



Adolf J. Schwab

Hochspannungs- meßtechnik

Meßgeräte und Meßverfahren

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 256 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1981

Professor Dr.-Ing. ADOLF J. SCHWAB
Institut für Hochspannungstechnik
und elektrische Anlagen
Universität Fridericiana Karlsruhe

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Schwab, Adolf J.:
Hochspannungsmesstechnik: Meßgeräte und
Meßverfahren / Adolf J. Schwab.
2., neubearb. u. erw. Aufl.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1981

ISBN-13: 978-3-642-47485-9 e-ISBN-13: 978-3-642-47483-5

DOI: 10.1007/978-3-642-47483-5

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.
Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die Verwertungsgesellschaft Wort, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1981

Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1981

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zur Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

2060/3020-543210

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Buch ist aus den Unterlagen zu meiner Vorlesung über Hochspannungsmeßtechnik entstanden, die ich im Rahmen eines Lehrauftrages seit 1964 am Hochspannungsinstitut der Universität Karlsruhe halte. Die Auswahl des Stoffs richtet sich neben dem allgemein angestrebten Überblick nach Fragestellungen, die sich während zahlreicher Studien- und Forschungsarbeiten an aktuellen Problemen der Hochspannungstechnik ergaben. Als besonders dringlich erschien mir eine zusammenfassende Behandlung der Messung nichtsinusförmiger schnellveränderlicher hoher Spannungen und Ströme, die in den vergangenen Jahren auch außerhalb der eigentlichen Hochspannungstechnik, beispielsweise in der Plasmaphysik und der Leistungselektronik, große Bedeutung gewonnen hat. Der Starkstromtechniker alter Prägung kam im Gegensatz zum Ingenieur der Nachrichtentechnik während seiner Ausbildung nur wenig mit der Erzeugung, Übertragung und Messung von Impulsen in Berührung. Um so schwerer fiel ihm in der Praxis die Einarbeitung in den Umgang mit schnellveränderlichen nichtsinusförmigen Größen, deren meßtechnische Erfassung in der Starkstromtechnik wegen der sie begleitenden hohen Störspannungen und -leistungen mit besonderen Schwierigkeiten verbunden ist. Einer Einführung in diesen Problemkreis dienen die im ersten Kapitel gegebenen Hinweise über die Ursache von Störspannungen und deren Beseitigung. Der Vollständigkeit halber werden in einem weiteren Kapitel auch die etwas geläufigeren Verfahren der Messung hoher Wechsel- und Gleichspannungen behandelt, wobei ein eigener Abschnitt über die meßtechnische Erfassung elektrostatischer Aufladungen der zunehmenden Verwendung von Kunststoffen in der Technik und im Alltag Rechnung trägt. Erwähnenswert schienen mir weiter die durch die Entwicklung der Verlustfaktormeßbrücke mit Stromkomparator erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der dielektrischen Messungen sowie eine gedrängte Darstellung der verschiedenen Verfahren der Teilentladungsmeßtechnik. Auf eine Behandlung der Messung elektrischer Felder habe ich bewußt verzichtet, da einerseits schon ein Buch über deren Messung vorliegt und andererseits ihre numerische Berechnung durch Anwendung digitaler Rechenmaschinen zunehmend Bedeutung gewinnt.

Mein besonderer Dank gilt meinem verehrten akademischen Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. Hermann Lau, für seine vielfältige Unterstützung und sein reges Interesse an meiner Arbeit, sowie Herrn Dr.-Ing. Walter Zaengl für wertvolle fachliche Diskussionen zum Abschnitt über die Messung schnellveränderlicher hoher Spannungen.

Vorwort zur zweiten Auflage

Die erste Auflage hat mit insgesamt 12500 Exemplaren in deutscher, englischer und russischer Sprache eine freundliche Aufnahme erfahren. Die noch rege Nachfrage mit einem unveränderten Nachdruck zu decken schien verlockend, wurde jedoch von Verfasser und Verlag verworfen, um den seit Erscheinen der Erstauflage erfolgten technologischen Fortschritt dem Leser nicht vorzuenthalten. Da sich die Art der Darstellung sowohl bei Lehrenden und Lernenden wie auch bei Physikern und Ingenieuren in Forschung und Industrie gleicher Beliebtheit erfreute, wurde der grundsätzliche Charakter des Buches beibehalten, der vorhandene Stoff jedoch an den heutigen Stand des Wissens angepaßt und um neue Erkenntnisse und Methoden bereichert. Besonders hervorgehoben seien die verbesserten bzw. neu hinzugekommenen Abschnitte über Transientenrecorder, elektromagnetische Verträglichkeit in Hochspannungslaboratorien, Stoßspannungsmesstechnik, kapazitive Spannungsteiler, nicht-konventionelle Strom- und Spannungsmessung, Teilentladungsmesstechnik und schließlich das beträchtlich ergänzte Schrifttum.

Mein Dank gilt zahlreichen Studenten sowie ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern, die im Rahmen der Durchführung und Betreuung von Diplom- und Studienarbeiten zum Fortschritt des Wissensstandes auf dem Gebiet der Hochspannungsmesstechnik beigetragen haben. Den Herren Dipl.-Ing. Bellm, Epping, Geibig, Imo und Sautter danke ich für Ihre Beteiligung am Korrekturlesen sowie für die Einbringung zahlreicher Verbesserungsvorschläge. Herrn Professor emer. Dr.-Ing. Hermann Lau, meinem verehrten akademischen Lehrer, danke ich sehr herzlich für die allzeit gewährte vielfältige Unterstützung und die wohlwollende harmonische Zusammenarbeit.

Karlsruhe, April 1980

Adolf Schwab

Inhaltsverzeichnis

1	Oszilloskopmeßtechnik für schnell veränderliche hohe Spannungen und Ströme	1
1.1	Elektronenstrahloszilloskope	1
1.2	Speicheroszilloskope und photographische Aufzeichnung.	6
1.3	Digitale Speichersysteme	9
1.4	Meßkabel	12
1.5	Elektromagnetische Verträglichkeit.	17
1.6	Messungen mit Differenzverstärkern	27
2	Messung hoher Stoßspannungen mit Spannungsteiler und Elektronenstrahlosziloskop	29
2.1	Der Meßkreis und seine Übertragungseigenschaften	30
2.1.1	Ermittlung der Übertragungseigenschaften durch Messung des Frequenzgangs	32
2.1.2	Ermittlung der Übertragungseigenschaften durch Messung der Sprungantwort	34
2.1.3	Impulsgeneratoren zur Messung der Sprungantwort.	36
2.1.4	Anstiegszeit und Antwortzeit	42
2.1.5	Fehlerermittlung bei der Messung des Scheitelwerts in der Stirn abgeschnittener Stoßspannungen	46
2.1.6	Rückwirkung eines Spannungsteilers auf den Hochspannungskreis	49
2.2	Ohmsche Spannungsteiler	52
2.2.1	Der zweistufige kompensierte Spannungsteiler ohne Berücksichtigung der Induktivitäten und der verteilten Erdkapazitäten	52
2.2.2	Der ohmsche Spannungsteiler unter Berücksichtigung der verteilten Erdkapazitäten	55
2.2.2.1	Die verteilten Erdkapazitäten	55
2.2.2.2	Der ohmsch-kapazitiv gemischte Spannungsteiler.	58
2.2.2.3	Der gesteuerte ohmsche Spannungsteiler	61
2.2.2.4	Niederohmige Spannungsteiler	63
2.3	Kapazitive Spannungsteiler	66
2.3.1	Der kapazitive Spannungsteiler und seine Zuleitungen	66
2.3.2	Kapazitive Spannungsteiler mit konzentrierter Hochspannungskapazität	68
2.3.3	Kapazitive Spannungsteiler mit verteilter Hochspannungskapazität	73
2.3.4	Niederspannungsteile kapazitiver Spannungsteiler	78
2.3.5	Anpassungsverhältnisse am Niederspannungsteil kapazitiver Spannungsteiler	80
2.4	Das Kettenleiterersatzschaltbild	82
2.5	Leitungsspannungsteiler	84

3	Einrichtungen zur Messung hoher Gleich- und Stoßspannungen sowie des Scheitel- und Effektivwerts hoher Wechselspannungen	87
3.1	Messung hoher Gleichspannungen und des Effektivwerts hoher Wechselspannungen	87
3.1.1	Hochohmige Widerstände und Spannungsteiler	87
3.1.2	Elektrostatische Spannungsmesser	94
3.2	Messung des Effektivwerts hoher Wechselspannungen	98
3.2.1	Kapazitiver Vorwiderstand und kapazitiver Spannungsteiler	98
3.2.2	Kapazitive Spannungswandler	99
3.2.3	Induktive Spannungswandler, Bestimmung der Hochspannung aus dem Übersetzungsverhältnis des Hochspannungsprüftransformators	103
3.3	Messung hoher Gleichspannungen, Stoßspannungen und des Scheitelwerts hoher Wechselspannungen mit der Kugelfunkenstrecke	107
3.4	Messung des Scheitelwerts hoher Wechsel- und Stoßspannungen	117
3.4.1	Scheitelspannungsmessung nach Chubb und Fortescue	119
3.4.2	Scheitelspannungsmeßeinrichtungen mit Spannungsteiler	121
3.4.3	Stoßspannungsmeßeinrichtungen mit Spannungsteiler	128
3.5	Messung hoher Gleichspannungen sowie des Scheitelwerts und beliebiger Zwischenwerte hoher Wechselspannungen mit Hochspannungsmessern nach dem Generatorprinzip	134
3.6	Absolute Spannungsmessung	139
3.7	Messung elektrostatischer Aufladungen	142
3.7.1	Messung des Potentials	144
3.7.2	Messung der Ladung	145
3.7.3	Messung der elektrischen Feldstärke	148
3.7.4	Meßgeräte zur Messung elektrostatischer Aufladungen	148
4	Messung hoher, schnellveränderlicher Ströme mit dem Elektronenstrahloszilloskop	153
4.1	Niederohmige Meßwiderstände	153
4.2	Magnetische Spannungsmesser (Rogowski-Spulen)	168
4.3	Hall-Generatoren	173
5	Nichtkonventionelle Messung hoher Spannungen und Ströme	176
5.1	Optische Effekte	177
5.2	Intensitätsmodulation	181
5.3	Nichtkonventionelle Strommessung	184
5.3.1	Aktive Systeme	185
5.3.2	Passive Systeme	186
5.4	Nichtkonventionelle Spannungsmessung	188
6	Dielektrische Messungen	191
6.1	Serien- und Parallelersatzschaltbild verlustbehafteter Kondensatoren	191
6.2	Brückenschaltungen zum Messen von Kapazitäten und Verlustfaktoren	193
6.2.1	Verlustfaktormeßbrücke nach Schering	193
6.2.2	Schering-Brücke für hohe Ladeströme	195
6.2.3	Schering-Brücke für hohe Verlustfaktoren	196
6.2.4	Universal-C-tan δ -Meßbrücke	197
6.2.5	Verlustfaktormeßbrücke mit Stromkomparator	198
6.3	Allgemeine Betrachtungen über Empfindlichkeit, Abschirmung und Brückenelemente	201

Inhaltsverzeichnis	IX	
6.3.1	Empfindlichkeit	201
6.3.2	Vergleichskondensator	202
6.3.3	Streukapazitäten und Abschirmung	204
6.3.4	Nullindikatoren	208
6.4	Messung der Kapazität und des Verlustfaktors geerdeter Prüflinge	211
6.4.1	Messung geerdeter Prüflinge mit der Schering-Brücke	211
6.4.2	<i>M</i> -Schaltung	213
6.4.3	Verlustfaktormessung mit dem Verfahren der gedämpften Schwingung	213
7	Teilentladungsmeßtechnik	215
7.1	Teilentladungsimpulse in Hohlräumen	216
7.2	Teilentladungsmeßschaltungen	220
7.3	Prüflinge mit verteilten Parametern	224
7.4	Meßgeräte zur Erfassung von Teilentladungen	227
7.5	Aussagekraft der am Ankopplungsvierpol gemessenen Größen in bezug auf die Größe der tatsächlichen Teilentladungen	231
7.6	Äquivalenz von Teilentladungsmeßergebnissen in Picocoulomb und Mikrovolt	234
7.7	Abschließende Bemerkungen zur Teilentladungsmeßtechnik	237
Literaturverzeichnis		240
Sachverzeichnis		273