Michael Budde (Autor)

Teilentladungsdiagnostik von hochbelasteten Isoliersystemen auf Epoxidharzbasis

https://cuvillier.de/de/shop/publications/799

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Grundlagen

1.1 Kunststoffe in der Elektrotechnik

Neben den klassischen festen Isolierstoffen, wie z.B. Porzellan, Keramik, Glas, Faserstoffe und Glimmerprodukte, die sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit und eine gewisse Unempfindlichkeit gegen chemische Einflüsse, Witterungseinflüsse, Strahlung und Teilentladungsbelastungen auszeichnen, werden seit Jahrzehnten zunehmend auch polymere Werkstoffe eingesetzt [Ger-05]. Die künstliche Herstellung von organischen Werkstoffen hat das Ziel, die natürlichen Werkstoffe zu ersetzen und dabei ihre Eigenschaften zu übertreffen und/oder neue Eigenschaften zu erreichen.

Charakteristisch für sie ist die breite Palette der verschiedenen Eigenschaften, wie Verarbeitungs-, Formgebungs- und Einsatzmöglichkeiten; gemeinsam haben sie den verhältnismäßig geringen Schmelzpunkt, der teilweise unter 100°C liegen kann [Küc-05]. Polymere Werkstoffe sind in der Regel leicht, weisen niedrige dielektrische Kennwerte und eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf [Hor-08].

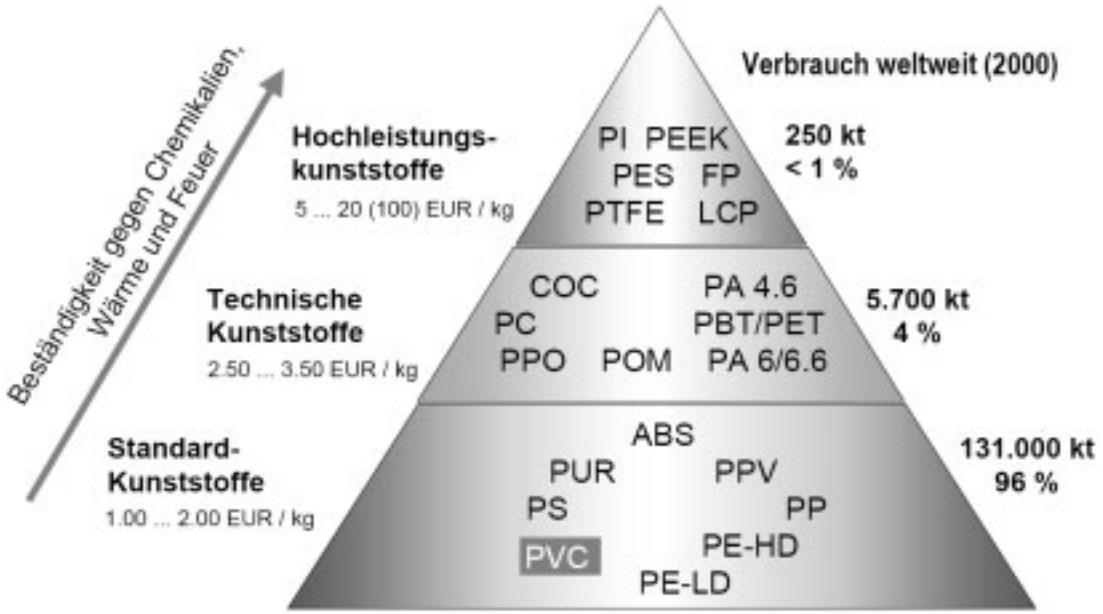

Bild 1.1: Übersicht über den weltweiten Einsatz von Kunststoffen im Jahr 2000

Grundbausteine von Polymeren sind Makromoleküle, die aus eine Kette von vielen hundert Monomeren bestehen können. Diese Ketten können unvernetzt (Thermoplaste), leicht vernetzt (Elastomere) oder aber stark vernetzt (Duroplaste) vorliegen [Hor-08]. Eine Übersicht der weltweit verwendeten Kunststoffe zeigt **Bild 1.1** [Kun-00].

1.1.1 Thermoplaste

Wesentliches Merkmal der Thermoplaste ist die schlechte Vernetzung von nebeneinander liegenden Molekülketten, d.h. ihre Vernetzung geschieht im Wesentlichen nur linear. Ihre Bindungskräfte sind physikalischer, d.h. zwischenmolekularer Natur. Sie sind dadurch bei Gebrauchstemperatur fest und können bei höheren Temperaturen fließend verformt werden. In ihrem mikroskopischen Aufbau werden sie unterschieden in teilkristallin oder amorph. Durch Beimengungen von einigen Prozent nichtpolymerer Stoffe, wie z.B. Weichmacher oder Stabilisatoren, können die Eigenschaften des Grundmaterials beeinflusst werden [Hor-08].

Klassische thermoplastische Isolierstoffe sind das Polyäthylen (PE), das Polyvinylchlorid (PVC) und das Polypropylen (PP).

1.1.2 Elastomere

Elastomere haben die einzigartige Eigenschaft der Gummielastizität, was auf die schwache bzw. weitmaschige Vernetzung der Kettenmoleküle zurückzuführen ist [Hor-08]. Andere Kunststoffarten verhalten sich nur in einem sehr schmalen Temperaturbereich gummiartig (Glasübergangspunkt), wohingegen Elastomere in einem sehr weiten Bereich gummielastisch sind. Sie haben kovalente Bindungskräfte, sind nicht schmelzbar und nicht löslich, jedoch quellbar.

Elastomere Isolierstoffe sind z.B. Chlorprene- (CR-), Nitril-/Butadien- (NBR-) und Fluor-Kautschuk (FKM). Sie werden häufig als Dichtungen oder Spritzschutz in der Elektrotechnik eingesetzt.

1.1.3 Duromere

Im Gegensatz zu den Thermoplasten sind die Molekülketten bei Duromeren stark miteinander durch kovalente und Ionenbindungskräfte vernetzt. Nach der Vernetzung können sie nicht mehr verformt werden, d.h. sie müssen entweder vor dem Härtungsprozess in eine entsprechende Form gegossen oder aber danach spanabhebend bearbeitet werden [Hor-08].

Epoxidharze

Typische Duromere sind Epoxidharze, die seit mittlerweile sechs Jahrzehnten in der Elektrotechnik Verwendung finden. Sie gehören in die Klasse der Reaktionsharze, die durch Polyaddition oder Polymerisation ohne Abspaltung flüchtiger Komponenten härten [Grin-07]. Insbesondere die sehr gute Festigkeit, Zähigkeit und Wärmebeständigkeit führen dazu, dass sie für qualitativ anspruchsvolle Anwendungen der Energietechnik in Frage kommen [Bei-07].

Zusätzlich haben sich in den letzten Jahren weitere Anforderungen der Industrie zur Herstellung elektrischer Isolierungen ergeben [Kau-07]:

- die Verkleinerung der Bauteile und damit Reduzierung der Isoliermaterialstärken;
- die Verbesserung der elektrischen und mechanischen Festigkeit;
- die Freiluftbeständigkeit;
- ein blasenfreier Verguss und
- eine verbesserte Oberfläche mit z.B. hydrophoben Eigenschaften.

Durch die verbesserte Prozesstechnik bei der Herstellung kommen darüber hinaus innerbetriebliche Anforderungen auf den Herstellungsprozess zu. Sie können wie folgt zusammengefasst werden [Kau-07]:

- der computergesteuerte Verguss (Vakuum- oder Druckgelierverfahren; s.u.);
- eine hohe Flexibilität der Anlagen in Bezug auf Anpassung an unterschiedliche Harzsysteme und Vergussverfahren;
- eine platzsparende und kompakte Auslegung der Anlagen auf einer Produktionsebene und
- eine rationelle und umweltschonende Verarbeitung der Isolierstoffe.

Bei der Verarbeitung der Epoxidharze werden die Stufen Einzelkomponenten, Reaktionsharzmasse und Formstoff durchlaufen. Bei der Herstellung der Reaktionsmasse muss auf eine gute Homogenisierung und Entgasung, eine gute Füllstoffbenetzung und eine geringe Sedimentation geachtet werden.

Die Reaktionsmasse besteht aus dem Harz, Härter und in der Regel aus Zusatzstoffen, wie z.B. Beschleuniger, Benetzungs- und Antisedimentationsmittel, Füllstoffe oder Pigmente. Die Reaktion verläuft exotherm, wobei erhebliche Wärmemengen freigesetzt werden können.

Als Verarbeitungsverfahren sind verschiedene Verfahren in Gebrauch [Bei-07]:

- Vakuumverguss (für Gießharztransformatoren);
- Druckgelieren (für Isolatoren, Durchführungen, Schalter);
- Vakuum-/Druckimprägnierung (für Generatoren, Motoren);
- Pressen (für Generatoren, Motoren);
- Träufeln (für Rotoren, Statoren);
- Strangziehen (für GFK-Profile, -Stäbe);
- Filament winding (für GFK-Rohre).

Das entscheidende Kriterium bei der Herstellung von Epoxidharzisolierungen ist die Vermeidung von Hohlräumen jeglicher Art [Grin-07]. Die mit der Vernetzungsreaktion einhergehende Dichteänderung und der Reaktionsschwund können bei Verarbeitungsproblemen nicht in jedem Fall durch nachfließende Masse kompensiert werden. Zum Zeitpunkt des Entformens ist die Härtereaktion erst zu etwa 75 bis 85 % abgeschlossen und verlangt in der Regel einen langwierigen Nachhärtungsschritt. Erst die neu entwickelten nicht nachhärtenden Epoxidharze (Non-post-cure-EP-Harzsysteme) können darauf verzichten [Grin-07].

Füllstoffe

Mineralische Füllstoffe ermöglichen es, durch die Einbringung in die Epoxidharzmatrix die Kosten zu senken und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern; sie sind daher häufig Hauptbestandteil der Isolierung. Zusätzlich verbessern sie die Rissbeständigkeit und Steifigkeit des Materials und verringern die Schwindung während des Härtungsprozesses. Als Standardmaterial kommt Quarzmehl (SiO_2) zur Anwendung. Daneben sind aber noch weitere Füllstoffe, wie z.B. Wollastonit, Aluminiumoxid, Siliziumcarbid oder Glimmer bekannt [Ger-05]. Mit ihnen lassen sich gezielt Werkstoffeigenschaften beeinflussen.

1.2 Teilentladungen

Für die Erläuterung des Begriffs „Teilentladungen“ hat die Norm eine exakte Beschreibung festgelegt [IEC 60270]:

- Teilentladung (TE) – örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einen Leiter auftreten kann.

Sie können in Gasen, Festkörpern und Flüssigkeiten (**Bild 1.2**) stattfinden und führen nicht direkt zum Durchschlag, können aber bei Isolierstoffen zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen. Daher sind sie fester Bestandteil der Qualitätsprüfung. Eine

wirtschaftliche Instandsetzung der Betriebsmittel fordert das Wissen über die Ursache und den Fehlerort der Teilentladung. Eine gezielte Verringerung der Beanspruchung lässt sich durch konstruktive Maßnahmen und eine örtlich verstärkte Isolation erreichen. Die Lebensdauer kann deutlich verbessert werden [Kur-93].

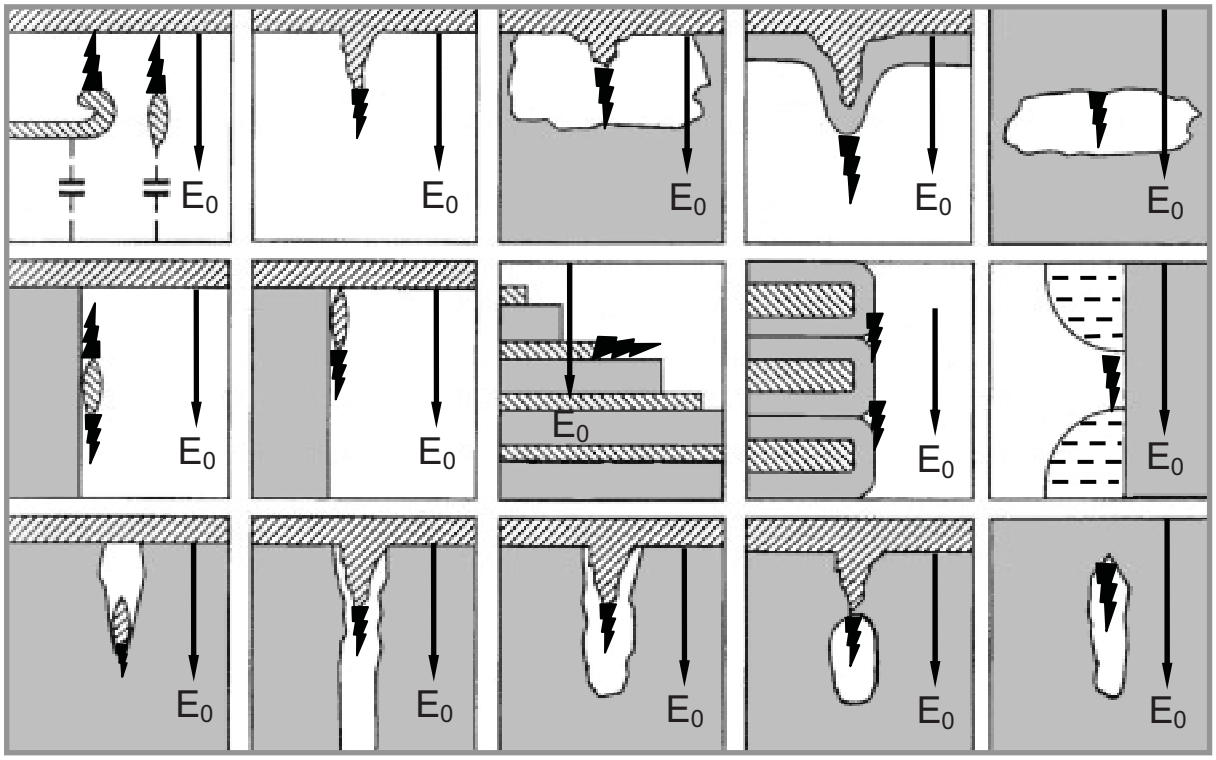

Bild 1.2: Übersicht verschiedener TE-Quellen zwischen Leitern ▨, Gasen □ und Isolierstoffen ■ (aus [Nie-95])

Wie in der Norm [IEC 60270] beschrieben überbrückt eine Teilentladung nur teilweise den Abstand zwischen den Potenzial führenden Kontakten. Es wird kein durchgehender niederohmiger Plasmakanal ausgebaut, der beide Kontakte vollständig verbindet.

Erst die Einleitung des Streamer-Mechanismus kann durch die Messtechnik erfasst werden. Um die Teilentladungsvorgänge zu verstehen, muss daher zunächst der Vorgang der Entladung anhand eines Streamers erläutert werden.

Ein Startelektron wird in einem Gas durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Ist die aufgenommene Energie, in Abhängigkeit von der freien Weglänge λ, ausreichend groß, können durch Stoßprozesse neue Elektronen und positive Ionen generiert werden. Es bildet sich eine Elektronenlawine aus. In der Gleichung 1-1 ist die Abhängigkeit von der konstanten Größe der Elementarladung e und der elektrischen Feldstärke E zu erkennen.

$$W = Q \cdot U = e \cdot E \cdot \lambda \qquad \text{(Glg. 1-1)}$$

Die Weglänge λ muss ausreichend lang sein, um die benötigte Stoßenergie aufzunehmen. Solch ein Stoßprozess ist in **Bild 1-3** dargestellt. Zu erkennen sind die Atome und die durch das elektrische Feld beschleunigten Elektronen. Ein Elektron stößt auf ein Atom und erreicht durch die aufgenommene kinetische Energie eine Spaltung des Atoms in ein positiv geladenes Ion und ein Elektron. Das freigesetzte und das ursprüngliche Elektron werden wieder durch das elektrische Feld beschleunigt. Durch weitere Stoßprozesse kann es zu einer Lawinenbildung kommen.

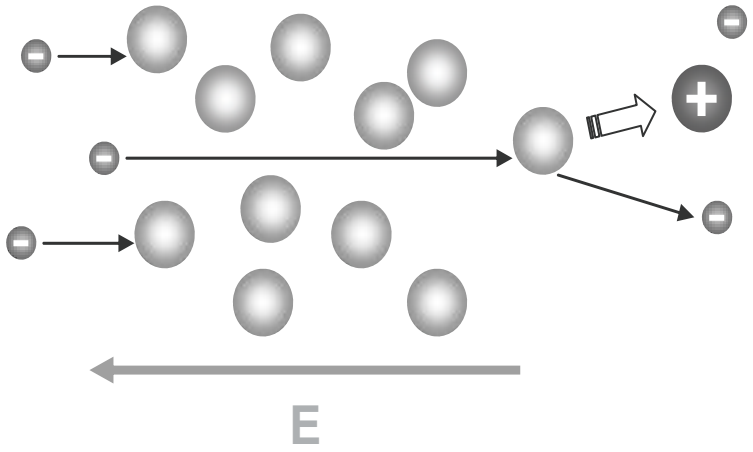

Bild 1-3: Zweidimensionale Darstellung des Beschleunigungs- und Stoßprozesses von Elektronen im elektrischen Feld mit erfolgreichem Stoßprozess mit einem Atom (rechts) [Tem-07]

Die entstandene Lawine bildet an ihrem Kopf eine negative Elektronenwolke. Aus der Bedingung:

$$N_e(x) = N_e(0) \cdot e^{(\alpha^* \cdot x)} \geq 10^6 \qquad \text{(Glg. 1-2)}$$

mit $N_e(x)$: Elektronenanzahl;

$N_e(0) = 1$: Startelektron;

α^* : effektiver Ionisierungskoeffizient;

x : zurückgelegte Strecke des Elektrons;

und

$$\alpha^* = \alpha - \eta \qquad \text{(Glg. 1-3)}$$

mit α : Ionisierungskoeffizient;

η : Anlagerungskoeffizient;

folgt die Zündbedingung einer Streamer-Entladung von N(x) ≥ 10^6 Elektronen, die nötig sind, um eine Streamer-Entladung auszulösen [Kur-07].

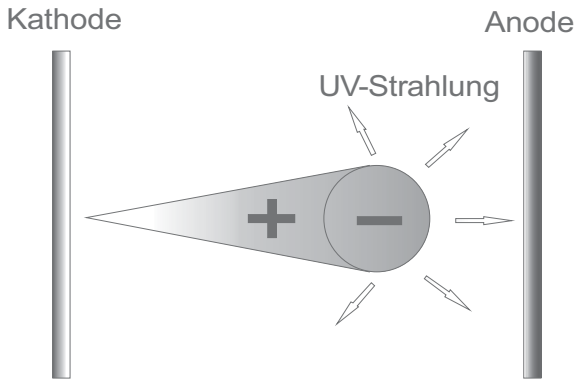

Bild 1-4: Ausbildung einer Elektronenlawine im gasgefüllten Raum zwischen zwei Elektroden

Durch die Teilung der Lawine in Ladungsträger mit geringer Beweglichkeit (positive Ionen, links) und mit hoher Beweglichkeit (Elektronen, rechts) kommt es zu einer elektrischen Feldverstärkung am Kopf der Elektronenwolke **(Bild 1-4)**. Ist diese groß genug (N(x) ≥ 10^6), sendet sie vom Lawinenkopf ausgehend photoionisierende Strahlung, d.h. UV-Licht, in alle Richtungen aus. Trifft diese auf der Kathode auf, können neue Startelektronen bereitgestellt werden.