



Andreas Thumm

a.thumm@diel.de

Elektrische Isoliermaterialien
(en: electrical insulating materials - EIM)

Elektrische Isoliersysteme
(en: electrical insulation systems - EIS)

50 V – 1000 V
„Niederspannung“

Was ist ein Isolierstoff?

Was ist ein Isolierstoff?

- Alles, was nicht leitet.

Das hat übrigens schon Stephen Gray 1729 in ersten Versuchen unterschieden.

Was ist ein Isolierstoff?

- Alles, was nicht leitet.
Das hat übrigens schon Stephen Gray 1729 in ersten Versuchen unterschieden.
- Der Ansatz ist, wenn wir von einem Isolierstoff sprechen müssen wir immer die Gegenfrage im Blick haben; Isolation gegen was?

Was ist ein Isolierstoff?

- Alles, was nicht leitet.
Das hat übrigens schon Stephen Gray 1729 in ersten Versuchen unterschieden.
- Der Ansatz ist, wenn wir von einem Isolierstoff sprechen müssen wir immer die Gegenfrage im Blick haben; Isolation gegen was?
- Erste Isolierstoffe:
 - Keramik, Bakelit und Glas als Festkörper
 - Seide und Baumwolle zur Leiterisolierung, diese wurden mit Bitumen, Alkyd- oder Schellack imprägniert
 - Papier mit Öl getränkt, typisch sind noch aus dieser Zeit Öltransformatoren -> Begriff „Isolationspapier“

Was ist ein Isolierstoff?

- Alles, was nicht leitet.
Das hat übrigens schon Stephen Gray 1729 in ersten Versuchen unterschieden.
- Der Ansatz ist, wenn wir von einem Isolierstoff sprechen müssen wir immer die Gegenfrage im Blick haben; Isolation gegen was?
- Erste Isolierstoffe:
 - Keramik, Bakelit und Glas als Festkörper
 - Seide und Baumwolle zur Leiterisolierung, diese wurden mit Bitumen, Alkyd- oder Schellack imprägniert
 - Papier mit Öl getränkt, typisch sind noch aus dieser Zeit Öltransformatoren -> Begriff „Isolationspapier“
- Heutzutage kommt das Isolationspapier aus chemisch-technischen Industrien und wird durch laminieren der unterschiedlichen Materialien miteinander verbunden, so dass mehrere Eigenschaften der einzelnen Materialien im Laminat Vorteile bringen.

Was ist ein Elektroisoliersystem?

Was ist ein Elektroisoliersystem?

Das Zusammenspiel zwischen Elektroisolierstoffen zum Schutz einer elektrischen Einheit zur Erfüllung der machbaren Anforderung unter Maßgabe der geforderten Normen und Vorgaben, sowie die Einhaltung aller relevanten Sicherheitsaspekten bei Herstellung und Betrieb für Mensch, Maschine und Umwelt.

Was ist ein Elektroisoliersystem?

Das Zusammenspiel zwischen Elektroisolierstoffen zum Schutz einer elektrischen Einheit zur Erfüllung der machbaren Anforderung unter Maßgabe der geforderten Normen und Vorgaben, sowie die Einhaltung aller relevanten Sicherheitsaspekten bei Herstellung und Betrieb für Mensch, Maschine und Umwelt.

Typischer Kupferleiter:

IEC 60317-13 Rundlackdraht und IEC 60317-29 Flachlackdraht

thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
240	S
>240	C

Isolierstoffe werden nach IEC 60085 in thermischen Klassen unterteilt:

bis 2005 > 180°C in Wkl. C, seit 2008 überarbeitet (N, R, S)

Die Klassen beziehen sich sowohl auf einzelne elektrische Isoliermaterialien (EIM), als auch auf elektrische Isoliersysteme (EIS), die sich aus mehreren Materialien zusammensetzen.

Isoliersystem (EIS) + Materialien (EIM) müssen nicht zwangsweise dieselbe Isolierstoffklasse aufweisen. Es kann z. B. ein Material durch die Schutzwirkung eines umhüllenden höheren Stoffes eine höhere Klasse als ohne Umhüllung aufweisen (*).

thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
240	S
>240	C

Bestimmung der Wärmeklasse:

Norm IEC 60085 für Isolationsmaterialien

- Dauergebrauchstemperatur nach 20.000 Betriebsstunden (entsprechen 833 Tage = ca. 2 ¼ Jahre)
- noch 50 Prozent der Durchschlagsspannung wie im Neuzustand

thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
240	S
>240	C

Bestimmung der Wärmeklasse:

Norm IEC 60085 für Isolationsmaterialien

- Dauergebrauchstemperatur nach 20.000 Betriebsstunden (entsprechen 833 Tage = ca. 2 ¼ Jahre)
- noch 50 Prozent der Durchschlagsspannung wie im Neuzustand
- Umso höher °C, desto stärker werden u.a. korrosive und oxidative Einflüsse der Umgebungsluft wirksam oder einfach gesagt; erhöht sich mit steigender Temperatur die Geschwindigkeit der Alterung
- Meisten Prozesse der Arrhenius-Kurve gehorchen

thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
240	S
>240	C

Als Faustregel aus der Elektronik:

Halbierung der Lebensdauer je 10°C
Temperaturerhöhung.

Und so werden die Materialien im Kurzzeittest geprüft und anschließend hochgerechnet.

Wie ist Durchschlagsfestigkeit zu definieren?

Wie ist Durchschlagsfestigkeit zu definieren?

Die Hersteller geben die geprüften Normwerte nach IEC 60243-1 in ihrem Datenblatt an, ab wann das Material versagt.

Hier wird stillschweigend vorausgesetzt, dass diese Werte nur im „Neuzustand“ Gültigkeit besitzen. Für die Prüfung selbst wird die Spannung um 500V/s durch das Material ansteigend erhöht, bis es zum Durchschlag kommt und wird schließlich mit kV/mm angegeben.

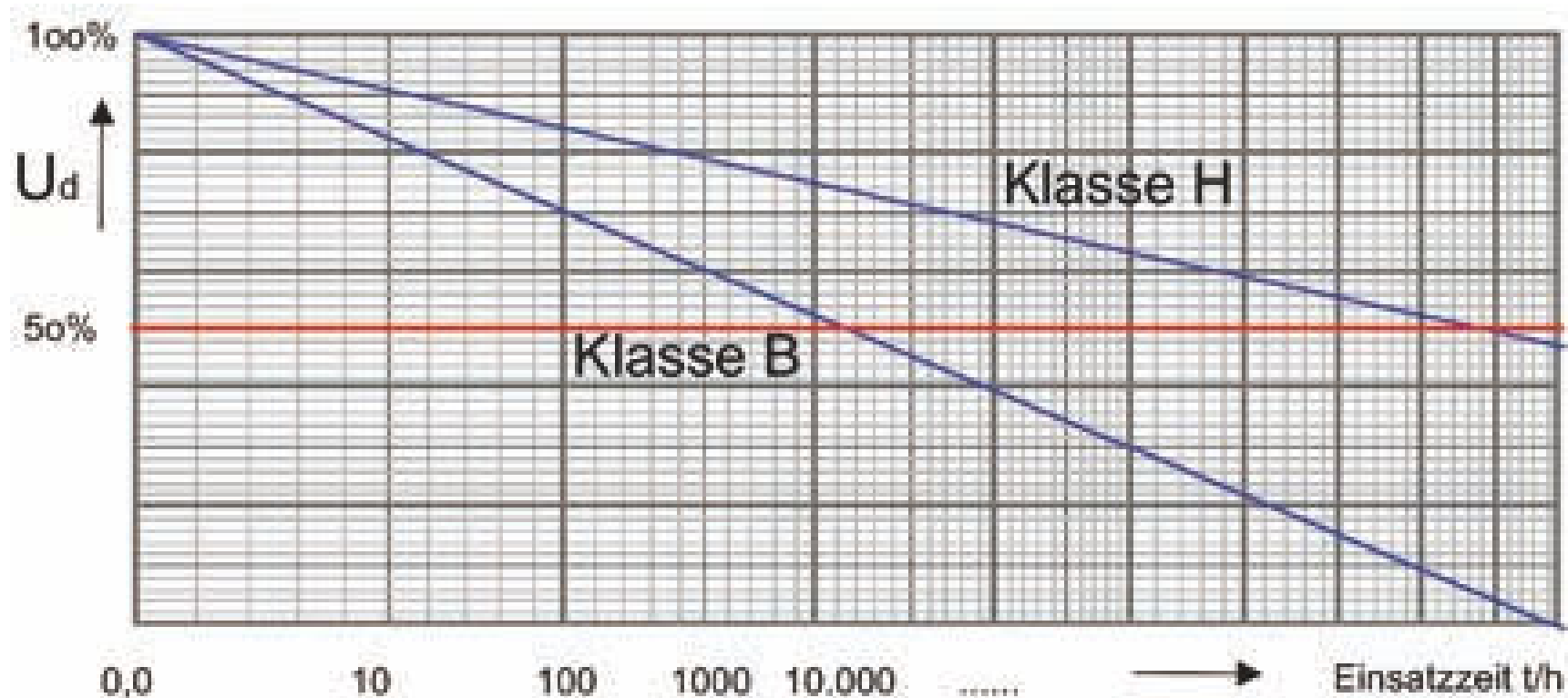
Wie ist Durchschlagsfestigkeit zu definieren?

Daraus lässt sich also ableiten, ...

...möchte man bei einer angegebenen Temperatur eine höhere Lebensdauer erzielen, setzt man ein Isolationsmaterial einer höheren Wärmeklasse ein.

Das übliche End-Life-Kriterium der „halbierten Durchschlagsspannung“ wird auf diese Weise viel später erreicht.

Wie ist Durchschlagsfestigkeit zu definieren?



Erreichen der halben Durchschlagspannung nach UL 746 (Quelle: CMC)

Wie ist Durchschlagsfestigkeit zu definieren?

Und bezüglich der maximal auftretenden Wärme sollte man u.a. Wärmestaus, höchstmögliche Umgebungstemperatur und evt. auftretende Fehlfunktionen mit in Betracht ziehen.

Auswahl bekannter Isolierstoffe als Übersicht

Wärmeklasse Kennzahl	Flüssige Isolierstoffe	Flexible Isolierstoffe	Feste Isolierstoffe	Schläuche + Litzen Ergänzung
1500°C			Keramik	
700°C			Glimmer (Phlogopit)	
500°C			Glimmer (Muskovit)	
450°C		Reines Glasgewebe		Glasschläuche roh
260°C "C"		PEEK-Folie	PEEK-Plattenware	
250°C "C" "C"	Silikon	Silikon-Gewebe	Silikon-Glashartgewebe	Silikon-Glasschlauch Silikon-Litze
240°C S S	Polyimid	Polyimidfolie	PTFE (Polytetraflourethylen)	PTFE-Schlauch PTFE-Litze
220°C R R	Epoxid Polyamidimid	Aramidfaser * (-filz) Laminat NKN + NGN		Silikon-Glasschlauch
200°C N N	theic.mod. Polyester	Aramidfaser	SI GC 202 + EP GC 308 + PI GC 301	FEP-Schlauch FEP-Litze
180°C H H	Polyester, mod. Alkyd Polyurethan-/imid	Laminat NPN* (Elan-Film HT 180)	UP GM 204 + EP GC 311 GFK + CFK	Silikon-Schlauch Silikon-Litze
155°C F F	mod. Polyurethan Alkyd	Laminat DMD + NPN PEN-Folie	EP GC 203 + UP GM 203 + PF GC 201	Glasschlauch DD / PUR Nomex- & XLPO-Litze
130°C B B	Polyurethan	Laminat VPV Verbundpressspan + PET	Polyestergewebe-Epoxid EP PC 301	Textil- & XLPE-Litze
120°C E	mod. Polyvinyl	Baumwolle, (Pressspan)	Papierphenol PF CP 203	Polyester-Textillitze
105°C A	Polyvinyl	Pressspan, Kunstfaser	BW-HGW PF CC 203	mod. PVC-HT-Schl.-Litz.
90°C Y		PVC-Folien		PVC-Schlauch/-Litzen

Auswahl bekannter Isolierstoffe als Übersicht

Hieraus erkennt man einzelnen Produkte, welche in einem Elektroisoliersystem zusammengefasst werden können.

Voraussetzung der chem. Verträglichkeit.

- Hilfsstoffe bei der Fertigung (keine elektrischen Eigenschaften)

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

Der Begriff Elektroisoliersystem (EIS) kam erst so richtig in Erscheinung mit der Globalisierung und dem Zugang zum amerikanischen Markt. Eines der am weitesten verbreiteten Prüfzeichen ist das amerikanische UL-Zeichen:

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

Der Begriff Elektroisoliersystem (EIS) kam erst so richtig in Erscheinung mit der Globalisierung und dem Zugang zum amerikanischen Markt. Eines der am weitesten verbreiteten Prüfzeichen ist das amerikanische UL-Zeichen:

Einmal für ein gelistetes Produkt und einmal für eine anerkannte Komponente.



(UL / UL mit Kanada / UL mit Kanada und USA)



Von der Organisation Underwriters Laboratories Inc., Northbrook (Illinois, USA, gegr. 1894) oder

kurz UL  .

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

Die UL nehmen ähnliche Aufgaben wie VDE oder TÜV wahr.

In einem EIS-System nach UL 1446 wurde vor 2016 ein Flammtest durchgeführt und die Verträglichkeit der einzelnen Materialien getestet, wobei sich die UL 1446 Edition 1-6 sich auf Konsumgüter bis 1 kV auf den amerikanischen Markt konzentrierte.

Seit 2016 mit der gültigen Edition 7 wurden die Prüfkriterien bevorzugt auf IEC (International Electrical Commission) Normen verwiesen. Die bisher üblichen ASTM (American Society for Testing and Materials) Normen werden als technisch äquivalent geführt. Die zweite wichtige Änderung ist, dass UL 1447 Ed.7 zu einem Standard wurde, der sich auf die thermische Bewertung und Klassifizierung von EIS unabhängig der Betriebsspannung konzentriert.

UL 1446 Ed. 7 ist mit IEC 61857-2 verbunden. Elektrische Isoliersysteme – Verfahren zur thermischen Bewertung – Teil 2: Auswahl der geeigneten Prüfmethode zur Bewertung und Klassifizierung von elektrischen Isoliersystemen

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

- Vergleicht man die Sicherheitsphilosophien zwischen dem VDE und UL, so stellt man sehr schnell gravierende Unterschiede fest: Während beim VDE die Einzelkomponente im Vordergrund der Tests steht, rückt bei UL das Gesamtsystem in den Fokus der Tests.

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

- Vergleicht man die Sicherheitsphilosophien zwischen dem VDE und UL, so stellt man sehr schnell gravierende Unterschiede fest: Während beim VDE die Einzelkomponente im Vordergrund der Tests steht, rückt bei UL das Gesamtsystem in den Fokus der Tests.
- Durch die Globalisierung und gleichzeitigen Harmonisierung der EIS hat das UL-System 1446 Ed. 7 auf dem Weltmarkt zugenommen und die Ansicht deutscher Isoliersysteme nach VDE, welche schon immer auf Wärmeklassen bzw. folglich Durchschlagsfestigkeiten der einzelnen Komponenten beruhen, hintenangestellt. Der Hintergrund ist letztlich auf das gemeinsame Ziel der Alterung, sprich Materialermüdung, was wiederum zur Durchschlagsfestigkeit zurückführt.

Elektroisoliersystem (EIS) – Aufbau und Zweck

- Vergleicht man die Sicherheitsphilosophien zwischen dem VDE und UL, so stellt man sehr schnell gravierende Unterschiede fest: Während beim VDE die Einzelkomponente im Vordergrund der Tests steht, rückt bei UL das Gesamtsystem in den Fokus der Tests.
- Durch die Globalisierung und gleichzeitigen Harmonisierung der EIS hat das UL-System 1446 Ed. 7 auf dem Weltmarkt zugenommen und die Ansicht deutscher Isoliersysteme nach VDE, welche schon immer auf Wärmeklassen bzw. folglich Durchschlagsfestigkeiten der einzelnen Komponenten beruhen, hintenangestellt. Der Hintergrund ist letztlich auf das gemeinsame Ziel der Alterung, sprich Materialermüdung, was wiederum zur Durchschlagsfestigkeit zurückführt.
- Das heißt für uns in der Betrachtung der elektrischen Maschine dürfen wir nicht nur diese eine Isolierkomponente betrachten, sondern alle elektrisch isolierenden Materialien im Verbund bezüglich des Alterungsprozesses.

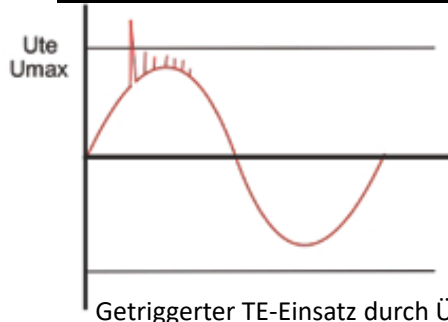
Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

1) Spannung (Stress, Teilentladung)

- Bereits ab 400V entsteht Corona-Entladung. Die wiederholenden, energiereichen Schaltimpulse bei modernen Geräten im Stromkreis haben kurze Anstiegszeiten und Scheitelspannungen deutlich über dem Nennwert der Versorgungsspannung.
- Diese Impulse lassen Isolationssysteme auf andere Weise altern wie unter herkömmlicher, netzfrequenter Wechselspannung.
- TE zerstören die Isolation durch aggressive Abbauprodukte, UV-Strahlung und Ozon
- Elektromechanische Ermüdung auf Grund der Stromimpulse
- Dielektrische Erwärmung wegen der hochfrequenten Anteile der Stromimpulse

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

Teilentladung entgegenwirken



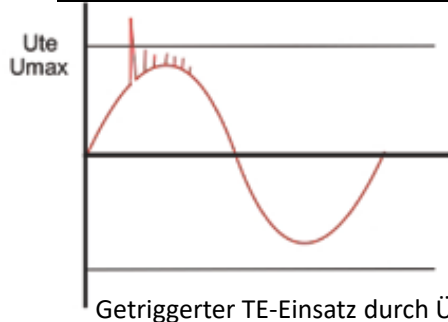
Kann man die Gefahr von Teilentladung nicht ausschließen, verwendet man Materialien, die besonders TE-beständig sind. Dazu gehören alle anorganische Isolationstoffe wie Glas, Keramik oder der Naturstoff Glimmer (Mica). Sie werden von Corona Entladungen nicht geschädigt.

Getriggert TE-Einsatz durch Überspannungsimpuls auch bei Betriebsspannung unter TE-Einsatzspannung (Quelle: CMC)

Bei kleineren Baugrößen empfiehlt sich der Einsatz von Polyimidfolie mit Flourpolymere wie z.B. FEP. Bei Polyimid mit Flourpolymere (Kapton[®]CR, Rayitek, etc) wird die Zugabe von anorganischen Werkstoffen in die Polymermasse drastisch erhöht.

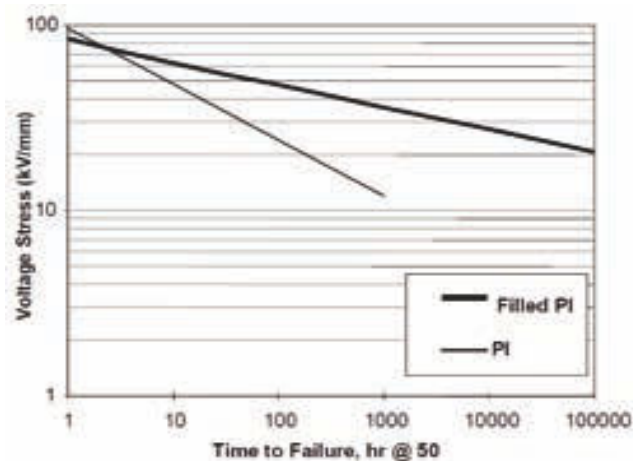
Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

Teilentladung entgegenwirken



Kann man die Gefahr von Teilentladung nicht ausschließen, verwendet man Materialien, die besonders TE-beständig sind. Dazu gehören alle anorganische Isolationsstoffe wie Glas, Keramik oder der Naturstoff Glimmer (Mica). Sie werden von Corona Entladungen nicht geschädigt.

Getriggelter TE-Einsatz durch Überspannungsimpuls auch bei Betriebsspannung unter TE-Einsatzspannung (Quelle: CMC)



Lebensdauer-Unterschied zwischen Kapton HN (PI) und Kapton CR (filled PI) bei Belastung durch TE's (Quelle: DuPont)

Bei kleineren Baugrößen empfiehlt sich der Einsatz von Polyimidfolie mit Flourpolymere wie z.B. FEP. Bei Polyimid mit Flourpolymere (Kapton[®]CR, Rayitek, etc) wird die Zugabe von anorganischen Werkstoffen in die Polymermasse drastisch erhöht.

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

2) Frequenz

- In sehr vielen „elektrischen“ Basisnormen wird normalerweise mit sinusförmiger Spannung bei 50 Hz gemessen. Moderne Schaltnetzteile arbeiten jedoch mit bedeutend höheren Frequenzen. Dadurch steigt der Stress für das Isolationsmaterial.
- Die elektrische Größe „Spannung“ macht eine Aussage über die Kraft, die notwendig ist, um eine Ladungseinheit zu bewegen. Und diese „Arbeit“ wird bei steigender Wechsel-Frequenz immer häufiger in das Isolationsmaterial eingebracht. Es entsteht ein mechanischer Stress und „Reibungswärme“. Die Folge ist eine verringerte Spannungsfestigkeit.

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

3) Verhalten bei Verschmutzung (Umwelt)

- Werden Oberflächen von Isolierstoffen durch Feuchtigkeit und Staub verunreinigt, entstehen bei einsetzenden Gleitentladungen langsam aber sicher Leitpfade. Diese Leitpfade breiten sich meist in Verästelungen (treeing) immer weiter aus und können am Ende durch mögliche Wasseraufnahme (Hydrolyse) zum Versagen der Isolation führen.



Ausbildung eines leitfähigen Pfades auf oder in Isolationsmaterialien (Quelle: CMC)

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

4) Konstruktive Maßnahmen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um die elektrische Sicherheit auch nach Tausenden von Betriebsstunden sicherzustellen.

- Die Erhöhung von Luft und Kriechstrecken trägt als wesentlicher Schutz dazu bei, das auch bei gealterten Isolationsmaterialien durch die dann verringerte Spannungsfestigkeit nichts passiert. Die erforderliche Luft und Kriechstrecke ist insgesamt eine Funktion von CTI, Verschmutzungsgrad, Überspannungskategorie, Frequenz und Einsatzgebiet (Haushalt, Industrie, Medizin, etc.)
- Durch den Einsatz von einem Isolationsmaterial der nächsthöheren Isolations- bzw. CTI-Klasse lässt sich die Zeit bis zum Versagen normalerweise um mindestens das Doppelte erhöhen.
- Außerdem ist die Qualität der verwendeten Materialien mitbestimmend für die Leistungsfähigkeit über die gesamte Betriebszeit. So ist zum Beispiel die Wärmestandfestigkeit einer Polyimidfolie deutlich abhängig vom Herstellverfahren. Die gleiche chemische Bezeichnung bedeutet nicht automatisch gleiche Eigenschaften.
- Schlussendlich sind natürlich auch die mechanischen Belastungen bei der Verarbeitung und die mögliche Vorschädigung durch Testverfahren zur Fertigungsüberbrückung (z. B. Hochspannungsprüfung) mit lebensdauerbestimmend.

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

5) Weitere mögliche Ursachen

Temperatur, Spannungstress, ungünstige Materialeigenschaften und Teilentladungen sind gewiss die am stärksten wirkenden Abbau-Mechanismen für Polymere. Es gibt jedoch weitere Faktoren, die je nach Einsatzort eine Rolle spielen können.

- Nahezu alle Kunststoffe werden durch Strahlung (UV-Licht, Radioaktivität) geschädigt. Die energiereiche Strahlung zerstört die Polymerketten und führt z. B. zu einer geringeren mechanischen Festigkeit.
- Ein ständiger Temperaturwechsel (z. B. nur zeitweiser Betrieb) belastet besonders Verbünde aus Isolationsmaterial und Kernmaterial bzw. Lackdrähte. Die Ausdehnungskoeffizienten von Kunststoffen liegen üblicherweise weit über denen von Metallen. Dies kann vor allem in vergossenen Systemen zu Spannungsrissen führen.
- Eine weitere Ursache für die mangelnde Lebensdauer einer elektrischen Isolierung kann an einem falsch gewählten Härtingsprozess (Verguss, Überzugslacke) liegen. Eine nicht vollständige und damit unzureichende Vernetzung oder eine zu schnelle Vernetzung führen unweigerlich zu einer reduzierten Lebensdauer.

Der Alterungsprozess wird auf weitere verschiedenste Arten beschleunigt:

Für die sichere Auslegung eines elektrischen Gerätes ist es also notwendig, alle auftretenden Einflussgrößen in Ihrer Wirkung aufzusummieren. Bei diesen Überlegungen lohnt es sich, die erforderlichen Spannungsfestigkeit am Ende der erwarteten Lebensdauer zu kennen. Denn sie bestimmt wesentlich mit, welche Materialien mit welchen Anfangseigenschaften eingesetzt werden sollten. Die Datenblattangaben von Isolierstoffen spiegeln den optimalen Wert der Isolationsfähigkeit unter standardisierten Bedingungen am Anfang der Einsatzzeit wider.

Was sind Tränkmittel und warum sind diese genauso wichtig? (allg. Imprägniermittel)

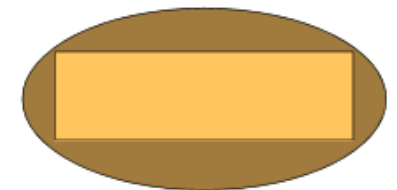
Grundlagen der Primärisolierung



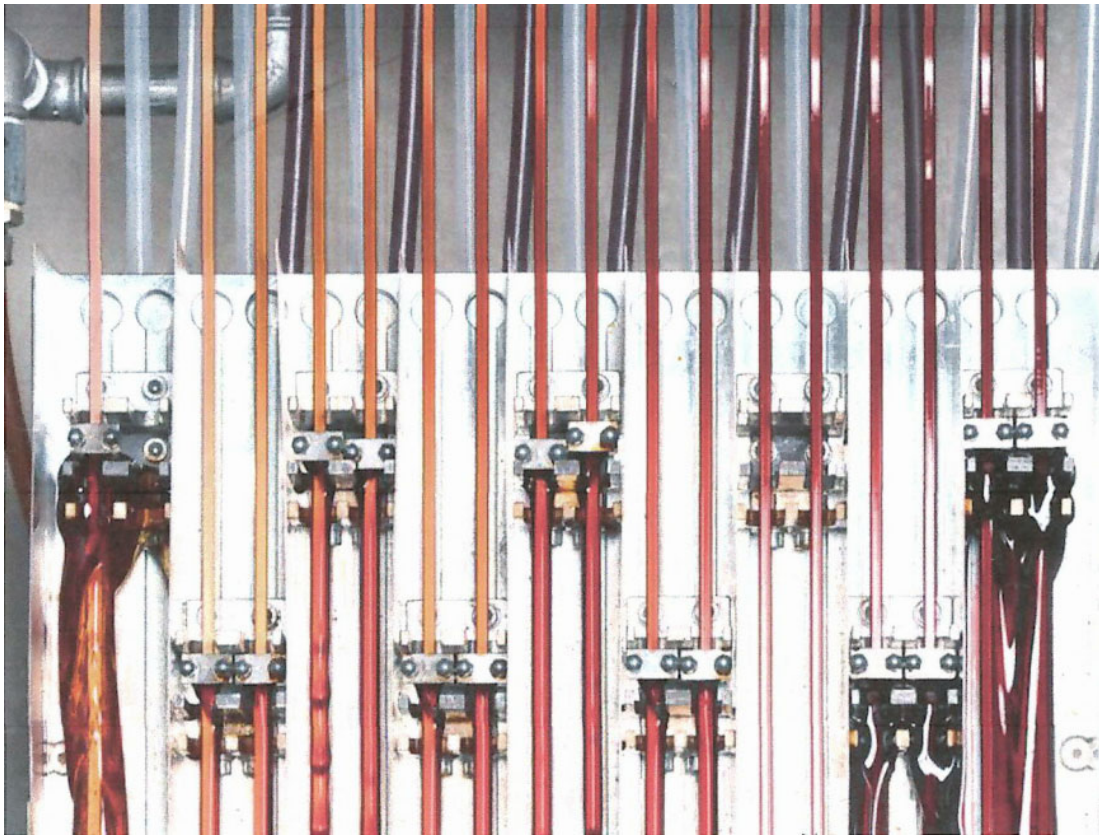
Bei lackierten (emailierten) und/oder auch umspunnen Drähten mit Glasseide, Polyester Glas, Papier, Nomex®, Kapton® oder Glimmer spricht man von Primärisolierung. Der aufgetragene Lack wird in mehreren Lackschichten je Düse und jeweiligem Trockenprozess im Ofen aufgetragen, so dass am Ende mehrschichtige Lackaufträge je nach Isolationszunahme als Gr. 1, Gr. 2 oder auch Gr. 3 erfolgen, bzw. weitere Lacktypen als Ergänzung wie Overcoat, Pin-Hole-Beständigkeit oder als selbstverklebender Lack (Backlack).

Herausforderung der Beschichtung von Rechteckdrähten mit flüssigem Drahtlack:

- Flüssigkeiten streben Tropfenform an = Kantenflucht
- Schichtdicke von $> 200\mu\text{m}$ für die angelegten Spannungsfelder.



Was sind Tränkmittel und warum sind diese genauso wichtig? (allg. Imprägniermittel)



Zur Veranschaulichung:

Die Produktion eines
Flackdrahtes mit 11 Lackdüsen
theic. Modifiziertem Polyesterimid
und 4 Lackdüsen Polyamidimid *(chenulor)*

Nach jedem Lackauftrag durchläuft
der Draht eine Umdrehung im
Hochofen zum Trocknen, bevor die
nächste Lackschicht aufgenommen
werden kann.

Was sind Tränkmittel und warum sind diese genauso wichtig? (allg. Imprägniermittel)

Grundlagen der Sekundärisolierung

Tränkmittel (sekundäre Isoliermaterialien), sind Flüssigharze, die mit Reaktivverdünnern verdünnt werden.

Sie härten vollständig auf den Objekten aus, auf die sie aufgetragen werden.

Sie bieten eine elektrische Isolation, eine hohe mechanische Stabilität, Schutz vor klimatischen Einflüssen und eine verbesserte Wärmeableitung für Kupfer-/Aluwicklungen und -spulen.

→ Denken wir hier zurück an die Hohlblocksteine beim Hausbau.

Die gängigen Verarbeitungen sind Tauchen, Träufeln, Strom-UV und Vakuumdruckverfahren (VPI).

Bei Imprägniermitteln nach dem Wickelvorgang spricht man von der Sekundärisolierung, da sie zum Schluss als Imprägnierung, Verfestigung und Wärmeableitung eingesetzt werden.

Viele Rohstoffe finden sich in der Leiterisolierung (Primärisolierung) wieder.

Was sind Tränkmittel und warum sind diese genauso wichtig? (allg. Imprägniermittel)

Die Geschichte der Sekundärisolation

- 1830 – 1880 Telegraphie (ohne Sekundärprägnierung möglich)
- 1880 – 1900 Erste Motoren und Generatoren wurden entwickelt
- 1920 Erster Motor im Privathaushalt. Imprägnierung mit Bitumen, Alkydlacken
- 1955 Patentierung und Einführung der ungesättigten Polyester(-imide) Harze von Dr. Beck AG (zeitweise Zweigwerk der BASF, Mannheim und Schenectady, USA, gehört es heute zu ELANTAS Europe in Hamburg)

Da keine Lizenzvergabe von Dr. Beck erfolgte, entwickelt sich die Isoliertechnologie in den Hauptmärkten unterschiedlich:

Was sind Tränkmittel und warum sind diese genauso wichtig? (allg. Imprägniermittel)

USA verharren auf der Alkydharzlack Imprägnierung und entwickeln später wasserbasierte Lacke

Europa Weiterentwicklung der Polyester(imide) Harze (VOC frei 1990er, Monomerfrei in den 00er Jahren)

Japan Epoxy Harz Imprägnierung

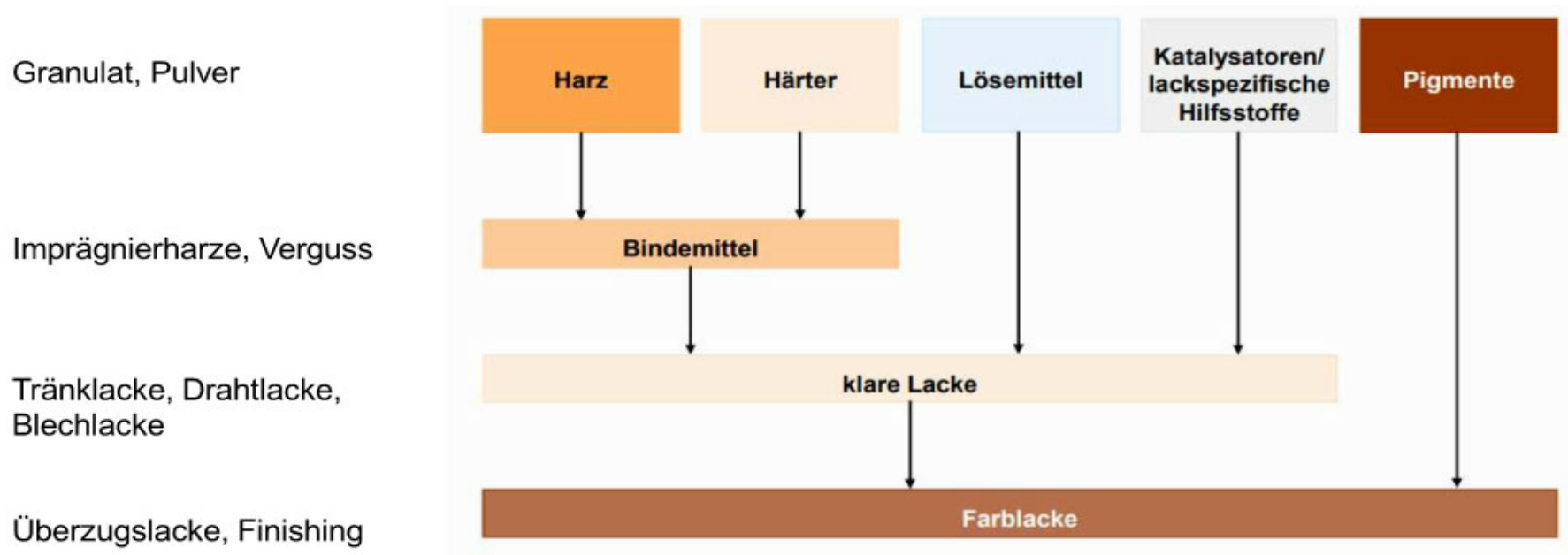
Nach Ablauf der Patente und mit zunehmender Globalisierung sind alle Technologien weltweit im Einsatz.

- Typische Anwendungen sind:
 - **Imprägnieren** (Tauchen, Träufeln, Rolliertaschen) für LV und MV Maschinen
 - **Vakuum (-Druck) Imprägnierung** für MV und HV Motoren und Generatoren
 - **Verguss** zur Verbesserung der Wärmeableitung bei Motoren, Drosseln, Bremsen, Trafos, Steuereinheiten
 - **Druckgeliervfahren** (APG) zur Schrumpfkompensation bei Gehäusen oder Rotoren

Die Umweltschutzvorgaben haben in den meisten Ländern zu einer strengeren Gesetzeslage bei den Emissionswerten und die Hersteller von bisherigen Styrol-, Vinyltoluol- und DAP- (*Diallylphthalat*)-haltigen Harzen zu emissionsarmen Systemen zur Imprägnierung geführt.

Der Unterschied zwischen Tränklack und Tränkharz

Zusammensetzung der Elektroisolierharze

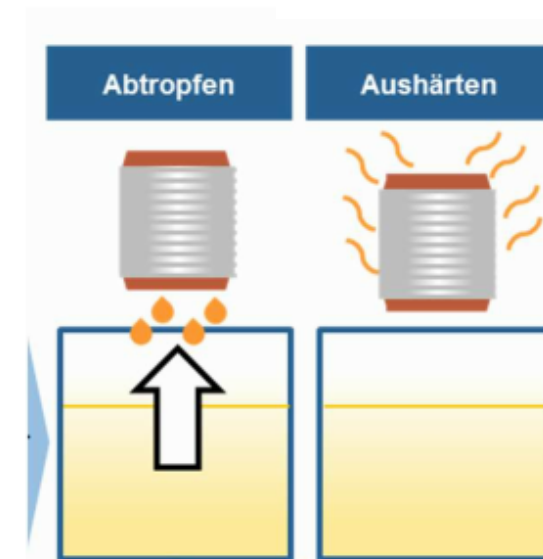


Der Unterschied zwischen einem Tränklack und einem Tränkharz

Die Chemie der Sekundärisolation – Lacke



	Lacke			
Chemie	Alkydharz	Polyester-(imid)	BPA Epoxy	Epoxy-Phenol
Lösungsmittel	Naphta	Naphta	Naphta	Naphta
	wässrig	wässrig	wässrig	wässrig
Reaktionstyp	Oxidativ / Diffusion	radikalische Polymerisation	katalytisch Addition	katalytisch Addition
Härtungsprozess	physikalisch + lufttrocknend	physikalisch + thermisch	physikalisch + thermisch	physikalisch + thermisch
Härtungs-Temp	RT - 80°C	80 - 160°C	80 - 160°C	80 - 160°C
Wärmeklasse	bis 180	bis 220	bis 180	bis 220
Wärmeleitfähigkeit	0,2 W/mK			
Anwendung als	Tränklack, Überzugslack	Tränklack, Überzugslack	Tränklack, B-Stage, Elektroblech	Tränklack Kältemittel-beständig



Trocknungsmechanismus der Lacke Kalt-Tauchen

„physikalische Trocknung“ = Abdampfen des LSM
dann thermische / oxidative Aushärtung

Der Unterschied zwischen einem Tränklack und einem Tränkharz

Die Chemie der Sekundärisolation – Lacke



Vorteile	Nachteile
Gute Lagerfähigkeit	Hohe Emissionen da etwa 50% Lösemittel
Lösemittel erlauben eine vielfältige Chemie	EX Schutz Öfen und Abluftführung
Lösemittel reinigen gleichzeitig, Nicht anfällig gegen Verunreinigungen	Oft billige aromatische Lösemittel und Formaldehyd Spaltprodukte
Kalttauchen ermöglicht hohe Produktvielfalt / Motortypen in der Produktion.	Mehrere Tauchgänge notwendig. Für moderne, kompakte Wicklungen mit kurzen Taktzeiten nicht möglich.
Über die Jahrzehnt in vielen EIS eingeführt	2 stufiger Aushärteprozess

- Die Lösemittel basierte Lacktechnologie ist immer noch gängig. Für Neuprojekte jedoch kaum mehr eine Option.
- Wässrige Lacke sind, vor allem in USA, weiterhin eine beliebte Technologie.

Der Unterschied zwischen einem Tränklack und einem Tränkharz

Die Chemie der Sekundärisolation – Harze

Chemie	Imprägnierharze				
	ungesättigtes Polyester(imid) = UP Harz			Epoxy	Silikonharz
Lösungsmittel	RV-Verdünner	RV-Verdünner	nein	RV-Verdünner	RV-Verdünner
	Styrol, Toluol, DAP	Methacrylat	monomerfrei	aliphat EP	phenyl-silikon
Viskosität @ 25°C	0,1-1 Pas	1 - 7 Pas	5 - 40 Pas	1-10 Pas	1
Reaktionstyp	radikalische Polymerisation			kat. Addtion	kat. Addtion
Härtungsprozess	thermisch (+UV)	thermisch (+UV)	thermisch (+UV)	thermisch	thermisch
Härtungs-Temp	130-160°C	130-170°C	150 - 180°C	130-180 °C	150-200°C
Wärmeklasse	bis 200	bis 200	bis 200	155-180	220
Wärmeleitfähigkeit	0,2 W/mK				
VOC / LE	nein	ja	ja	Ja	Ja
Anwendung als	Kalt-Tränken, Träufeln, VI und VPI	Warm -Tränken, Träufeln, (VI und VPI selten)	Heiß-Tränken, Träufeln	Warm-Tränken, Träufeln, VI und VPI	Warm-Tränken, Träufeln, VI und VPI

- Stand der Imprägnierharz Technologie
- Applikation je nach markt oder Bauteilanforderung
- Trend zu VOC freien, Low Emission, momomerfreien Harzen.



Der Unterschied zwischen einem Tränklack und einem Tränkharz

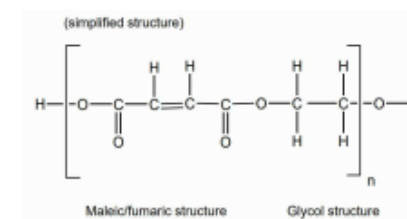
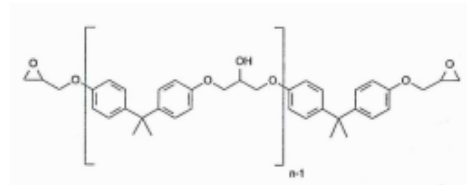
Die Chemie der Sekundärisolation – Harze

Ungesättigte Polyester (-imide)

- + Hohe Reaktivität möglich
- + Breiter Glasübergangsbereich durch Polymerisation, homogeneres Eigenschaftsbild über die Arbeitstemperatur
- Hydrolyseempfindlich, bei Direktkontakt mit wässrigen Kühlmitteln

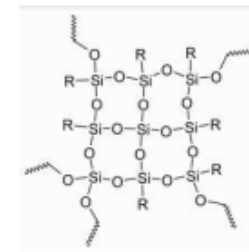
Epoxide

- + Hohe Anfangsfestigkeiten
- + Hohe Chemikalienbeständigkeit
- + Bessere Haftung auf PEEK
- Lange Aushärtezeiten



Silikonharz

- + Hochtemperaturfähig
- + Sehr gute elektrische Isoliereigenschaften
- Sehr lange Aushärtezeiten



 **ELANTAS**

Der Unterschied zwischen Tränklack und Tränkharz

Zusammensetzung der Elektroisolierharze

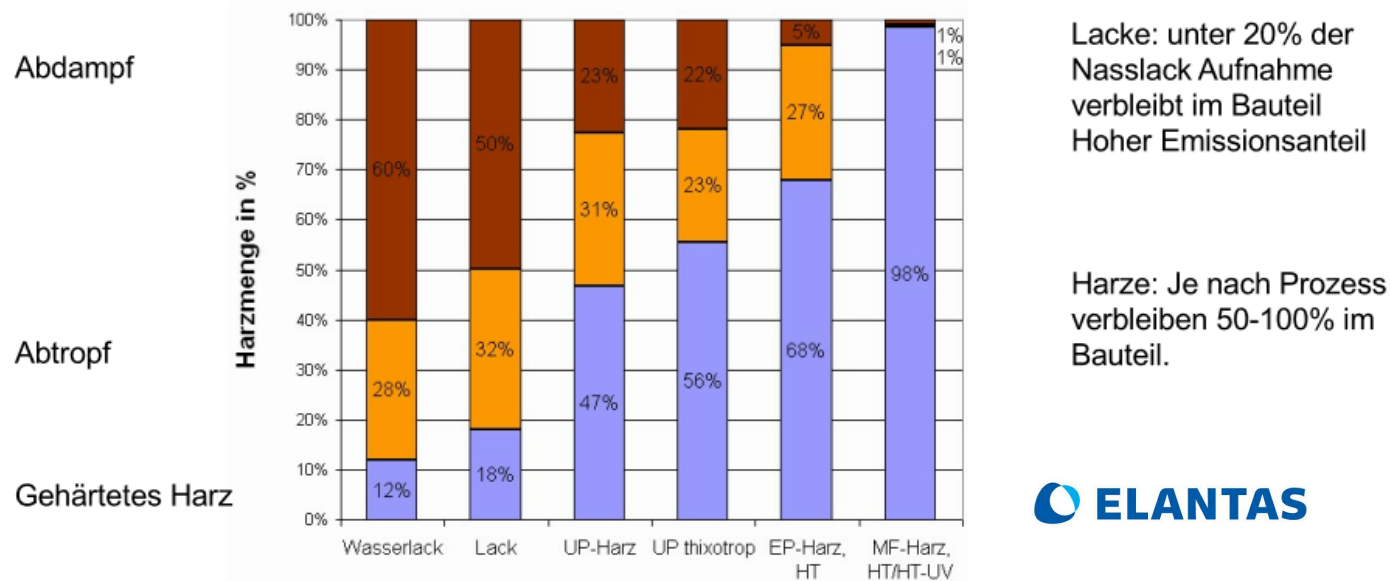
Imprägnierharze haben sehr wenige bis gar keine Lösungsmittel, was sich beim Abdampfen (Aushärten meist im Ofen) der Endprodukte sehr stark bemerkbar macht. Dies sehen wir in der folgenden Skizze im Vergleich von Imprägnierlacken und Imprägnierharzen.

Der Unterschied zwischen Tränklack und Tränklarz

Zusammensetzung der Elektroisolierharze

Imprägnierharze haben sehr wenige bis gar keine Lösungsmittel, was sich beim Abdampfen (Aushärten meist im Ofen) der Endprodukte sehr stark bemerkbar macht.

Dies sehen wir in der folgenden Skizze im Vergleich von Imprägnierlacken und –harzen.



Verwendungszwecke von Harzen

- Zusammenfassend können wir festhalten, der Markt für Elektroisierlacke im Bau für Industriemotoren hat sich aufgrund der technischen Unterlegenheit gegenüber ungesättigten Polyesterharzen bei Inverter gesteuerten Antrieben, sowie durch Umwelt- und Arbeitsschutzvorgaben noch stärker zurück entwickelt. Neue Motoren für diese hochwertigen Antriebe werden nahezu ausschließlich mit Laminaten und Tränk- / Träufelharzen produziert. Größere Transformatoren und Drosseln werden ebenfalls einem Imprägnierprozess mit einem Tränk- / Träufelharz unterzogen. Anders verhält es sich bei den Kleintransformatoren, diese werden meist nur gegen äußere Einflüsse lackiert und um die Wicklung zu verfestigen.
- Motoren aus dem Automotive, im Werkzeugmaschinenbau oder anderen herausfordernden Anwendungen werden die Statoren im Vollverguß aus Epoxidharzen (chemische Beständigkeit, sehr gute Wärmeableitung, hoher Temperaturindex) gefertigt. Genauso werden Trockentransformatoren von Verteilerstationen, Windkraftanlagen, usw. mit einem Epoxidharz gegen äußere Einflüsse vergossen.
- Motoren, welche in der Haustechnik (Rollläden, Rolltore, Garagentore, kleine Wasserpumpen, etc.) werden überwiegend mit Backlackdrähten gewickelt, so dass eine Sekundärisolierung nicht mehr nötig wird und dadurch Kosten entfallen.

Verwendungszwecke von Harzen

Weitere Ansätze zum Produktdesign:

- Da bei einem Motor immer der Antrieb auf die 20.000 Stunden im gesamten betrachtet werden muss, rückt auch bei der Reparatur immer stärker die Materialauswahl, Fertigung, Arbeits- und Umweltschutz, sowie Energie in den Vordergrund. Denn, der Kunde soll wiederkommen und nicht das Produkt!
- Zu berücksichtigen gilt also immer, woher kommt der Motor, wie viele Betriebsstunden sind zu kalkulieren und ist ein Inverter vorgeschaltet oder nicht.
- Zudem spielt die Energieeffizienz im Betrieb des Motors auch bei der Reparatur eine beachtende Rolle und kann dem Kunden Vorteile bringen. Je wärmer ein Motor wird, desto mehr Strom nimmt er auf und ineffizienter ist er, also müssen wir dagegen steuern. Besseres Isoliersystem (inkl. Imprägnierung) = bessere Wärmeableitung. Bspw. bei einem Vollverguß wird die Wicklung vollflächig bedeckt und bis zum Außenmantel gefüllt, somit kann nur sehr gering Luft eingeschlossen werden und den Wärmeaustausch beeinträchtigen. (Hohlblocksteine!)
- Viele Harze für den Vollverguß sind kalthärtend und werden nur bei 60°C – 100°C, je nach Mischungsverhältnis und Dauer, getempert. Dadurch werden Energiekosten bei der Fertigung und im Betrieb gesenkt.

Verwendungszwecke von Harzen

Apropos Kosten...

... da Sekundärisolierungen immer mit Wärme zu tun haben und Energie inzwischen sehr teuer geworden ist, hat sich eine „alte“ Imprägniervariante bei einem namhaften Motorenhersteller wieder als Standard herausgestellt, allerdings hochmodernisiert. Die anfänglichen Harze bestanden aus 2-Komponenten; einmal Harz und einmal Härter. Da bei einem ein-komponentigen Harz der Glasübergangspunkt deutlich höher ist; bedingt durch die lange Lagerfähigkeit, macht sich dieser Hersteller genau dieses zu nutze.

Die Statoren werden induktiv vorgewärmt auf $65^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, anschließend im 45° Winkel rotierend in den warmen Trüffelstrahl eingedreht und nach ca. 10 m ist das Harz geliert, danach werden die Statoren um 180° gedreht und der gleiche Prozess von der Unterseite vollzogen. Schließlich kommen die Statoren ohne Abtropfverluste direkt in den Ofen und bei ca. 120°C nachgetempert.

Somit ist kein Harzverlust gegeben, die energieintensive Aufheizung des Ofens mit Wärmeübertragung auf den Stator entfällt zwar nicht komplett, wird aber deutlich minimiert, da das Harz-/Härtergemisch schneller zu reagieren anfängt.

Die Einrichtung dieser automatischen „Fertigungsstraße“ hat sich gegenüber dem herkömmlichen Tränkprozess und der gestiegenen Energiekosten innerhalb von einem Jahr amortisiert.

Verwendungszwecke von Harzen

The world is going electric



Electric motion plays a significant role



Carbon reduction



Energy efficiency



Digitalization



Energy efficiency is a must

Demand for electric motion to double by 2040¹

1. Additional electricity consumption by electric motors till 2040
Source: WEO IEA 2018, "Future is electric", including industrial applications, room cooling and electric cars, IEA China electricity consumption 2016
© 2023 ABB. All rights reserved. Slide 3 October 17, 2023



The critical role of motors

45% of the world's electricity is used to power electric motors in building and industrial applications

Efficiency matters numbers: ABB Large Motors & Generators

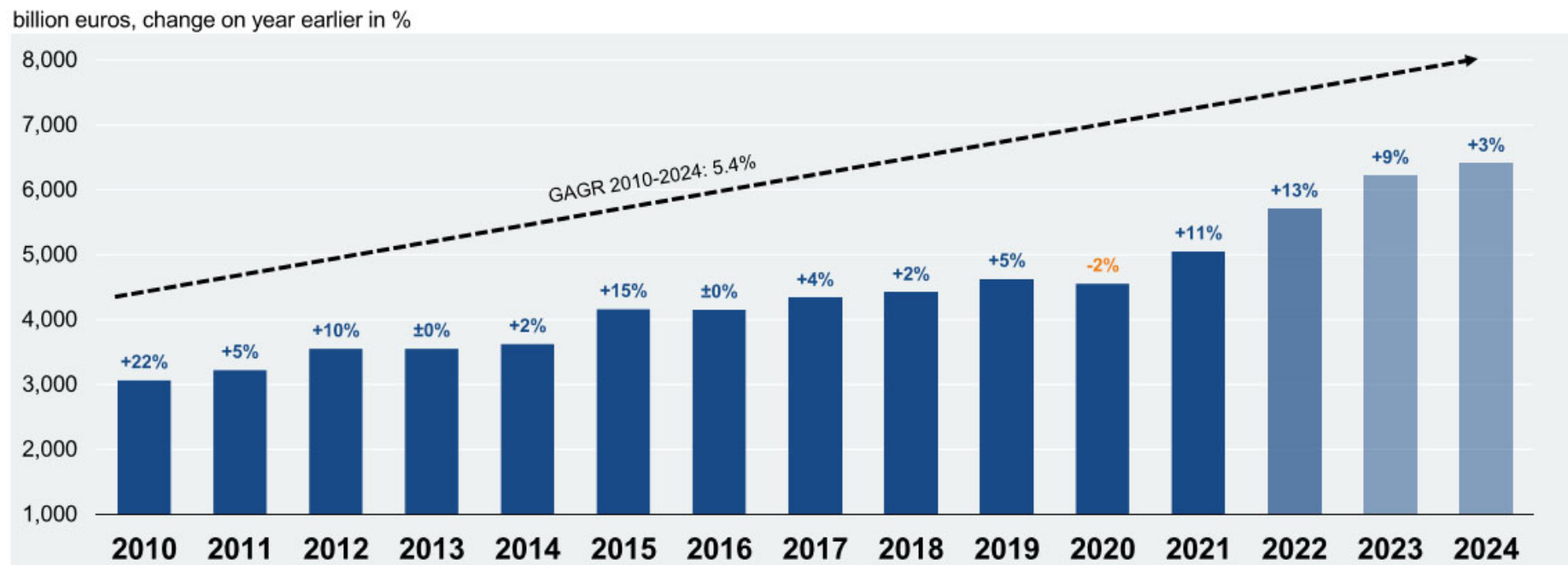
Choosing an option with 0.4% higher efficiency on a 20 MW motor results in **1.6 MUSD** and **6,000 tCO₂** savings over a 20-year **lifetime**

Average **payback** time of **0.5–1.5 years**



Global electro and digital industry

– Development since 2010 & forecasts until 2024

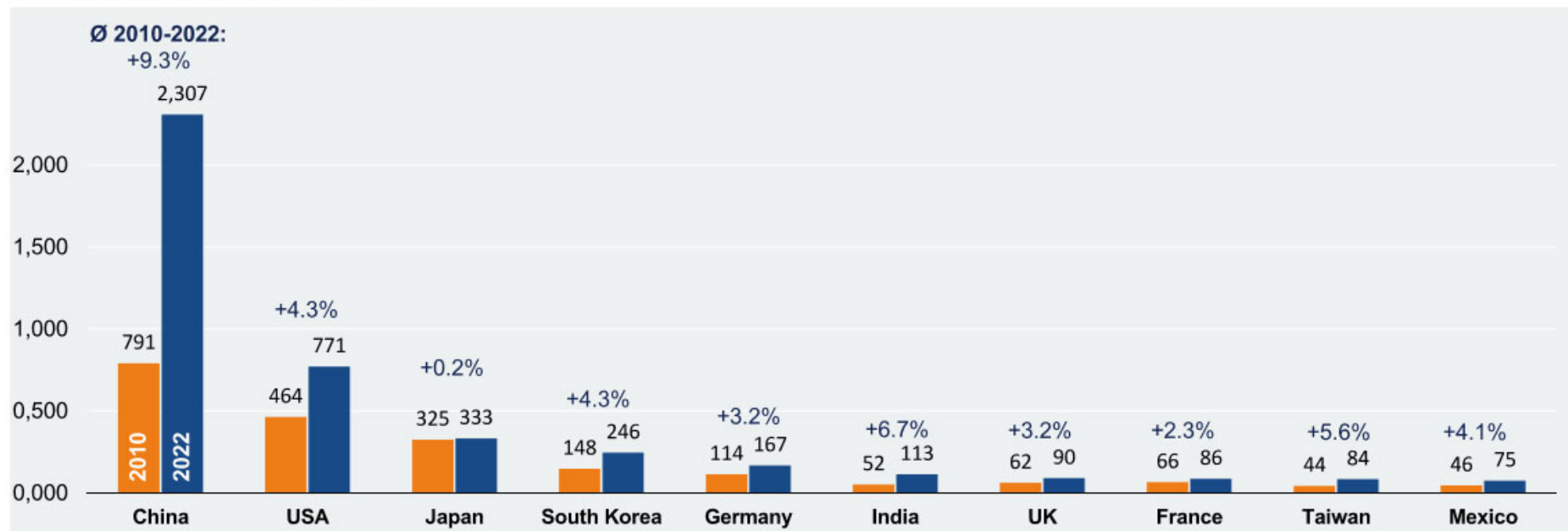


2022 nowcast, 2023 and 2024 forecast
Source: National statistical offices and ZVEI's own calculations

Global electro and digital industry

– TOP 10 country markets, development since 2010

billion euros, CAGR 2010 until 2022 in %

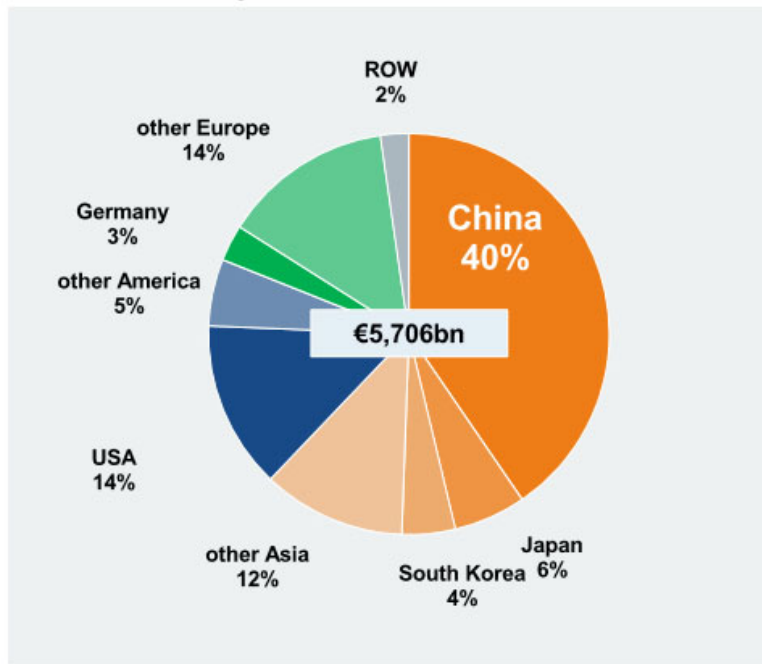


Source: National statistical offices and ZVEI's own calculations

Global electro and digital industry

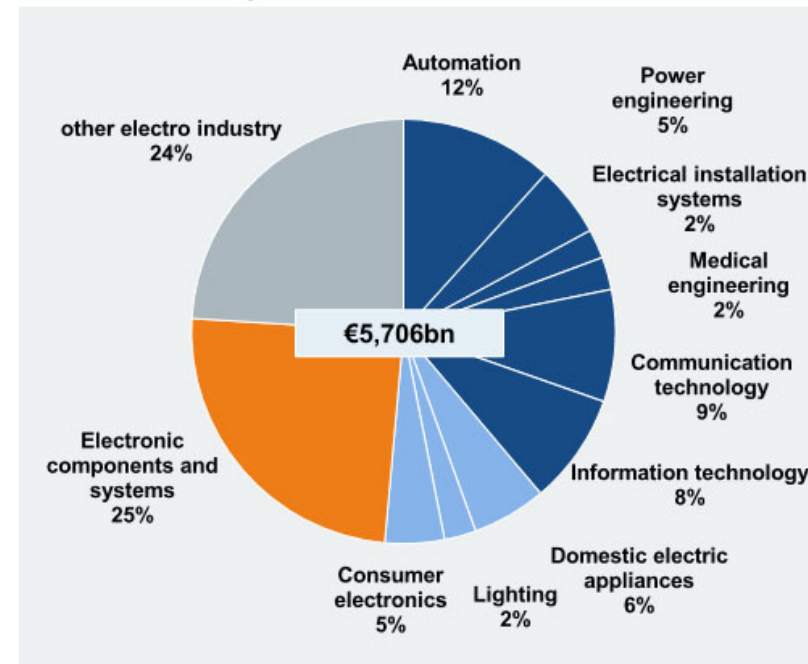
– Structure by countries/regions and sub-branches

2022, shares in the global market in %



Source: National statistical offices and ZVEI's own calculations

2022, shares in the global market in %



Source: National statistical offices and ZVEI's own calculations



Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!

a.thumm@diel.de

Mit freundlicher Unterstützung durch die ABB, ZVEI und ELANTAS a member of Altana-Group