

Ansprüche an Epoxyharze als Bindemittel für vakuumimprägnierte Hochspannungsisolationen

Von K. BLINNE

Maschinenfabrik Oerlikon/Zürich, Abteilung Materialprüfung

Summary

By replacing the binders shellac and asphalt by plastics such as epoxy-resins, high-tension insulations for electrical machines could be considerably improved.

The working-technique made such resins necessary which possess a viscosity characteristic allowing them to be used as impregnating material.

Principally the qualitative requests are on the whole reached, but the temperature-range of the application is naturally limited by the properties of the resins. To enlarge this temperature-range to higher temperatures, resins are needed which show, besides the necessary temperature-dependence of the physical properties, also a sufficient ability of resistance against ageing.

1. Einleitung

Etwa bis 1950 wurden als Bindemittel für Hochspannungsisolationen fast ausschließlich die thermoplastischen Stoffe Schellack und Asphalt benutzt. Zunächst in Amerika, bald danach aber auch in Europa wurden infolge der ungenügenden thermo-mechanischen Festigkeit der bis dahin angewendeten Isolationssysteme

härthbare, warmfeste Kunststoffe als Bindemittel eingesetzt. Dadurch wollte man die Zuverlässigkeit der Hochspannungsisolationen erhöhen und ihren Temperaturbereich vergrößern. Zu diesem Zweck waren jedoch Kunstharztypen notwendig, die ohne Abspaltung flüchtiger Reaktionsprodukte aushärteten und somit die Herstellung von hohlraumfreien Isolationen ermöglichten. Geeignete Materialien lagen in den ungesättigten Polyesterharzen und in den Epoxyharzen zu diesem Zeitpunkt bereits vor.

Die Eigenschaften dieser beiden Stoffgruppen sind in den vergangenen Jahren intensiv untersucht worden, was zu einer weitgehenden Abgrenzung ihrer Einsatzgebiete führte. Trotzdem werden beide Harztypen, in der Mehrzahl der Fälle zwar in geeignet modifizierter Form, in der Elektroindustrie weiterhin nebeneinander als Bindemittel für Hochspannungsisolationen verwendet.

Im folgenden sollen die auf diesem Anwendungsgebiet an die Harze gestellten Ansprüche diskutiert werden, wie sie sich aus der Art der Verarbeitung und den quali-

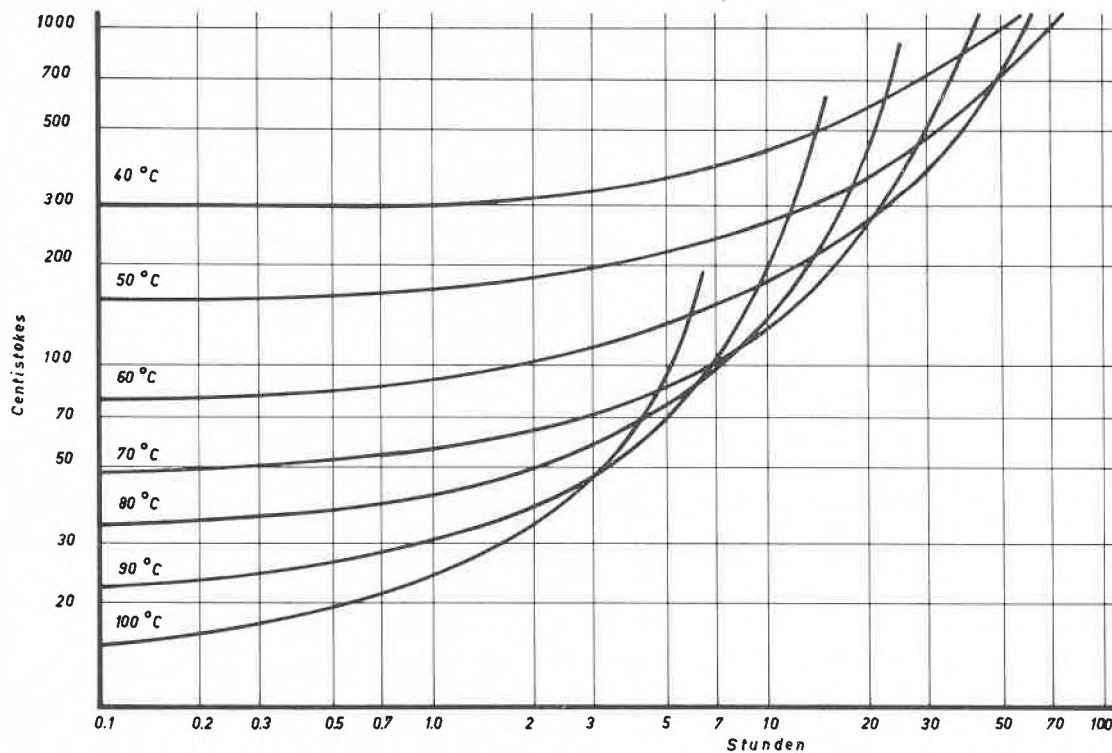


Abb. 1. Abhängigkeit der Viskosität von der Zeit mit der Temperatur als Parameter für eine zur Vakuumimprägnierung von Isolationen verwendete Harzkombination

tativen Anforderungen an das Endprodukt ergeben. Dabei soll vor allem auf die Epoxyharze eingegangen werden.

2. Verarbeitungstechnische Anforderungen

2.1 Verarbeitungstechnik

Die Herstellung der Hochspannungsisolationen geschieht in der Art, daß ein vorher aufgebracht Winkel eines glimmerhaltigen, nahezu bindemittelfreien Isolationsmaterials im Vakuum mit dem Epoxyharz imprägniert und anschließend zu einer festen Isolation ausgehärtet wird.

Bei der Festlegung der Arbeitsweise wird angestrebt, den Imprägnierprozeß in ähnlicher Weise wie bei der Verwendung lösungsmittelhaltiger Isolierlacke kontinuierlich auszuführen. Dazu sind jedoch Harze hinreichender Qualität notwendig, die allein durch Ersatz des bei der Imprägnierung entnommenen Anteils durch frisches Harz eine konstante und zur Durchführung des Imprägnierprozesses geeignete Viskosität beibehalten. Das Auffinden derartiger Harzkombinationen ist bisher nicht gelungen und wird durch folgende Umstände erschwert.

1. Der Fortfall des stark verdünnenden Lösungsmittels erfordert, daß das Harz zur Erreichung der für die Imprägnierung notwendigen Viskosität bei erhöhten Temperaturen verarbeitet wird. Bei diesen Temperaturen zeigen die Harze aber einen wesentlich rascheren Viskositätsanstieg als bei Raumtemperatur.

2. Durch das häufig sehr sperrige Imprägniergut besteht ein sehr ungünstiges Verhältnis von benötigter zur aufgenommenen Harzmenge.
3. Der Anfall an sehr unterschiedlichen Imprägniergütern erschwert eine kontinuierliche und gleichmäßige Belastung der Imprägnieranlage.

Die Verarbeitung mußte daher zunächst so gestaltet werden, daß sie den einzelnen Imprägniergütern besser angepaßt werden konnte. Dabei ergaben sich folgende Arbeitsweisen:

1. Die Imprägnierung in der anschließend zur Formgebung oder Pressung benutzten Kokille, in der auch die Aushärtung stattfindet.
2. Die Imprägnierung in gesondert hergestellten Gießwannen, wobei das Imprägniergut anschließend in Preßformen kalibriert und ausgehärtet wird.

Bei beiden Arbeitsweisen fällt, insbesondere bedingt durch die für das Gelingen der Imprägnierung notwendige Überdeckung des Imprägniergutes, ein beträchtlicher Anteil des eingesetzten Imprägnierharzes nach dem Arbeitsgang als Restharz an.

2.2 Viskositätsverhalten

Um die Verarbeitung unter diesen Umständen wirtschaftlich zu gestalten, ist es notwendig, die anfallenden Restharzmengen im nächstfolgenden Arbeitsgang zu einem möglichst großen Teile wiederzuverwenden. Zur Bemessung dieses Anteils, aber auch zur geeigneten Auswahl der Imprägnierbedingungen ist die genaue Kenntnis des

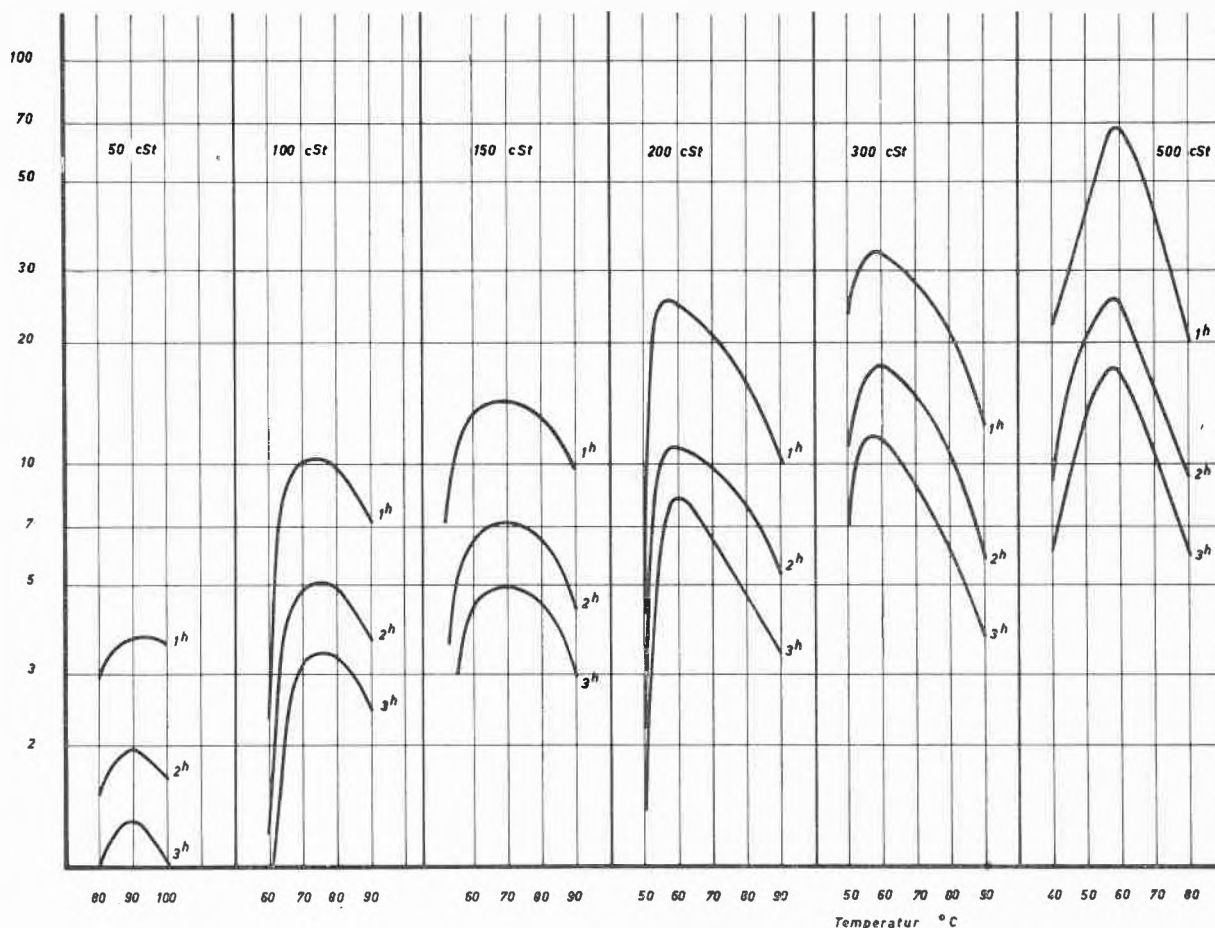


Abb. 2. Abhängigkeit des Grads der Wiederverwendbarkeit des Restharzes von der Imprägniertemperatur mit der Verarbeitungszeit als Parameter für eine Reihe von Anfangsviskositäten. – Ordinatoreinteilung: Die angegebene Zahl zeigt an, daß diese Anzahl von Teilen Restharz mit 1 Teil ungebrauchten Harzes wieder die Imprägnierviskosität ergibt

Viskositätsverhaltens der verwendeten Harzkombinationen unerlässlich.

In Abb. 1 ist die Abhängigkeit der Viskosität von der Zeit mit der Harztemperatur als Parameter für eine in dieser Weise verwendete Harzkombination dargestellt. Die hierin wiedergegebenen Meßergebnisse geben die Möglichkeit, die optimalen Arbeitsbedingungen abzuleiten.

Abb. 2 zeigt eine derartige Auswertung, in der die Abhängigkeit der Wiederverwendbarkeit des Restharzes von der Imprägniertemperatur mit der Verarbeitungszeit als Parameter für eine Reihe von Anfangsviskositäten dargestellt ist. Die Darstellung zeigt,

1. daß sich für jede Anfangsviskosität eine optimale Imprägniertemperatur ergibt,
2. daß der Grad der Wiederverwendbarkeit des Harzes mit der benötigten Verarbeitungszeit, also der Zeit, die das Harz auf Verarbeitungstemperatur gehalten werden muß, sinkt, und
3. daß und in welchem Ausmaß der Grad der Wiederverwendbarkeit von der Höhe der Anfangsviskosität abhängt.

Diese Zusammenhänge machen deutlich, daß für eine Reihe von Parametern des zu imprägnierenden Materials die notwendige Verarbeitungszeit und die Imprägnierviskosität experimentell bestimmt werden müssen. Dies gilt insbesondere für die Art des Isoliermaterials und die Dicke des zu imprägnierenden Wickels. Darüber hinaus muß bei der Konstruktion der Gießwannen und bei der Festsetzung der Überdeckung des Imprägniergutes mit Harz darauf geachtet werden, die Menge des Restharzes gering zu halten.

Das Viskositätsverhalten ist sowohl durch Auswahl der Harz/Härter-Basis als auch durch Art und Bemessung diverser Zusatzstoffe an sich in weiten Grenzen variierbar.

Bei der Auswahl der Harz/Härter-Basis muß jedoch die Mehrzahl der angebotenen Kombinationen wegen des für die vorgesehene Arbeitsweise ungenügenden Viskositätsverhaltens unberücksichtigt bleiben.

Durch Verwendung von Zusatzstoffen kann das Viskositätsverhalten günstig beeinflusst werden. Häufig muß jedoch die zur Aushärtung des Harzes benötigte Temperatur herabgesetzt werden, um die Härtingsbedingungen an die vorhandene Ofenkapazität anzupassen. Dies

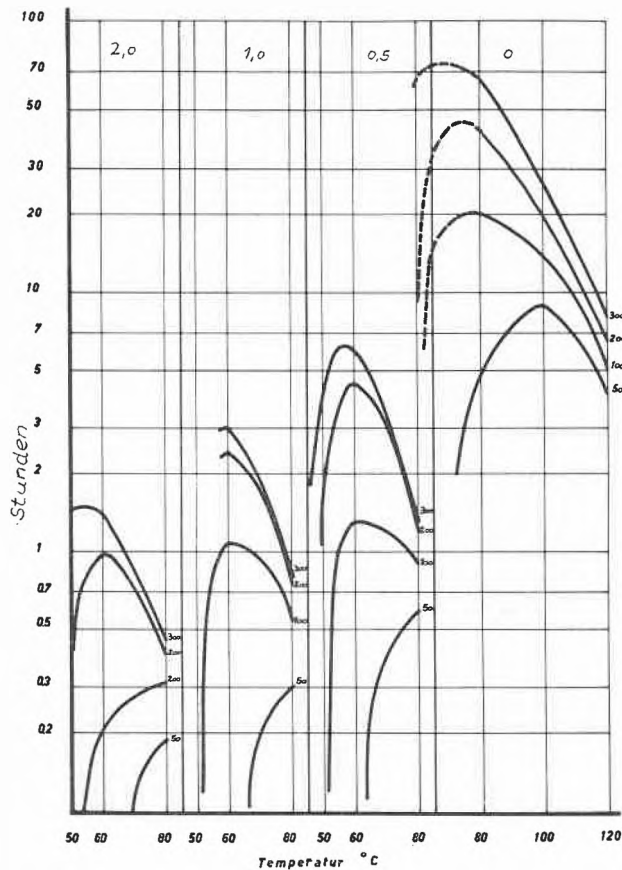


Abb. 3. Aufzeichnung der Zeiten bis zur Erreichung einer bestimmten Harzviskosität in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Beschleunigergehalte

ist zwar durch geeignete Dosierung eines Beschleunigers leicht möglich. Welchen Einfluß dies jedoch auf den Grad der Wiederverwendbarkeit angefallenen Restharzes und damit auf die Wirtschaftlichkeit des Imprägnierprozesses hat, geht aus der Abb. 3 hervor.

Versucht man dagegen, das Viskositätsverhalten einer Harzmischung durch Zusatz der bisher verfügbaren reaktiven Verdünnungsmittel zu verbessern, so setzt man dadurch die qualitativen Eigenschaften der Harzkombination herab.

Auf Grund dieser Eigenschaften muß jedoch weitgehend über die Einsatzgebiete der Harze im Bereich elektrischer Hochspannungsisolationen entschieden werden. Die qualitative Verbesserung ist daher als ein wesentliches Ziel der weiteren Entwicklungstätigkeit anzusehen. Die Verwendung von Zusatzstoffen zur Verbesserung des Viskositätsverhaltens mußte sich daher bisher in relativ engen Grenzen halten.

3. Qualitative Anforderungen

Bei der Einführung von Epoxyharzen als Bindemittel für Hochspannungsisolationen ergaben sich neben der gesteigerten Warmfestigkeit eine Reihe weiterer wesentlicher Fortschritte gegenüber den bis dahin vorwiegend

mit den Bindemitteln Schellack und Asphalt hergestellten Isolationen. Diese Fortschritte beruhen insbesondere auf dem guten Haftvermögen, den hohen mechanischen Festigkeiten, der Wasserfestigkeit sowie ganz besonders auf dem guten dielektrischen Verhalten der Epoxyharze. Umfangreiche Untersuchungen und auch die Erfahrung im Betrieb haben inzwischen gezeigt, daß die Epoxyharze den an Bindemittel für Hochspannungsisolationen gestellten Anforderungen in vollem Umfange genügen.

Die Hochspannungsisolationen sind in der Folgezeit über die durch die bloße Veränderung der Bindemittelklasse erhaltenen Eigenschaftsverschiebungen hinaus durch Entwicklung geeigneterer Epoxyharze wesentlich verbessert worden.

Bei der Weiterentwicklung der Isolationen ist das Hauptziel, den Bereich ihrer Anwendbarkeit zu höheren Temperaturen zu verschieben.

Dazu werden Harze benötigt, die eine Verwendung im vorgesehenen Temperaturbereich noch gestatten.

Läßt man das Viskositätsverhalten zunächst unberücksichtigt, so steht eine Reihe von Harzkombinationen und einer hinreichend hohen Warmfestigkeit zur Verfügung.

Neben den Anforderungen an die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften muß jedoch die Widerstandsfähigkeit der Isolation gegen die Alterung im Betrieb beachtet werden. Dies geschieht bisher wegen der in elektrischen Maschinen vorliegenden komplexen Beanspruchungen in einer Reihe von praxisnahen Zeitstandprüfungen¹. Diese Prüfungen umfassen u. a. sogenannte thermomechanische Beanspruchungen wie die Ausführung von Temperaturzyklen zwischen Raumtemperatur und Beanspruchungstemperatur, sowie thermoelektrische Prüfungen, wie die Anwendung einer über der Beanspruchungstemperatur liegenden Alterungstemperatur bei gleichzeitiger Einwirkung einer Spannung erhöhter Frequenz.

Je weiter die Betriebstemperaturen in elektrischen Maschinen gesteigert werden, um so notwendiger erscheint es, diese Untersuchungen durch die Prüfung der Alterungsbeständigkeit des Bindemittels in Abhängigkeit von der Temperatur zu ergänzen. Für derartige Untersuchungen liegt in der VDE-Vorschrift 0304 bereits eine brauchbare Anleitung vor. Wenn die auf die angegebene Weise ausgeführten Untersuchungen wegen der großen Interpretationsschwierigkeiten auch kaum gestatten, für ein bestimmtes Material eine Grenztemperatur für dauernde Beanspruchung zu beziffern, so erlauben sie doch mit Sicherheit, das Alterungsverhalten verschiedener untersuchter Stoffe abzustufen².

Die Beurteilung der so erhaltenen Ergebnisse kann jedoch nicht erfolgen, ohne daß Beziehungen zu den in der elektrischen Maschine tatsächlich vorliegenden Be-

¹ K. ABEGG, *Bulletin SEV 51* (1960) Nr. 19, S. 1.

² P. NOWAK, *Kunststoffe 51* (1961) 480.

anspruchungen hergestellt werden. Es wird deshalb derzeit versucht, eine Zuordnung sowohl der physikalischen Warmfestigkeit als auch des chemischen Alterungsverhaltens der Bindemittel zu den Ergebnissen der praxisnahen Untersuchungen und somit zu der von der C.E.I. definierten Wärmeklasseneinteilung zu schaffen.

Diesbezügliche eigene Untersuchungen sind noch nicht so weit fortgeschritten, daß sie diese Zuordnung gestatten würden. Nach den bisherigen Ergebnissen der Untersuchung von Epoxybindemitteln nach der bereits zitierten VDE-Vorschrift 0304 muß jedoch angenommen werden, daß das Alterungsverhalten der bisher verfügbaren Epoxyharze deren Verwendung im Isolationsverband bei einer Dauerbeanspruchungstemperatur oberhalb 140 °C nicht gestattet.

Sollen die Epoxyharze auch bei Isolationen höherer Temperaturbeanspruchung als Bindemittel verwendet werden, erscheint daher die Auffindung von Typen größerer Alterungsbeständigkeit notwendig. Die Weiterentwicklung von Harzen geeigneten Viskositätsverhaltens hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit der physikalischen Eigenschaften wird unabhängig davon immer begrüßt werden, weil dadurch in jedem Falle die Möglichkeit geschaffen würde, die bisher nur begrenzt eingesetzten reaktiven Verdüner in größerem Maße als

bisher zur Verbesserung des Viskositätsverhaltens zu verwenden.

Die angestrebte Anpassung der Harzeigenschaften an die Betriebsbedingungen der Isolationen betrifft ebenfalls den Einsatz der Epoxyharze für thermisch weniger beanspruchte Isolationen. Hier werden die Epoxyharze besonders dann angewendet, wenn von Isolationen eine hohe Wasserfestigkeit verlangt wird, wie dies bei den Wicklungen von Labormagneten häufig der Fall ist.

Bei der Abkühlung dieser Spulen nach der Härtung treten, bedingt durch die unterschiedlichen linearen Ausdehnungskoeffizienten von Leitermaterial und Isolation, Spannungen auf. Diese Spannungen können dadurch vermindert werden, daß der Erweichungspunkt des angewendeten Epoxyharzes herabgesetzt wird, wie dies durch Zusatz geeigneter Flexibilisatoren in unbegrenztem Maße möglich ist. Auch hier ist für die Bezifferung des Erweichungspunktes eine Zuordnung der Isolationsbeanspruchung zu diesem Harzparameter notwendig. Die zu diesem Zweck derzeit ausgeführten Untersuchungen werden über diese Fragestellung hinaus auch Klarheit darüber bringen, in welchem Maße die zurzeit vieldiskutierten flexiblen Epoxyharze Eingang in die Isolationstechnik finden und welche Eigenschaften sie dazu benötigen.