

# Inhaltsverzeichnis

Übersicht .....	1
Einleitung.....	2
1 Materialien und Probekörper .....	6
1.1 Grundlagen der Reaktionsharzformstoff-Technologie.....	6
1.1.1 Reaktionsharzsysteme .....	6
1.1.1.1 Epoxidharzsysteme .....	6
1.1.1.2 Epoxidmodifizierte Isocyanatsysteme .....	9
1.1.2 Füllstoffe.....	11
1.1.2.1 Quarzmehl .....	13
1.1.2.2 Quarzgutmehl .....	13
1.1.2.3 Wollastonit .....	14
1.1.3 Härtungsreaktion und Schwund.....	14
1.2 Untersuchte Materialien.....	18
1.2.1 Eigenschaften der Füllstoffe .....	20
1.2.2 Physikalische Eigenschaften der Reaktionsharzformstoffe.....	22
1.2.3 Dielektrische Eigenschaften der Reaktionsharzformstoffe .....	25
1.3 Elektrodenanordnungen.....	27
1.3.1 Probekörper mit Rogowski-Elektrodenkonfiguration.....	27
1.3.2 Probekörper mit Nadel-Platte-Elektrodenkonfiguration .....	28
1.4 Gießvorgang.....	29
2 Aufbau und Durchführung der Versuche.....	31
2.1 Versuchseinrichtungen.....	31
2.1.1 Verwendete Prüfgefäße.....	31
2.1.2 Aufbau zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagfestigkeit.....	32
2.1.3 Aufbau zur Bestimmung der Teilentladungs(TE)-Kenngrößen .....	33
2.2 Versuchsdurchführung.....	34
2.2.1 Bestimmung der Durchschlag- und TE-Einsatzspannung .....	34
2.2.2 Bestimmung des TE-Verhaltens vor und nach thermischen Wechselbeanspruchungen.....	35
2.3 Auswertung der TE-Kenngrößen .....	37

---

3	Theoretische Grundlagen .....	39
3.1	Leitungs- und Verlustmechanismen in hochpolymeren Isolierstoffen.....	39
3.1.1	Bändermodell.....	39
3.1.2	Gleichstromleitung .....	42
3.1.3	Ladungsträgerbereitstellung.....	45
3.1.4	Wechselspannungsverluste .....	48
3.1.5	Einfluss der Frequenz, der Temperatur und der Feldstärke auf den Verlustfaktor und die Permittivität.....	50
3.1.6	Raumladungen .....	52
3.2	Struktureller Aufbau mineralisch gefüllter Reaktionsharzformstoffe.....	53
3.2.1	Harzmatrix .....	54
3.2.2	Füllstoff .....	54
3.2.3	Harzmatrix-Füllstoff-Grenzfläche .....	55
3.3	Ursachen und Wirkungen mechanischer Spannungen.....	59
3.3.1	Entstehung von inneren mechanischen Spannungen .....	60
3.3.2	Auswirkungen von mechanischen Spannungen.....	61
3.3.2.1	Zerstörungsfreie Materialverspannungen .....	61
3.3.2.2	Rissbildung und -ausbreitung.....	63
3.4	Durchschlagprozesse in festen Isolierstoffen.....	67
3.4.1	Elektrischer Durchschlag .....	68
3.4.2	Wärmedurchschlag .....	70
3.4.3	Elektromechanischer Durchschlag .....	73
3.4.4	Erosionsdurchschlag.....	77
3.5	TE-Vorgänge in festen Isolierstoffen.....	78
3.5.1	TE in Hohlräumen.....	79
3.5.2	„Electrical Treeing“.....	82
3.5.2.1	Initialaufbruch.....	82
3.5.2.2	TE-Aktivität und Kanalwachstum.....	85
4	Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse.....	88
4.1	Elektrische Kurzzeitfestigkeit der Reaktionsharzformstoffe .....	88
4.1.1	Durchschlagspannung im homogenen elektrischen Feld .....	88
4.1.1.1	Einfluss der Temperatur .....	88
4.1.1.2	Einfluss der Elektrodenoberfläche und der Schlagweite .....	94
4.1.2	Durchschlagspannung im inhomogenen elektrischen Feld.....	95

---

4.1.2.1 Einfluss der Temperatur .....	95
4.1.2.2 Einfluss der Ausrichtung der Nadel-Elektrode .....	97
4.1.2.3 Einfluss der Herstellungsparameter und der Vorbeanspruchung .....	98
4.1.3 TE-Einsatzspannung im inhomogenen elektrischen Feld .....	100
4.1.3.1 Einfluss der Temperatur .....	100
4.1.3.2 Einfluss der Nachhärte-temperatur.....	104
4.2 TE-Verhalten der Formstoffe vor und nach thermischen Wechselbeanspruchungen ..	109
4.2.1 TE-Einsatzspannung .....	110
4.2.2 TE-Kenngrößen .....	115
4.2.2.1 Phasenaufgelöste TE-Muster.....	115
4.2.2.2 Anzahl, mittlerer Ladungsinhalt, Erwartungswert und Energieinhalt der TE .....	118
Zusammenfassung .....	133
Schrifttum.....	141
Zitierte Normen .....	160
Lebenslauf	

## Abkürzungen und Formelzeichen

1-K-Anlage	Ein-Komponenten-Gießanlage
AKV	Ankopplungsvierpol
BADGE	Bisphenol-A-diglycidylether
DSC	Differential Scanning Calorimetry
ESZ	ebener Spannungszustand
EVZ	ebener Verzerrungszustand
Gew.-%	Gewichtsprozent
GT	Gewichtsteil
k. A.	keine Angabe
mech.	mechanisch
MDI	Diphenylmethandiisocyanat
min.	minimal
MTHPA	Methyltetrahydrophthalsäureanhydrid
REM	Rasterelektronenmikroskop
sil.	silanisiert
TE	Teilentladung
TEM	Teilentladungsmessgerät
TMA	thermomechanische Analyse
TTT	Time-Temperature-Transition
RT	Raumtemperatur
Syst.	System
therm.	thermisch
Vol.-%	Volumenprozent
$a_F$	spezifische Füllstoffoberfläche
$A$	Elektrodenfläche
$A_R$	Richardson-Konstante
$b_e, b_i$	Beweglichkeit von Elektronen und Ionen
$c$	Konstante
$C$	Kapazität
$C_0$	Leerkapazität
$C_1$	Kapazität des Hohlraums
$C_2$	Kapazität des intakten Materials in Reihe zum Hohlraum
$C_3$	Kapazität des intakten Materials parallel zum Hohlraum
$C_K$	Koppelkapazität
$C_{OS}$	Oberspannungskapazität
$C_{US}$	Unterspannungskapazität
$d$	Korndurchmesser, Maschenweite des Prüfsiebes
$d_{50}$	mittlerer Korndurchmesser
$d_{95}$	oberer Korndurchmesser
$d_{max}$	maximaler Korndurchmesser
$D$	elektrische Verschiebungsdichte, Siebdurchgang
$D_n$	Normalkomponente der elektrischen Verschiebungsdichte
$e$	Elementarladung
$E$	elektrische Feldstärke

$E_D$	Durchschlagfeldstärke
$E_{D, em}$	elektromechanische Durchschlagfeldstärke
$E_{krit}$	kritische Feldstärke
$E_{max}, \hat{E}_{max}$	maximale Feldstärke
$E_{mittel}$	mittlere Feldstärke
$E_M$	Elastizitätsmodul
$E_{M, F}$	Elastizitätsmodul des Formstoffs
$E_{M, P}$	Elastizitätsmodul sich gegenseitig anziehender Partikel
$E_n$	Normalkomponente der elektrischen Feldstärke
$E_{(-)}$	Kathodenfeldstärke
$f$	Frequenz
$F$	Kraft
$G$	Energiefreisetzungsrate
$G_{IC}$	kritische Energiefreisetzungsrate
$h$	spezifische Reaktionsenthalpie
$i, I$	Strom, Zählindex
$i_{TE}$	Nachladestrom
$I_C, I_R$	Imaginär- und Realteil des Stroms
$k$	Boltzmann-Konstante
$K_I$	Spannungsintensitätsfaktor
$K_{IC}$	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
$L$	Länge
$L_\mu$	Längsausdehnung einer Leerstelle
$l_{Ri}$	Risslänge
$m$	Erwartungswert, Masse, Zählindex
$n$	Zählindex
$N$	Impulshäufigkeit
$N_e, N_i$	Anzahl an Elektronen und Ionen
$N_M$	Anzahl der Messungen
$N_{th}$	Anzahl der thermischen Wechselbeanspruchungen
$p$	Druck
$P_{ab}$	abgeführte Leistung
$P'_{ab}$	abgeführte Leistung pro Volumeneinheit
$P_{diel}$	dielektrische Verlustleistung
$P'_{diel}$	dielektrische Verlustleistung pro Volumeneinheit
$P_v$	Verlustleistung
$P'_v$	Verlustleistung pro Volumeneinheit
$P_1$	Stromwärmeverlustleistung
$Q$	Ladung
$Q_1$	im Hohlraum umgesetzte Ladung
$Q_e, Q_i$	Ladung von Elektronen und Ionen
$Q_{mit}$	mittlere scheinbare Ladung
$Q_s$	scheinbare Ladung
$Q_{Ph}$	scheinbare Ladungsmenge je Phasenabschnitt
$r$	Radius eines Risses, Spitzenradius der Nadelelektrode
$r_R$	Radius der Raumladungszone
$R$	Gaskonstante, ohmscher Widerstand, Reaktionsumsatz
$R_1$	Widerstand der Hohlraumwandung und -umgebung
$R_2$	Widerstand des dem Hohlraum in Reihe liegenden Dielektrikums
$R_a$	Mittenrauwert

$R_z$	gemittelte Rautiefe
$s$	mittlere Schichtdicke, Schlagweite
$s_0$	Mindestschichtdicke
$S_{\text{FN}}, S_{\text{RS}}$	Kathodenstromdichte nach Fowler-Nordheim und Richardson-Schottky
$t$	Zeit
$\tan \delta$	dielektrischer Verlustfaktor
$\tan \delta_L$	Leitungsverlustfaktor
$\tan \delta_P$	Polarisationsverlustfaktor
$\tan \delta_{\text{TE}}$	Teilentladungsverlustfaktor
$T$	absolute Temperatur
$T_g$	Glasübergangstemperatur
$T_{g0}$	Glasübergangstemperatur des vollständig unernetzten Reaktionsharzes
$T_{\text{ggel}}$	Glasübergangstemperatur des teilweise vernetzten Reaktionsharzes
$T_{g^\infty}$	Glasübergangstemperatur des vollständig vernetzten Reaktionsharzes
$T_U$	Umgebungstemperatur
$T_{(-)}$	Temperatur der Kathode
$u, U$	Spannung
$u_1, U_1, \hat{U}_1$	Spannungsabfall über Hohlraum
$u_2$	Spannungsabfall über intaktem Dielektrikum
$U_D$	Durchschlagspannung
$U_{K, g}$	Kippspannung des globalen Wärmedurchschlags
$U_{K, l}$	Kippspannung des lokalen Wärmedurchschlags
$U_L$	Löschspannung
$U_{\text{TE}}$	Teilentladungseinsetzspannung
$U_Z$	Zündspannung
$U_\mu$	Spannungsabfall über Leerstelle
$V$	Volumen
$W$	Bandabstand, Energie
$W_0$	Elektronenaustrittsarbeit des Kathodenmetalls im leeren Raum
$W_a$	außen am Prüflingen messbare Energie einer Teilentladung
$W_{\text{em}}$	elektromechanische Energie
$W_{\text{es}}$	elektrostatische Energie
$W_i$	innerhalb des Prüflings umgesetzte Energie einer Teilentladung
$W_{\text{pls}}$	plastische Verformungsenergie
$W_{\text{th}}$	thermische Aktivierungsenergie
$W_A$	Elektronenaffinität des Dielektrikums
$W_S$	Oberflächenenergie
$W_\mu$	energetische Höhe eines Potenzialwalls
$x, y$	axiale Wegkoordinate, Zählindex
$x_0$	Nennradius einer Elektrode mit Rogowski-Profil
$Y$	Geometriefaktor
$\alpha$	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
$\alpha_F$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Formstoffs
$\alpha_M$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Metalls
$\beta$	Temperaturkoeffizient
$\beta_{\text{PF}}$	Poole-Frenkel-Konstante
$\beta_S$	Schottky-Konstante
$\gamma$	Grenzflächenenergie, Grenzflächenspannung

$\Delta t$	Zeitspanne
$\Delta L$	Längenänderung
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz
$\varepsilon$	Permittivität
$\varepsilon_0$	Permittivität des leeren Raumes
$\varepsilon_{\text{krit}}$	kritische Dehnung
$\varepsilon_r$	Permittivitätszahl
$\varepsilon_r'$	Realteil der komplexen Permittivitätszahl
$\varepsilon_r''$	Imaginärteil der komplexen Permittivitätszahl
$\varepsilon_{\text{rel}}$	relative Dehnung
$\varepsilon_R$	Reaktionsschwund
$\varepsilon_S$	Schwund
$\varepsilon_T$	Abkühlungsschwund
$\eta$	Schwaiger'scher Ausnutzungsfaktor
$\vartheta$	Temperatur
$\vartheta_H$	Härtungstemperatur
$\Theta$	Benetzungswinkel
$\kappa$	elektrische Leitfähigkeit
$\kappa_{\text{min}}$	minimale Gleichstromleitfähigkeit
$\kappa_{\infty}$	stationäre Gleichstromleitfähigkeit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	Füllgrad, Querkontraktionszahl
$\rho$	Dichte
$\rho_s$	spezifischer Durchgangswiderstand
$\rho_M$	Dichte der Polymermatrix
$\rho(T)$	Raumverlustziffer
$\sigma$	mechanische Spannung, Oberflächenspannung
$\sigma_d$	Druckspannung
$\sigma_{\text{em}}$	elektromechanische Spannung
$\sigma_f$	Oberflächenspannung des Feststoffs
$\sigma_{\text{fl}}$	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
$\sigma_{\text{krit}}$	kritische Spannung
$\sigma_n$	Normalspannung
$\sigma_y$	Streckspannung
$\sigma_z$	Zugspannung
$\varphi$	Phasenwinkel, Winkel
$\omega$	Kreisfrequenz
$\zeta(I_R)$	raumladungsabhängiger Verstärkungsfaktor