterharze werden herausgezogen. Außerdem ist es hier wichtig, die Konzentration der Dämpfe unter der unteren Explosionsgrenze zu halten, um eine Explosion des Ofens zu verhindern. Das lässt sich durch einen kontinuierlichen Austausch der erwärmten Luft erreichen, so dass die kritische Konzentration der entflammenden Substanzen nicht erreicht werden kann.

Bei der Anwendung von SI-Stoffen muss der Kunde mit dem Harz und auch den Hilfsprodukten wie Härtern und Beschleunigern umgehen. Deshalb sind auch diejenigen Gefahren zu beachten, die mit diesen Stoffen verbunden sind. Bei der Aktivierung eines ungesättigten Polyesterharzes mit einem Härtemittel – in den meisten Fällen ein Peroxid – und einem Beschleuniger – in den meisten Fällen ein Schwermetallsalz – ist es wichtig, diese beiden Komponenten niemals in konzentrierter Form in direkten Kontakt zu bringen. Die Aktivierung muss in der richtigen Reihenfolge erfolgen: Zunächst muss der Beschleuniger gründlich eingemischt werden, dann wird das Härtemittel hinzugefügt. Sollte einer dieser Stoffe verschüttet werden, ist unbedingt darauf zu achten, dass die Anweisungen im MSDS für die Aufnahme und Entsorgung der verschütteten Stoffe befolgt werden.

Außerdem gibt es ein Brandrisiko, wenn luft-trocknender Lack zur Imprägnierung verwendet wird. Wenn ein Stück Stoff mit einem solchen Stoff kontaminiert wird, kann sich dieses durch das oxidative Trocknen des Lackes von selbst entzünden, da es sich hierbei um eine exotherme Reaktion handelt, bei der genügend Energie freigesetzt wird, um das Stück Stoff zu entzünden. Bis zur endgültigen Entsorgung muss es entweder in einem gut verschlossenen Behälter oder sogar unter Wasser von Luft ferngehalten werden.

Gesundheitsrisiken

Beim Umgang mit Lacken oder Harzen und deren Hilfskomponenten kann es auch ein Gesundheitsrisiko durch direkten Kontakt mit diesen Substanzen geben. Diese sind ebenfalls im MSDS beschrieben. Die Substanzen können von der Haut absorbiert werden, ohne dass sie Schaden nehmen, während die Substanzen jedoch die Haut schädigen können. Es kann zu direkten toxischen Wirkungen oder toxischen Wirkungen nach Ansammlung durch langfristigen Kontakt kommen. Die Aufnahme kann durch Einatmen oder durch direktes Verschlucken erfolgen. Der erste Fall kann beim Rauchen einer Zigarette passieren, die mit kontaminierten Fingern gehalten wird, letzterer Fall kann vorkommen, wenn an dem Ort, wo diese Stoffe gehandhabt und verwendet werden, gegessen oder getrunken wird. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, solche Stoffe niemals in Flaschen oder Behälter zu füllen, die normalerweise für Getränke verwendet werden. Und jeder Behälter, jedes Fass und jede Flasche muss unverzüglich richtig etikettiert werden. Ein Vertauschen solcher Substanzen kann katastrophale Folgen haben.

Ein Gesundheitsrisiko, das durch viele Substanzen verursacht wird, - gut bekannt dafür sind Epoxidharze – ist die Sensibilisierung und Allergieauslösung. Deshalb ist ein direkter Kontakt mit solchen Substanzen zu vermeiden.

Risiko für die Umwelt

Das Risiko einer Kontamination der Umwelt existiert nicht nur während des Transports und der Lagerung, sondern auch während des Handhabungsprozesses, zum Beispiel durch Verschütten des Produkts. Das kann sowohl zu einer Kontamination des Bodens als auch des Grundwassers führen. In dieser Hinsicht müssen wasserlösliche Lacke mit besonderer Vorsicht behandelt werden. Sie können leicht in den Boden eindringen, bis sie das Grundwasser erreichen, weil sie in Wasser löslich sind. Von dort aus werden sie möglicherweise über lange Entfernungen weiter getragen. Regen trägt dazu bei, den Stoff in das Grundwasser zu waschen, aber auch in Oberflächengewässer wie Flüsse und Seen. Von großer Bedeutung ist, ob die Stoffe toxische Wirkungen auf die Organismen im Wasser haben oder ob sie biologisch abbaubar sind.

Eine weitere Möglichkeit der Kontamination betrifft die Atmosphäre. Lacke enthalten etwa 50% flüchtige organische Substanzen (VOC). Diese VOCs sind normalerweise entflammbar und toxische Verbindungen. Der weltweite Verbrauch von Lacken für sekundäre elektrische Isolationen beträgt etwa 40.000 t/Jahr. Das bedeutet, dass 20.000 Tonnen VOC während des Tränkvorgangs freigesetzt werden. Ungesättigte Polyesterharze, die im Erwärmungsprozess erhitzt werden müssen, emittieren etwa 20% an Comonomeren durch Verdampfung. Bei einer jährlichen Verwendung von 20.000 Tonnen weltweit für elektrische Isolationszwecke werden pro Jahr 4.000 Tonnen VOCs freigesetzt. Insgesamt können pro Jahr potenziell 24.000 Tonnen VOCs weltweit freigesetzt werden. Um die Kontamination der Atmosphäre mit diesen VOCs zu verhindern, müssen die beim Tränkvorgang erzeugten Emissionen dekontaminiert werden, entweder durch thermische oder durch katalytische Oxidation zu Kohlendioxid und Wasser.

Zukünftige Möglichkeiten zur Reduzierung von Risiken

Es gibt Möglichkeiten, die Risiken, die mit der Imprägnierung von elektrischen Maschinen zur Bildung einer SI verbunden sind, zu reduzieren. Einige SI-Hersteller haben erfolgreich ungesättigte Polyester entwickelt, die keine Comonomere für die Bildung von Duroplasten benötigen. Diese monomerenfreien (MF) ungesättigten Polyester sind gering viskose Polymere ohne jegliche Monomere oder VOCs. Sie sind als nicht gefährliche Stoffe deklariert, mit umfangreichen Folgen. Es gibt keine Transport- und Lagerprobleme. Es gibt keine Brandgefahr, weil sie keinen Flammpunkt haben, der unter der Zersetzungstemperatur liegt. Deshalb muss kein Explosionsgrenzwert beachtet werden. Aufgrund der besonderen Härtungsmechanismen gibt es praktisch kein Risiko einer verfrühten Gelierung und Härtung, auch bei Temperaturen bis zu 50 und 60°C. Und es gibt keine signifikanten Gesundheitsrisiken bei der richtigen Handhabung dieser Harze.

Trotzdem enthalten die MSDS Anweisungen, dass ein Verschütten vermieden werden muss. Der Grund dafür ist, dass in Europa jedes Verschütten von flüssigen Chemikalien einen Bodenaustausch als Konsequenz erforderlich macht. Und bei der Handhabung dieser Ersatzstoffe ist es notwendig, die gleichen Handschuhe und Sicherheitsbrillen zu tragen, wie es bei der Handhabung anderer Chemikalien der Fall ist.

Während des Härtevorgangs werden zwischen 1% und 5% dieser Harze als Dämpfe freigesetzt. Diese Dämpfe sind teilweise VOCs. Sie resultieren aus der Tatsache, dass jeder organische Stoff in gewissem Maße beim Erwärmen zersetzt wird, insbesondere, wenn er eine Sauerstoffdonatorkomponente wie Peroxid enthält. Die Menge und die Zusammensetzung dieser Dämpfe sind abhängig von den Härtungsbedingungen und der Konstruktion der elektrischen Maschine. Für Standardbedingungen ist die Zusammensetzung dieser Dämpfe bekannt.

Schlussfolgerung

Die Auflistung der Risiken und Gefahren bei der Verwendung von Stoffen zur Sekundärisolation kann zu dem Eindruck verleiten, dass deren Verwendung sehr gefährlich ist. Wenn die in den MSDS beschriebenen Anweisungen sowie die Vorschriften und Gesetze nicht beachtet werden, kann dieser Eindruck zutreffen. Nichtsdestotrotz arbeiten die Hersteller von Lacken und Harzen hart daran, diese Gefahren zu reduzieren. Bekannte Risiken können vermieden werden. Um die Sicherheit zu verbessern, suchen die Hersteller von Harzen nach neuen Möglichkeiten zur Reduzierung des Risikopotenzials in den heute verwendeten Stoffen und haben unterschiedliche Erfolge bei der Erreichung dieses Ziels.

1 Temperaturindex

Auf Datenblättern für Elektroisierstoffe sind viele interessante Zahlenwerte angegeben. Einer davon ist der Temperaturindex. Der Temperaturindex wird als Ziffer ohne jede Einheit und häufig ohne weitere Erklärung angegeben. In diesem Beitrag sollen die verschiedenen Arten von Temperaturindizes und die Beziehung zu den Wärmeklassen von Stoffen und Systemen erörtert werden.

1.1 Theorie

Um die Theorie des Temperaturindex (TI) zu verstehen, müssen zunächst einige Ausgangspunkte geklärt werden:

- Die Zersetzung der elektrischen Isolation ist der Faktor, welcher die Lebensdauer des elektrischen Gerätes begrenzt.
- Die Zersetzung folgt den kinetischen Regeln einer chemischen Reaktion.
- Nahezu alle Zersetzungsreaktionen von Elektroisierstoffen folgen einer chemischen Reaktion erster Ordnung oder pseudo-erster Ordnung.
-

Alle Reaktionen erster Ordnung ergeben eine Gerade in einem Diagramm aus log Zeit und reziproker absoluter Temperatur.

Das erlaubt uns, Vorhersagen hinsichtlich des Verhaltens eines Stoffes basierend auf Temperatur und Zeit zu treffen.

1.2 Eigenschaften, die einen TI beeinflussen

Das allgemeine Problem ist die Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeit der Zersetzungsreaktion. In den meisten Fällen ist es unmöglich, die Konzentrationen der Komponenten zu bestimmen. Um dieses Problem zu lösen, werden festgelegte Testverfahren und definierte Endpunktkriterien verwendet.

Es werden verschiedene Temperatur-Zeit-Daten ermittelt und in ein Diagramm aus log Zeit und reziproker absoluter Temperatur eingetragen. Anschließend wird eine Regressionslinie berechnet, und die Linie wird auf eine definierte Zeit extrapoliert.

1.2.1 Testverfahren

Das Testverfahren muss die Hauptbeanspruchung eines Isolationsstoffes während der Lebensdauer widerspiegeln. Die üblichen Hauptbeanspruchungen sind Spannungsbeanspruchung oder mechanische Beanspruchung.

Beispiel: Verwendungszweck: Drahtlack – Testverfahren: Prüfspannung

1.2.2 Endpunktkriterien

Die Endpunktkriterien sollten den Grad an Zersetzung widerspiegeln, der für den Isolationsstoff akzeptabel ist.

Sehr häufig wird ein Wert von 50% des Anfangswerts verwendet, aber es sind auch viele feste Werte in Gebrauch.

1.2.3 Extrapolationszeit

Die Extrapolationszeit sollte die beabsichtigte Nutzungsdauer des Gerätes sein.

Beispiele:

Für eine elektrische Maschine wird häufig ein Wert von 20.000 h verwendet, das sind etwa zwei Jahre und drei Monate.

Aber es gibt auch andere Möglichkeiten, je nach Verwendung des Gerätes.

Eine Kaffeemühle läuft in einem Zeitraum von 20 Jahren insgesamt etwa 50 h.

Der Generator eines Autos wird im Laufe seines Lebens für etwa 3000 h verwendet. In der gleichen Zeit wird der Anlasser weniger als 50 h gebraucht.

Auf der anderen Seite muss der Transformator oder Generator eines Kraftwerkes mehr als 25 Jahre laufen, das sind etwa 200.000 h.

1.3 Zusammenfassung

Ein Temperaturindex ohne weitere Erklärungen ist nutzlos.

Es gibt nicht den einen Temperaturindex für einen Stoff, sondern es können beliebig viele TIs festgelegt werden.

Folgendes ist wichtig zu wissen:

- Welches Testverfahren wurde verwendet, und reflektiert dieses Verfahren die Hauptbeanspruchung?
- Entspricht das Endpunktkriterium den Anforderungen meines Gerätes?
- Wie lang ist die aktive Zeit eines Gerätes während seiner Lebensdauer, und spiegelt sich das in der Extrapolationszeit wider?

Das kann nur von den Herstellern des Gerätes beantwortet werden, aber die meisten TIs werden von den Herstellern der Stoffe erstellt.

Um dieses Problem zu lösen, gibt die IEC 60216-2 [1] allgemein akzeptierte Testmethoden und Endpunktkriterien für Stoffe und deren Verwendungszweck an.

In der IEC 60216 wird eine Extrapolationszeit von 20.000 h verwendet, falls nichts anderes angegeben ist.

2 Wärmeklasse

Die Wärmeklasse stuft einen Stoff oder ein System in einen gegebenen Temperaturbereich ein. Sie ist immer mit dem beabsichtigten Verwendungszweck des Stoffes und der Hauptbeanspruchung für den Stoff verknüpft.

2.1 Wärmeklasse eines Stoffes

Die Wärmeklasse eines Stoffes entspricht dem numerischen Wert der empfohlenen maximalen Temperatur bei Dauernutzung in Grad Celsius. Die Stoffe werden in Gruppen mit definierten Temperaturbereichen eingestuft.

2.2 Wie man vom Temperaturindex zur Wärmeklasse eines Stoffes gelangt

Zunächst muss der Verwendungszweck des Stoffes geklärt werden. Mit diesem Wissen ist es möglich, nach einem allgemein akzeptierten Testverfahren und nach allgemein akzeptierten Endpunktkriterien zu suchen.

Sollte es kein allgemein akzeptiertes Verfahren geben, müssen sich Lieferant und Käufer nach ihrem besten Wissen und ihrer Erfahrung auf ein Verfahren einigen.

Der nach einem Test des thermischen Langzeitverhaltens ermittelte TI wird in eine der in IEC 60085 [2] definierten Wärmeklassen eingestuft.

Tabelle 1 – Wärmeklassen nach IEC 60085

Temperaturindex	Wärmeklasse
≥90 <105	90
≥105 <120	105
≥120 <130	120
≥130 <155	130
≥155 <180	155
≥180 <200	180
≥200 <220	200
≥220 <250	220
≥250 <275	250

Falls es bereits etablierte Materialien für den beabsichtigten Verwendungszweck gibt, für welche Felderfahrungen vorliegen, sollte das Verfahren nach IEC 60216-5 [3] angewendet werden, um einen neuen Stoff in Verbindung mit einem bereits etablierten zu klassifizieren.

2.3 Wärmeklasse eines Systems

Zunächst muss der Verwendungszweck des Isoliersystems geklärt werden. Allgemeine Überlegungen, wie ein System zu testen ist, sind der IEC 60505 [4] zu entnehmen.

Für Systeme im Bereich von drehenden Maschinen oder Transformatoren können Systemtests nach IEC 61857-21 [5] verwendet werden.

Der Versuchsaufbau selbst ist wie beim TI-Versuch. Es werden verschiedene Temperatur-Zeit-Daten ermittelt und in ein Diagramm aus log Zeit und reziproker absoluter Temperatur eingetragen. Es wird eine Regressionslinie berechnet. Anschließend wird ein Zahlenwert entsprechend einem TI berechnet, und der TI wird in eine der Wärmeklassen eingestuft.

:

2.4 Beziehung zwischen der Wärmeklasse eines Stoffes und der eines Systems

Es gibt keine direkte Beziehung zwischen der Klasse eines Stoffes und dem Verhalten dieses Stoffes in einem System.

Laut IEC 60085 wird die Klasse eines Stoffes durch Tests des thermischen Langzeitverhaltens nach der Anweisung in IEC 60216 bestimmt, und die Klasse eines Systems wird durch Systemtests nach Anweisung in IEC 60505 ermittelt.

Der Hauptgrund, warum die Wärmeklasse eines Stoffes nicht für ein System verwendet werden kann, liegt in chemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten eines Systems während der Herstellung und der Verwendung. In der Praxis sind positive wie negative synergetische Effekte zu beobachten.

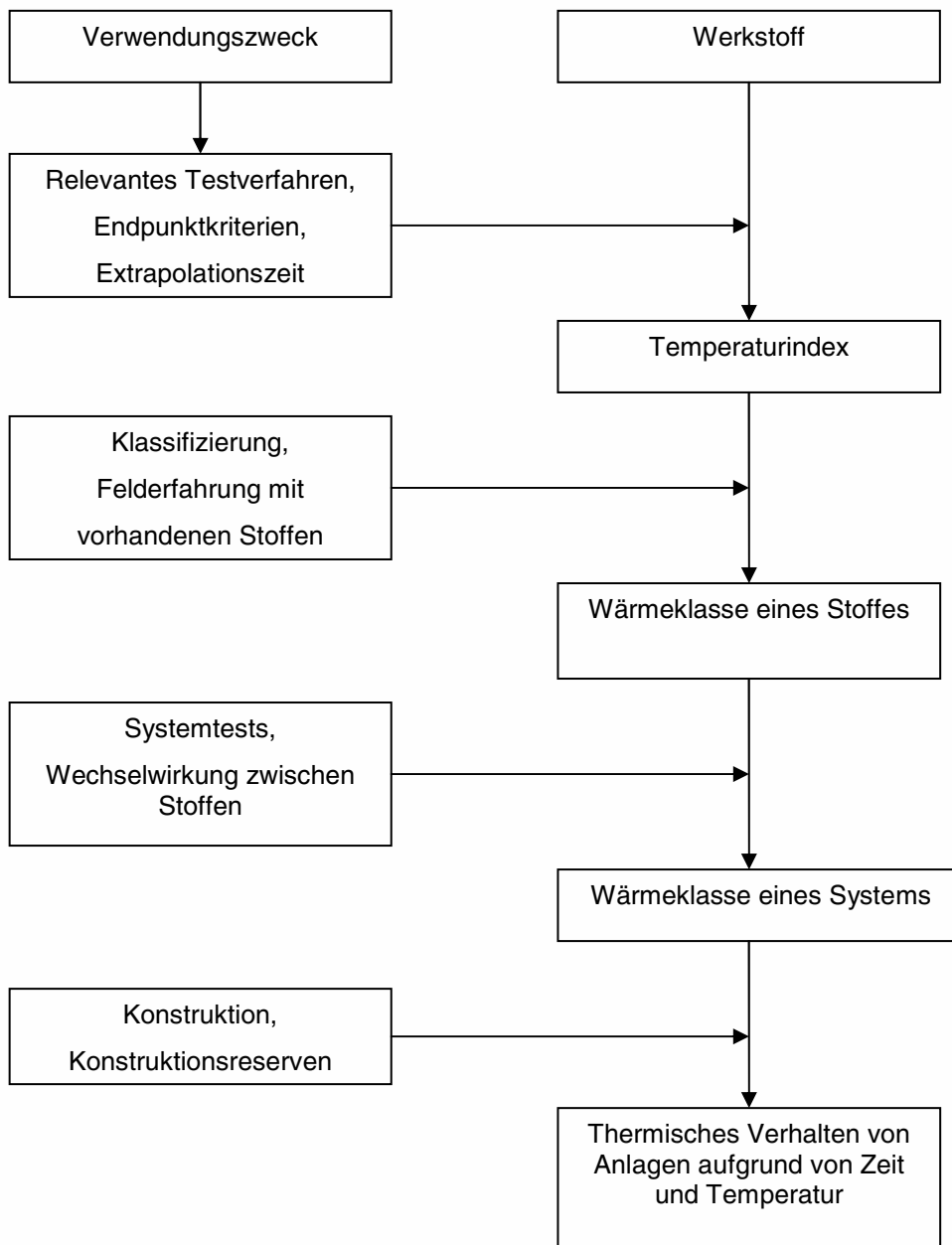
Ein Stoff der Klasse 155 kann ohne Probleme in Systeme der Klasse 180 passen. Auf der anderen Seite, wenn Stoffe von unerfahrenen Konstrukteuren von Geräten ausgewählt werden oder unbekannte Inkompatibilitäten auftreten, können sogar Stoffe der Klasse 200 in Systemen der Klasse 180 versagen.

3 Einfluss der Konstruktion auf die Lebensdauer eines Gerätes

Der letzte Schritt in dieser Erörterung betrifft die Beziehung zwischen etablierten und getesteten Systemen und der realen Konstruktion einer Anlage oder Maschine.

Die Korrelation zwischen Systemen und realen Anlagen basiert auf etablierten und konservativen Konstruktionen. Wird eine ungewöhnliche Konstruktion verwendet oder wird eine Anlage bis zu ihrer technisch möglichen Grenze getrieben, kann diese Korrelation ungültig werden. In einem solchen Fall muss die Anlage selbst getestet werden.

4 Schlussfolgerung



5 Literatur

- [1] IEC 60216-2 Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
Teil 2: Leitfaden zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisolierstoffen - Auswahl der Prüfmerkmale
- [2] IEC 60085 Elektrische Isolierung – Thermische Klassifizierung
- [3] IEC 60216-5 Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens –
Teil 5: Bestimmung des relativen thermischen Lebensdauer-Indexes (RTE) von Elektroisolierstoffen
- [4] IEC 60505 Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen
- [5] IEC 61857-21 Elektrische Isoliersysteme – Verfahren zur thermischen Bewertung –
Teil 21: Spezielle Bedingungen für Mehrzweckmodelle - Anwendungen bei Drahtwicklungen

Inzwischen wurden mehr als 10 Jahre Erfahrung in der Verarbeitung sowie der Verwendung von monomerfreien Tränk- und Träufelharzen auf Basis ungesättigter Polyester gesammelt. 10 Jahre, in denen neue Harze entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt wurden. Aber auch ein Zeitraum, in dem die relativ junge Produktgruppe zur Reife geführt wurde.

Gegenwärtig sind MF-Harze für alle Güter des elektrotechnischen Maschinenbaus in Verwendung. Anlass genug, in einem Rückblick die Entwicklung zu betrachten und neue Erkenntnisse zur Verarbeitung der Harze darzustellen.

Vor 30 Jahren...

Es war das Jahr 1978 als Dr. Günter Hegemann, der damalige Forschungsleiter für Tränk- und Träufelharze der Dr. Beck GmbH, Alternativen zum Styrol als gängigstes Monomer für ungesättigte Polyesterharze untersuchte. Er schloss mit dem Fazit ab, dass Ersatzstoffe existierten, letztendlich aber die Vorteile der Substitute von anderen, zum Teil schwerer wiegenden Nachteilen eliminiert werden. Die logische Konsequenz war die Entwicklung eines ungesättigten Polyesterharzes, in dem vollständig auf die Verwendung von Monomeren verzichtet wird. Trotz der abschließenden Erkenntnis dauerte es noch einige Jahre, bis diese entwickelt wurden.

In Kooperation mit der BASF Ludwigshafen wurde schließlich an der Umsetzung dieser Idee gearbeitet. Ihren erfolgreichen Abschluss fanden die gemeinsamen Forschungen im Jahr 1996, als das erste monomerfreie Tränk- und Träufelharz, Dobeckan[®] MF 8001, seine Marktreife erlangte und bestehenden Kunden vorgestellt wurde. Es traf umgehend auf großes Interesse infolge des milden Geruchs und der arbeitsphysiologischen Eigenschaften.

Die Bedenken gegenüber der sehr hohen Viskosität, die etwa 30.000 mPas betrug, verhalfen faktisch erst dem Nachfolger Dobeckan[®] MF 8001 NV zu einer weiten Verbreitung und noch immer anhaltenden praktischen Bedeutung. Mit einem Wert von 7.500 mPas konnte die Viskosität des Dobeckan[®] MF 8001 NV erheblich reduziert werden. Neue Möglichkeiten der Verwendung erschlossen sich.

Der erste kommerzielle Erfolg war Bestätigung der Einschätzung, dass monomerfreie Polyesterharze einen wesentlichen Anteil der gegenwärtigen und vielmehr der zukünftigen Nachfrage nach Tränk- und Träufelharzen befriedigen können. Weitere Entwicklungen schlossen sich an, die zum einen speziellen Anforderungen des Marktes entsprachen, zum anderen das Portfolio der monomerfreien UP-Harze vervollständigen sollten.

Mittlerweile bilden 6 Gruppen das Programm der monomerfreien Tränk- und Träufelharze. Tabelle 1 zeigt sie im Überblick.



Dr. Hegemanns Artikel zum Ersatz von Styrol erscheint in beck isolier technik, Ausgabe 53 aus dem Jahr 1978

Tabelle 1:

Name Dobeckan®	Beschreibung	Anwendung
MF 8001 NV	Polyester;	Statoren von Motoren und Generatoren
MF 8001 UV-2	Elastisches, umweltfreundliches Produkt für allgemeine Verwendungszwecke	Transformatoren
MF 8004	Polyesterimid Hartelastisches, umweltfreundliches Produkt für Anwendungen mit hoher maximaler thermischer und mechanischer Beanspruchung	Wechselstromerzeuger Servomotoren
MF 8044	Polyesterimid	Generatoren
MF 8044 UV	Hartelastisches, umweltfreundliches, hoch reaktives Produkt für Anwendungen mit hoher maximaler thermischer und mechanischer Beanspruchung	Elektrowerkzeuge Spezialanwendungen
MF 8005	Polyester; Elastisches, umweltfreundliches Produkt mit sehr geringer Viskosität für allgemeine Verwendungszwecke	Kleintransformatoren Universalantriebe
MF 8006	Polyesterimid Elastisches, umweltfreundliches, hoch reaktives Produkt für Anwendungen mit hoher maximaler thermischer und mechanischer Beanspruchung	Generatoren Transformatoren Spezialanwendungen
MF 86..	Polyester/Polyesterimid Hartelastisches, umweltfreundliches Produkt mit hervorragender Wärmeleitfähigkeit	Antriebe Generatoren

Viskosität und Eindringvermögen der MF Harze

Der Tatsache, dass auf die Verwendung der niedrigviskosen Monomere verzichtet wird, ist die höhere Viskosität der MF Harze geschuldet. Gerne wird diese Eigenschaft als Gegenargument für die Verwendung verwendet und oft mit einem schlechteren Eindringvermögen gleichgesetzt. Zunächst scheint die schlichte Abhängigkeit von Viskosität und Eindringvermögen auch plausibel, mitnichten aber ist das Eindringvermögen eines Harzes alleinig von dessen Viskosität abhängig. Vielmehr müssen weitere Eigenschaften Berücksichtigung finden, um das Verhalten beurteilen zu können.

Als kinetische Größe ist die Viskosität ein Maß für die Zähigkeit eines Fluids und entspricht dem Kehrwert des Fließvermögens. Eine höhere Viskosität bedeutet demnach eine höhere Zähigkeit, was wir als reduziertes Fließen wahrnehmen. Verursacht wird diese Eigenschaft durch einen lockeren Zusammenhalt der Moleküle des Fluids.

Dieser Zusammenhalt bringt einen Widerstand der relativen Verschiebung einzelner Teilchen entgegen, was auch als innere Reibung bezeichnet wird. Je größer die Moleküle des Fluids sind, desto höher ist auch dessen Viskosität. Monomere, wie beispielsweise Styrol, Diallylphtalat oder auch Diakrylate, sind im Vergleich zum polymeren Grundharz klein. Ihre Viskosität ist um ein vielfaches niedriger als das der Polymere.

Durch die größere Molekurbewegung bei höheren Temperaturen reduziert sich bei den meisten Flüssigkeiten die innere Reibung. Die Viskosität nimmt ab. Abb. 1 zeigt die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur am Beispiel des Dobeckan® MF 8044.

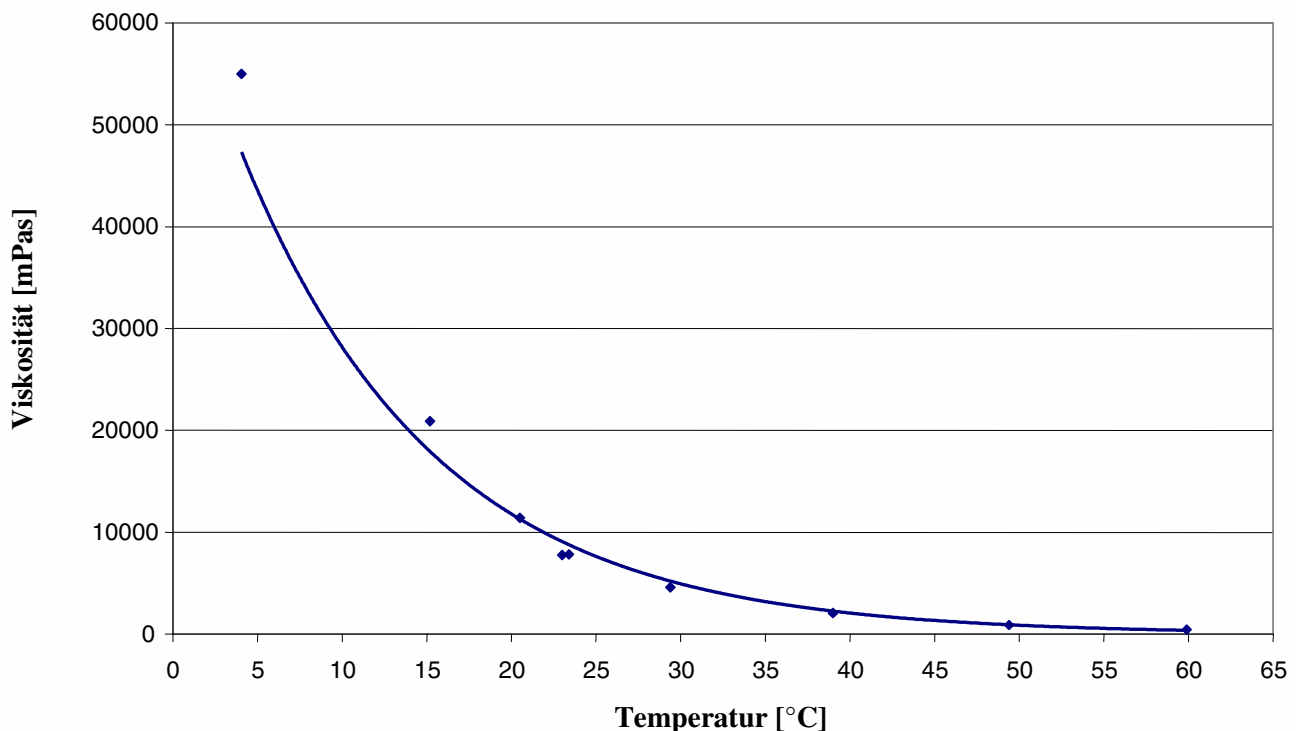


Abb. 1: Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur am Beispiel des Dobeckan® MF 8044

Harze dringen bei der Imprägnierung infolge zweier Mechanismen in die Struktur eines Wickelguts ein. Zunächst werden durch die relative Bewegung von Harz und Wickelgut sowie dem Bestreben des flüssigen Harzes, die energetisch günstigste Form zu halten, größere Öffnungen der Struktur geflutet. In feinen Kanälen, den Kapillaren, wird das flüssige Harz zudem entgegen der Schwerkraft nach oben gesaugt. Ursächlich für die als Kapillareffekt bezeichnete Erscheinung sind Grenzflächenspannungen zwischen der Flüssigkeit sowie der festen Oberfläche. Der Zusammenhang wird bei der Betrachtung der kapillaren Steighöhe deutlich:

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\varphi}{\rho g r} \quad \{1\}$$

h: kapillare Steighöhe	ρ: Fluiddichte
σ: (Oberflächen-) Grenzflächenspannung	g: Fallbeschleunigung
φ: Kontaktwinkel	r: Kapillarradius

Folglich hilft neben der Viskosität die thermodynamische Größe Oberflächenspannung in Verbindung mit dem Kontaktwinkel zur Beurteilung des Eindringvermögens eines Harzes.

In Versuchen des Anwendungstechnischen Labors der ELANTAS Beck GmbH ist das Eindringvermögen der monomerfreien Tränk- und Träufelharze im Vergleich zu herkömmlichen Systemen untersucht worden. An Standardobjekte zeigte sich die herausragende gute Penetration des Harzes. Entgegen der höheren Viskosität wurden selbst kleinste Kapillare der Wicklung vollständig gefüllt. Die Bestätigung dieser Beobachtungen sollte anhand eines einfachen Versuchs zur Messung der Steighöhe in einem variablen Kapillarspalt bei unterschiedlichen Temperaturen gefunden werden.

Für den Versuch sind zwei Glasplatten aufeinander gelegt und gegeneinander fixiert worden. An einer Seite der Platten wurde ein Draht mit 1 mm Durchmesser gelegt. Derart ergab sich zwischen den Platten ein Spalt, der vom Draht weg an Weite abnahm (vgl. Abb. 2). Zur Versuchsdurchführung wurden die Platten in einer definierten Tiefe in das Harz eingetaucht. Für die Bestimmung des Temperatureinflusses erfolgte die Versuchsdurchführung in einem Ofen, wobei erst nach dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts die Platten in das Harz getaucht wurden

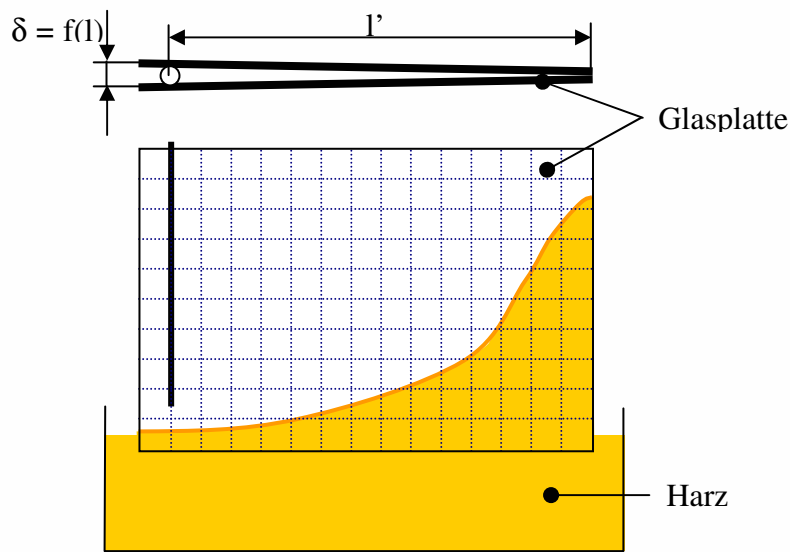


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Penetrationsverhaltens

Anhand des auf den Glasplatten angebrachten Rasters konnte die Steighöhe h in Abhängigkeit der Länge l abgelesen werden.

$$\delta(l) = l \cdot \frac{D}{l'} \quad \{2\}$$

δ : Spaltmaß
D: Referenzdurchmesser,
Drahtdurchmesser

l: Abstand zum
Referenzdurch-
messer
l': Horizontale
Spalllänge

Die Messergebnisse sind in dem folgenden Diagramm zusammengefasst.

Bild 3 zeigt sehr deutlich, dass die mit der Vorwärmung einhergehende Viskositätsabsenkung ein schnelleres Eindringen zur Folge hat. Der stationäre Endwert aber ist in etwa gleich. Deutlich können hier auch die Grenzen der Viskositätsenkung abgelesen werden. Bereits oberhalb von 60°C ist die Differenz vernachlässigbar.

Die Kurvenverläufe sind praktisch identisch. Demnach kann durch eine weitere Vorwärmung keine bessere Penetration erreicht oder der Eindringprozess beschleunigt werden.

Im Vergleich zu dem mit 250 mPas erheblich niedrig viskoserem Dobeckan® FT 2015/60 EK wird das zuvor gewonnene Bild bestätigt. Das Eindringvermögen des konventionellen Tränkeharzes ist zunächst besser, wobei eine Temperaturerhöhung auf 60°C zu einer geringfügig schlechteren Penetration führt, was in der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung begründet liegt. Bei 60°C weist das Dobeckan® MF 8044 eine Viskosität von 435 mPas auf, ist also noch immer zäher als das konventionelle Harz im Vergleich. Dennoch nähert sich die Kurve bis auf wenige Zehntel Millimeter schnell der des Dobeckan® FT 2015/60 EK bei gleicher Temperatur an.

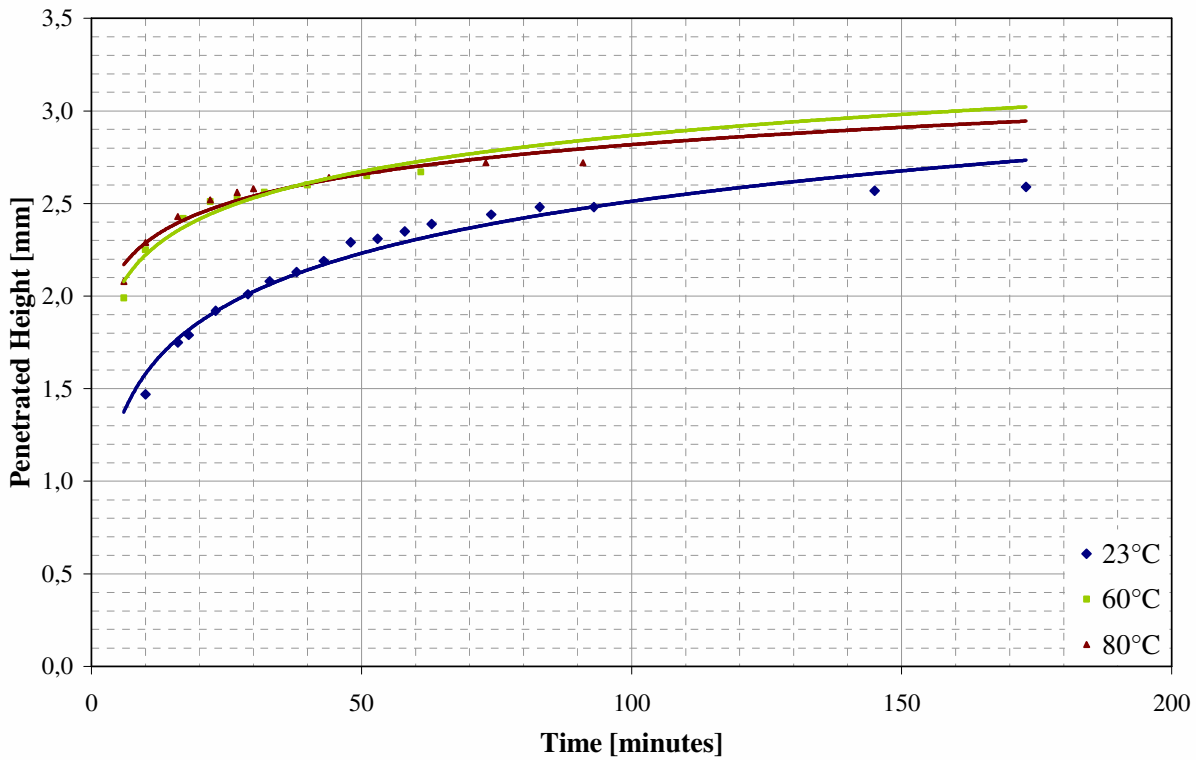


Abb. 3: Eindringtiefe in eine Nut von 1/55 mm Dobeckan® MF 8044 bei unterschiedlichen Temperaturen

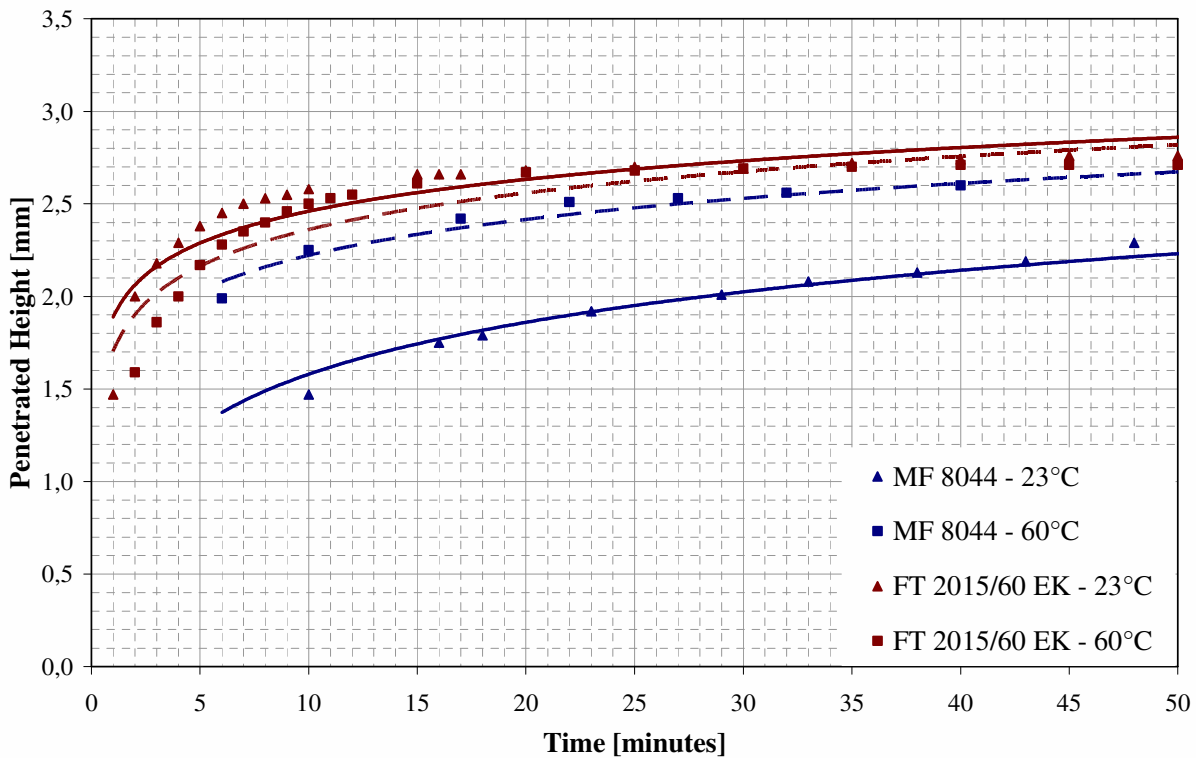


Abb. 4: Eindringtiefe in eine Nut von 1/55 mm Dobeckan® MF 8044 und Dobeckan® FT 2015/60 EK

Die Versuche zeigen, dass die ausschließliche Betrachtung der Harzviskosität für die Abschätzung des Eindringvermögens unzureichend ist. Unabhängig der zum Teil wesentlich höheren Viskositäten weisen die monomerfreien Harze dank der günstigen Oberflächenspannung und des wesentlich höheren Kontaktwinkels zu konventionellen Harzsystemen vergleichbare Penetrationseigenschaften auf.

Steigerung der Verarbeitungseffizienz

Den vorangegangenen Ausführungen zufolge erscheinen Objektvorwärmtemperaturen oberhalb von etwa 60°C als nicht sinnvoll. Dennoch werden in den Verarbeitungsrichtlinien zu den MF-Harzen Temperaturen, die zum Teil wesentlich höher liegen, empfohlen. Dies liegt in der Möglichkeit begründet, durch höhere Vorwärmtemperaturen einen energetisch effektiveren Prozess bei gleichzeitiger Steigerung der Objektqualität zu realisieren.

In der Anwendung konventioneller, monomerenhaltiger Systeme wird auf eine Objektvorwärmung im Allgemeinen verzichtet. Dies liegt in der leichten Flüchtigkeit gängiger Monomere sowie Bedenken hinsichtlich der Tränkbeckenstabilität begründet. Durch das Eintauchen heißer Bauteile werden große Mengen des Monomers verdunstet. Der resultierende Verlust muss durch Zugabe neuen Monomers ersetzt werden, um einen Viskositätsanstieg und Änderungen der Verarbeitungsbedingungen zu vermeiden. Die regelmäßige Harzkontrolle ist notwendig. Darüber hinaus neigen viele konventionelle Systeme zur fortschreitenden Polymerisation sobald die Reaktion gestartet ist. Diese Polymerisation erfolgt zunächst bei niedriger Geschwindigkeit, nimmt aber im weiteren Verlauf stetig zu. Es droht ein Gelieren des Reaktionsharzes im Tränkbecken. Die monomerfreien Tränk- und Träufelharze Dobeckan[®] MF weisen eine herausragende Stabilität auf. Eine Schädigung des Harzes ist in praktisch relevanten Prozessen selbst bei hohen Vorwärmtemperaturen nicht zu erwarten, womit erst die Möglichkeit der Heißtauchung und auch Gelierung unter Harz geschaffen ist.

Eine Vorwärmung der Objekte wirkt sich in mehrfacher Hinsicht positiv aus. Durch die bereits vorgewärmten Objekte wird weniger Zeit für deren Erwärmung im Härtingsofen benötigt. Wenn auch eine Abkühlung während des Tauchens auftritt, liegen die Objekttemperaturen noch immer höher als bei einer Imprägnierung ohne Vorwärmung. Das Harz vermag schneller zu reagieren. Höhere Harzaufnahmen bei gleichzeitig geringeren Abtropfverlusten werden in der Folge der schnelleren Reaktion erzielt. Bedeutender noch ist die Möglichkeit, das in die Wicklung eingedrungen Harz Angelieren zu lassen. Beim Gelieren werden als Quervernetzungen bezeichnete Brücken zwischen den ungesättigten Polyester-molekülen aufgebaut. Mit fortschreitender Reaktion entstehen immer größere Moleküle, was deutlich am Anstieg der Harzviskosität zu sehen ist. Das Fließvermögen des Harzes nimmt weiter ab und damit einhergehend verringert sich der Abtropfverlust im Härtingsofen. Der Anteil, der nicht als Abtropfverlust in Erscheinung tritt, ist als zusätzliches Harz in der Wicklung und verbessert die Eigenschaften der elektrotechnischen Maschine.

Das Optimum findet die Imprägnierung vorgewärmter Objekte in der Heißtauchung bei Erhalt der Bauteiltemperatur durch Stromerwärmung. Durch Varianz der Tauchtemperatur sowie der Tauchzeit ermöglicht dieses Verfahren die gezielte Steuerung der Harzaufnahme. Die dabei erzielte Imprägnierqualität kann mit der einer Tauchrollierung gleichgesetzt werden.

Das folgende Diagramm schlüsselt den Harzverbrauch bei unterschiedlichen Verarbeitungsbedingungen auf. Dargestellt werden die Abtropf- sowie Abdampfverluste im Vergleich zur im Bauteil verbleibenden Harzmenge nach der Härtung. Basis der Darstellung sind Versuche des Anwendungstechnischen Labors der ELANTAS Beck GmbH an einem 4poligen Stator der Baugröße 90. Die Imprägnierung erfolgte mit dem monomerfreien Tränk- und Träufelharz Dobeckan[®] MF 8044 sowie dem abtropfoptimierten Dobeckan[®] FT 1052/60 EK.

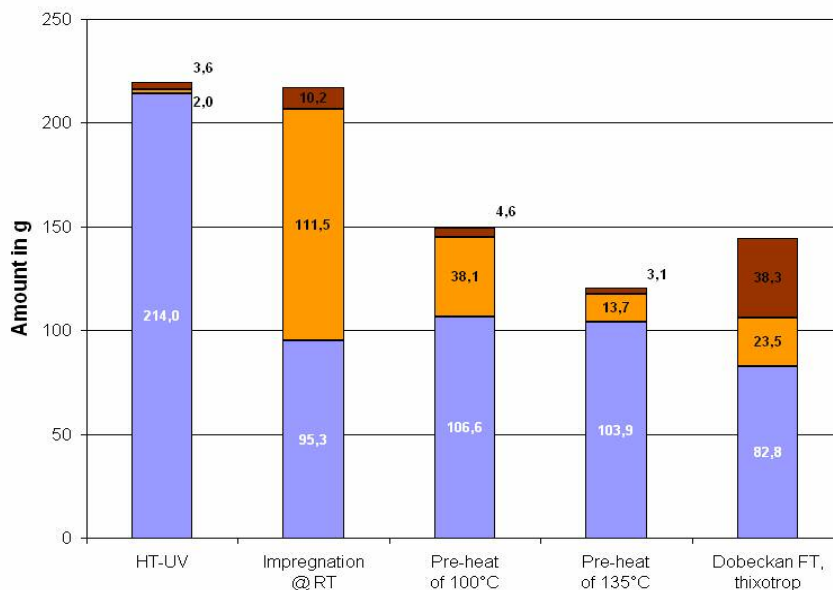


Abb. 5: Imprägniereffizienz verschiedener Methoden und Harze
(Dobeckan[®] MF 8044 und Dobeckan[®] FT 1052/60 EK)

Durch die Heißtauchung mit Gelierung unter Harz (HT-UV, linke Säule) ist es möglich, die Wicklung praktisch vollständig zu füllen. Dies führt zu erheblich verbesserter Wärmeabfuhr durch die Vermeidung von dämmenden Lufteinschlüssen. Messungen eines Kunden an einem Pumpenantrieb zeigten im Vergleich zur Träufelung mit einem styrolischen System, dass die Erwärmung des Stators mit 89°C zu 125°C bei der Träufelung trotz gleicher Leistung wesentlich niedriger ausfällt. Darüber hinaus ist die vollständig gefüllte Wicklung besser gegen mechanische Belastungen sowie der Verschmutzung durch äußere Medien geschützt.

Bei Raumtemperatur werden Harzaufnahmen erzielt, die der Imprägnierung mit konventionellen Systemen entsprechen. Mit der Erwärmung im Verlauf des Ofens wird das sehr gut eindringende Harz schnell in die Wicklung aufgenommen. Jedoch bedingt ein starker äußerer Auftrag hohe Abtropfverluste, so dass dieses Verfahren lediglich mit Dobeckan[®] MF 8005, dem niedrigviskosen monomerfreien Tränk- und Träufelharz interessant ist.

Bereits bei einer Objektvorwärmung auf 100°C reduziert sich der Abtropfverlust erheblich. Das bessere Eindringvermögen in Kombination mit einer schnelleren Gelierung reduziert den Gesamtverlust auf ein Maß unterhalb dessen eines konventionellen, abtropfoptimierten Harzes. Im Vergleich zeigt sich weiters die bessere Wicklungsfüllung.

Eine weitere Optimierung kann selbst bei vergleichsweise kleinen Motoren erreicht werden, wenn diese auf höhere Temperaturen vorgewärmt werden. Im Versuch sind Temperaturen von 135°C untersucht worden. Durch eine derartige Vorbehandlung der Objekte lassen sich geringere Umsätze bei höherer Harzaufnahme im gehärteten Objekt realisieren. Dieses Verfahren reduziert den Harzverbrauch drastisch ohne das eine Schädigung des Harzes in praktisch relevanten Anwendungen befürchtet werden muss.

Einleitung

Transformatoren ermöglichen einen effizienten Transport und die Verteilung von elektrischer Energie über lange Distanzen vom Kraftwerk zum Verbraucher. Die elektrischen Verluste im Transformationsprozess führen dabei zu einer Erwärmung des Eisenkerns und der Kupferwicklungen. Zur Abfuhr dieser thermischen Energie und zur Verbesserung der allgemeinen elektrischen Eigenschaften sind die meisten Transformatoren mit einer Kühl- und Isolierflüssigkeit gefüllt, in den meisten Fällen immer noch Mineralöl. In der langen Entwicklungszeit des Mineralöls gab es zwar viele Verbesserungen im Detail, aber die chemische Basis ist unverändert. Die grundlegenden Eigenschaften von Mineralölen sind immer noch die gleichen und lassen sich mit folgendem Satz beschreiben:

Mineralöl ist toxisch für lebende Organismen, fast überhaupt nicht biologisch abbaubar und gut brennbar. Diese Fakten führen zu sehr hohen Kosten im Falle eines Austritts von Mineralöl in die Umwelt und zu immensen, teilweise irreparablen Schäden im Ökosystem.

Im Falle eines Unfalles, der durch einen internen Kurzschluss oder durch externes Feuer ausgelöst werden kann, brennt das Mineralöl unter großer Rauchentwicklung sehr stark, was die Brandbekämpfung sehr schwierig und gefährlich macht, und die Schäden können nicht kalkulierbaren Folgen für alle Beteiligten und die Umwelt haben.

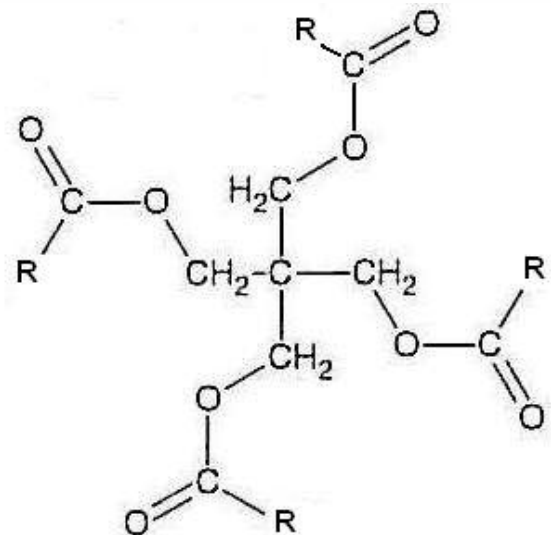
Neben diesem dramatischen Verhalten im Falle eines Fehlers gibt es auch noch andere bekannte Nachteile, wie korrosiven Schwefel, Schlamm Bildung und Wasserunlöslichkeit des Mineralöls im Transformator.

In Bezug auf diese Tatsachen gibt es in vielen Ländern mittlerweile Umweltvorschriften nicht nur in Schutzgebieten, weshalb alternativen Isolier- und Kühlflüssigkeiten eine immer höhere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

BecFluid 9902 - eine „neuartige“ Kühl- und Isolierflüssigkeit

Der erste Ersatz für Mineralöl in Transformatoren tauchte in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts auf mit der Einführung von chlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffen, die polychlorierten Biphenyle (PCB, Askarel). Der Einsatz dieser PCBs wurden verboten, weil im Brandfall hochgiftige Dioxine und Furane entstehen und die Umwelt enorm schädigen können; der erste schwere Unfall mit diesen Stoffen geschah in Seveso, Italien. Als Alternative zu den PCBs wurden in den 70er Jahren Silikon-Öle entwickelt, gefolgt von anderen synthetischen Flüssigkeiten wie z.B. Polyalphaolefinen (PAO) und Polyolestern (POE) in den 80ern, die einen sehr hohen Flamm- und Brennpunkt aufweisen und weniger Risiken für die Umwelt bergen.

BecFluid 9902 ist ein Polyolester auf der Basis von Pentaerythrit, das zur Verwendung für Verteilungs-, Leistungs- und Traktionstransformatoren sowie für die Hybridantriebstechnologie formuliert ist. Die einzigartigen chemischen und elektrischen Eigenschaften von BecFluid 9902 sowie die Umweltfreundlichkeit und Brandsicherheit sind sehr deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Mineralölen. Diese ausgezeichneten Eigenschaften sind seit über 30 Jahren bekannt, und von daher liegen schon sehr viele positive Erfahrungen mit dieser Kühl- und Isolierflüssigkeit vor.



Eigenschaften

a) Brandsicherheit

Der Flammpunkt ist als diejenige Temperatur definiert, bei welcher der Gleichgewichtsdampf über einer chemischen Substanz eine Konzentration erreicht hat bei der dieser Dampf von außen durch offenes Feuer, Lichtbogen o.ä. entzündbar ist. Am Brennpunkt ist der Dampfdruck eines Stoffes so hoch, dass ein Weiterbrennen des Dampfes möglich ist.

Im Vergleich zum Mineralöl hat BecFluid 9902 einen sehr hohen Flamm- und Brennpunkt und ist als Flüssigkeit der Klasse K zur Verwendung in Transformatoren klassifiziert. Sicherlich ist der hohe Brennpunkt vom synthetischen Ester der Hauptgrund für die Einstufung als schwer zu entflammende Flüssigkeit, aber weitere Ergebnisse von Brandversuchen mit Mineralöl und synthetischen Estern haben ferner gezeigt, dass die Esterflüssigkeiten sich zusätzlich auch langsamer erwärmen im Brandfall. Die niedrige Erwärmungsrate von BecFluid 9902 ist durch die hohe spezifische Wärmekapazität und die gute Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit bedingt. Wird Mineralöl einer Wärmequelle, wie z.B. einer Flamme, ausgesetzt, wird es nach relativ kurzer Zeit schwarz. Dies kann allgemein als Indikator für die thermische Zersetzung des Mineralöls zu schwer definierbaren Spaltprodukten betrachtet werden

Synthetischer Ester färbt sich erst nach einem erheblich längeren Kontakt mit einer Flamme nur leicht dunkel, was auf eine minimale Zersetzung hindeutet.

Ein anderer wichtiger Aspekt beim Brandverhalten eines Materials ist die Tendenz zur Erzeugung von Rauch und toxischen Gasen und der Eigenschaften der entstandenen Substanzen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Brandbekämpfung und die Fluchtmöglichkeiten haben. Aufgrund v.a. diesen Verhaltens wurden die ersten Mineralöl-Ersatzstoffe, die PCBs verboten. Sie produzieren im Brandfall dichten schwarzen Rauch, der große Anteile an korrosivem und ätzendem Chlorwasserstoff (HCl, Salzsäure) zusammen mit kleineren Mengen an hoch toxischen Dioxinen und Furanen enthält. Brandversuche mit synthetischen Estern haben gezeigt, dass beim Verbrennen von BecFluid 9902 keine toxischen Gase entstehen, von der chemischen Zusammensetzung vergleichbar mit Rauch eines Holzfeuers, wobei die Rauchemissionen minimal sind, deutlich geringer als bei Mineralöl und Askarel. Da BecFluid keine Chlorverbindungen enthält, können auch keine gefährlichen Chlorwasserstoffe oder Dioxine entstehen.

Synthetische Ester wie BecFluid 9902 wurden von Versicherungsgesellschaften und Brandbehörden getestet, und zur Verwendung in Transformatoren im Inneren von Gebäuden und anderen kritischen Bereichen ohne Notwendigkeit besonderer Feuerchutzvorkehrungen zugelassen.

	Einheit	BecFluid® 9902	Mineralöl
Flammpunkt	°C	274	160
Brennpunkt	°C	303	170
Spezifische Wärme	J / kg · K	1816	1860
Verbrennungswärme	kJ / g	36,8	46,0

Umweltschutz

In Zeiten immer stärkerer Umweltbelastung liegt es in unser aller Verantwortung, durch die Verwendung umweltfreundlicher Materialien die weitere Fortschreitung der Umweltzerstörung zu verhindern oder zumindest deutlich zu verlangsamen.

Die Befüllung von Transformatoren mit BecFluid 9902 ist eine bei weitem umweltfreundlichere Option gegenüber sowohl Mineralöl als auch Silikonöl.

BecFluid 9902 kann nach der Testmethode gemäß OECD 301 als leicht biologisch abbaubar eingestuft werden. Es erfüllt die dualen Kriterien sowohl was den biologischen Abbau zu mindestens 60% innerhalb von 10 Tagen nach Überschreiten einer Zersetzung von 10%, als auch den Abbau von mindestens 60% bis zum 28. Tag des Tests. Tatsächlich war das Produkt in den Tests nach dem 28. Tag zu 99% abgebaut.

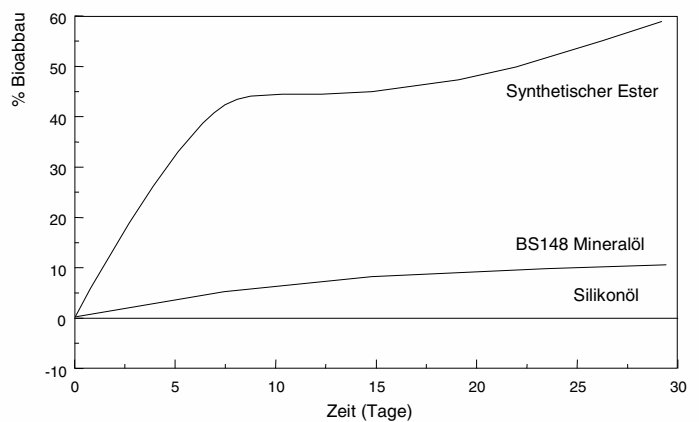
Für eine umweltfreundliche Transformatorenflüssigkeit ist es nicht nur wichtig, dass sie leicht biologisch abbaubar ist, sondern sie sollte auch in größeren Konzentrationen keine Gefahr für das Ökosystem darstellen. In Studien zur akuten Toxizität haben synthetische Ester keine Sterblichkeit oder andere auswertbaren toxischen Wirkungen auf Regenbogenforellen und Wasserflöhe gezeigt. In diesen Tests wurde ein Versuchsaufbau verwendet, der eine extrem hohe, praktisch nicht erreichbare Konzentration in einem Fließgewässer darstellen würde, und trotzdem gibt es durch BecFluid 9902 in diesem Fall kein akutes Risiko für das Ökosystem in Gewässern. Auch durch eine anhaltende allmähliche Freisetzung von Esterflüssigkeit aus einem undichten Transformator ist es nicht möglich so hohe Konzentrationen von BecFluid in Gewässern zu erreichen, dass Lebewesen in Gewässern zu Schaden kommen können.

Kläranlagen verwenden in den Becken mikrobiell belebten Schlamm zur Zersetzung organischer Materie im Abwasser. Einige Chemikalien können diese Mikroorganismen absterben lassen und zu einem vollständigen Stillstand des Abwasserbehandlungsprozesses führen. Das ist ein schwerwiegendes Problem für die Betreiber der Kläranlagen, und Abwasseraufbereitungsunternehmen haben daher in vielen Ländern Vorschriften für die Verursacher von industriellem Abwasser erlassen, die eine strafrechtliche Verfolgungen der Verursacher der nachgewiesenen Kontaminationen ermöglichen und sie mit unterschiedlichen, teilweise drastischen Strafen belegen. Mineralöle können die Abbauaktivität in diesen biologischen Kläranlagen reduzieren oder zum Erliegen bringen, indem das Mineralöl entweder die Mikroorganismen absterben lässt oder einen Ölfilm über dem Schlamm bildet, der den Sauerstoffaustausch verhindert und so den Abwasserzersetzungsprozess stoppen lässt.

Die Aktivität von Mikroben in belebtem Schlamm wird anhand ihrer Respirationsrate gemessen. Daher lässt sich das Verhalten von potenziell mikrobenschädigenden Chemikalien daran messen, wie der Prozess der Respiration verändert wird. In Versuchen, die in einem akkreditierten Labor durchgeführt wurden, zeigten sich bei synthetischem Ester bis zur maximal einstellbaren Konzentration keine Auswirkungen auf die Respirationsrate der Mikroorganismen im belebten Schlamm.

Aus diesen Versuchen kann der Schluss gezogen werden, dass BecFluid 9902 in Abwässern in keiner Konzentration ein Risiko für biologische Kläranlagen darstellt.

OECD 301D Test an synthetischem Ester, Mineralöl und Silikonöl



Aufgrund der zunehmenden Kontamination von Trink- und Grundwasser durch Industriechemikalien wurde 1976 ein Sonderausschuss gebildet, der das deutsche Innenministerium im Hinblick auf die Handhabung, den Transport, die Lagerung und die Verpackung von wassergefährdenden Stoffen berät. Die Aufgabe des Ausschusses bestand darin, den Begriff ‚wassergefährdende Stoffe‘ zu definieren und Verfahren zur Klassifizierung solcher Stoffe zu etablieren.

Auf der Grundlage der Ergebnisse von biologischen und toxikologischen Tests unterhält seitdem der Ausschuss ein Register validierter wassergefährdender oder nicht wassergefährdender Stoffe.

BecFluid 9902 ist in die Liste der „nicht wassergefährdenden“ Stoffe des Umweltbundesamtes aufgenommen worden.

BecFluid 9902 ist eine Kühl- und Isolierflüssigkeit für Transformatoren, die biologisch abbaubar ist, die nicht toxisch ist, die die Abbauaktivität von belebtem Schlamm in biologischen Kläranlagen nicht beeinträchtigt und die vom Umweltbundesamt als nicht wassergefährdend eingestuft wurde. Da Transformatoren auch in der Nähe von Flüssen, Kanälen, Seen, Wasserfreizeitanlagen, Kläranlagen oder anderen besonders schutzbedürftigen Umgebungen aufgestellt werden, lässt sich das Risiko einer Umweltverschmutzung mit Hilfe von BecFluid 9902 verhindern.

Feuchtigkeit

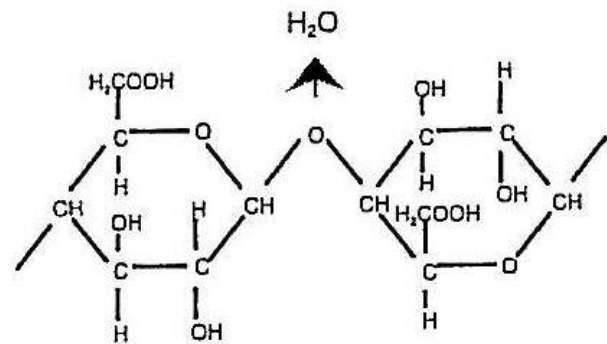
Die Anwesenheit von Feuchtigkeit in einem Transformator verschlechtert die Eigenschaften von Transformatoren durch dramatische Reduzierung sowohl der elektrischen Eigenschaften, wie z.B. die Durchschlagsfestigkeit, als auch der mechanischen Festigkeit der in den meisten Transformatoren verwendeten Papierisolationen. Das Risiko von Kurzschlüssen und damit häufig verbundenen Totalausfällen und Bränden steigt deutlich.

Mineralöle sind völlig unpolare Substanzen, was zu einer sehr geringen Wasseraufnahmefähigkeit führt und daher ist Wasser in mineralölgefüllten Transformatoren sehr kritisch. BecFluid 9902 als synthetischer Ester hat eine sehr viel größere Fähigkeit, Wasser auf chemische Weise zu absorbieren, ohne die dielektrischen Eigenschaften insgesamt zu beeinträchtigen.

Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass durch Verdopplung des Wassergehalts die mechanische Lebensdauer der Papier-Isolation eines mineralölgefüllten Transformators um die Hälfte reduziert wird. Die Rate der thermischen Alterung von Isolierpapier ist proportional zu seinem Wassergehalt, und da das Mineralöl praktisch kein Wasser aufnehmen kann, lagert sich das Wasser im Papier an, und katalysiert dadurch zusätzlich die Alterung der Isolation. Bei estergefüllten Transformatoren ist die Alterung der Papierisolation aufgrund der deutlich höheren Wasseraufnahmekapazität signifikant reduziert, was zu einer längeren Lebensdauer der gesamten Isolation führt.

Feuchtigkeit in einem Transformator kann z.B. aus der Umgebungsluft kommen, was sich nur bei Verwendung von hermetisch abgeschlossenen Transformatoren praktisch minimieren lässt. Die meisten Verteil- und Leistungstransformatoren sind aber aus Kostengründen frei atmend und durch wartungsintensive TrocknungsfILTER lässt sich der Wassereintritt auch nicht dauerhaft verhindern.

Wasser im Papier ist in vier möglichen Zuständen anzutreffen: Es kann von der Oberfläche adsorbiert, als Dampf gelöst, als freies Wasser in den Kapillaren und als absorbiertes freies Wasser vorkommen. Wasser katalysiert die Alterung von Zellulose und ist auch ein Endprodukt des Zelluloseabbaus, d.h. der Zerfall der Zellulose wird durch deren Abbauprodukt zusätzlich beschleunigt:



Das Papier enthält wesentlich mehr Feuchtigkeit als Mineralöl. Der Feuchtigkeitsgehalt der Zellulose und des Mineralöls folgt Gleichgewichtskurven, die in vielen technischen Publikationen dargestellt wurden, in Abhängigkeit von der Temperatur und allgemeinen Parametern des einzelnen Transformators.

Viele Transformatoren sind durch wechselnde Belastungen häufig nicht in dem anzunehmenden Gleichgewicht, d.h. an lokal begrenzten Zonen sind thermodynamische Ungleichgewichte vorhanden, die Störungen wie eine punktuelle Alterung der Isolation, hot spots oder sogar Kurzschlüsse begünstigen.

BecFluid 9902 erfüllt bis zu einem Wassergehalt von 400 ppm in Transformatoren immer noch die Spezifikationsanforderungen im Hinblick auf die dielektrischen Eigenschaften. Im Gegensatz dazu ist Mineralöl bereits bei mehr als 30 ppm Wassergehalt nicht mehr spezifikationskonform, und ein weiterer Betrieb nur unter erhöhtem Risiko möglich.

Bereits geringe Mengen Wasser in Mineralöl führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Durchschlagsspannung, im Gegensatz zum BecFluid 9902, dass selbst bei einem Feuchtigkeitsgehalt von mehr als 500 ppm eine hohe Durchschlagsspannung aufweist.

Sollte der Feuchtigkeitsgehalt die Höchstgrenze für den Betrieb des Transformators mit BecFluid 9902 überschreiten, so können die gleichen Verfahren und Geräte genutzt werden, die auch bei Mineralöl zum Entfernen der Feuchtigkeit zum Einsatz kommen.

Zusammenfassung

Zurückkommend auf das Hauptthema - wie die steigenden Kosten für elektrische Energie durch Verwendung von BecFluid 9902 als neue Isolier- und Kühlflüssigkeit auf Esterbasis in Transformatoren reduziert werden können - kann man folgendes feststellen:

- Die Betriebstemperatur der Transformatoren kann aufgrund des hohen Brennpunkts erhöht werden oder stärker schwanken.
- Die Elektrizitätsverluste durch den Transformationsprozess lassen sich verringern.
- Es sind keine besonderen Brandschutzmaßnahmen notwendig.
- Verluste und Beschädigungen von Transformatoren durch Brände können minimiert werden.
- Es gibt keine Beschränkungen aufgrund von Umweltschutzvorschriften.
- Die Verwendung und Lagerung der Esterflüssigkeit ist viel weniger gefährlich und dabei weniger Vorschriften zu beachten.
- Die Lebensdauer von Transformatoren lässt sich durch eine signifikant reduzierte Alterung der Isolation verlängern.
- Elektrische Fehler aufgrund des Feuchtigkeitsgehalts sind unwahrscheinlich.
- Ausfälle und Schäden bei Kaltstarts werden reduziert.
- Der Standby-Betrieb und die damit verbundenen Verluste bei niedrigen Temperaturen können verringert werden.
- Die Wartungs- und Überwachungskosten können gesenkt werden.
- BecFluid 9902 ist vollständig mit Mineralöl mischbar und kann zum Nachfüllen verwendet werden.

Die guten Erfahrungen mit synthetischem Ester seit nahezu 30 Jahren und die hervorragenden Eigenschaften sollten dazu veranlassen, BecFluid 9902 zu verwenden.