

ELANTAS Technische Präsentation

INDUCTICA Konferenz

Berlin 2008

Fortschritte in der Technologie der monomerenfreien ungesättigten Polyester

von Michael Glomp

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

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.

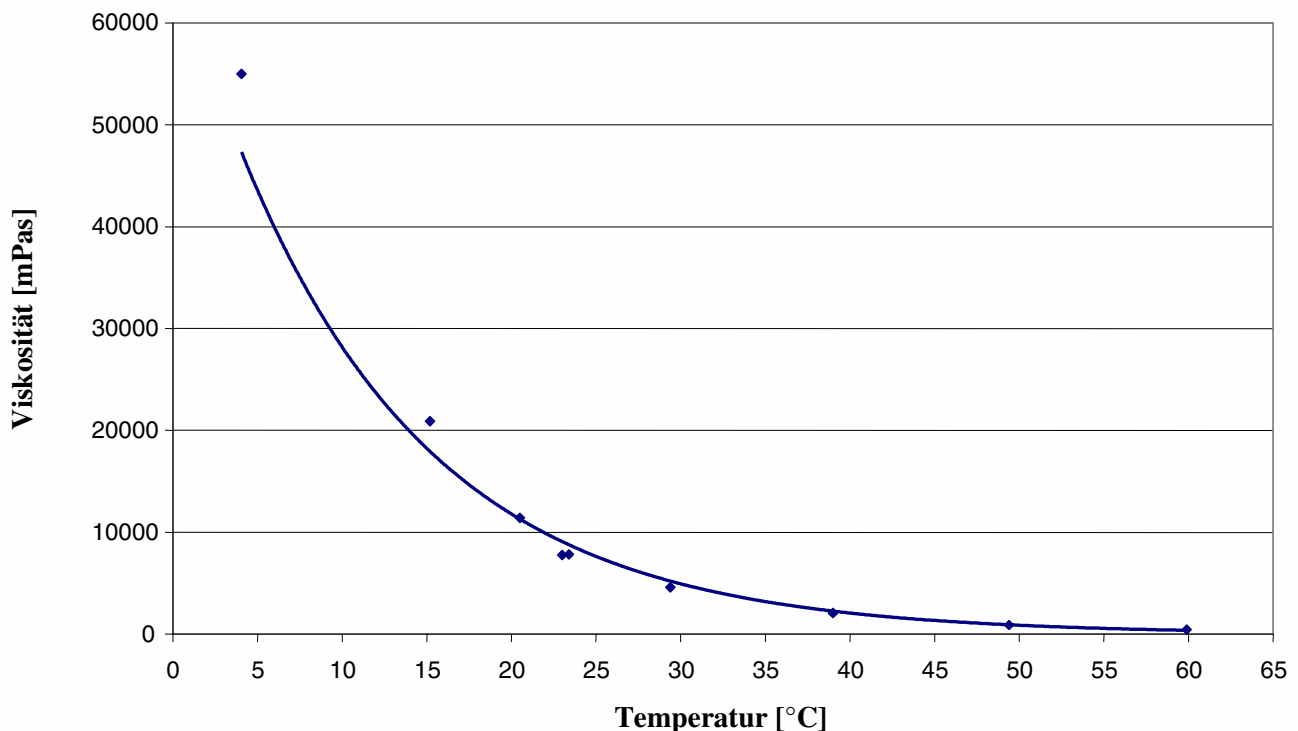


Abb. 1: Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur am Beispiel des Dobeckan® MF 8044

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

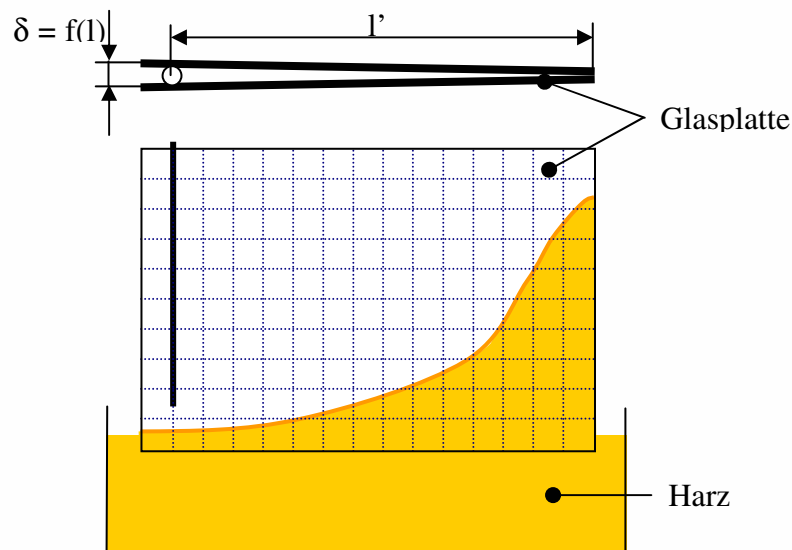


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Penetrationsverhaltens

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.

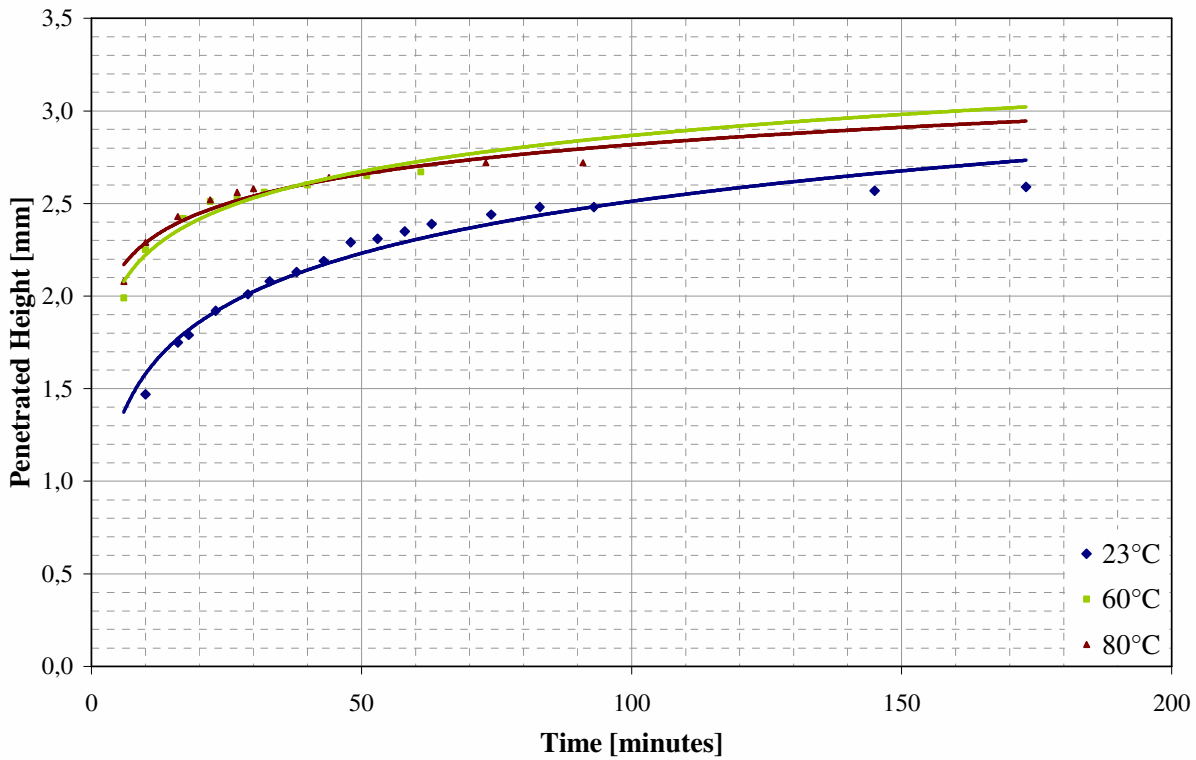


Abb. 3: Eindringtiefe in eine Nut von 1/55 mm Dobeckan[®] MF 8044 bei unterschiedlichen Temperaturen

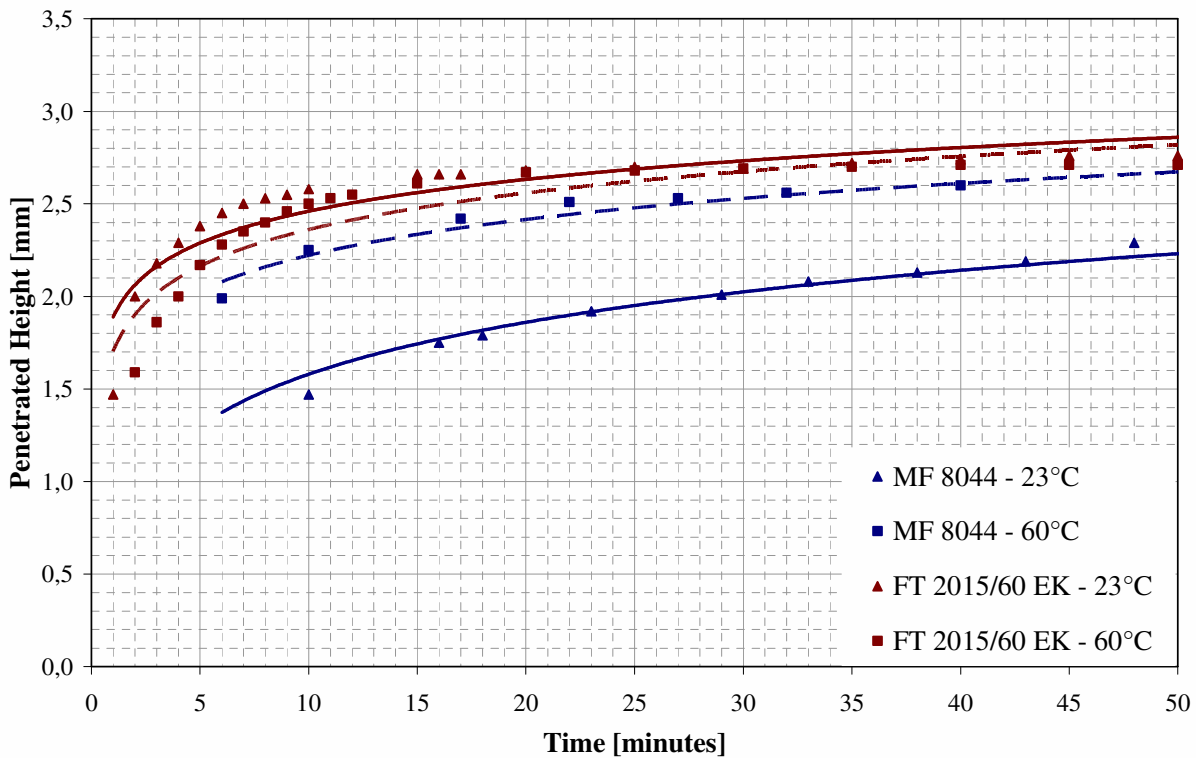


Abb. 4: Eindringtiefe in eine Nut von 1/55 mm Dobeckan[®] MF 8044 und Dobeckan[®] FT 2015/60 EK

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.

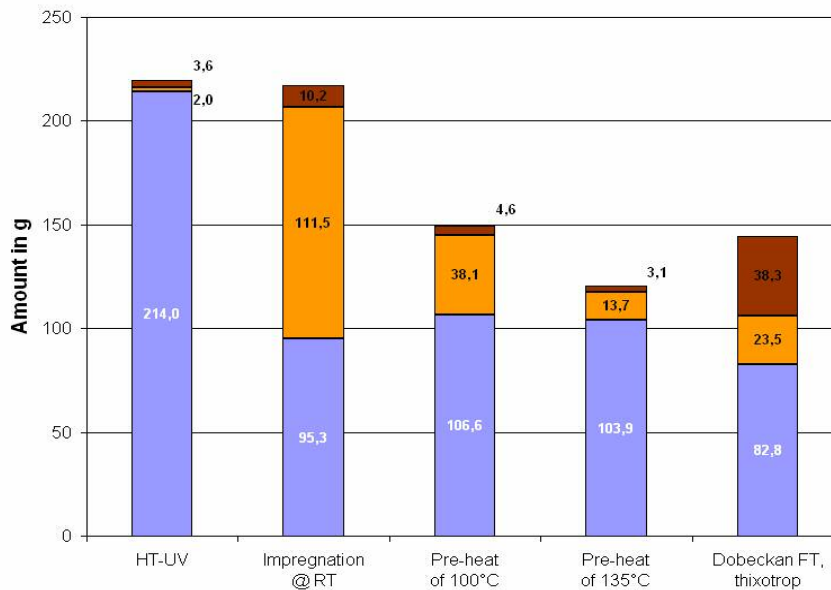


Abb. 5: Imprägniereffizienz verschiedener Methoden und Harze
(Dobeckan[®] MF 8044 und Dobeckan[®] FT 1052/60 EK)

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.

ELANTAS Beck GmbH

Grossmannstr. 105
20539 Hamburg
Germany

Tel. +49 40 78946 0
Fax +49 40 78946 276

Info.elantas.beck@altana.com
www.elantas.com

Selling organisation
Application laboratories
Production plant
Global R&D centre of competence

ELANTAS Deatech S.r.l.

Via San Martino 6
15028 Quattordio
Italy

Tel. +39 0131 773870
Fax +39 0131 773875

info.elantas.deatech@altana.com
www.elantas.com

Selling organisation
Application laboratories
Production plant
R&D centre of competence

ELANTAS Camattini S.p.A.

Strada Antolini, 1
Fraz. Lemignano
43044 Collecchio (PR)
Italy

Tel. +39 0521 304711
Fax +39 0521 804410

info.elantas.camattini@altana.com
www.elantas.com

Selling organisation
Application laboratories
Production plant
R&D centre of competence

ELANTAS UK Ltd.

Keate House
1 Scholar Green Road
Cobra Court, Manchester
M32 0TR, United Kingdom

Tel. +44 161 864 1689
Fax +44 161 864 6090

sales.elantas.uk@altana.com
www.elantas.com

Selling organisation

Unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgt nach bestem Wissen, ist jedoch in jeder Hinsicht, insbesondere auch in Bezug auf etwaige Schutzrechte Dritter unverbindlich, und befreit Sie nicht von der eigenen Prüfung der von uns gelieferten Produkte auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Anwendung, Verwendung und Verarbeitung der Produkte erfolgen außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschließlich in Ihrem Verantwortungsbereich. Sollte dennoch ein Haftungsfall eintreten, so ist unsere Haftung auf den typischerweise vorhersehbaren Schaden begrenzt. Selbstverständlich gewährleisten wir die einwandfreie Qualität unserer Produkte nach Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.