

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| | Literatur | 5 |
| 2 | Hohe Wechselspannungen und -ströme | 7 |
| 2.1 | Wechselspannungen | 7 |
| 2.2 | Wechselströme | 9 |
| 2.2.1 | Stationärer Wechselstrom | 10 |
| 2.2.2 | Kurzzeitwechselstrom | 11 |
| 2.3 | Erzeugung hoher Wechselspannungen | 12 |
| 2.3.1 | Bauarten von Prüftransformatoren | 13 |
| 2.3.2 | Kaskadenschaltung von Transformatoren | 13 |
| 2.3.3 | Resonanzprüf anlagen | 17 |
| 2.4 | Erzeugung hoher Wechselströme | 18 |
| 2.5 | Messung hoher Wechselspannungen | 18 |
| 2.5.1 | Kapazitiver Spannungsteiler | 19 |
| 2.5.1.1 | Streukapazitäten und einfache Ersatzschaltbilder | 20 |
| 2.5.2 | Analoge Messgeräteschaltungen | 21 |
| 2.5.2.1 | Einfache Scheitelpunktspannungsmesseinrichtung | 22 |
| 2.5.2.2 | Messeinrichtung nach Chubb und Fortescue | 22 |
| 2.5.3 | Digitale Messgeräteschaltungen | 26 |
| 2.5.4 | Elektrostatische Voltmeter | 28 |
| 2.5.5 | Induktive Spannungswandler | 28 |
| 2.5.6 | Kapazitive Spannungswandler | 29 |
| 2.5.7 | Elektronische Spannungswandler | 30 |
| 2.5.8 | Kugelfunkenstrecke | 32 |
| 2.6 | Messung hoher Wechselströme | 35 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 2.6.1 | Messwiderstände | 35 |
| 2.6.2 | Induktive Stromwandler | 35 |
| 2.6.3 | Messspulen mit elektronischer Datenübertragung | 36 |
| 2.6.3.1 | Rogowski-Spulen für Wechselstrommessungen | 37 |
| 2.6.3.2 | Strommessung auf Hochspannungspotenzial | 38 |
| Literatur | | 40 |
| 3 | Hohe Gleichspannungen und -ströme | 43 |
| 3.1 | Gleichspannungen | 43 |
| 3.2 | Gleichströme | 45 |
| 3.2.1 | Stationärer Gleichstrom | 45 |
| 3.2.2 | Kurzzeitgleichstrom | 46 |
| 3.3 | Erzeugung hoher Gleichspannungen und -ströme | 47 |
| 3.3.1 | Gleichrichterschaltungen | 48 |
| 3.3.2 | Elektrostatische Generatoren | 51 |
| 3.4 | Messung hoher Gleichspannungen | 51 |
| 3.4.1 | Messanordnung mit ohmschem Spannungsteiler | 52 |
| 3.4.2 | Messanordnung mit Vorwiderstand | 54 |
| 3.4.3 | Temperaturverhalten | 56 |
| 3.4.4 | Übertragungsverhalten | 59 |
| 3.4.4.1 | Messung der Welligkeit | 60 |
| 3.4.5 | Gleichspannungsteiler höchster Genauigkeit | 61 |
| 3.4.6 | Addition von Teilspannungen | 64 |
| 3.4.7 | Fixpunkte der Hochspannungsskale | 65 |
| 3.4.8 | Rotationsvoltmeter | 66 |
| 3.4.9 | Stab-Stab-Funkenstrecke | 69 |
| 3.5 | Messung hoher Gleichströme | 71 |
| 3.5.1 | Niederohmige Messwiderstände | 71 |
| 3.5.2 | Hall-Stromsensoren | 72 |
| 3.5.3 | Gleichstromwandler | 75 |
| Literatur | | 76 |
| 4 | Stoßspannungen | 79 |
| 4.1 | Definitionen und Parameter von Stoßspannungen | 79 |
| 4.1.1 | Blitzstoßspannungen | 80 |
| 4.1.1.1 | Toleranzen und Messunsicherheiten bei Prüfungen | 83 |
| 4.1.1.2 | Blitzstoßspannung mit überlagerter Schwingung | 83 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1.2 | Schaltstoßspannungen | 89 |
| 4.1.2.1 | Bestimmung der Scheitelzeit | 90 |
| 4.1.3 | Schwingende Stoßspannungen bei Vor-Ort-Prüfungen | 92 |
| 4.1.4 | Steilstoßspannung | 92 |
| 4.2 | Erzeugung von Stoßspannungen | 94 |
| 4.2.1 | Generatoren für Blitz- und Schaltstoßspannungen | 94 |
| 4.2.1.1 | Vervielfachungsschaltung | 96 |
| 4.2.1.2 | Betrieb des Stoßspannungsgenerators | 96 |
| 4.2.1.3 | Überschwingen der erzeugten Stoßspannung | 99 |
| 4.2.1.4 | Rückenhalbwertszeit bei kleiner induktiver Last | 101 |
| 4.2.2 | Erzeugung von schwingenden Stoßspannungen | 101 |
| 4.2.3 | Erzeugung von abgeschnittenen Stoßspannungen | 102 |
| 4.2.4 | Erzeugung von Steilstoßspannungen | 103 |
| 4.3 | Messung von Stoßspannungen | 104 |
| 4.3.1 | Messsysteme mit Stoßspannungsteiler | 105 |
| 4.3.1.1 | Grundsätzliche Anordnung des Prüf- und Messkreises | 105 |
| 4.3.1.2 | Komponenten eines Stoßspannungsmesssystems | 106 |
| 4.3.1.3 | Maßstabsfaktor | 110 |
| 4.3.1.4 | Streukapazität zur Erde | 111 |
| 4.3.1.5 | Allgemeine Betrachtung zum Übertragungsverhalten | 112 |
| 4.3.1.6 | Kettenleiterersatzschaltbild und Sprungantwort | 114 |
| 4.3.1.7 | Einwirkung von Störungen und Gegenmaßnahmen | 116 |
| 4.3.2 | Messsysteme mit ohmschem Stoßspannungsteiler | 118 |
| 4.3.2.1 | Grundsätzlicher Aufbau des Messsystems | 118 |
| 4.3.2.2 | Sprungantwort des ohmschen Spannungsteilers als Kettenleiter | 121 |
| 4.3.2.3 | Einfaches Ersatzschaltbild mit konzentrierten Elementen | 123 |
| 4.3.2.4 | Feldkonformer Widerstandsteiler | 124 |
| 4.3.2.5 | Optimierter Messabgriff | 125 |
| 4.3.2.6 | Kapazitive Signaleinkopplung in den Niederspannungsteil | 127 |
| 4.3.2.7 | Spannungsteiler mit wässriger Lösung | 127 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 4.3.3 | Kapazitiver Stoßspannungsteiler | 128 |
| 4.3.3.1 | Aufbau des Messsystems mit kapazitivem Spannungsteiler | 128 |
| 4.3.3.2 | Schaltung auf der Niederspannungsseite | 129 |
| 4.3.3.3 | Burch-Abschluss bei langem Messkabel | 130 |
| 4.3.3.4 | Einfache Ersatzschaltbilder mit Erdkapazität | 130 |
| 4.3.3.5 | Varianten des kapazitiven Stoßspannungsteilers | 131 |
| 4.3.4 | Gedämpft kapazitiver Stoßspannungsteiler | 133 |
| 4.3.4.1 | Aufbau des Messsystems mit gedämpft kapazitivem Spannungsteiler | 133 |
| 4.3.4.2 | Kettenleiterersatzschaltbild und Sprungantwort | 135 |
| 4.3.4.3 | Messkabel und Burch-Abschluss | 137 |
| 4.3.4.4 | Optimierung des Niederspannungsteils | 137 |
| 4.3.4.5 | Optimal und schwach gedämpfte kapazitive Stoßspannungsteiler | 138 |
| 4.3.4.6 | Beispiele für Referenzteiler | 139 |
| 4.3.5 | Ohmsch-kapazitiv gemischter Spannungsteiler | 144 |
| 4.3.6 | Kugelfunkenstrecke für Stoßspannungsmessungen | 146 |
| 4.3.7 | Kapazitive Feldsensoren | 148 |
| 4.3.7.1 | Messprinzip und Ersatzschaltbild | 148 |
| 4.3.7.2 | Feldsensor für den Linearitätsnachweis von Spannungsteilern | 150 |
| 4.3.7.3 | Dreidimensionaler Feldsensor | 151 |
| Literatur | | 153 |
| 5 | Stoßströme | 159 |
| 5.1 | Definitionen und Parameter von Stoßströmen | 160 |
| 5.1.1 | Exponentielle Stoßströme | 160 |
| 5.1.2 | Rechteckstoßstrom | 162 |
| 5.2 | Erzeugung von Stoßströmen | 162 |
| 5.2.1 | Generatorschaltung für exponentielle Stoßströme | 162 |
| 5.2.1.1 | Einfluss des Prüflings auf den Zeitverlauf | 165 |
| 5.2.1.2 | Crowbar-Technik | 166 |
| 5.2.2 | Generatorschaltung für Rechteckstoßströme | 167 |
| 5.3 | Messung von Stoßströmen | 168 |
| 5.3.1 | Messsystem mit niederohmigem Messwiderstand | 169 |
| 5.3.1.1 | Erdschleifen und Kopplungsimpedanz | 169 |
| 5.3.1.2 | Leiterwiderstand eines Messkabels | 172 |
| 5.3.1.3 | Induktivitäten eines niederohmigen Widerstandes | 173 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 5.3.1.4 | Aufbau koaxialer Messwiderstände | 176 |
| 5.3.1.5 | Stromverdrängung (Skineffekt) | 178 |
| 5.3.1.6 | Kettenleiterersatzschaltbild | 181 |
| 5.3.1.7 | Experimentelle Sprungantwort von Messwiderständen | 182 |
| 5.3.1.8 | Besondere Bauformen | 184 |
| 5.3.1.9 | Grenzlastintegral | 186 |
| 5.3.2 | Messsysteme mit Strommessspule | 188 |
| 5.3.2.1 | Durchflutungs- und Induktionsgesetz | 188 |
| 5.3.2.2 | Integrationsverfahren | 191 |
| 5.3.2.3 | Sprungantwort von Messspulen | 192 |
| 5.3.2.4 | Potenzialfreie Messdatenübertragung | 193 |
| 5.3.2.5 | Rogowski-Spulen | 193 |
| 5.3.2.6 | Strommessspulen mit Magnetkern | 199 |
| 5.3.2.7 | Magnetfeldsensor | 200 |
| Literatur | | 203 |
| 6 | Elektro- und magnetooptische Sensoren | 205 |
| 6.1 | Elektrooptische Effekte | 205 |
| 6.1.1 | Pockels-Effekt | 206 |
| 6.1.1.1 | Pockels-Sensoren für Feldmessungen | 208 |
| 6.1.1.2 | Pockels-Sensoren für Spannungsmessungen | 212 |
| 6.1.1.3 | Inverser piezoelektrischer Effekt | 214 |
| 6.1.1.4 | Elektrooptische Spannungswandler | 215 |
| 6.1.2 | Elektrooptischer Kerr-Effekt | 216 |
| 6.2 | Faraday-Effekt | 219 |
| 6.2.1 | Magnetooptische Stromsensoren | 220 |
| 6.2.2 | Magnetooptische Stromwandler | 223 |
| Literatur | | 223 |
| 7 | Digitalrecorder, Software und Kalibratoren | 227 |
| 7.1 | Aufbau und Eigenschaften von Digitalrecordern | 227 |
| 7.1.1 | A/D-Wandlung mit Flash-Konverter | 228 |
| 7.1.2 | Charakteristische Daten des Digitalrecorders | 230 |
| 7.1.3 | Weitere Eigenschaften des Digitalrecorders | 232 |
| 7.2 | Fehlerquellen der digitalen Messtechnik | 234 |
| 7.2.1 | Ideale Quantisierung | 235 |
| 7.2.2 | Statische differenzielle und integrale Nichtlinearitäten | 237 |
| 7.2.3 | Differenzielle Nichtlinearität und Häufigkeitsverteilung bei dynamischer Beanspruchung | 239 |
| 7.2.4 | Diskrete Abtastfehler bei Sinusspannungen | 241 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 7.2.5 | Effektive Bitzahl | 242 |
| 7.2.6 | Signalsteilheit und Abtastfehler | 244 |
| 7.2.7 | Rauschen und Jitter des A/D-Wandlers | 245 |
| 7.2.8 | Sprungantwort des Digitalrecorders | 246 |
| 7.2.9 | Elektromagnetische Störbeeinflussung | 248 |
| 7.3 | Software zur Datenauswertung | 249 |
| 7.3.1 | Prüfung der Auswertesoftware mit dem TDG | 250 |
| 7.4 | Kalibriergeneratoren | 251 |
| 7.5 | Anforderungen an Messgeräte, Software und Kalibratoren | 253 |
| Literatur | | 256 |
| 8 | Darstellung von Impulsen im Zeit- und Frequenzbereich | 259 |
| 8.1 | Analytische Darstellung von Stoßspannungen | 259 |
| 8.1.1 | Mathematischer und virtueller Nullpunkt | 263 |
| 8.1.2 | Varianten der Stoßspannung | 264 |
| 8.1.3 | Parameter von Stoßspannungen | 265 |
| 8.1.4 | Spektrum von Stoßspannungen | 266 |
| 8.2 | Analytische Darstellung von Stoßströmen | 269 |
| 8.2.1 | Bestimmung der Schaltkreiselemente | 272 |
| 8.2.2 | Spektrum von exponentiellen Stoßströmen | 273 |
| 8.3 | Analytische Darstellung von Kurzzeitwechselströmen | 273 |
| 9 | Übertragungsverhalten linearer Systeme, Faltung und Entfaltung | 275 |
| 9.1 | Sprungantwort eines Systems | 276 |
| 9.2 | Faltungsintegral und Faltungsalgorithmus | 277 |
| 9.3 | Fourier-Transformation und Übertragungsfunktion | 279 |
| 9.4 | Laplace-Transformation | 282 |
| 9.5 | Eigenschaften von RC- und RLC-Gliedern | 284 |
| 9.5.1 | Sprungantwort eines Tiefpasses | 284 |
| 9.5.2 | Sprungantwort eines Schwingkreises | 285 |
| 9.5.3 | Übertragungsfunktion von Tiefpass und Schwingkreis | 287 |
| 9.6 | Antwortzeit, Anstiegszeit und Bandbreite | 288 |
| 9.7 | Beispiele für die Faltung | 291 |
| 9.7.1 | Keilstoßspannung auf RC-Glied | 291 |
| 9.7.2 | Keilstoßspannung auf RLC-Glied | 294 |
| 9.7.3 | Stoßspannung auf RC-Glied | 295 |
| 9.7.4 | Antwortfehler und Fehlerdiagramm | 296 |
| 9.8 | Experimentelle Sprungantwort | 300 |
| 9.8.1 | Auswertung der experimentellen Sprungantwort | 301 |
| 9.8.2 | Antwortparameter der Sprungantwort | 301 |
| 9.8.3 | Messschaltungen für die Sprungantwort | 304 |
| 9.8.4 | Erzeugung von Sprungspannungen | 306 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 9.9 | Ergänzende Betrachtungen zum Übertragungsverhalten | 310 |
| Literatur | | 313 |
| 10 | Kalibrierung der Messsysteme | 317 |
| 10.1 | Normung, Akkreditierung und Rückführung | 317 |
| 10.2 | Kalibrierung im Allgemeinen | 320 |
| 10.3 | Kalibrierung von Spannungsmesssystemen | 321 |
| 10.3.1 | Vergleichsmessung mit Referenzsystem | 321 |
| 10.3.2 | Besonderheiten bei der Vergleichsmessung | 323 |
| 10.3.3 | Kalibrierung eines einzelnen Spannungsteilers | 324 |
| 10.3.4 | Festgesetzter Maßstabsfaktor | 325 |
| 10.3.4.1 | Vergleich über den gesamten Spannungsbereich (Referenzverfahren) | 326 |
| 10.3.4.2 | Vergleichsmessung über einen begrenzten Spannungsbereich | 327 |
| 10.3.4.3 | Kalibrierung der Komponenten (Alternativverfahren) | 328 |
| 10.3.5 | Linearitätsprüfung | 329 |
| 10.3.6 | Zeitparameter einer Stoßspannung | 329 |
| 10.3.7 | Dynamisches Verhalten | 330 |
| 10.3.8 | Anforderungen an die Sprungantwort | 331 |
| 10.3.9 | Fehlerdiagramm für Scheitelwert und Zeitparameter | 333 |
| 10.3.10 | Einfluss benachbarter Objekte (Näheeffekt) | 335 |
| 10.3.11 | Kurz- und Langzeitverhalten | 336 |
| 10.4 | Kalibrierung von Strommesssystemen | 338 |
| 10.4.1 | Vergleichsmessung mit Referenzsystem bei Stoßstrom | 338 |
| 10.4.2 | Linearitätsprüfung | 340 |
| 10.4.3 | Alternativverfahren für Strommesssysteme | 340 |
| 10.4.4 | Dynamisches Verhalten | 341 |
| 10.5 | Kalibrierung von Digitalrecordern | 341 |
| 10.5.1 | Kalibrierung mit Exponentialimpulsen | 342 |
| 10.5.2 | Kalibrierung mit Sprungspannungen | 342 |
| 10.5.3 | Kalibrierung mit Sinusspannungen | 343 |
| Literatur | | 344 |
| 11 | Kapazität und Verlustfaktor | 347 |
| 11.1 | Grundlagen | 347 |
| 11.1.1 | Verlustfaktor im Zeigerdiagramm | 348 |
| 11.1.2 | Ersatzschaltbilder für verlustbehaftetes Dielektrikum | 350 |
| 11.2 | Messverfahren für feste und flüssige Dielektrika | 351 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 11.3 | Messgeräte für C und $\tan\delta$ | 352 |
| 11.3.1 | Schering-Messbrücke | 353 |
| 11.3.2 | Schering-Messbrücke mit Wagnerschem Hilfszweig | 355 |
| 11.3.3 | Messbrücke mit Stromkomparator | 357 |
| 11.3.4 | C - $\tan\delta$ -Messgerät mit digitaler Datenerfassung | 358 |
| 11.4 | Kalibrierung und Rückführung | 359 |
| 11.4.1 | Kalibrierung von C - $\tan\delta$ -Messgeräten | 360 |
| 11.4.2 | Verlustfaktornormale | 362 |
| 11.4.3 | Kryo-Verlustfaktornormal | 364 |
| 11.5 | Druckgaskondensatoren | 365 |
| 11.5.1 | Konstruktionen | 365 |
| 11.5.2 | Einfluss des Gasdrucks | 366 |
| 11.5.3 | Temperaturabhängigkeit | 367 |
| 11.5.4 | Exzentrizität und Kapazität | 368 |
| 11.5.5 | Spannungsabhängigkeit der Kapazität | 370 |
| 11.5.6 | Mechanische Eigenschwingung und Resonanzfrequenz | 373 |
| 11.5.6.1 | Mechanische Eigenschwingung | 373 |
| 11.5.6.2 | Elektrische Resonanz | 376 |
| | Literatur | 377 |
| 12 | Grundlagen der Teilentladungsmesstechnik | 381 |
| 12.1 | Innere Teilentladungen bei Wechselspannung | 382 |
| 12.2 | Eigenschaften von TE-Impulsen | 385 |
| 12.3 | Scheinbare Ladung | 388 |
| 12.4 | Abgeleitete TE-Messgrößen | 388 |
| 12.5 | TE-Messgeräte für die scheinbare Ladung | 389 |
| 12.5.1 | Quasi-Integration durch Bandbegrenzung | 390 |
| 12.5.1.1 | Breitband-Messgerät | 391 |
| 12.5.1.2 | Schmalband-Messgerät | 393 |
| 12.5.1.3 | Funkstörmessgerät | 394 |
| 12.5.2 | Integration der TE-Impulse im Zeitbereich | 394 |
| 12.5.2.1 | Elektronische Integrierschaltung | 395 |
| 12.5.2.2 | Digitale Messdatenerfassung, numerische Integration | 396 |
| 12.5.3 | Festlegung der Anzeige als Funktion $f(N)$ | 398 |
| 12.6 | TE-Prüfschaltungen nach IEC 60270 | 399 |
| 12.7 | Kalibrieren der Prüf- und Messkreise nach IEC 60270 | 402 |
| 12.7.1 | Kalibrierimpulse | 402 |
| 12.7.2 | Kalibrieren des vollständigen Prüf- und Messkreises | 406 |
| 12.7.3 | Genauigkeitsanforderungen | 407 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 12.8 | Visualisierung von TE-Impulsen | 408 |
| 12.8.1 | Phasenabhängiges TE-Muster | 408 |
| 12.8.2 | Synchrone Mehrkanalmessung | 409 |
| 12.9 | Besondere Mess- und Nachweisverfahren | 413 |
| 12.9.1 | VHF- und UHF-Messverfahren | 413 |
| 12.9.1.1 | UHF-Messverfahren für GIS | 414 |
| 12.9.1.2 | UHF-Messverfahren für Transformatoren | 416 |
| 12.9.1.3 | TE-Messsonde für schnelle Vor-Ort-Messung | 417 |
| 12.9.2 | TE-Messverfahren für Kabel und Muffen | 419 |
| 12.9.3 | Akustische TE-Ortung | 423 |
| 12.9.4 | Optische TE-Messverfahren | 426 |
| 12.9.5 | Chemische Nachweisverfahren | 428 |
| 12.10 | Teilentladungen bei Gleichspannung | 429 |
| 12.11 | Teilentladungen bei Stoßspannung | 431 |
| | Literatur | 433 |
| 13 | Bestimmung von Messunsicherheiten | 441 |
| 13.1 | Der GUM | 441 |
| 13.1.1 | Grundkonzept des GUM | 442 |
| 13.1.2 | Modellfunktion einer Messung | 443 |
| 13.1.3 | Ermittlungsmethode vom Typ A | 445 |
| 13.1.4 | Ermittlungsmethode vom Typ B | 446 |
| 13.1.5 | Beigeordnete Standardmessunsicherheit | 449 |
| 13.1.6 | Erweiterte Messunsicherheit | 451 |
| 13.1.7 | Effektiver Freiheitsgrad | 452 |
| 13.1.8 | Messunsicherheitsbudget | 453 |
| 13.1.9 | Angabe des vollständigen Messergebnisses | 453 |
| 13.2 | Abschließende Bemerkungen | 453 |
| | Literatur | 455 |
| | Anhang A: Fourier- und Laplace-Transformation | 457 |
| | Anhang B: Beispiele zur Bestimmung von Messunsicherheiten | 463 |
| | Sachverzeichnis | 473 |