

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur	5
2	Hohe Wechselspannungen und -ströme	7
2.1	Wechselspannungen	7
2.2	Wechselströme	10
2.2.1	Stationärer Wechselstrom	11
2.2.2	Kurzzeitwechselstrom	12
2.3	Erzeugung hoher Wechselspannungen	13
2.3.1	Bauarten von Prüftransformatoren	14
2.3.2	Kaskadenschaltung von Transformatoren	16
2.3.3	Einfaches Ersatzschaltbild	17
2.3.4	Resonanzprüf anlagen	18
2.4	Erzeugung hoher Wechselströme	19
2.5	Messung hoher Wechselspannungen	20
2.5.1	Kapazitiver Spannungsteiler	21
2.5.1.1	Streukapazitäten und einfache Ersatzschaltbilder	21
2.5.2	Analoge Messgeräteschaltungen	23
2.5.2.1	Einfache Scheitelspannungsmesseinrichtung	23
2.5.2.2	Messeinrichtung nach Chubb und Fortescue	24
2.5.3	Digitale Messgeräteschaltungen	27
2.5.4	Elektrostatische Voltmeter	29
2.5.5	Induktive Spannungswandler	30
2.5.6	Kapazitive Spannungswandler	31
2.5.7	Elektronische Spannungswandler	32
2.5.8	Kugelfunkenstrecke	34
2.6	Messung hoher Wechselströme	37
2.6.1	Messwiderstände	37
2.6.2	Induktive Stromwandler	38

2.6.3	Messspulen mit elektronischer Datenübertragung	39
2.6.4	Rogowski-Spulen für Wechselstrommessungen	39
2.6.5	Strommessung auf Hochspannungspotenzial	42
Literatur		43
3	Hohe Gleichspannungen und -ströme	47
3.1	Gleichspannungen	47
3.2	Gleichströme	50
3.2.1	Stationärer Gleichstrom	50
3.2.2	Kurzzeitgleichstrom	51
3.3	Erzeugung hoher Gleichspannungen und -ströme	52
3.3.1	Gleichrichterschaltungen	52
3.3.2	Elektrostatische Generatoren	55
3.4	Messung hoher Gleichspannungen	56
3.4.1	Messanordnung mit ohmschem Spannungsteiler	57
3.4.2	Messanordnung mit Vorwiderstand	62
3.4.3	Temperaturverhalten	63
3.4.4	Übertragungsverhalten, Messung der Welligkeit	67
3.4.5	Gleichspannungsteiler höchster Genauigkeit	70
3.4.6	Addition von Teilspannungen	72
3.4.7	Fixpunkte der Hochspannungsskale	73
3.4.8	Rotationsvoltmeter	75
3.4.9	Stab-Stab-Funkenstrecke	76
3.5	Messung hoher Gleichströme	78
3.5.1	Niederohmige Messwiderstände	79
3.5.2	Hall-Stromsensoren	80
3.5.3	Gleichstromwandler	83
Literatur		84
4	Stoßspannungen	87
4.1	Definitionen und Parameter von Stoßspannungen	87
4.1.1	Blitzstoßspannungen	88
4.1.1.1	Toleranzen und Messunsicherheiten bei Prüfungen	91
4.1.1.2	Blitzstoßspannung mit überlagerter Schwingung	92
4.1.2	Schaltstoßspannungen	99
4.1.2.1	Bestimmung der Scheitelzeit	100
4.1.3	Schwingende Stoßspannungen bei Vor-Ort-Prüfungen	101
4.1.4	Steilstoßspannung	102
4.2	Erzeugung von Stoßspannungen	103
4.2.1	Generatoren für Blitz- und Schaltstoßspannungen	103
4.2.1.1	Vervielfachungsschaltung	105

4.2.1.2	Betrieb des Stoßspannungsgenerators	107
4.2.1.3	Überschwingen der erzeugten Stoßspannung	109
4.2.1.4	Rückenhalbwertzeit bei kleiner induktiver Last	111
4.2.2	Erzeugung von schwingenden Stoßspannungen	112
4.2.3	Erzeugung von abgeschnittenen Stoßspannungen	112
4.2.4	Erzeugung von Steilstoßspannungen	113
4.3	Messung von Stoßspannungen	114
4.3.1	Messsysteme mit Stoßspannungsteiler	115
4.3.1.1	Grundsätzliche Anordnung des Prüf- und Messkreises	115
4.3.1.2	Komponenten eines Stoßspannungsmesssystems	116
4.3.1.3	Maßstabsfaktor	121
4.3.1.4	Streukapazität zur Erde	122
4.3.1.5	Allgemeine Betrachtung zum Übertragungsverhalten	123
4.3.1.6	Kettenleiterersatzschaltbild und Sprungantwort	124
4.3.1.7	Einwirkung von Störungen und Gegenmaßnahmen	127
4.3.2	Messsystem mit ohmschem Stoßspannungsteiler	128
4.3.2.1	Grundsätzlicher Aufbau des Messsystems	128
4.3.2.2	Sprungantwort des ohmschen Spannungsteilers als Kettenleiter	132
4.3.2.3	Einfaches Ersatzschaltbild mit konzentrierten Elementen	134
4.3.2.4	Feldkonformer Widerstandsteiler	136
4.3.2.5	Optimierter Messabgriff	137
4.3.2.6	Kapazitive Signaleinkopplung in den Niederspannungsteil	138
4.3.2.7	Spannungsteiler mit wässriger Lösung	138
4.3.3	Kapazitiver Stoßspannungsteiler	139
4.3.3.1	Aufbau des Messsystems mit kapazitivem Spannungsteiler	139
4.3.3.2	Schaltung auf der Niederspannungsseite	141
4.3.3.3	Burch-Abschluss bei langem Messkabel	141
4.3.3.4	Einfache Ersatzschaltbilder mit Erdkapazität	142
4.3.3.5	Varianten des kapazitiven Stoßspannungsteilers	143
4.3.4	Gedämpft kapazitiver Stoßspannungsteiler	144
4.3.4.1	Aufbau des Messsystems mit gedämpft kapazitivem Spannungsteiler	144

8.1.2	Varianten der Stoßspannung	276
8.1.3	Parameter von Stoßspannungen	277
8.1.4	Spektrum von Stoßspannungen	278
8.2	Analytische Darstellung von Stoßströmen.	280
8.2.1	Bestimmung der Schaltkreiselemente	283
8.2.2	Spektrum von exponentiellen Stoßströmen	284
8.3	Analytische Darstellung von Kurzzeitwechselströmen	285
9	Übertragungsverhalten linearer Systeme, Faltung und Entfaltung	287
9.1	Sprungantwort eines Systems	288
9.2	Faltungsintegral und Faltungsalgorithmus	289
9.3	Fourier-Transformation und Übertragungsfunktion	291
9.4	Laplace-Transformation	294
9.5	Eigenschaften von RC- und RLC-Gliedern	296
9.5.1	Sprungantwort eines Tiefpasses	296
9.5.2	Sprungantwort eines Schwingkreises	297
9.5.3	Übertragungsfunktion von Tiefpass und Schwingkreis	298
9.6	Antwortzeit, Anstiegszeit und Bandbreite	300
9.7	Beispiele für die Faltung	302
9.7.1	Keilstoßspannung auf RC-Glied	302
9.7.2	Keilstoßspannung auf RLC-Glied	305
9.7.3	Doppelexponentielle Stoßspannung auf RC-Glied	306
9.7.4	Antwortfehler und Fehlerdiagramm	307
9.8	Experimentelle Sprungantwort	310
9.8.1	Auswertung der experimentellen Sprungantwort	311
9.8.2	Antwortparameter der Sprungantwort	312
9.8.3	Messschaltungen für die Sprungantwort	314
9.8.4	Erzeugung von Sprungspannungen	315
9.9	Ergänzende Betrachtungen zum Übertragungsverhalten	321
	Literatur	325
10	Kalibrierung der Messsysteme	329
10.1	Normung, Akkreditierung und Rückführung	329
10.2	Kalibrierung im Allgemeinen	332
10.3	Kalibrierung von Spannungsmesssystemen	333
10.3.1	Vergleichsmessung mit Referenzsystem bei Stoßspannung	333
10.3.2	Besonderheiten bei der Vergleichsmessung	335
10.3.3	Kalibrierung eines einzelnen Spannungsteilers	337
10.3.4	Festgesetzter Maßstabsfaktor eines Spannungsmesssystems	337
10.3.4.1	Vergleich über gesamten Spannungsbereich (Referenzverfahren)	338

10.3.4.2	Vergleich über einen begrenzten Spannungsbereich	339
10.3.4.3	Kalibrierung der Komponenten (Alternativverfahren)	340
10.3.4.4	Auswertung der Sprungantwort (Alternativverfahren)	341
10.3.5	Linearitätsprüfung	342
10.3.6	Zeitparameter von Stoßspannungen	343
10.3.7	Dynamisches Verhalten	344
10.3.8	Kalibrierung eines Referenzteilers	345
10.3.9	Fehlerdiagramm für Scheitelwert und Zeitparameter	346
10.3.10	Einfluss benachbarter Objekte (Näheeffekt)	347
10.3.11	Kurz- und Langzeitverhalten	349
10.4	Kalibrierung von Strommesssystemen	350
10.4.1	Vergleichsmessung mit Referenzsystem bei Stoßstrom	351
10.4.2	Maßstabsfaktor eines Stoßstrommesssystems	352
10.4.3	Kalibrierung der Komponenten eines Strommesssystems	353
10.4.4	Linearitätsprüfung	353
10.4.5	Dynamisches Verhalten	354
10.5	Kalibrierung von Digitalrecordern	354
10.5.1	Kalibrierung mit Impulsspannungen	355
10.5.2	Alternative Kalibrierung mit Sprungspannungen	356
10.5.3	Bestimmung des Scheitelwertes mit Sprungspannungen	356
10.5.4	Bestimmung des Scheitelwertes mit Sinusspannungen	357
Literatur		358
11	Kapazität und Verlustfaktor	359
11.1	Grundlagen	359
11.1.1	Verlustfaktor im Zeigerdiagramm	360
11.1.2	Ersatzschaltbilder für verlustbehaftetes Dielektrikum	362
11.2	Messverfahren für feste und flüssige Dielektrika	363
11.3	Messgeräte für C und $\tan\delta$	364
11.3.1	Schering-Messbrücke	365
11.3.2	Schering-Messbrücke mit Wagnerschem Hilfszweig	367
11.3.3	Messbrücke mit Stromkomparator	369
11.3.4	C - $\tan\delta$ -Messgerät mit digitaler Datenerfassung	370
11.4	Kalibrierung und Rückführung	371
11.4.1	Kalibrierung von C - $\tan\delta$ -Messgeräten	372
11.4.2	Konventionelle Verlustfaktornormale	374
11.4.3	Kryo-Verlustfaktornormal	376
11.5	Druckgaskondensatoren	377

11.5.1	Konstruktionen	377
11.5.2	Einfluss des Gasdrucks	379
11.5.3	Temperaturabhängigkeit	380
11.5.4	Exzentrizität und Kapazität	381
11.5.5	Spannungsabhängigkeit der Kapazität	383
11.5.6	Mechanische Eigenschwingung und Resonanzfrequenz	385
11.5.6.1	Mechanische Eigenschwingung	386
11.5.6.2	Elektrische Resonanz	387
Literatur		389
12	Grundlagen der Teilentladungsmesstechnik	393
12.1	Innere Teilentladungen bei Wechselspannung	394
12.2	Eigenschaften von TE-Impulsen	396
12.3	Scheinbare Ladung	399
12.4	Abgeleitete TE-Messgrößen	400
12.5	TE-Messgeräte für die scheinbare Ladung	400
12.5.1	Quasi-Integration durch Bandbegrenzung	401
12.5.1.1	Breitband-TE-Messgerät	402
12.5.1.2	Schmalbandiges TE-Messgerät	404
12.5.1.3	Funkstörmessgerät	405
12.5.2	Integration der TE-Impulse im Zeitbereich	405
12.5.2.1	Elektronische Integrierschaltung	406
12.5.2.2	Digitale Messdatenerfassung, numerische Integration	407
12.5.3	Festlegung der Anzeige als Funktion $f(N)$	409
12.6	TE-Prüfschaltungen nach IEC 60270	410
12.7	Kalibrieren der Prüf- und Messkreise nach IEC 60270	413
12.7.1	Kalibrierimpulse	413
12.7.2	Kalibrieren des vollständigen Prüf- und Messkreises	417
12.7.3	Genauigkeitsanforderungen	418
12.8	Visualisierung von TE-Impulsen	418
12.8.1	Phasenabhängiges TE-Muster	419
12.8.2	Synchrone Mehrkanalmessung	421
12.9	Besondere Mess- und Nachweisverfahren	423
12.9.1	VHF- und UHF-Messverfahren	424
12.9.1.1	UHF-Messverfahren für Teilentladungen in GIS	424
12.9.1.2	UHF-Messverfahren für Transformatoren	426
12.9.1.3	TE-Messsonde für schnelle Vor-Ort-Messung	428
12.9.1.4	TE-Ortung im Freifeld mit UHF-Sensoren	429
12.9.2	TE-Messverfahren für Kabel und Muffen	430
12.9.3	Akustische TE-Ortung	434

12.9.4	Optische TE-Messverfahren.	437
12.9.5	Chemische Nachweisverfahren	441
12.10	Teilentladungsmessung bei Gleichspannung	442
12.11	Teilentladungsmessung bei Stoßspannung	444
	Literatur.	446
13	Bestimmung von Messunsicherheiten	455
13.1	Der GUM	456
13.1.1	Grundkonzept des GUM	456
13.1.2	Modellfunktion einer Messung	458
13.1.3	Ermittlungsmethode vom Typ A	459
13.1.4	Ermittlungsmethode vom Typ B	460
13.1.5	Beigeordnete Standardmessunsicherheit	463
13.1.6	Erweiterte Messunsicherheit	465
13.1.7	Überprüfung der Normalverteilung	465
13.1.8	Messunsicherheitsbudget	466
13.1.9	Angabe des vollständigen Messergebnisses.	467
13.2	Abschließende Bemerkungen	468
	Literatur.	468
	Anhang A: Fourier- und Laplace-Transformation	471
	Anhang B: Beispiele zur Bestimmung von Messunsicherheiten	477
	Stichwortverzeichnis	487