

# Die elektrische Kraftübertragung

Von

Dipl.-Ing. **Herbert Kyser**

Oberbaurat

Zweiter Band

**Die Niederspannungs-  
und Hochspannungs-Leitungsanlagen**

Entwurf, Berechnung, elektrische und  
mechanische Ausführung

Dritte

vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 395 Abbildungen und 55 Zahlentafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH  
1932

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1932  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1932  
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1932

ISBN 978-3-662-36136-8

ISBN 978-3-662-36966-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-36966-1

## Vorwort.

Bei der Durchsicht der zweiten Auflage stellte sich heraus, daß die Fortschritte im Bau von Leitungen für Kraftübertragungszwecke gleich allen anderen technischen Einzelheiten in den letzten zehn Jahren so wesentliche Änderungen mit sich gebracht hatten, daß eine vollständige Neubearbeitung auch des zweiten Bandes erforderlich wurde. Diese Neubearbeitung lege ich nunmehr der Fachwelt vor und knüpfe daran die Hoffnung, daß es mir gelungen ist, wiederum etwas für Studium und Praxis Brauchbares geschaffen zu haben.

Um Nachsicht muß ich bitten, wenn nicht Alles behandelt worden ist, was auf dem Gebiet der Leitungsberechnung und des Leitungsbaues hätte erwähnt werden können. Ich mußte mir wegen der Fülle des Stoffes Beschränkungen auferlegen und wünsche nur, daß nach Ansicht meiner Fachkollegen diese Beschränkungen nicht zum Nachteil des Werkes ausgefallen sind. An die Spitze habe ich bei der Stoffbeurteilung stets die Aufgaben, deren Lösung und die Wünsche gestellt, die vom praktischen Betrieb ausgehen, nicht von Studienuntersuchungen oder theoretischen Aufgabenstellungen. Konstruktionen, Patente usw. sind wiederum nicht behandelt worden.

Den Elektrizitätsfirmen, die mich durch Überlassung von Bildvorlagen unterstützt haben, insbesondere der Siemens-Schuckert-Werke A.G. und der Hermsdorf Schomburg Isolatoren G.m.b.H., Hermsdorf, sowie Herrn Direktor Dr.-Ing. W. Weicker danke ich an dieser Stelle noch besonders für ihre wertvolle Mitarbeit. Ganz besonderer Dank gebührt der Verlagsbuchhandlung Julius Springer, die der Drucklegung und der Bildbearbeitung auch des zweiten Bandes ihre fachmännische Aufmerksamkeit und Beratung in hervorragendem Maße widmete.

Möge auch diese Neubearbeitung eine gute Aufnahme in Fachkreisen finden.

Weimar, im Oktober 1932.

H. Kyser.

# Inhaltsverzeichnis.

## Erster Abschnitt.

### Der elektrische Bau der Leitungsanlage.

	Seite
1. Allgemeine Gesichtspunkte für den Entwurf einer Leitungsanlage . . .	1
2. Die Verteilungsleitungen im allgemeinen . . . . .	2
a) Die Berechnungsgrundlagen . . . . .	2
b) Der Anschluß der Stromverbraucher an eine Hauptleitung (Reihen- und Parallelschaltung) . . . . .	4
c) Gemischte und reine Stromkreise . . . . .	6
d) Der Spannungsabfall . . . . .	9
3. Die Gleichstrom-Verteilungsleitungen . . . . .	12
a) Die offenen Leitungen . . . . .	12
b) Die geschlossenen Leitungen (Ring- und Netzleitung) . . . . .	21
c) Das Dreileiternetz . . . . .	32
4. Die Gleichstrom-Fernleitungen (Speiseleitungen) . . . . .	37
5. Die Wechselstrom-Verteilungsleitungen . . . . .	38
a) Phasenverschiebung, induktive Widerstände . . . . .	38
b) Die Niederspannungs-Verteilungsleitungen . . . . .	40
1. Einphasenstrom S. 40. — 2. Zweiphasenstrom S. 50. — 3. Dreiphasen- oder Drehstrom S. 51.	
$\alpha$ ) Dreieckschaltung S. 53. — $\beta$ ) Sternschaltung S. 55.	
6. Die Wechselstrom-Hochspannungsleitungen . . . . .	60
a) Allgemeine Grundlagen, Grundgleichungen . . . . .	60
b) Der Ohmsche Widerstand und der Skineneffekt . . . . .	62
c) Selbstinduktion und gegenseitige Induktion . . . . .	67
1. Die Einphasenleitung S. 70. — Das Spannungsdiagramm für die Einphasenleitung mit Ohmschen Widerstand und Selbstinduktion S. 76. — 2. Die Dreiphasenleitung S. 77.	
d) Die Kapazität . . . . .	91
1. Die Einphasenleitung S. 93. — 2. Die Dreiphasenleitung S. 97. — 3. Die genaue Berechnung der Kapazität und der Erdschlußströme in Dreiphasennetzen ohne und mit Erdseilen S. 101. — Die Drehstrom-einfachleitung S. 101. — Die Drehstrom-Doppelleitung S. 107. — Das Schutz- und Erdseil S. 108. — Der Einfluß eines Erdschlusses auf die Kapazitätsströme S. 113. — Das Spannungsdiagramm für die Fernleitung mit Ohmschem Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität S. 121.	
e) Die Ableitung . . . . .	125
f) Der Strahlungsverlust (Koronaverlust) . . . . .	127
Das Spannungsdiagramm für die Fernleitung mit Ohmschem Widerstand, Selbstinduktion, Kapazität und Wirkverlusten durch Ableitung und Korona S. 135.	
g) Leiterquerschnitt, Spannungsabfall und Entwurfsbearbeitung. . . . .	138
h) Die elektrische Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch die Hochspannungsleitungen. . . . .	152

## Zweiter Abschnitt.

### Der mechanische Bau der Freileitungen.

7. Allgemeines über die Wahl der Ausführung als Freileitung oder Kabel	161
8. Die Freileitungstrecke . . . . .	163

	Seite
9. Die Werkstoffe für Freileitungen . . . . .	170
a) Die Werkstoffe im allgemeinen . . . . .	170
b) Kupfer . . . . .	176
c) Aluminium . . . . .	179
d) Stahlaluminium . . . . .	182
e) Aldrey . . . . .	185
f) Kupferpanzerstahl . . . . .	187
g) Bronze . . . . .	191
h) Stahl . . . . .	191
i) Leiterwerkstoffe für Fernmeldeleitungen . . . . .	193
10. Die Festigkeitsberechnung der Freileitungen . . . . .	193
a) Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	193
b) Berechnung der Beanspruchung und des Durchhanges des Leiters auf Stützenisolatoren und an senkrecht hängenden Kettenisolatoren auf ebener Leitungsstrecke . . . . .	195
c) Berechnung der Beanspruchung und des Durchhanges des Leiters an schweren Abspann-Kettenisolatoren . . . . .	197
d) Berechnung der Beanspruchung und des Durchhanges des Leiters auf Stützenisolatoren und an senkrecht hängenden Kettenisolatoren auf geneigter Leitungsstrecke . . . . .	198
e) Die Berechnung nach den V. S. F./1930 . . . . .	201
f) Die Belastung . . . . .	203
g) Die Eisbelastung . . . . .	205
h) Die Zugspannung und der Sicherheitsgrad $S$ . . . . .	211
i) Der Mastabstand oder die Spannweite $a_M$ . . . . .	215
11. Die Freileitungsisolatoren . . . . .	220
a) Allgemeine Bedingungen . . . . .	220
b) Der Werkstoff . . . . .	221
c) Die elektrischen Forderungen . . . . .	225
d) Die mechanischen Forderungen . . . . .	233
e) Die Isolatorformen . . . . .	234
1. Die Stützenisolatoren S. 234. — 2. Die Kettenisolatoren S. 240.	
f) Die Mauerdurchführungen . . . . .	261
12. Die Maste . . . . .	268
a) Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	268
b) Die Holzmaste . . . . .	269
c) Die Stahlmaste . . . . .	290
d) Die Eisenbetonmaste . . . . .	308
13. Entwurf und Berechnung der Maste . . . . .	313
a) Das Mastkopfbild . . . . .	313
b) Der Ausschwingwinkel des Leiters . . . . .	316
c) Die Mastlänge . . . . .	318
d) Die kritische Beurteilung der verschiedenen Leiteranordnungen und Mastkopfbilder . . . . .	327
e) Die Mastberechnungsgrundlagen und der Mastspitzenzug . . . . .	327
f) Die Berechnung der Holzmaste . . . . .	338
g) Die Mastverstreibungen . . . . .	345
h) Die Stahlgitter- und Stahlrohrmaste . . . . .	347
i) Die Eisenbetonmaste . . . . .	348
14. Besondere Streckeneinzelheiten . . . . .	348
a) Streckentrennschalter . . . . .	348
b) Schutzgitter . . . . .	351
c) Die Leiterverbindungen . . . . .	353
d) Die Leiterbefestigungen an Stützenisolatoren . . . . .	354
e) Die Verdrillungspunkte . . . . .	355
f) Schutzvorrichtungen gegen Gefährdungen durch Isolator- oder Leiterbruch am Isolator . . . . .	356
g) Große Spannfelder . . . . .	363

h) Störungen durch Seilschwingungen . . . . .	Seite 366
i) Walddurchquerungen . . . . .	367
k) Erdung und Sicherheit . . . . .	368
l) Wirtschaftliche Angaben . . . . .	372
m) Die Betriebsfernsprechanlagen . . . . .	378

## Dritter Abschnitt.

**Die Kabelleitungen.**

15. Die Kabelbauformen . . . . .	387
a) Werkstoffe und Bauformen im allgemeinen . . . . .	387
b) Das Gürtel- oder Normkabel . . . . .	388
c) Das H-Kabel . . . . .	394
d) Das verseilte Drei-Einleiterkabel . . . . .	397
e) Das verseilte Drei-Einleiterkabel mit Rillenbleimantel . . . . .	398
f) Die Zweileiter- und Vierleiterkabel . . . . .	399
g) Die Einleiterkabel . . . . .	399
h) Das Ölkabel . . . . .	401
i) Das Druckkabel . . . . .	403
k) Die Querschnittsformen des Leiters . . . . .	403
l) Die Bewehrung der Kabel . . . . .	407
m) Das Dehnungskabel . . . . .	410
n) Prüfdrähte . . . . .	411
16. Die elektrischen Werte der Kabel und Kabelanlagen . . . . .	412
a) Allgemeines . . . . .	412
b) Die Isolationsstärke und ihre rechnerische Beurteilung . . . . .	413
c) Der Isolationswiderstand . . . . .	419
d) Die Durchschlagsfestigkeit . . . . .	421
e) Die zulässige Belastung . . . . .	422
f) Die Leistungsverluste im Kabel . . . . .	426
g) Die Eisenverluste . . . . .	429
h) Die dielektrischen Verluste . . . . .	432
i) Der Gesamtleistungsverlust . . . . .	435
k) Der Leerlaufverlust durch den Ladestrom . . . . .	436
l) Die Berechnung des Ohmschen Spannungsabfalles . . . . .	436
m) Die Induktivität . . . . .	437
n) Die Kapazität, der Ladestrom und der Erdschlußstrom . . . . .	441
17. Der mechanische Bau von Kabelanlagen . . . . .	449
a) Die Strecke . . . . .	449
b) Der Kabelgraben und die Kabelverlegung im Freien . . . . .	452
c) Die Kabelverlegung in Gebäuden . . . . .	456
d) Kabelstollen . . . . .	459
e) Kurzschlußkräfte . . . . .	460
f) Die Kabelzubehörteile . . . . .	461
1. Die Kabelendverschlüsse S. 462. — 2. Die Kabelverbindungs-	
muffen S. 469. — 3. Die Kabelkästen S. 471.	
18. Wirtschaftliche und betriebstechnische Einzelheiten . . . . .	473
a) Kabel statt Freileitung . . . . .	473
b) Kostenvergleich zwischen Kabel und Freileitungen . . . . .	475
c) Kosten der Kabelverlegung . . . . .	479
d) Kabelschutzeinrichtungen . . . . .	481
e) Prüfung, Fehlerortsbestimmung . . . . .	482
Sachverzeichnis . . . . .	485

## VDE-Bestimmungen (Vorschriften, Regeln, Normen und Leitsätze), die für den 2. Band besonders beachtlich sind.

- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die **Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V**, V.E.S. 1./1930. (Sonderdruck VDE 436.)
- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die **Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber** V.E.S. 2./1930. (Sonderdruck VDE 437.)
- Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von **Starkstromanlagen** V.B.S./1929. (Sonderdruck VDE 438.)
- Normen für Betriebsspannungen elektrischer **Starkstromanlagen**. (Sonderdruck VDE 393.)
- Kupfernormen.**
- Vorschriften für isolierte Leitungen in **Starkstromanlagen** V.I.L./1930. (Sonderdruck VDE 450.)
- Vorschriften für umhüllte **Leitungen**. (Sonderdruck VDE 449.)
- Leitsätze für **Erdungen und Nullung in Niederspannungsanlagen**. (Sonderdruck VDE 314.)
- Leitsätze betreffend **Anfressungsgefährdung des blanken Nulleiters** von Gleichstrom-Dreileiteranlagen.
- Leitsätze für **Maßnahmen an Fernmelde- und an Drehstromanlagen** im Hinblick auf gegenseitige Näherungen. (Sonderdruck VDE 321.)
- Allgemeine Vorschriften für die **Ausführung und den Betrieb** neuer **elektrischer Starkstromanlagen** (ausschließlich der elektrischen Bahnen) bei Kreuzungen und Näherungen von Telegraphen- und Fernsprechleitungen. Ausführungsbestimmungen des Reichspostministers zu den „Allgemeinen Vorschriften für die Ausführung und den Betrieb neuer elektrischer Starkstromanlagen (ausschließlich der elektrischen Bahnen) bei Kreuzungen und Näherungen von Telegraphen- und Fernsprechanlagen.“
- Vorschriften für den Bau von **Starkstrom-Freileitungen** V.S.F./1930. (Sonderdruck VDE 442.)
- Merkblätter für **Verhaltensmaßregeln** gegenüber **elektrischen Freileitungen**. (Sonderdruck VDE 329.)
- Vorschriften für **isolierte Leitungen** in Fernmeldeanlagen V.F.L./1928. (Sonderdruck VDE 397.)
- Vorschriften für die Prüfung elektrischer **Isolierstoffe**. (Sonderdruck VDE 318.)
- Leitsätze für die Bestimmungen **elektrischer Eigenschaften von festen Isolierstoffen**. (Sonderdruck VDE 455.)
- Leitsätze für die Prüfung der **Stoffeigenschaften** keramischer Isolierteile für Nennspannungen unter 1000 V. (Sonderdruck VDE 458.)
- Leitsätze für die Erzeugung bestimmter **Luftfeuchtigkeit** zur Prüfung elektrischer Isolierstoffe. (Sonderdruck VDE 459.)
- Regeln für Spannungsmessungen mit der **Kugelfunkenstrecke** in Luft. (Sonderdruck VDE 365.)
- Leitsätze für die Prüfung von **Isolatoren** aus keramischen Werkstoffen für **Spannungen von 1000 V an**. (Sonderdruck VDE 446.)
- Leitsätze für die Prüfung von **Hochspannungsisolatoren mit Spannungsstößen**. (Sonderdruck VDE 367.)
- Merkblatt über die **Zerstörung von Holzmasten** durch Käferlarven. (Sonderdruck VDE 392.)

- Leitsätze für **Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen.** (Sonderdruck VDE 374.)
- Leitsätze für den **Schutz** elektrischer Anlagen gegen Überspannungen. (Sonderdruck VDE 323.)
- Normen für häufig gebrauchte **Warnungstafeln.**
- Bahnkreuzungsvorschriften für **fremde Starkstromanlagen** B.K.V./1930. (Sonderdruck VDE 475.)
- Vorschriften für die **Kreuzung** von **Reichswasserstraßen** durch fremde Starkstromanlagen W.K.V./1927. (Sonderdruck VDE 474.)
- Vorschriften für die **bruchsichere Führung** von **Starkstromleitungen** mit Betriebsspannungen von 1000 V und mehr über Postleitungen. (Sonderdruck VDE 473.)
- Regeln für die Errichtung elektrischer **Fernmeldeanlagen.** (Sonderdruck VDE 324.)
- Sicherheitsvorschriften für **Hochfrequenztelephonie** in Verbindung mit **Hochspannungsanlagen.**
- Vorschriften für **Bleikabel** in **Starkstromanlagen** V.S.K./1928. (Sonderdruck VDE 403.)
- Vorschriften für die Bewertung und **Prüfung** von **Vergußmassen** für Kabelzubehörteile. (Sonderdruck VDE 396.)
- Leitsätze für die **Prüfung** von **Vergußmassen** für Geräte unter **1000 V** Nennspannung. (Sonderdruck VDE 456.)
- Leitsätze für die **Bekämpfung** von **Bränden** in **elektrischen Anlagen** und deren Nähe. (Sonderdruck VDE 348.)



## Zahlentafeln und Zusammenstellungen.

	Seite
1. Belastungstafel für isolierte Leiter und Schnüre aus Leiterkupfer nach V. E. S. 1/1930 . . . . .	11
2. Rechnungsgrundlagen zum 1. Beispiel . . . . .	15
3. Belastungen und Spannungsabfälle für das Leitungsnetz der Abb. 15 bei Störungen auf verschiedenen Strecken . . . . .	31
4. Rechnungsgrundlagen zum 8. Beispiel . . . . .	48
5. Ohmscher Wechselstromwiderstand $R_{We, Eisen}$ für 1 km Eisenleitung bei $f = 50$ Hertz . . . . .	64
6. Ohmscher Wechselstromwiderstand $R_{We, Eisen}$ für 1 km Eisenleitung bei $f = 50$ Hertz . . . . .	65
7. Induktivitäten für Einphasenleitungen . . . . .	75
8. Induktivitäten für Drehstromleitungen . . . . .	84
9. Kapazitätsbelastung von Kraftwerken durch die Ladeleistung in kVA der Freileitungen (Drehstrom, Frequenz 50, 100 km Länge, übliche Abstände)	124
10. Leistungsverluste zwischen Leiter und Stütze bei Hochspannungs-Stützenisolatoren . . . . .	126
11. Umrechnungswerte für $\cos \varphi$ , $\sin \varphi$ und $\operatorname{tg} \varphi$ . . . . .	140
12. Elektrische und mechanische Grundwerte der Leiterwerkstoffe . . . .	174
13. Einlagen-Hohlseile ohne inneres Stützorgan aus Elektrolytkupfer für Höchstspannungs-Übertragungen . . . . .	176
14. Normen für Kupferleiter-Drähte und Seile . . . . .	178
15. Vergleichende Zusammenstellung der Werkstoffwerte für Kupfer und Aluminium bezogen auf Kupfer = 1 . . . . .	179
16. Aufbau, mechanische und elektrische Eigenschaften von Aluminium- und Kupferseilen . . . . .	180
17. Aufbau von Stahlaluminiumseilen . . . . .	183
18. Verteilung der Belastung bei Stahl-, Aluminium- und Reinaluminiumseilen . . . . .	184
19. Mechanische und elektrische Eigenschaften von Stahlaluminium-, Bronze- und Aldreyseilen . . . . .	186
20. Querschnitts- und Gewichtsvergleich für Stahlaluminium-, Bronze- und Aldreyseile . . . . .	187
21. Vergleichende Zusammenstellung der Werkstoffwerte für Kupfer, Kupferpanzerstahl und Bronze bezogen auf Kupfer = 1 . . . . .	188
22. Vergleichskosten für Mittelspannungsleitungen aus KPS und Cu bei 15 kV Betriebsspannung und 10 km Länge . . . . .	190
23. Werkstoffangaben für Fernmelde-Freileitungen nach Din VDE 8300 . .	192
24. Beaufort-Skala für Windgeschwindigkeit und Winddruck . . . . .	204
25. Zusammenstellung von Heizleiterversuchen auf der Versuchsstrecke des Thüringenwerkes . . . . .	210
26. Grenzspanweiten nach V.S.F./1930 . . . . .	212
27. Sicherheitsgrad der Leiterwerkstoffe bei den Werten nach V.S.F./1930 . .	214
28. Mindest-Regenüberschlagspannung für Isolatoren in Drehstromanlagen	232
29. Gegenüberstellung von Stützen- und Kleinkettenisolatoren für eine Betriebsspannung von 30 kV . . . . .	245
30. Gegenüberstellung einer Kappen- und Vollkernisolatorkette für eine Betriebsspannung von 110 kV . . . . .	257
31. Wirtschaftliche Werte verschieden imprägnierter Holzmaste . . . . .	272
32. Abmessungen von amerikanischen Holzmasten . . . . .	280
33. A-Holzmaste mit gleichem Abstand der Stangen an der Zange . . . .	282

	Seite
34. Abmessungen für hölzerne Querträger . . . . .	286
35. Ergebnisse zum 25. Beispiel . . . . .	317
36. Kritische Beurteilung der verschiedenen Leiteranordnungen und Mastkopfbilder für Drehstrom-, Einfach- und Doppelstromkreise . . . . .	320
37. Gewichte und Abmessungen verschiedener Abspann- und Tragmaste für eine 100 kV-Drehstrom-Doppelleitung $6 \times 95 \text{ mm}^2$ Cu, $1 \times 70 \text{ mm}^2$ Fe, 230 m Spannweite, Verdrehungsbeanspruchung und Mastberechnung nach V. S. F./1930 . . . . .	326
38. Berechnungsgrundlagen für Maste nach V. S. F./1930 . . . . .	328
39. Zulässige Spannungen für Holzmaste . . . . .	338
40. Hilfstafel für die Berechnung von Holzmasten . . . . .	339
41. Zulässige Spannungen für Stahlgittermaste . . . . .	347
42. Kilometerpreis für einfache Drehstromleitungen mit einem Stromkreis auf Holz- bzw. Eisenmasten mit Stützenisolatoren einschließlich je eines verstärkten Mastes für Abspann- oder Kreuzungspunkte bei mittleren Spannweiten . . . . .	372
43. Leitungsbaukosten für 110- und 220-kV-Freileitungen . . . . .	373
44. Entschädigungssätze für das Aufstellen von Masten . . . . .	376
45. Vergleichswerte für Dreileiter- und Einleiter-Gürtel und H-Kabel mit rundem Leiterquerschnitt für 30 und 60 kV Betriebsspannung . . . . .	396
46. Einleiter-Masse- und Einleiter-Ölkabel für 100-kV-Drehstrom . . . . .	401
47. Vergleichswerte für Dreileiter-Gürtelkabel mit rundem und sektorförmigem Leiterquerschnitt für 6 bis 15 kV-Betriebsspannung . . . . .	405
48. Papierisolierte Starkstromkabel (V. S. K./1928), Kurzzeichen-Erläuterung . . . . .	407
49. Angaben über den elektrischen Kabelaufbau für verschiedene Verhältnisse . . . . .	415
50. Isolationsstärken für verseilte Mehrleiterkabel nach V. S. K./1928 . . . . .	417
51. Isolationsstärken für Einleiter-Wechselstromkabel nach V. S. K./1928 . . . . .	418
52. Zulässige Belastung für normale Gürtelkabel nach V. S. K./1928 . . . . .	425
53. Verlustwiderstandsmessungen an Einphasenkabeln . . . . .	431
54. Vergleich einer Drehstrom-Freileitung mit einem Drehstrom-Ölkabel für 60 kV Betriebsspannung . . . . .	478
55. Preise für Kabelgrabenherstellung . . . . .	480