

**WIRTSCHAFTLICHE
ENERGIEVERTEILUNG
IN DREHSTROMKABELNETZEN**

VON

DR.-ING. WILLY SPEIDEL

MIT 17 ABBILDUNGEN



MÜNCHEN UND BERLIN 1932

VERLAG VON R. OLDENBOURG

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechtes, vorbehalten.

Copyright 1932 by R. Oldenbourg, München und Berlin.

Druck von R. Oldenbourg, München und Berlin.

Vorwort.

Auf der Weltkraftkonferenz 1930 in Berlin hat der amerikanische Botschafter Sackett einen seinerzeit aufsehenerregenden Vorstoß gegen die hohen Verkaufspreise für elektrische Arbeit unternommen. Er erklärte, daß bei keinem sonstigen Produkt so hohe Unterschiede zwischen Erzeugungskosten und Verteilungskosten bestehen wie gerade bei dem Verkauf elektrischer Arbeit. Die Elektrizitätswerke haben sich gegen diesen Vorwurf durch Erläuterung der hohen Verteilungskosten und der schlechten Ausnützung der Verteilungs- und Erzeugungsanlagen gewehrt. Die Anlage- und Betriebskosten von Energieerzeugungsanlagen können durch eingehende Veröffentlichungen als geklärt angesehen werden. Die Aufwendungen für flächenhafte Energieverteilungsanlagen sind dagegen nur durch Schätzungswerte, z. B. in dem Gutachten 1930 des Enqueteausschusses über die deutsche Elektrizitätswirtschaft, bekannt, welche keinen Weg zeigen, wie diese Kostenbeträge vermindert werden können.

Die vorliegende Arbeit gibt — zunächst für Kabelnetze — eine Methode an, mit welcher die wirtschaftliche Gestaltung eines Verteilungsnetzes nach Größe und Energieverbrauch bestimmt werden kann. Sie zeigt die Berechnung der wirtschaftlichsten Verteilungsform, der wirtschaftlichsten Spannung und der günstigsten Zahl von Unterstationen und läßt zugleich den Einfluß von Abweichungen von den wirtschaftlichen Werten auf die Anlage- und Betriebskosten zahlenmäßig erkennen. Die häufigste Ursache für zu hohe Verteilungskosten ist die Wahl zu großer Bezirke, die von einer Zentrale bzw. bei der Kleinverteilung von einer Unterstation gespeist werden. Über das ungünstige Verhältnis von den Leitungs- zu den Stationskosten hinaus ergibt die Wahl zu großer Verteilungsbezirke indirekt noch eine Erhöhung der toten Reserve im Leitungsnetz, welche praktisch nicht ausgenutzt werden kann.

Die neue Methode zur Berechnung einer wirtschaftlichen Energieverteilung ist kein Rezept, welches das Eindringen in die Netzverhältnisse überflüssig macht. Sie zeigt vielmehr die außerordentlich große Zahl von Faktoren, welche bei einer zweckmäßigen Lösung zu berücksichtigen sind. Sie gibt die Möglichkeit planmäßiger und dabei elastischer Gestaltung von Leitungsnetzen, an der es in der Praxis häufig gefehlt hat. Für den Fachmann wie den Studierenden dürfte die Angabe von praktischen Kostenwerten zur Vorausplanung von besonderem Interesse sein.

IV

So läßt sich aus vorstehender Arbeit die Antwort auf den Vorstoß des Botschafters Sackett ableiten, indem die Vielgestaltigkeit der Bedingungen zweckmäßiger Netzgestaltung und der in Frage kommenden Kostenwerte enthüllt wird.

Die Durchführung dieser Untersuchungen wurde mir durch die Unterlagen erleichtert, die mir als projektierendem Elektroingenieur eines großen Industriekonzerns zur Verfügung stehen. Ich verdanke jedoch auch Unterstützung und Anregung dem Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Darmstadt und insbesondere Herrn Professor Dipl.-Ing. R. Schneider, der meine Arbeit stets mit größtem Interesse verfolgt und gefördert hat, in dem Bestreben, die Frage der Netzkosten zu klären und die Verteilungskosten zu senken. In der Folge hat er sich auch in seinem Büro für Kraftwirtschaft für die Einführung der neuen Rechnungsmethoden in die Praxis eingesetzt. Ich bin Herrn Professor Schneider für alle Förderung meiner Zielsetzung zu besonderem Dank verpflichtet. Ich möchte es auch nicht unterlassen an dieser Stelle Herrn Prof. Oberbaurat A. Sengel für das Interesse zu danken, welches er der Arbeit entgegengebracht hat. Bei dieser Gelegenheit dem Verlag Oldenbourg für sein Eingehen auf meine Wünsche zu danken, ist mir eine angenehme Pflicht.

Ludwigshafen, im Juli 1932.

Willy Speidel.

Inhaltsangabe.

	Seite
Zusammenstellung der gewählten Bezeichnungen	VII
I. Einleitung	1
II. Mathematische Grundgleichungen für die Anlage- und Betriebskosten von Transformatorstationen	4
A. Anlagekosten von Transformatorstationen in Abhängigkeit von Scheinleistung, Spannung und Transformatorzahl	4
B. Kosten der jährlichen Transformatorverluste in Abhängigkeit von Scheinleistung und Oberspannung	9
C. Jährliche Betriebskosten für Transformatorstationen	10
III. Mathematische Grundgleichungen für die Anlage- und Betriebskosten von Drehstromkabeln	11
A. Kabelkosten in Abhängigkeit von Querschnitt und Spannung	12
B. Kabelverlegungskosten bei verschiedenen Verlegungsarten	12
C. Wirtschaftliche Stromdichte und Kabelreservefaktor	14
D. Kabelkosten je kVA maximaler Übertragungsleistung auf 1 km bei verschiedenen Spannungen	19
E. Kabelverluste in Abhängigkeit von übertragener Leistung und Spannung	21
F. Jährliche Betriebskosten für Kabel	23
IV. Lineare Kraftübertragungen durch Drehstromkabel	24
V. Ableitung mathematischer Grundgleichungen für eine wirtschaftliche flächenhafte Drehstromkabelverteilung	26
A. Allgemeine Darlegung des Rechnungsganges	26
B. Wirtschaftliche Gestaltung von quadratisch aufgebauten Drehstromkabelnetzen mit Zentrale in Anlagenmitte	31
a) Reine Niederspannungsverteilung	31
b) Zweispannungsnetz ohne Hochspannungs-Verbraucher	33
c) Dreispannungsnetz ohne Mittelspannungs-Verbraucher	38
C. Wirtschaftliche Gestaltung von rechteckig aufgebauten Drehstromkabelnetzen mit Zentrale in Anlagenmitte	42
a) Reine Niederspannungsverteilung	43
b) Rechteckiges Zweispannungsnetz ohne Hochspannungsverbraucher	45
c) Rechteckiges Dreispannungsnetz ohne Mittelspannungsverbraucher	50
D. Wirtschaftliche Energieverteilung in Städten mit quadratischen Gebäudeblocks	53
E. Maximaler Spannungsabfall im Niederspannungsnetz	56

VI

	Seite
VI. Beeinflussung der wirtschaftlichen Größen einer Energieverteilung durch gegenüber Kapitel V geänderte Voraussetzungen.	59
A. Verschiebung der Zentrale aus Anlagenmitte	59
B. Veränderliche Energiedichte	61
C. Vorhandensein von Hochspannungsverbrauchern	61
D. Erhöhung der Anlage- und Betriebskosten eines Netzes infolge Abweichung von der wirtschaftlichen Spannung	65
E. Erhöhung der Anlage- und Betriebskosten eines Netzes infolge Abweichung von der wirtschaftlichen Unterstationszahl	68
VII. Jährliche Betriebskosten von Kabelnetzen	70
A. Bedingungen für die günstigste Überlagerung von Kabelnetzen verschiedener Spannungen	70
B. Vermaschung von Netzen	74
C. Wirtschaftliche konstruktive Ausbildung von Unterstationsausrüstungen	78
VIII. Einfluß der Verbraucher auf die Energieverteilung in Industrieanlagen	80
A. Maximaler Leistungsbedarf und installierte Verbraucherleistung . .	81
B. Jährliche Benutzungsdauer des Leistungsmaximums und jährliche Verluststundenzahlen	83
C. Sicherheit des Strombezugs	86
D. Wahl der Niederspannung	87
E. Wahl der Hochspannung und wirtschaftliche Grenzleistungen zwischen Niederspannungs- und Hochspannungsmotoren	94
IX. Zusammenfassung der Rechnungsergebnisse in ihrer Auswirkung auf die wirtschaftlichen Größen	96
A. Wirtschaftliche Unterstationszahl	97
B. Wirtschaftliche Netzgröße bei gegebener Spannung	101
C. Anlagekosten je kVA Verteilerleistung und Verteilungskosten je kWh für wirtschaftlich ausgeführte Kabelnetze in Abhängigkeit von Netzgestaltung und Flächenstromdichte	104
X. Schlußwort	109

Anlagen.

I. Leistungsunabhängige Anlage- und Betriebskosten von Transformatorstationen	111
II. Kosten von armierten Dreileiter-Rundkabeln in Abhängigkeit von Querschnitt und Spannung	111
III. Grundpreise für Kabelverlegungskosten je Meter Kabel in Reichsmark	112
IV. Wirtschaftliche Grenzleistungen zwischen Hoch- und Niederspannungsmotoren in kW	113

Tabellarische Aufstellungen.

	Seite
Aufstellung 1: Konstanten δ_1 bis δ_3 zur Errechnung der Anlagekosten von Transformatorstationen	7
Aufstellung 2: Konstanten γ_1 bis γ_5 zur Errechnung der jährlichen Verlustkosten von Transformatoren	10
Aufstellung 3: Konstanten α und β zur Errechnung der Kosten verlegter Kabel je kVA und km	21
Aufstellung 4: Abhängigkeit der Anlage- und Betriebskosten eines Netzes von einer von der wirtschaftlichen abweichenden Verteilerhochspannung	67
Aufstellung 5: Abhängigkeit der Anlage- und Betriebskosten eines Netzes von einer von der wirtschaftlichen abweichenden Unterstationszahl	69
Aufstellung 6: Preise von Motorschutzschaltern	92
Aufstellung 7: Anzahl der Unterstationen je km nach Burger	100

Zusammenstellung der gewählten Bezeichnungen.

Bei der Wahl der Bezeichnungen wurden die von Herrn Prof. Dipl.-Ing. R. Schneider-Darmstadt anlässlich der 2. Weltkraftkonferenz 1930 vorgeschlagenen Terminologien und Formelzeichen berücksichtigt und nur für bisher nicht normalisierte Begriffe und Konstanten neue Bezeichnungen eingeführt. Für den Rechnungsgang war teilweise eine Zusammenfassung verschiedener Konstanten zweckmäßig.

1. Elektrische Grundbegriffe.

J_f	= Flächendichte der maximalen Energieaufnahme im Niederspannungsnetz in kVA/km ² (Kapitel V bis X).
$c_{ho} \cdot J_f$	= Flächendichte der maximalen Energieaufnahme einschließlich der etwa von Hochspannungsverbrauchern aufgenommenen Spitzenleistungen (Kapitel VI C) in kVA/km ² .
j_w	= wirtschaftliche Stromdichte in A/mm ² , d. h. diejenige Stromdichte zur Zeit der Spitze für Dreileiterkabel, bei der sich die niedrigsten jährlichen Betriebskosten (Kapitaldienst + Verlustkosten) ergeben (Kapitel III C).
j_{zul}	= nach der Erwärmung (V.S.K. 1928) zulässige Stromdichte für Dreileiterkabel (Kapitel III C bis F) in A/mm ² .
L_a	= maximale Leistungsaufnahme an den Hauptabzweigpunkten des Niederspannungsverteileretzes (abgekürzt Verbraucher) in kVA (Kapitel V).
$L_{\infty s}$	= maximale Scheinleistung in kVA (Kapitel II und III).
L_{Tr_s}	= Nennscheinleistung von Transformatoren in kVA (Kapitel II).
L_{Tr_v}	= wirtschaftliche Transformatorleistung in kVA (Kapitel V).
q	= Kabelquerschnitt je Phase in mm ² (Kapitel III und IV).
r_s	= spezifischer Widerstand des Leitermaterials bezogen auf 1 m und Quadratmillimeter (Kapitel II).
S	= Spitze in einem Zeitraum.
t	= beliebige Zahl von Stunden (Kapitel II und III).
T	= Stundenzahl eines bestimmten Zeitraumes (Jahres).
U_n	= Niederspannung in kV (Kapitel III, V E).
u_n	= maximaler Spannungsabfall im Niederspannungsnetz in V (Kapitel V E).
$u_n^{\circ/0}$	= maximaler Spannungsabfall im Niederspannungsnetz in %.
U_m	= Mittelspannung eines Dreispannungsnetzes in kV.
U_h	= Hochspannung in kV (bei Zweispannungsnetz Verteilerhochspannung, bei Dreispannungsnetz oberste Verteilerspannung).

VIII

2. Wirtschaftliche Grundbegriffe.

- a = spezifischer fixer Kostenanteil einer kWh in RM./kWh.
 A = querschnittsunabhängige Konstante für Kabelkosten (Kapitel III A).
 B = querschnittsabhängige Konstante für Kabelkosten (Kapitel III A und C).
 b = spezifischer proportionaler Kostenanteil einer kWh in RM./kWh.
 c_{ho} = Konstante, welche die Erhöhung der Niederspannungsnetzspitzenleistung durch Hochspannungsverbraucher angibt (Kapitel VI C).
 c_x = Konstante, welche die Abweichung der wirklichen von der wirtschaftlichen Unterstationszahl angibt (Kapitel VI E).
 g = $\frac{a \cdot T}{h_{v_s}} + b$ = Kosten einer Verlust-kWh in RM.
 m = Verhältnis der Zahl der »Verbraucher« (Hauptanschlußpunkte) je Straße zur Zahl der parallelen Verbraucherstraßen eines rechteckigen Netzes (Kapitel V C).
 $M = (m \cdot n)$ = Verhältnis der Längenabmessung eines rechteckigen Netzes in Richtung zu der quer zu den Verbraucherstraßen (Kapitel V C).
 n = Verhältnis des Abstandes der Verbraucher in den Straßen zum Straßenabstand eines rechteckigen Netzes (Kapitel V).
 $N \text{ km}$ = »wirtschaftliche Netzgröße« (Länge einer Quadratseite) eines quadratisch begrenzten Netzes für eine gegebene Verteilerhochspannung (Kapitel V B, b und c).
 $N_e \text{ km}$ = effektive Netzgröße eines quadratisch begrenzten Netzes.
 $N_1 \text{ km}$ = »wirtschaftliche Netzgröße« quer zu Verbraucherstraßen eines rechteckig begrenzten Netzes für eine gegebene Verteilerhochspannung (Kapitel V C, b und c).
 $N_{e_1} \text{ km}$ = effektive Netzgröße quer zu Verbraucherstraßen eines rechteckig begrenzten Netzes.
 $N_2 = (M \cdot N_1) \text{ km}$ = wirtschaftliche Netzgröße in Richtung der Verbraucherstraßen eines rechteckig begrenzten Netzes für eine gegebene Verteilerhochspannung (Kapitel V C, b und c).
 $N_{e_2} \text{ km}$ = $(M \cdot N_{e_1}) \text{ km}$ = effektive Netzgröße in Richtung der Verbraucherstraßen eines rechteckig begrenzten Netzes.
 P = Zahl der Hauptanschlußpunkte je Gebäudeblockseite in städtischen Verteilungsnetzen (Kapitel V D).
 p = jährliche Quote für Abschreibung und Verzinsung von Teilen eines Verteilungsnetzes (Kapitel II und III) (mit Indexen » l « für Leitungen, » Tr « für Transformatorstationen).
 r_{i_1} = $\frac{\Sigma (L_{g \text{ zul}} \cdot l_{\text{min}})}{\Sigma (L_{s_v} \cdot l_{\text{min}})}$ = Kabelreservefaktor für Anlagekosten von Kabeln (Kapitel III C).
 r_{i_2} = $\frac{\Sigma (L_{g \text{ zul}} \cdot l_{\text{min}})}{\Sigma (L_{s_v} \cdot l_{\text{zul}})}$ = Kabelreservefaktor für Verlustkosten und Spannungsabfall von Kabeln (Kapitel III C, V E).
 r_{Tr_1} = Reservefaktor für Reserve in den Betriebstransformatoren.
 r_{Tr_2} = » » normal nicht angeschlossene Reservetransformatoren im Verhältnis zur Zahl der Betriebstransformatoren (Kapitel II).
 X = Zahl der Unterstationen eines Netzes (Kapitel V bis IX).
 X_0 = wirtschaftliche Zahl von Unterstationen je km².
 y = Entfernung paralleler Verbraucherstraßen in km (Kapitel V).
 z = Zahl der Parallelstraßen mit Verbrauchern in einer Richtung (Kapitel V).
 z_k = Zahl der parallel geschalteten Kabel (Kapitel III E, IV).
 α = Konstante für Kabelkosten je kVA und km (Kapitel III, Aufstellung 3).
 β = Konstante für Kabelkosten je kVA und km (Aufstellung 3).

- δ_1 bis δ_5 = Konstante für Kosten von Transformatorstationen (Kapitel II, Aufstellung 1).
 γ_1 bis γ_3 = Konstante für Verluste in Transformatoren (Kapitel II, Aufstellung 2).
 Θ = Zahl der Betriebstransformatoren je Unterstation (Kapitel II bis IX).

3. Beziehungszahlen.

- ϑ = Arbeitsverlustfaktor (Kapitel VIII B).

$$= \frac{\text{tatsächliche veränderliche Verluste in einem Zeitraum}}{\text{Spitzenkupferverlustleistung} \times \text{Stundenzahl des Zeitraums}}$$
 h_{v_r} = Scheinarbeitsverluststundenzahl (Kapitel VIII B, II bis IX).

$$= \frac{\text{tatsächliche veränderliche Verluste in einem Zeitraum}}{\text{veränderliche Verluste bei Spitzenscheinleistung}}$$
 m = Belastungsfaktor (Kapitel VIII B).

$$= \frac{\text{Benutzungsstundenzahl der Spitze während eines Zeitraums}}{\text{Gesamtstundenzahl dieses Zeitraums}}$$
 v = Verschiedenheitsfaktor (Kapitel V bis IX, insbesondere VIII A).
 Summe der gleichzeitigen Spitzenleistungen im Niederspannungsnetz je km²

$$= \frac{\text{Höchstbelastung von Kabeln, Transformatoren oder in der Zentrale, bezogen auf 1 km}^2 \text{ (je mit Index)}}{\text{Höchstbelastung von Kabeln, Transformatoren oder in der Zentrale, bezogen auf 1 km}^2 \text{ (je mit Index)}}$$
 v_i = »Verbrauchsfaktor«.

$$= \frac{\text{Spitzenleistung einer Abnehmergruppe}}{\text{Anschlußwert einer Gruppe}}$$

4. Indices.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| f = fest, z. B. feste Kabelverluste, | s = Scheinleistung, |
| h = Hochspannung, | S = Spitzenscheinleistung, |
| J = Jahr, | T_r = Transformator bzw. Stationen, |
| l = Leitung (speziell Kabel), | r = Unterstation, |
| m = Mittelspannung, | V = Verlustarbeit, |
| n = Niederspannung, | w = wirtschaftlich. |

5. Abkürzungen.

- $k_{l_{min}}$ = Kabelkosten je kVA maximaler Übertragungsleistung auf 1 km in RM bei voller Ausnutzung (Kapitel III D).
 k_l = $\left(\frac{\alpha}{U} + \beta\right) \cdot r_l$ = Kabelkosten je kVA maximaler Übertragungsleistung auf 1 km unter Berücksichtigung eines Kabelreservefaktors (Kapitel III D, IV bis IX) in Abhängigkeit der Spannung U .
 k_{l_1} = $\left(p_1 \cdot r_l \cdot \alpha + 1,73 \cdot r_s \cdot \frac{I_{zul}}{r_{l_2}} \cdot g \cdot h_{v_r}\right)$ (Kapitel III F).
 k_{l_2} = $p_1 \cdot r_l \cdot \beta$.
 k_{l_j} = $\left(\frac{k_{l_1}}{U} + k_{l_2}\right)$ RM. = Jährliche Betriebskosten einer Kabelübertragung je kVA maximaler Übertragungsleistung und km in Abhängigkeit der Spannung U (Kapitel III F, IV bis IX) (mit Indices).
 $k_{l_{v_{r_1}}}$ = $\frac{0,003 \cdot t \cdot g}{6,4}$ (Kapitel IV).

X

- $k_{l_{V_{T_2}}} = \frac{r_{l_1}}{17,3 \cdot j_{zul}}$ (Kapitel IV).
 k_{T_v} = Kosten von 1 kVA fertig installierter Transformatorleistung mit Zubehör (Kapitel II A).
 $k_{T_{r_1}} = \frac{p_{T_v} \cdot r_{T_{r_2}}}{\delta_2}$ (Kapitel II C, IV bis IX).
 $k_{T_{r_2}} = p_{T_v} \cdot r_{T_{r_1}} \cdot r_{T_{r_2}} \cdot \delta_3$ (Kapitel II C, IV bis IX).
 $k_{T_{r_{v_1}}} = g_h \cdot \left(\frac{h_{V_s} \cdot \gamma_1}{r_{T_{r_1}}^2} + t \cdot \gamma_3 \right)$ = leistungsunabhängige jährliche Transformatorverlustkosten in RM. (Kapitel II C, IV bis IX).
 $k_{T_{r_{v_2}}} = g_h \cdot r_{T_{r_1}} \cdot t \cdot \gamma_4$ = leistungs- und spannungsabhängige jährliche Transformatorverlustkosten in RM.
 $k_{T_{r_{v_3}}} = g_h \cdot r_{T_{r_1}} \cdot \left(\frac{h_{V_s} \cdot \gamma_2}{r_{T_{r_1}}^2} + t \cdot \gamma_5 \right)$ = leistungsabhängige jährliche Transformatorverlustkosten (Kapitel II B, C, IV bis IX).
 $k_{r_1} = \frac{r_{T_{r_2}}}{\delta_2}$ (Kapitel II A, IV bis IX).
 $k_{r_2} = r_{T_{r_1}} \cdot r_{T_{r_2}} \cdot \delta_3$ (Kapitel II A, IV bis IX).
 K_{x_f} = Kostenanteil für 1 Transformatorstation, der keiner Gesetzmäßigkeit nach Spannung und Leistung gehorcht (Kapitel II bis IX).
 $K_{x_{f_j}}$ = $p_{T_v} \cdot K_{x_f}$ = jährliche Kapitalquote für K_{x_f} .

Literaturverzeichnis.

- Aemmer, »Die zukünftige Gestaltung der Energieverteilung in New York«. Bullet. Schweiz. ETV v. 21. 1. 31.
 Apt, R., »Isolierte Leitungen und Kabel, Erläuterungen zu den VDE-Vorschriften«. 1930.
 Besold und Müller, ETZ 1930, S. 953.
 Blake, D. K., »Network promises marked economies«. Electrical World vom 14. März 1931.
 Burger, O., »Berechnung von Drehstromkraftübertragungen«. Springer 1927/1931.
 —, »Stromverteilung in Großstädten durch Hoch- und Niederspannungsnetze«. ETZ 1929, S. 73/75.
 Chrustschoff, W., »Zur Frage über die Berechnung elektrischer Netze unter der Bedingung eines Minimums von Material«. Arch. f. El. XIII. Bd., 1924, S. 109.
 —, »Zur Frage über die rationelle Verteilung der Speisepunkte und Transformatorstationen in elektrischen Netzen«. Arch. f. El. 1926, S. 341.
 —, »Beitrag zur Berechnung der Speiseleitungen elektrischer Stadtnetze«. E. u. M. 1928, S. 587.
 —, »Günstigste Spannung in Verteilungsnetzen mit Lichtbelastung«. ETZ 1930, S. 744.
 Dettmar, Prof. Dr.-Ing. e. h., G., »Über den Ausgleich der Einzelbelastungen bei Elektrizitätswerken« (Verschiedenheitsfaktor). ETZ 1926, S. 33.
 Eggeling, »Erwärmungsmessungen an 12-kV-Kabeln«. Elektrizitätswirtschaft 1928, S. 99.
 Eimer, H., »Die wirtschaftlich günstigste Spannung für Fernübertragungen mittels Freileitungen«. Dissertation, München 1914.
 Enqueteausschuß, »Die deutsche Elektrizitätswirtschaft«. 1930, verlegt bei E. S. Mittler & Sohn, Berlin.
 Freiburger, Elektrizitätswirtschaft Juni 1930.

- Grünholz, Dr. H., »Theorie der Wechselstromübertragung«. Springer, 1928.
- Herzog-Feldmann, »Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze in Theorie und Praxis«. Springer, 1927, S. 340/347.
- Jansen, ETZ 1926, S. 819.
- Klein, »Kabeltechnik«. Springer, 1930.
- Koch, H., »Beitrag zur Förderung der Verwendung von Kurzschluß-Läufermotoren in Deutschland«. Mitteilungen des Elektrotechn. Vereins Mannheim-Ludwigshafen 1930, Heft 10 und 11.
- Koch & Sterzel, Preisliste T II 1929 für Transformatoren.
- Majerczik, W., »Die Berechnung elektrischer Freileitungen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten«. Dissertation, Berlin 1910.
- Zur Megede, ETZ 1931, S. 1017.
- Mestermann, »Niederspannungsmaschennetze mit Vielfachspeisung«. E. u. M. 1931, S. 816.
- , »Die Elektrizitätsversorgung von Städten durch vielfach gespeiste vermaschte Drehstrom-Niederspannungsnetze«. Siemens-Zeitschrift 1931, Heft 10.
- Miller, Dr. O. v., »Gutachten über die Reichselektrizitätsversorgung«. VDI-Verlag, 1930.
- Rühle, E., »Die Verteilung elektrischer Energie in Absatzgebieten großer Konsumdichte mit besonderer Berücksichtigung von Groß-Berlin«. Elektrizitäts-Wirtschaft 1926, Sonderheft.
- Schnaus, G., »Verschiedenheitsfaktor, Wahrscheinlichkeitstheorie und ihre Anwendung in elektro-wirtschaftlichen Rechnungen«. ETZ 1931, S. 441.
- Schneider, Prof. Dipl.-Ing. R., »Probleme der wirtschaftlichen Kupplung von Elektrizitätsversorgungsgebieten«. Annalen der Betriebswirtschaft u. Arbeitsforschung Bd. 3, Heft 3, S. 229.
- Schwaiger, Prof. A., »Hochspannungsleitungen«. Oldenbourg, 1931.
- Sengel, Prof. A., »Bestimmung der günstigsten Zahl von Speisepunkten eines Verteilernetzes«. ETZ 1899, S. 807/826.
- Siemens-Schuckert, Starkstromkabel Best.-Nr. 3442/1.
- , »Preisliste M 20 b für Transformatoren, August 1929.
- Teichmüller, Prof. Dr., »Die Erwärmung der elektrischen Leitungen«. Verlag Enke, Stuttgart 1905.
- VDE, »Fachberichte 1931«.
- , »Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker«.
- Wittich, »Drehstrom-Maschennetze mit Mehrfachspeisung«. E. u. M. 1931, S. 625.
- Weltkraftkonferenz 1930, Bericht Nr. 42 der Sektion 3 zur zweiten Weltkraftkonferenz 1930.
- Wolf, Dr. M., »Die Grundlagen der Mathematik der Belastungskurven und der Netzverluste«. Dissertation, Darmstadt 1930.

Wirtschaftliche Energieverteilung in Drehstromnetzen.

I. Einleitung.

Der wirtschaftlichen Bedeutung der elektrischen Kraftübertragung entsprechend ist im Laufe der Jahre eine umfangreiche Literatur über die Berechnung elektrischer Leitungsnetze entstanden. Die verschiedenen Verfasser beschäftigen sich vor allem mit der Errechnung der zu überwindenden Leitungswiderstände und der durch sie bedingten Spannungs- und Stromwerte längs der Leitungen bei verschiedenen Betriebszuständen. Die Kenntnis dieser Größen ist besonders wichtig bei der in neuerer Zeit zu erhöhter Bedeutung gekommenen Kupplung von Kraftwerken untereinander. Sie ist weiter notwendig, um in verzweigten und vermaschten Leitungsnetzen die Stromverteilung im Netz berechnen zu können.

Man mag es erstaunlich finden, daß die der Berechnung von Leitungsnetzen auf Wirtschaftlichkeit dienenden Arbeiten gegenüber denen rein elektrisch-physikalischer Natur zurücktreten. Diese Tatsache kann vielleicht damit erklärt werden, daß die Berechnung der Leitungsnetze auf Wirtschaftlichkeit außer den elektrischen Fragen vor allem die Kenntnis der für die Preisgestaltung von Leitungsmaterial und Transformatorstationen in betriebsfertigem Zustand geltenden Gesetzmäßigkeiten erfordert, welche im Zusammenhang nur wenigen Fachleuten zugänglich sind.

Die vorliegende Arbeit geht auf die für die Strom- und Spannungsverteilung in Netzen geltenden Gesetze¹⁾ nur insoweit ein, als sie für die Berechnung von Leitungsnetzen auf Wirtschaftlichkeit Bedeutung haben. Sie setzt sich hauptsächlich zur Aufgabe, die Möglichkeiten der Senkung der Verteilungskosten elektrischer Energie zu klären, welche bekanntlich den Hauptanteil der Kosten elektrischer Arbeit an der Stelle des Verbrauchs darstellen.

Es ist bekannt, daß bei einer wirtschaftlichen Energieverteilung die Summe der für Abschreibung und Verzinsung des Anlagekapitals einzusetzenden Jahresbeträge und der jährlichen Verlustkosten möglichst klein sein soll. Bei der Berechnung der Verlustkosten muß auch die durch

¹⁾ Siehe hierüber insbesondere: Schwaiger, »Hochspannungsleitungen«. Verlag Oldenbourg, München 1931. — Burger, »Berechnung von Drehstromkraftübertragungen«. Verlag Springer, Berlin 1931.