

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
	Literatur	5
<b>2</b>	<b>Hohe Wechselspannungen und -ströme</b>	<b>7</b>
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 Resonanzprüfanlagen	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 Kugelfunkstrecke	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
<b>3</b>	<b>Hohe Gleichspannungen und –ströme . . . . .</b>	<b>47</b>
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
<b>4</b>	<b>Stoßspannungen . . . . .</b>	<b>87</b>
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	Rückenhalfwertzeit 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
<b>9</b>	<b>Übertragungsverhalten linearer Systeme, Faltung und Entfaltung. ....</b>	<b>287</b>
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
<b>10</b>	<b>Kalibrierung der Messsysteme .....</b>	<b>329</b>
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
<b>11</b>	<b>Kapazität und Verlustfaktor . . . . .</b>	<b>359</b>
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
<b>12</b>	<b>Grundlagen der Teilentladungsmesstechnik</b> .....	<b>393</b>
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
<b>13</b>	<b>Bestimmung von Messunsicherheiten . . . . .</b>	<b>455</b>
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
	<b>Anhang A: Fourier- und Laplace-Transformation . . . . .</b>	<b>471</b>
	<b>Anhang B: Beispiele zur Bestimmung von Messunsicherheiten. . . . .</b>	<b>477</b>
	<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>487</b>