H. Wilhelm Lücking

Energiekabeltechnik

Mit 32 Bildern und 11 Tabellen

Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lücking, H. Wilhelm:

Energiekabeltechnik/H. Wilhelm Lücking. —

Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1981.

ISBN-13:978-3-528-03587-7 e-ISBN-13:978-3-322-84312-8

DOI: 10.1007/978-3-322-84312-8

1981

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1981

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Satz: Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Umschlaggestaltung: Peter Neitzke, Köln

ISBN-13:978-3-528-03587-7

Vorwort

Das vorliegende Studienbuch „Energiekabeltechnik“ ist die Unterlage für eine Vorlesung, die ich seit SS 1977 an der Technischen Hochschule Darmstadt halte. Ziel ist es, in

- einem ersten Teil die Kabelaufbauelemente und die gängigen Kabelkonstruktionen nach VDE zu erläutern, und in
- einem zweiten Teil einen Überblick zu geben über die theoretischen Grundlagen und die daraus zu ziehenden Folgerungen im Hinblick auf Konstruktionen von Kabeln für höhere Spannungen und Leistungen.

Die Kabeltechnik gewinnt sicherlich ihren Reiz durch die Mannigfaltigkeit ihrer Aufgaben und Lösungswege. Dies zu vermitteln, ohne die Vertiefung bedeutsamer Grundgedanken zu vernachlässigen, erforderte im Hinblick auf die begrenzte Vorlesungszeit viele Kompromisse bei der Stoffauswahl. Mir schwebte in Analogie zu einer Bohrinselform, eine Plattform zu errichten, auf der der Hörer sich sicher bewegen und selbständig tiefer bohren und weiter aufbauen kann. Dem sollen auch die Literaturhinweise dienen, deren Beschränkung eine Ermunterung zum Studium sein möge. Ihre Auswahl ist willkürlich aus der großen Anzahl relevanter Veröffentlichungen vorgenommen, so wie sie von mir benutzt wurden, und beinhaltet keine Wertung. Wichtig war mir, unter didaktischen Gesichtspunkten jeder Vorlesungsstunde ein genau umschriebenes Thema zuzuordnen und die Stofffülle so zu begrenzen, daß ein Abschluß möglich ist. Eine deutliche Untergliederung zur Erleichterung des Verständnisses war eine selbstverständliche Folgerung.

Sicherlich ist dieses Buch zunächst für Studenten der Elektrotechnik geschrieben, die nach dem Vordiplom ihre technischen Kenntnisse über ein Investitionsgut der elektrischen Energieversorgung vertiefen wollen, das von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung ist. In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich mit einem Betrag von ca. 10^{10} DM in der elektrischen Energieversorgung mehr Mittel als in jeder anderen Industriebranche investiert; ein Viertel dieser Aufwendungen fließt in die Kabelnetze. Ingenieure, die Entscheidungen über ein so langlebiges Produkt, wie es Energiekabel auf dem heute erreichten Entwicklungsstand sind, zu fällen haben, stehen somit in einer großen Verantwortung. Möglicherweise ist es auch für diese Praktiker von Reiz, in einem Studienbuch noch einmal nachzulesen, wie sich ihr umfangreiches Erfahrungswissen aus der täglichen Arbeit einfachen Entwicklungslinien zuordnen läßt.

Die Fakten, die ich in diesem Buch zusammengestellt und geordnet habe, sind letztendlich von vielen Fachkollegen, sei es als Kabelhersteller oder -anwender, erarbeitet worden. Gerne nehme ich Gelegenheit, mich für jede Form der Zusammenarbeit, die in einzelnen Fällen schon 30 Jahre umfaßt, zu bedanken. Ich bitte sehr, daß sich jeder angesprochen fühlt, ohne daß ich Namen nenne.

H. Wilhelm Lücking

Köln, August 1979

Inhaltsverzeichnis

Teil I	Kabelaufbauelemente und -konstruktionen	1
1	Kabelleiter	1
1.1	Kupfer als Leiterwerkstoff	1
1.2	Aluminium als Leiterwerkstoff	2
1.3	Eigenschaften der Leiterdrähte	2
1.4	Leiterverseilung	3
1.5	Leiterkonstruktionen	4
1.6	Definition des Leiterquerschnitts	5
2	Papier als Kabeldielektrikum	7
2.1	Wahl von Papier zur Kabelisolierung	7
2.2	Anforderungen an Kabelisolierpapier	8
2.3	Papierherstellung	9
2.4	Eigenschaften von Kabelisolierpapieren und deren Nachweis	11
3	Isolieröle zur Kabeltränkung	13
3.1	Wahl von Mineralölen zur Kabeltränkung	13
3.2	Klassifizierung von Mineralölen	14
3.3	Eigenschaften von Kabelisolierölen	16
3.4	Harzzusätze für Kabeltränkmassen	17
3.5	Haftmassen	18
4	Fertigungsverfahren für Papierkabel-Isolierungen	19
4.1	Aufwickeln von Papierbändern auf den Kabelleiter	19
4.2	Trocknen der Kabelisolierung	23
4.3	Tränkung der Kabelisolierung	24
5	PVC als Kabeldielektrikum	25
5.1	Wahl von PVC zur Kabelisolierung	25
5.2	Anforderungen an PVC zur Kabelisolierung	27
5.3	Zusammenstellung eines PVC-Kompounds zur Kabelisolierung	27
5.4	Eigenschaften und Prüfungen der PVC-Kompounde	29
5.5	Fertigungsverfahren für PVC-Isolierungen	30
6	Polyäthylen als Kabeldielektrikum	31
6.1	Wahl von PE zur Kabelisolierung	31
6.2	Verfügbare Polyäthylene	33
6.3	Eigenschaften von Polyäthylen zur Kabelisolierung	34
6.4	Fertigungsverfahren für PE-Isolierungen	35
6.5	Vernetzung von Polyäthylen	36
6.6	Eigenschaften von VPE zur Kabelisolierung	37

7	Kabelmäntel und -schirme, Schutzhüllen	38
7.1	Aufgaben dieser Kabelaufbauelemente	38
7.2	Grundlagen der Metallkorrosion	39
7.3	Verhalten metallener Mantel- und Rohrwerkstoffe	40
7.4	Passiver Korrosionsschutz	41
7.5	Aktiver Korrosionsschutz	42
8	Normen und VDE-Bestimmungen	45
8.1	Wesen und Notwendigkeit einer Normungsarbeit	45
8.2	VDE-Vorschriftenwerk	45
8.3	„Maschinenschutzgesetz“	46
8.4	Normenwerk des DNA	46
8.5	Deutsche Elektrotechnische Kommission	47
8.6	Internationale Elektrotechnische Kommission	48
8.7	Europäische Elektrotechnische Kommissionen	48
8.8	CIGRE	49
8.9	Gültige kabeltechnische Normen und Bestimmungen	50
9	Konstruktionen von Nieder- und Mittelspannungskabeln	51
9.1	Aufbau einer VDE-Bestimmung	51
9.2	Starkstromleitungen	51
9.3	Massekabel nach VDE 0255	52
9.4	PVC-Kabel nach VDE 0271	53
9.5	PE- und VPE-Kabel nach VDE 0273	54
9.6	VPE-Niederspannungskabel nach VDE 0272 Entwurf	54
9.7	Kenn- und Kurzzeichen	55
9.8	Prüfungen	57
9.9	Marktgängige Kabeltypen	59
10	Kabellegung, Garnituren und Montagetechniken	62
10.1	Verlegung der Kabel in Erde	62
10.2	Leiterverbindungen	64
10.3	Muffen	65
10.4	Aufbauelemente eines Endverschlusses	67
10.5	Endverschlüsse für Massekabel	69
10.6	Endverschlüsse für Kunststoffkabel	71

Teil II Theoretische Grundlagen	
Kabel für höhere Spannungen und Leistungen	73
11 Technische Grundprinzipien	73
11.1 Komponenten für Massekabel	73
11.2 Gürtelkabel	74
11.3 Schottwirkung der Papierisolierung	75
11.4 H-Kabel	77
11.5 Mehrmantelkabel	78
12 Mechanismen eines Kabeldurchschlags	79
12.1 Elektrische Beanspruchung der Kabelisolierung	79
12.2 Leiterglättung durch leitfähige Schichten	80
12.3 Hohlraumbildung im Betrieb eines Kabels	81
12.4 Glimmentladungsdurchschlag	82
12.5 Wärmedurchschlag	83
13 Strombelastbarkeit von Energiekabeln	86
13.1 Wärmebilanz eines Kabels	86
13.2 Berechnung der Verluste	88
13.3 Innere Wärmewiderstände eines Kabels	89
13.4 Äußerer Wärmewiderstand bei Luftverlegung	91
13.5 Äußerer Wärmewiderstand bei Erdverlegung	92
13.6 Konstanten in der Belastbarkeitsgleichung	94
13.7 Spezifischer Wärmewiderstand des Erdbodens	95
13.8 Bodenaustrocknung durch die Kabelverlustwärme	96
13.9 Theorie der dosierten Bodenaustrocknung	97
14 Höchstspannungskabel mit einem Öl/Papier-Dielektrikum	98
14.1 Elektrische Durchschlagfestigkeit	98
14.2 Ölkabel	100
14.3 Druckkabel	103
14.4 Gasinnendruckkabel	106
14.5 Oilostatic- und Öl-Hochdruckkabel	108
14.6 Vergleich stabilisierter Kabel	109
15 Höchstspannungskabel mit einem Kunststoffdielektrikum	111
15.1 Einsatz von Polyäthylen	111
15.2 Beurteilung des elektrischen Verhaltens	113
15.3 Alterung durch "Water treeing"	115
15.4 Trockenvernetzung bei Höchstspannungskabeln	116
15.5 Lebensdauer-Gesetz kunststoffisolierter Kabel	117

16 Hochleistungskabel	120
16.1 Thermische Grenzleistungen	120
16.2 Laterale Kühlung der Kabeloberfläche	122
16.3 Integrale Kühlung der Kabeloberfläche	123
16.4 Innere Kühlung des Kabelleiters	124
16.5 Einsatzbereiche zwangsgekühlter Kabel	126
16.6 Tieftemperaturkabel	127
16.7 Ultrahöchstspannungskabel	129
 Liste der verwendeten Symbole	 131
Namenverzeichnis	134
Sachverzeichnis	134