

Lehrbuch der Hochspannungstechnik

Lehrbuch der Hochspannungstechnik

Von

Dr.-Ing. Guntram Lesch

o. Prof. an der Technischen Hochschule Fridericiana Karlsruhe

Nach dem Tode des Verfassers

herausgegeben von

Dr.-Ing. E. Baumann

Oberingenieur am Hochspannungsinstitut
und Lehrstuhl für Elektrotechnik

der Technischen Hochschule Fridericiana Karlsruhe

Mit 542 Abbildungen



Springer-Verlag

Berlin / Göttingen / Heidelberg

1959

ISBN 978-3-642-50200-2 ISBN 978-3-642-50199-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-50199-9

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1959

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

Vorwort

Professor LESCH hat von 1946 bis 1956 am Lehrstuhl für Elektrotechnik der Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe zugleich mit Vorlesungen über elektrische Antriebe und Bahnen und elektrische Anlagen, in einer zuletzt dreisemestrigen Vorlesung, die Grundlagen der Hochspannungstechnik gelehrt. Der Stoff dieser Vorlesung „Hochspannungstechnik“ und ein Teil der Vorlesung über „Elektrische Isolierstoffe“ bilden den Grundstock des vorliegenden Buches.

Dieses Lehrbuch der Hochspannungstechnik bietet aber weit mehr als diesen Vorlesungsstoff. Vor allem war es das Ziel von Prof. LESCH, dem Konstrukteur und dem interessierten Ingenieur die notwendigen Unterlagen und Grundlagen in kurzer, moderner Form in die Hand zu geben. Aus, sowohl für den Praktiker wie auch für den Studierenden wichtigen Gründen, wurde der sehr umfangreiche Inhalt so komprimiert wie nur möglich wiedergegeben. Der Text ist sehr knapp gehalten und das gebotene Zahlenmaterial in Form von Diagrammen und Tabellen und das Anschauungsmaterial in Form von Bildern ist äußerst umfangreich und entspricht jeweils dem neuesten Stand der Technik. So konnte trotz des weitreichenden Inhalts ein wirtschaftlicher Umfang des Buches erzielt werden.

Der Inhalt ist in drei Teile (A, B, C) aufgliedert: Die Grundlagen (Teil A) vermitteln eine kurze Zusammenfassung der elektrostatisch zu behandelnden Feldbeanspruchungen. Sie geben ferner einen Überblick über die im Laboratorium und im Prüffeld verwendeten Hochspannungserzeuger und Meßgeräte (§ 5). Es wird hier also die Frage behandelt, wie die Feldbeanspruchungen zustande kommen.

Die dielektrische Festigkeit (Teil B) der gasförmigen, flüssigen und festen Dielektrika sowie der daraus aufgebauten Hochspannungskonstruktionen wird im zweiten Teil dargelegt. Es wird hier die Frage gestellt „was wird beansprucht“, und ihre Beantwortung anhand der physikalischen Grundlagen einerseits und der praktischen Meßergebnisse andererseits gegeben.

Der dritte Teil C befaßt sich ordnend mit der Frage nach dem Woher der Überbeanspruchungen der Geräte im Netz. Der interessierte Ingenieur findet über die hier behandelten Schaltvorgänge ein umfassendes Werk, bewundernswert systematisch aufgebaut, in dem Buch von Rüdén-

berg „Elektrische Schaltvorgänge“ (1953) Springer-Verlag und weitere ausführliche Beispiele über die Überspannungen bei Baatz „Überspannungen in Energieversorgungsnetzen“ (1956) Springer-Verlag. In den §§ 12 und 13 (von Teil C) wurden nur die fundamental wichtigen Erscheinungen systematisch nach physikalischen Gesichtspunkten geordnet behandelt. Der § 14 faßt die möglichen Überspannungshöhen zusammen und vergleicht sie mit den beobachteten Werten. Aus der Störungs- und Schadensstatistik (Tab. 14.2) geht die Bedeutung der einzelnen Überspannungen für die Lebensdauer der verschiedenen Hochspannungsgeräte hervor.

Soviel sei dem Praktiker über den Aufbau des Lehrbuches gesagt. Über den Inhalt des Buches und die Ziele des Verfassers möchte ich an dieser Stelle dem wissenschaftlich interessierten Ingenieur einige prinzipielle Ausführungen machen.

Herr Prof. LÄSCH hat selbst die empirische Entwicklung der Hochspannungstechnik mitgemacht. Der sich heute bereits manchen Orts abzeichnenden systematischen Erforschung der Grundlagen der Hochspannungstechnik galten seine Arbeiten auf diesem Gebiet während seiner gesamten Hochschulzeit. Fußend auf einer über 25jährige praktischen Erfahrung und einer breiten physikalisch-wissenschaftlichen Grundlage verstand er es, die mannigfaltigsten komplexen Phänomene in kürzester Zeit treffend zu meistern und darzustellen.

Dem mehr wissenschaftlich tätigen Ingenieur, sogar dem Physiker oder Chemiker eines elektrotechnischen Labors, dienen die hier kurz dargelegten Grundlagen der Hochspannungstechnik als Gedächtnisstütze oder Repetitorium in der Sprache des Technikers. Unterstützt durch die Ergebnisse an Geräten und an Anordnungen der Praxis und durch die angegebene Literatur mag es ihn dazu bewegen, die eine oder andere spezielle Veröffentlichung eines großen Praktikers eingehender zu studieren. Wenn ihm so die technischen Schwierigkeiten näher gebracht werden, wird er auch die Sorgen des Konstrukteurs verstehen.

Da die Hochspannungstechnik auf den wichtigsten Gebieten derart eng mit Energieversorgung und elektrischer Anlagentechnik verknüpft ist, daß dies gar nicht besonders hervorgehoben zu werden brauchte, ist es der Zweck dieses Buches, dem Konstrukteur und dem Wissenschaftler deren Belange näher zu bringen.

Dem Ingenieur eines Energieversorgungsunternehmens möge das Buch dazu dienen, Probleme, die momentan außerhalb seiner Spezialaufgabe liegen, von der praktischen Erscheinung her und in den grundsätzlichen Zusammenhängen klar zu sehen. Dann wird er sich auch mit den Konstrukteuren und den Labor-Ingenieuren noch besser aussprechen und diesen wertvolle Anregungen geben können.

Durch eine solide Grundausbildung des Studenten auf der hier für das Gebiet der Hochspannungstechnik beschrittenen breiten Basis darf man hoffen, den Bedürfnissen der Praxis und den Wünschen jedens Einzelnen weitgehend gerecht zu werden.

Wir sehen also, daß hier der Versuch unternommen worden ist, auf der einen Seite dem Konstrukteur und auf der anderen Seite dem Wissenschaftler durch eine breitere Basis die Voraussetzungen für ein verständnisvolles Zusammenarbeiten zu geben. Der studierende Ingenieur möge sich seinen goldenen Mittelweg zwischen Theorie und Praxis suchen.

Am 14. Oktober 1956, erlag Prof. Dr.-Ing. G. LESCH (damaliger Rektor der Fridericiana) völlig unerwartet einem Herzschlag. Die Fertigstellung des Buches erfolgte im Sinne des Verfassers und zum großen Teil nach seinen Vorlesungsmanuskripten. Folgende im einzelnen aufgeführten Stellen und Bilder wurden von mir bearbeitet. § 3.5 — Bild 4.4 — § 4.4 — Bild 5.47 — Bild 5.48, 7.21 — Messungen zu Bild 7.51, 7.48 — Bild 7.50 — 7.52 — 8.51 — 8.52 — 9.38 (mit Text) — 9.40 — 9.42 — 9.47 — 9.48 — § 10.61 — § 10.62 — § 10.63 — Bild 10.17 — 10.18 — 10.19 — § 11.1 — § 11.2 — § 11.4 (mit Bildern) — § 12.1 bis § 12.7 (insbesondere § 12.62, § 12.63, 12.64, 12.65) — § 13.1 — § 13.2 — § 13.3 — § 13.4 — § 13.5 — § 13.6 — § 13.7 — § 13.8 — § 13.9 (mit Bildern) und § 14.2. Die Ergebnisse der zu Zeiten von Prof. Dr. LESCH begonnenen und sich daran anschließenden Untersuchungen wurden, soweit möglich, verwertet.

Den § 3.5, § 3.6 und Anhang D sowie § 7.3 liegen die Ausarbeitungen von Herrn Dipl.-Ing. E. MERKERT zu Grunde. Einem internen Bericht von Herrn Dipl.-Ing. D. WÜRSTLIN wurde § 7.8 f und g mit den Bildern 7.56, 7.57, 7.58, 7.59, 7.60, 7.61 und 7.62 entnommen. Herrn WILIMZIG danke ich für die Überarbeitung von S. 27.

Fräulein E. SCHILLING gilt mein besonderer Dank für die Bewältigung der Schreibarbeiten und Fräulein M. GONDRUM für die Zeichenarbeiten. Für die Mithilfe beim Lesen der Korrektur danke ich Fräulein SCHILLING und Fräulein GONDRUM vielmals.

Dem Springer-Verlag sei für die Ausstattung des Buches und besonders Herrn Dr.-Ing. JULIUS SPRINGER für sein Vertrauen gedankt.

Mit der persönlichen Bitte an die Studierenden um Änderungs-Vorschläge, die dem besseren Verständnis dienen, und an die Spezialisten um Hinweise für die Aufnahme von Neuerungen auf ihrem speziellen Gebiet, möchte ich dieses Werk von Herrn Prof. LESCH dem Leser übergeben.

Karlsruhe, den 11. März 59

EBERHARD BAUMANN

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
Bedeutung und Arbeitsgebiete der Hochspannungstechnik	1
A. Grundlagen	
2 Das elektrostatische Feld	3
2.1 Dielektrische Feldgrößen	4
2.2 Das Feldbild	5
Superposition S. 7	
2.3 Verschiedene Dielektriken im Feld	7
Reihenschaltung verschiedener Dielektriken S. 8 — Brechung S. 9.	
2.4 Feldkräfte, Feldenergie	10
Kraft auf geladene Teile und auf Elektroden S. 11. — Mechanische Druck- und Zugspannungen im Feld und an Grenzflächen S. 13.	
2.5 Ladestrom. Kondensator an Wechselspannung	15
Scheitelspannungsmesser S. 16. — Ladestrom, Kapazität und Feldstärke S. 17.	
2.6 Unvollkommenes Dielektrikum	18
Gleichspannungsfeld am geschichteten Dielektrikum S. 18. — Wechselspannungsfeld am geschichteten Dielektrikum S. 19.	
2.7 Mischdielektrikum	20
2.8 Verluste im elektrischen Feld	21
2.9 Hochspannungs-Verlustmessung	24
3 Berechnung des Feldes einfacher Elektrodenanordnungen	30
3.1 Plattenkondensator	30
3.2 Kugelelektroden. Zwei konzentrische Kugeln	30
Zwei isolierte Kugeln nebeneinander S. 31.	
3.3 Spiegelung. Kugel und Ebene	33
Spiegelung an Kugelflächen. Außenfeld des Dipols S. 34.	
3.4 Das radiale ebene Zylinderfeld. Koaxiale Zylinder	36
Parallele Zylinder; Leiter und Ebene S. 38. — Zylinder — Ebene, Leiter über Erde im Abstand h S. 40.	
3.5 Schirmwirkung eines Erdseiles	42
3.6 Bündelleiter. Seilfaktor	45
3.7 Andere Elektrodenformen	49
Spitze. Kanten S. 50.	
3.8 Oberflächengradient der Feldstärke an Isoliertrennflächen	51
Isolierbarriere. Transformator. Säulen-Endisolierung	
3.9 Randfeld der Plattenelektrode	56
3.10 Graphisch-rechnerische Ermittlung des Feldbildes	57
3.11 Ausmessung von Feldern	58

	Seite
4 Anwendungen und Ergänzungen	60
4.1 Kapazitive Spannungsteilung. Reihenschaltung der Kapazitäten . Kettenschaltung der Kapazitäten S. 62. — Kapazitive Induktion von Ladungen und Aufladungen von isolierten Metallteilen S. 67. — Abschirmungen S. 68.	60
4.2 Feldformung, Potentialsteuerung. Potentialsteuerung durch Paral- lelimpedanz.	69
4.3 Elektrodenfreie kapazitive Potentialsteuerung, Kondensator-Durch- führung	75
4.4 Mehrelektroden- und Mehrphasensysteme. Betriebskapazität	80
4.41 Kapazitätsberechnung in Mehrelektrodensystemen	80
4.42 Praktische Berechnung der Potentialkoeffizienten und der Teil- kapazitäten einer Freileitung (Zweiphasen-Leitung)	82
4.43 Allgemeine Definition der Betriebskapazität	84
4.5 Drehstromleitung im Normalbetrieb	85
4.51 Ladeströme im Normalbetrieb des Drehstromnetzes	87
4.52 Die Dreiphasenleitung im Normalbetrieb	87
4.6 Kapazitive Unsymmetrie. Erdschluß im Drehstromnetz	89
Erdkurzschluß, Erdschlußlöschung S. 92.	
4.7 Allgemeine Netzunsymmetrie. Nullpunktsverlagerung	94
4.8 Einige Zusätze	97
5 Hochspannungserzeugung, insbesondere im Laboratorium und im Prüffeld	97
5.1 Formen der Hochspannung	97
5.2 Hochspannungs-Prüftransformatoren	100
5.3 Hochfrequente Hochspannung	105
5.4 Hohe Gleichspannung. Elektrost. Gleichspannungsgeneratoren	107
5.5 Hohe Gleichspannung durch Gleichrichtung	110
5.6 Stoßspannungs-Erzeugung	114
5.7 Hochspannungsmeßtechnik. Spannungsmessung	119
5.8 Aufzeichnung des zeitlichen Spannungsverlaufs	123
5.9 Meßkondensatoren, Hochspannungswiderstände. Spannungsteiler	124
 B. Dielektrische Festigkeit 	
6 Entladungsvorgänge	129
6.1 Die Entladungen im Dielektrikum	129
6.2 Bewegung der Ladungsträger im gasförmig erfüllten Feldraum . .	131
6.3 Dunkler Vorstrom	135
6.4 Entstehung von Ladungsträgern mit freien polaren Ladungen . .	136
Raumionisierung S. 136. — Oberflächenionisierung S. 137.	
6.5 Ionisierungsvorgänge	138
6.6 Ionierungsquellen	141
6.7 Vernichtung der freien Ladungsträger	142
6.8 Ausbildung der Entladung im Gas. Townsend Lawine	143
6.9 Raumladungsverstärkte Ionisierung. Kanalentladung Raether . .	146
6.10 Polaritätseffekt im inhomogenen Feld	147
6.11 Zeitlicher Ablauf der Entladungen, Zündverzögerung	151
7 Gasentladungen	154
7.1 Verschiedene Mechanismen bei verschiedener Feldebildung . . .	154
7.2 Durchbruchsspannung im homogenen Feld	155

	Seite
7.3 Kugelfunkenstrecke zur Spannungsmessung	159
7.4 Inhomogenes Feld. Teilentladung. Charakteristische Spannungen	160
7.5 Einfluß von Luftdichte, Luftbewegung und Feuchtigkeit	165
7.6 Stoßkennlinie des Durchbruchs und Frequenzabhängigkeit	168
7.7 Schirm zwischen den Elektroden im inhomogenen Feld	171
7.8 Korona	175
8 Durchbruch, Lichtbogen, Blitz, Überschlag	197
8.1 Strom-Spannungs-Charakteristik der Entladungen	197
8.2 Lichtbogen bei Normaldruck	199
8.3 Verhalten freier Lichtbögen	204
8.4 Schalter	207
8.5 Gleichstromabschaltung	208
8.6 Wechselstrom-Abschaltung	210
8.7 Wechselstrom-Schalter	213
8.8 Blitz	220
8.9 Oberflächen-Entladungen	225
8.10 Kriechweg	237
9 Feste und flüssige Dielektriken	238
9.1 Einleitung	238
9.2 Elektrizitäts-Leitung im festen Dielektrikum	240
9.3 Leitfähigkeit und dielektrische Verluste	242
9.4 Innerer elektrischer Durchbruch fester Dielektriken	252
9.5 Durchbruch eingeleitet durch Ionisation	255
9.6 Wärmedurchbruch	259
9.7 Elektrochemische Zerstörung	264
9.8 Isolierflüssigkeiten. Gas- und Wassereinfluß	264
9.9 Lebensdauer	272
10 Die festen und flüssigen Isolierstoffe der Technik	275
10.1 Überblick und Einleitung	275
10.2 Keramik, Glas, Metalloxyde	280
10.3 Glimmer und Glimmer-Erzeugnisse	283
10.4 Faserstoffe	284
10.5 Isolierkunststoffe	286
10.6 Isolieröle	292
10.7 Chlorierte Kohlenwasserstoffe	297
11 Konstruktionen	297
11.1 Isolatoren für Freileitungen, Schaltanlagen und Geräte	297
11.2 Transformatoren, Wandler und Maschinen	306
11.3 Kabel und isolierte Leitungen.	319
11.4 Kondensatoren	324
11.5 Übliche elektrische Beanspruchungen und Isolierabmessungen	326
C. Netzzorgänge und Spannungsbeanspruchung	
12 Übersicht über die im Betrieb bestehenden Spannungsbeanspruchungen. Überspannung und Ausbreitung	331
12.1 Schwingungsmöglichkeiten als Eigenwerte der Anlagen. Verhalten von Anlageteilen bei Auftreten von Ausgleichsvorgängen.	332
12.2 Thomsonsche Schwingung (freie Schwingungen)	332
Literatur zu 12.1 u. 12.2 Einschwingspannung	342

	Seite
12.3	Verteilte Leitungskonstanten. Wanderwellen. Entstehung. Charakteristische Daten der Rechteckstirnwellen. 343 Schalten von Leitungen und Eigenschwingen. Einschalten einer langen Leitung S. 343 — Entladung einer unter Spannung stehenden Leitung S. 344
12.4	Verformung von Wanderwellen bei Ausbreitung längs der Leitung 346 Entstehung der endlichen Stirnteilheit S. 346 — Verformung von Wanderwellen durch Dämpfung S. 347.
12.5	Reflexion von Wanderwellen 347
12.6	Praktische Anwendungen der Reflexionen infolge Wellenwiderstandsänderungen 352 Wirkung eines Überspannungsableiters S. 353 — Wirkungsweise und Aufbau von Überspannungsableitern S. 354 — Ansprechspannung von Überspannungsableitern S. 356 — Die Restspannung von Ventilableitern S. 357 — Der Schutzbereich eines Überspannungsableiters S. 359 — Literatur zu 12.6 Überspannungsableiter S. 361.
12.7	Transformatoren- und Maschinenwicklungen bei Stoß. 361 Betrachtung der Wicklung mit festem Wellenwiderstand (stark konzentrierte Kapazitäten und Induktivitäten) S. 361 — Die Transformatoren- und Maschinenwicklung, im Ersatzbild als Kettenleiter dargestellt S. 362 — Der zeitliche Verlauf der Spannungen in einer Wicklung bei Stoßbeanspruchung S. 365 — Die Steuerung der Anfangsspannungsverteilung S. 368. — Literatur zu 12.7 Verhalten von Transformatoren bei Stoßbeanspruchung S. 369
13	Erregung von erzwungenen Schwingungen und Ausgleichsvorgängen 371
13.1	Potentialverlagerung der Grundwelle bei Betriebsspannungen . . 373
13.2	Oberwellen der Netzspannung als Erreger von Überspannungen . 379
13.3	Überspannungen durch nicht sinusförmige Vorgänge. Ferroresonanz, Kippschwingungen 381 Potentialverlagerung des Sternpunktes dreier Spannungswandler gegenüber dem Netzsternpunkt (Netzfrequente Spannungsverlagerung) S. 382 — Kippschwingungen S. 383 — Erzeugung von Kippschwingungen durch Zusammenwirken von <i>R</i> , <i>C</i> und einer Glimmentladung bzw. einer Glimmentladungsröhre S. 385.
13.4	Überspannungen durch Schalten im Netz. 386 Einschalten eines induktiven Kreises S. 386 — Einschalten von Kapazitäten S. 389.
13.5	Abschalten induktiver Kreise 396 Aperiodisches Abschalten eines Kurzschlusses durch eine Sicherung oder einen Schalter S. 397 — Abschalten eines Schwingkreises S. 398 — Abschalten eines Kurzschlusses S. 398 — Abschalten kleiner Ströme S. 400 Abschalten leerlaufender Transformatoren S. 400.
13.6	Abschalten kapazitiver Last 401
13.7	Mehrphasiges Schalten 403
13.8	Erdschluß als Überspannungserreger 404 Erdschluß im Einphasennetz S. 404 — Erdschluß im Drehstromnetz (vgl. 4.6) S. 405.
13.9	Der aussetzende Erdschluß 405
13.10	Starre Sternpunktserdung. 407

	Seite
14 Zusammenstellung der tatsächlichen Beanspruchungen . . .	408
14.1 Die Netzbeanspruchungen	408
14.2 Störungs- und Schadensstatistik	411
14.3 Folgerungen	417

Anhang

A (zu 3.4) Hilfsfaktoren zur Berechnung der maximalen Feldstärke an der Leiteroberfläche und der Kapazität im Zylinderfeld	421
B Betriebsgrößen für Hochspannungsleitungen, Widerstand, Kapazitäten, Reaktanz	423
C Luftdichte und Luftfeuchtigkeit	425
D Spannungsmessung mit der Kugelfunkenstrecke	427
E Dielektrische Daten von Isolierstoffen $\varepsilon/\tan \delta \cdot 10^4$	433
Sachverzeichnis	434