

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	Resonanzprüfanlagen	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 Scheitelspannungsmesseinrichtung	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 Hochspannungsskala	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	Rückenhalfwertszeit 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 (Skinneffekt)	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