Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 2 (1911)

Heft: 2

Artikel: Ueber die Bestimmungen des wirtschaftlichen Spannungsabfalles in Fernübertragungsleitungen für Bahnkraftwerke

Autor: Dänzer-Ischer, Alb.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059637

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN
BULLETIN
ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.
Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an die

Redaktion: Ing.-Consulent Dr. W. Kummer, Mythenstrasse 15, Zürich II (Telephon 5806)

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den

Verlag: Fachschriften-Verlag A.-G., Zürich Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

Est publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.
Ce bulletin parait mensuellement.
Toutes les communications concernant la matière du „Bulletin" sont à adresser à la

Rédaction: Ing.-Conseil Dr. W. Kummer Mythenstrasse 15, Zurich II (Téléphone 5806)

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les insertions sont à adresser à

l'éditeur: Fachschriften-Verlag A.-G., Zurich Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

II. Jahrgang / IIe Année — Bulletin No. 2 — Februar / Février 1911

Ueber die Bestimmung des wirtschaftlichen Spannungsabfalles in Fernübertragungsleitungen für Bahnkraftwerke.

Von *Alb. Dänzer-Ischer,* Ingenieur, Bern.

Bei der Berechnung der Energieverteilung für grössere Bahnkraftnetze handelt es sich in erster Linie darum, sich über die Grundlagen klar zu werden, von denen die Berechnung auszugehen hat, da dieselben nicht notwendigerweise die gleichen sein müssen wie bei Licht- und Kraftnetzen.

Bei den letztern, die wir der Kürze halber einfach als Industrienetze bezeichnen wollen, tritt vorab die technische Forderung in den Vordergrund, dass der Spannungsabfall in den Zeiten der Maximalbelastung auch in den entferntesten Energieabgabepunkten ein bestimmtes Mass nicht überschreiten darf, damit die Lichtstärke der Lampen nicht wesentlich reduziert wird. Diese Forderung gestattet in der Regel keinen grossen Spielraum in den Dimensionierungsmöglichkeiten, ja derselbe ist so eng [1]), dass er die Berücksichtigung wirtschaftlicher Erwägungen ausschliesst. Diese Erwägungen bestehen darin, dass diejenige Lösung gesucht wird, die ein Minimum der Jahresausgaben für Stromwärmeverluste, Verzinsung, Amortisation und Unterhalt der Leitungsanlage gewährleistet. Besser liegen die Verhältnisse für die Bemessung von Speiseleitungen. Hier lassen sich die technischen Forderungen in etwas befriedigenderer Weise mit denjenigen wirtschaftlicher Natur in Uebereinstimmung bringen, indem jede Speiseleitung bis zu einem gewissen Grade speziell reguliert und somit mit einem einigermassen wirtschaftlichen Querschnitt ausgeführt werden kann, unbeschadet darum, dass der Spannungsabfall in Zeiten starker Belastungen unter Umständen abnorm gross wird. In der Literatur sind diese Erwägungen von verschiedenen Autoren durchgeführt worden; sie haben ihren Ausgang von einer Studie von *W. Thomson (Lord Kelvin)* aus dem Jahre 1881 genommen [2]), welche nachher allgemein unter dem Namen „Thomson'sche Oekonomieregel" in Gebrauch kam, jedoch den

[1]) Nach *Hirschauer,* E. T. Z. 1908, S. 87, variiert die Lichtstärke der Metallfadenlampen mit der 4ten bis 4,3ten Potenz der Spannung, diejenige der Kohlenfadenlampen sogar mit der 5,8ten bis 6,3ten. Vgl. ebenfalls *Berninger,* E. u. M. (Wien) 1909, S. 607, sowie *Laporte,* Bull. de la Soc. int. des Electr. Bd. 9, 1909, S. 111, sowie *Satori,* E. u. M. (Wien) 1909, S. 227.

[2]) *W. Thomson,* Brit. Assoc. Rep. 1881, S. 518 u. 526.

Fehler besitzt, dass die Betriebsspannung in ihr nicht zum Ausdruck kommt und daher unter Umständen zu unzutreffenden Resultaten führen kann. Die spätern Veröffentlichungen betonen dann namentlich das Prinzip der konstanten Stromdichte, demzufolge seinerzeit sogar Leiter mit konischem Querschnitt gebaut worden sind.[1])

Bei den Bahnkraftnetzen liegen die Verhältnisse etwas anders als bei den Industrienetzen, entsprechend dem abweichenden Charakter der Beanspruchung. Während im allgemeinen bei den Industrienetzen die Belastungskurven einen bis zu einem gewissen Grade stetigen Verlauf aufweisen, der die technischen Forderungen über zulässige Temperaturerhöhungen, den zulässigen Spannungsabfall usw. stark in den Vordergrund rückt, hat die Belastungskurve eines Bahnwerkes und mehr noch diejenige der einzelnen Uebertragungsleitungen einen mehr sprunghaften, oft sogar intermittierenden Charakter, der sich gewissermassen mit demjenigen eines Walzwerkbetriebes vergleichen lässt, mit dem wesentlichen Unterschiede, dass die Stösse beim Bahnwerk sich nicht in zeitlich fast gleichen Intervallen wiederholen, wie dies beim Walzwerk meistens der Fall ist. Da nun die Bahnmotoren (wir denken hier zunächst an Motoren für einphasigen Wechselstrom) einen erheblichen Spannungsabfall zulassen, ohne eine nennenswerte Beeinträchtigung in ihrem Funktionieren zu erfahren, und da es sich, zumal in unserm Lande, beim Betrieb grosser Bahnnetze um die Uebertragung der elektrischen Energie über grosse Distanzen handeln wird — die Uebertragungsleitungen somit einen erheblichen Teil der Gesamtkosten der Elektrifizierung ausmachen, scheint es gerechtfertigt, bei der Berechnung dieser Leitungen das wirtschaftliche Moment besonders zu betonen, d. h. mit den tatsächlichen Effektverlusten und Spannungsabfällen zu rechnen, die mehr mittleren Belastungen entsprechen und nicht nur mit denjenigen der Belastungsspitzen, wie dies gewöhnlich bei den Industriewerken der Fall ist, mit ihren, aus technischen Gründen gebotenen, engen Grenzbedingungen. Prof. *A. Sengel*[2]) hat die Bestimmung des wirtschaftlichen Querschnittes für eine Gleichstrombahnlinie durchgeführt und werden wir im folgenden noch auf diese Arbeit zurückgreifen.

Zweck der vorliegenden Studie ist, die Aufgabe etwas allgemeiner zu behandeln, d. h. nicht direkt die Querschnittsbestimmung anzugeben, sondern die Bestimmung des wirtschaftlichen Spannungsabfalles, indem dieser im allgemeinen Problem auch einen allgemein physikalischen Charakter hat und namentlich als neue Variable das Schwankungsverhältnis zwischen maximaler und mittlerer Belastung einer Uebertragungslinie in die Formel einzuführen. Dieses Schwankungsverhältnis besitzt eine ganz besondere Bedeutung, indem es einerseits Schlüsse zu ziehen gestattet über den Ausnützungsfaktor der Bahnanlagen und anderseits über die Grösse der baulichen Aufwendungen bei bekannten Verkehrsmengen; es bildet gewissermassen einen Parameter in der Beurteilung einer gegebenen Bahnanlage. Aus diesem Grunde legen wir dessen Einführung in die Formel einen gewissen Wert bei.

Bei der ersten Dimensionierung von Uebertragungsleitungen ist zu bedenken, dass für dieselbe zunächst ein Näherungsverfahren mit Berücksichtigung der Hauptfaktoren genügt. Es wäre einerseits nicht richtig, die Methoden der genauen Leitungsberechnung mit ihrer feinen Apparatur schon zum vornherein anzuwenden, wenn man anderseits über die Belastungsverteilung, die Strompreise bei verschiedener Belastung der Kraftwerke[3]) und bei verschiedenen Ausbauetappen nur approximative Unterlagen hat. Es wird daher bei der ersten Dimensionierung zweckmässig vorerst von der Berücksichtigung der induktiven, kapazitiven und Ableitungsverhältnisse der Leitungen Umgang genommen, in der Annahme, dass es dann Sache der nach Festlegung der Hauptverhältnisse vorzunehmenden Rechnung der Stromverteilung ist, dies zu tun und allfällige sekundäre Aenderungen zu treffen.[4]) Hier soll nun eine Methode entwickelt werden, die rasch einen vergleichenden Ueberblick über die Hauptverhältnisse eines grossen Netzes gestattet.

---

[1]) *Herzog und Feldmann,* Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze, II. Aufl., II. Bd., S. 17, Berlin 1905.

[2]) *A. Sengel,* E. T. Z. 1902, S. 335.

[3]) Wir denken hiebei an bahneigene Kraftwerke, bei denen der Gestehungspreis der Energieeinheit abhängig ist von der Ausnützung der Anlage.

[4]) Wird Wechselstrom mit 15 Perioden in der Sekunde übertragen, wie hier vorausgesetzt wird, so ist dieses Vorgehen zulässig.

Wird eine einphasige Wechselstromleitung vom Querschnitt q (in mm) und der einfachen Länge λ (in km) von einem konstanten Strom i durchflossen, so beträgt der totale Energieverlust im Leiter während der jährlichen Betriebsdauer t:

$$L_v = i^2 \cdot \frac{2 \cdot \lambda \cdot t}{k \cdot q} \quad \text{KWStd.}$$

Kostet eine KWStd. ab Zentrale z Fr., so bedeutet dieser Energieverlust eine Jahresausgabe In Fr. von

$$K_s = i^2 \cdot \frac{2 \lambda \cdot t}{k \cdot q} \cdot z \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Bei Bahnleitungen ist aber die Stromstärke beständig variierend und die Jahresstromkosten erhalten die Form:

$$K_s = \frac{2 \cdot \lambda \cdot z}{k \cdot q} \cdot \int_o^t i^2 \cdot dt$$

wo i die Stromstärken während den Zeitelementen dt darstellt. Der Gesamtverlust wird also gebildet aus der Summe der Momentanverluste, die ihrerseits den Quadraten der momentanen Stromstärken proportional sind. *Sengel* hat in der angeführten Arbeit die Summe dieser Momentanverluste mit derjenigen herrührend von der mittlern Stromstärke in Beziehung gebracht. Wird mit:

$$i_m = \frac{1}{t} \int_o^t i \, dt$$

der einfache oder Linienmittelwert des Stromes bezeichnet und mit:

$$\sqrt{M(i^2)} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_o^t i^2 \, dt}$$

der Mittelwert der ins Quadrat erhobenen Stromstärken oder der Flächenmittelwert, wie ihn *Sengel* bezeichnet, so kann gesetzt werden:

$$\frac{M(i^2)}{i_m^2} = c^2 = \frac{\frac{1}{t} \int_o^t i^2 \, dt}{\left[\frac{1}{t} \int_o^t i \, dt\right]^2}$$

wo c eine Konstante ist, die jedenfalls grösser als 1 ist und deren Quadrat angibt, um wieviel mal der effektive Energieverlust in der Leitung grösser ist als derjenige, der durch eine konstante mittlere Stromstärke erzeugt würde; wir möchten c daher den *Stromwärmefaktor* nennen. Die jährlichen Stromkosten werden alsdann:

$$K_s = \frac{2 \cdot \lambda \cdot z}{k \cdot q} \cdot i_m^2 \cdot c^2 \cdot t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Setzen wir für den Querschnitt:

$$q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot 1000 \cdot i_1}{k \cdot \varepsilon_1 \cdot E} \cdot 100$$

wobei k die Leitfähigkeit des Kupfers, ε_1 der in Prozenten der Betriebsspannung ausgedrückte Spannungsabfall bei der maximalen Belastung L_1, die in der Regel bekannt ist,

bezeichnen; da ferner die maximale Stromstärke im allgemeinen Fall einer Wechselstromübertragung:

$$i_1 = \frac{L_1}{E \cdot \cos \varphi_1}$$

ist, so wird:

$$q = 2000 \cdot 100 \cdot \frac{\lambda \cdot L_1}{k \cdot \varepsilon_1 E^2 \cdot \cos \varphi_1}.$$

Das Verhältnis zwischen der Maximallast und der Mittellast, das sog. *Schwankungsverhältnis* führen wir ein mit:

$$\sigma = \frac{L_1}{L_m} = \frac{i_1 \cdot \cos \varphi_1}{i_m \cdot \cos \varphi_m}$$

und erhalten:

$$i_m = \frac{L_1}{\sigma \cdot E \cdot \cos \varphi_m}$$

Die Einsetzung dieser Werte in Gleichung (2) ergibt:

$$K_s = \frac{1}{100000} \cdot \frac{z \cdot L_1 \cdot c^2 \cdot t \cdot \varepsilon_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sigma^2 \cdot \cos^2 \varphi_m} \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

die durch den Energieverlust in der Leitung verursachten Jahreskosten.

Zu diesen Jahreskosten treten nun diejenigen für Verzinsung, Amortisation und Unterhalt der Leitung.

Die Anlagekosten einer Leitung lassen sich näherungsweise durch den Ausdruck:

$$(a + b \cdot q)\, \lambda$$

darstellen, wobei a eine durch die Art der verwendeten Gestänge, durch deren Disposition, Montierung und durch die Kosten des Erwerbs der Durchleitungsrechte, b eine vom Kupferpreis, dem spezifischen Gewicht des Kupfers, der Montierung des Drahtes abhängige Konstante bedeuten. Müssen für Verzinsung, Amortisation und Unterhalt jährlich p % des Anlagekapitals gerechnet werden, so betragen die jährlichen Leitungskosten:

$$K_l = (a + b \cdot q) \cdot \frac{\lambda \cdot p}{100} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Setzen wir auch hier den oben angegebenen Wert für q ein, so wird:

$$K_l = \left[a + b \cdot \frac{200000 \cdot \lambda \cdot L_1}{k \cdot \varepsilon_1 \cdot E^2 \cdot \cos \varphi_1}\right] \cdot \frac{\lambda \cdot p}{100} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Die jährlichen Gesamtkosten für die Uebertragung der Energie betragen daher:

$$K = K_s + K_l = \frac{1}{100000} \cdot \frac{z \cdot L_1 \cdot c^2 \cdot t \cdot \varepsilon_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sigma^2 \cdot \cos^2 \varphi_m} + \left[a + b \frac{200000 \cdot \lambda \cdot L_1}{k \cdot \varepsilon_1 \cdot E^2 \cdot \cos \varphi_1}\right] \frac{\lambda p}{100} \quad . \quad (6)$$

Dieselben werden für den Wert von ε_1 zu einem Minimum, der sich aus der nach ε_1 differenzierten und gleich Null gesetzten Gleichung ergibt, also:

$$\frac{dK}{d\varepsilon_1} = \frac{z \cdot L_1 \cdot c^2 \cdot t \cdot \cos \varphi_1}{100000 \cdot \sigma^2 \cdot \cos^2 \varphi_m} - \frac{200000 \cdot b \cdot \lambda^2 \cdot L_1 \cdot p}{k \cdot E^2 \cdot \cos \varphi_1 \cdot 100} \cdot \frac{1}{\varepsilon_1^2} = 0$$

woraus folgt:

$$\varepsilon_1 = 1000 \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma \cdot \cos \varphi_m}{c \cdot E \cdot \cos \varphi_1} \sqrt{\frac{200 \cdot b \cdot p}{k \cdot t} \cdot \frac{1}{z}} \quad . \quad . \quad (7)$$

Für eine Reihe gegebener Fälle konnte nun festgestellt werden, dass die Faktoren c, $\frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1}$, b, p, k, t innerhalb verhältnismässig enger Grenzen variieren, so dass dieselben zu einer neuen Konstanten zusammengefasst werden können:

$$\alpha = \frac{1000}{c} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1} \sqrt{\frac{200 \cdot b \cdot p}{k \cdot t}}$$

sodass Gleichung (7) die Form annimmt:

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha}{E} \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma}{\sqrt{z}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Je nachdem nun ε_1, λ, σ oder z als Variable betrachtet werden, stellt die Gleichung (8) bei gegebener Betriebsspannung E verschiedene Raumflächen dar. Wird das Schwankungsverhältnis σ als konstant betrachtet, so erhalten wir die in den Abbildungen 1, 2

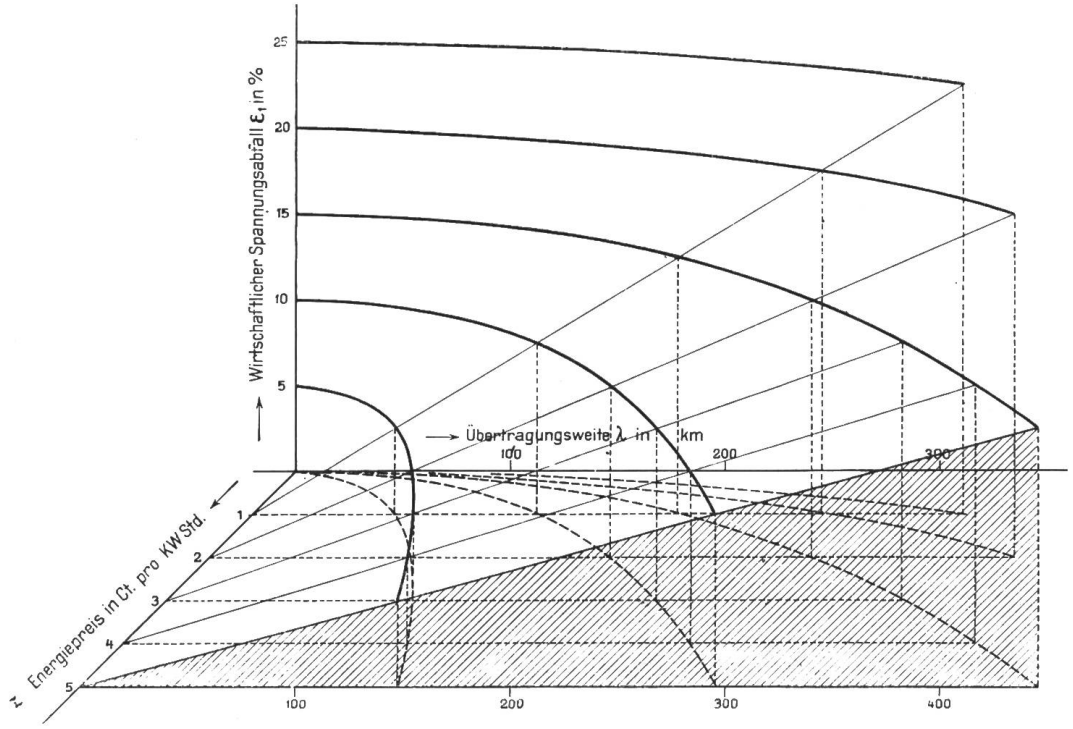

Abbildung 1. Kurven des wirtschaftlichen Spannungsabfalles in Abhängigkeit von der Uebertragungsweite λ und den Energiegestehungskosten z bei einer Uebertragungsspannung $E = 60000$ Volt und *Schwankungsverhältnis* $\sigma = 2$.

und 3 dargestellten Paraboloïde, aus welchen für verschiedene Uebertragungsweiten und Strompreise der wirtschaftliche Spannungsabfall abgelesen werden kann. Wird der Spannungsabfall ε_1 als gegeben betrachtet, so stellen die übrigen drei Variabeln gleichseitige hyperbolische Paraboloïdflächen dar, wie in Abbildung 4 gezeigt ist. Diese Abbildungen gestatten, sofort einen Einblick in die Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Variabeln und ihre relative Tragweite zu tun, und ermöglichen daher ein rasches Festlegen der für die Leitungsberechnung notwendigen Grundlagen.

In den Formeln und in den Kurven ist der maximale Spannungsabfall eingesetzt, da in der Regel auch für die einzelnen Transformatorenstationen die maximalen Belastungen bekannt sind; der mittlere Spannungsabfall ergibt sich aus der einfachen Beziehung:

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1}{\sigma} \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_m}$$

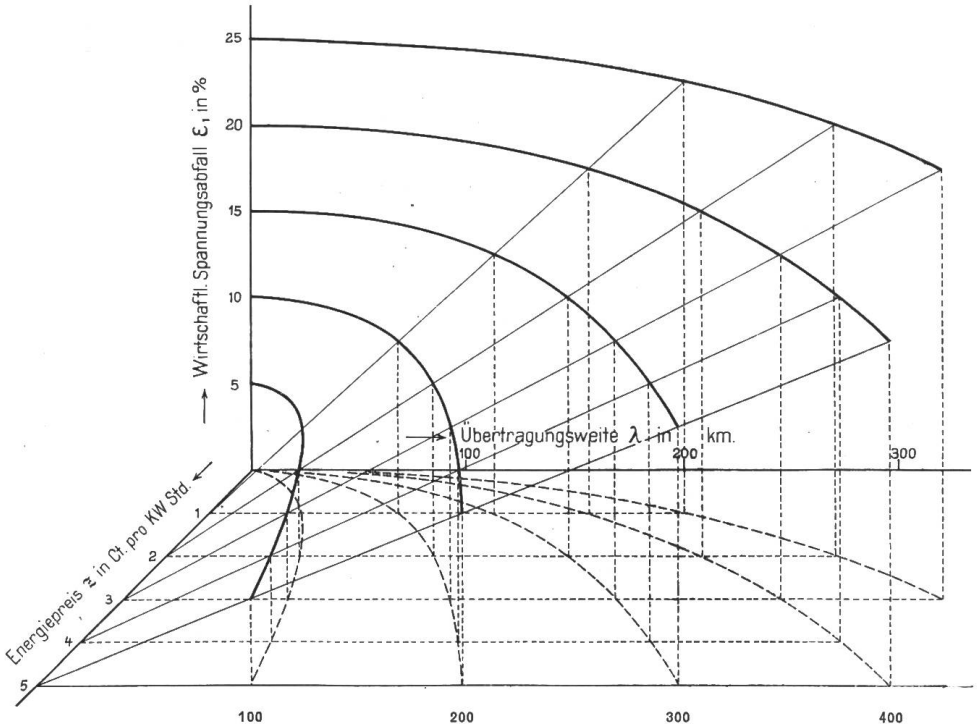

Abbildung 2. Kurven des wirtschaftlichen Spannungsabfalles in Abhängigkeit von der Uebertragungsweite λ und den Energiegestehungskosten z bei einer Uebertragungsspannung $E = 60000$ Volt und einem *Schwankungsverhältnis* $\sigma = 3$.

Uebergehend zur Berechnung und Anwendung der Diagramme sind vorerst die einzelnen Faktoren der Konstanten α festzusetzen.

1. Die Konstante c oder das Verhältnis zwischen Flächenmittelwert und Linienmittelwert der Stromstärke oder der Stromwärmefaktor, wie wir ihn früher bezeichnet haben:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t i^2\,dt}}{\sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t i\,dt}} \cong \frac{\sqrt{\frac{1}{t}\,\Sigma_0^t\, i^2 \cdot \Delta t}}{\frac{1}{t}\,\Sigma\, i \cdot \Delta t}$$

wird zweckmässig nach dem Vorgang von *Sengel*[1]) aus dem Belastungsdiagramm der Uebertragungsleitung bestimmt. Eine andere Methode der Berücksichtigung des Stromwärmefaktors gibt *Strecker*[2]). Nach Sengel wird $\Sigma\,(i^2 \cdot \Delta t)$ erhalten durch Zerlegung des Stromdiagramms in einzelne Elemente und durch Summieren der Quadrate der mittlern Stromstärken während eines Zeitelementes[3]); $\Sigma\,(i \cdot \Delta t)$ ergibt sich aus einer einfachen Planimetrierung der Stromfläche. *Sengel* fand für ein Diagramm mit stark intermittierender Belastung einer Strassenbahn aus 721 Momentbeobachtungen für $c = 1{,}225$. Wir haben c für verschiedene Belastungsdiagramme von Voll- und Hauptbahnstrecken mit verschiedenem Charakter näherungsweise bestimmt und finden:

---

[1]) E. T. Z. 1902, S. 336 u. 337.

[2]) *Grawinkel und Strecker,* Hilfsbuch für die Elektrotecknik, V. Aufl., S. 414, Berlin 1898.

[3]) Die Elementarflächen bilden in der Regel Trapeze, deren parallele Seiten i_1 und i_2 sind; für die quadrierte Fläche wäre $F = \frac{1}{3}\left(i_1^2 + i_2^2 + i_1 \cdot i_2\right) = \left(\frac{i_1 + i_2}{2}\right)^2 + \frac{1}{12}\left(i_1 - i_2\right)^2$. Das letzte Glied hat den Charakter einer Korrektion und kann für nicht zu grosse Differenzen von i_1 und i_2 vernachlässigt werden, so dass das Quadrat der mittlern Stromstärke sehr angenähert als richtiger Wert betrachtet werden kann.

$c = 1{,}064$ für eine Linie mit einer Tagesleistung von 1 099 000 Bruttotonnenkilometer
$c = 1{,}075$ „ „ „ „ „ „ „ 1 244 200 „
$c = 1{,}118$ „ „ „ „ „ „ „ 1 109 100 „
$c = 1{,}169$ „ „ „ „ „ „ „ 787 700 „

Für diese vier Fälle war das Schwankungsverhältnis σ bezw. 3,10, 3,45, 3,40, 4,40. Es lässt sich zwischen dem Stromwärmefaktor c und dem Schwankungsverhältnis σ eine gewisse Abhängigkeit vermuten in dem Sinne, dass c mit zunehmendem σ ebenfalls wächst. Es wäre Sache einer speziellen Untersuchung, die sich über eine hinreichende Zahl von Linien zu erstrecken hätte, diese Abhängigkeit festzustellen; wir haben dieselbe, mit Rücksicht auf die enorme mechanische Rechenarbeit, die dabei zu bewältigen ist, hier nicht weiter durchgeführt. Ja man könnte sogar noch weiter gehen. Denjenigen, die sich mit Energiebedarfsrechnungen für grössere Bahnnetze beschäftigt haben, ist bekannt, dass das Schwankungsverhältnis σ einer Linie in einem gewissen Verhältnis zu den Verkehrsleistungen, ausgedrückt in *tkm*, steht. In der Literatur findet sich eine bezügliche Arbeit von *Weber-Sahli*[1]), in der für 14 Linien mit den verschiedensten Fahrplan- und Steigungsverhältnissen die Schwankungsverhältnisse bestimmt und in Abhängigkeit von der Verkehrsleistung graphisch aufgetragen sind. Alle diese Werte ordnen sich in das Intervall zwischen zwei Grenzkurven ein, die zweiten Grades sind. Daraus folgt, dass sich auch bis zu einem gewissen Grade zwischen dem Stromwärmefaktor c und der Verkehrsleistung ein gesetzmässiges Abhängigkeitsverhältnis wird kon-

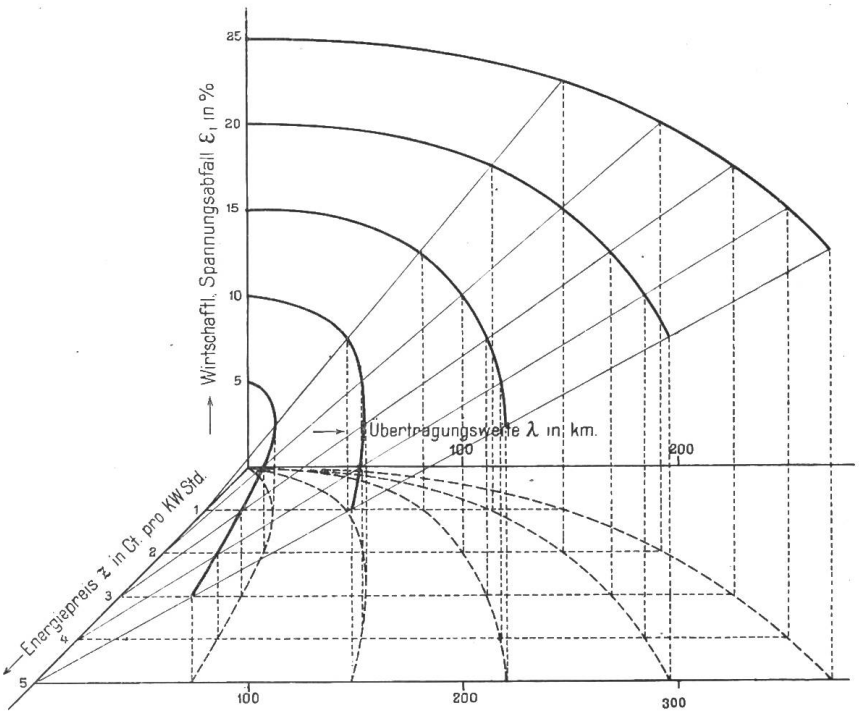

Abbildung 3. Kurven des wirtschaftlichen Spannungsabfalles in Abhängigkeit von der Uebertragungsweite λ und den Energiegestehungskosten z bei einer Uebertragungsspannung $E = 60000$ Volt und einem *Schwankungsverhältnis* $\sigma = 4$.

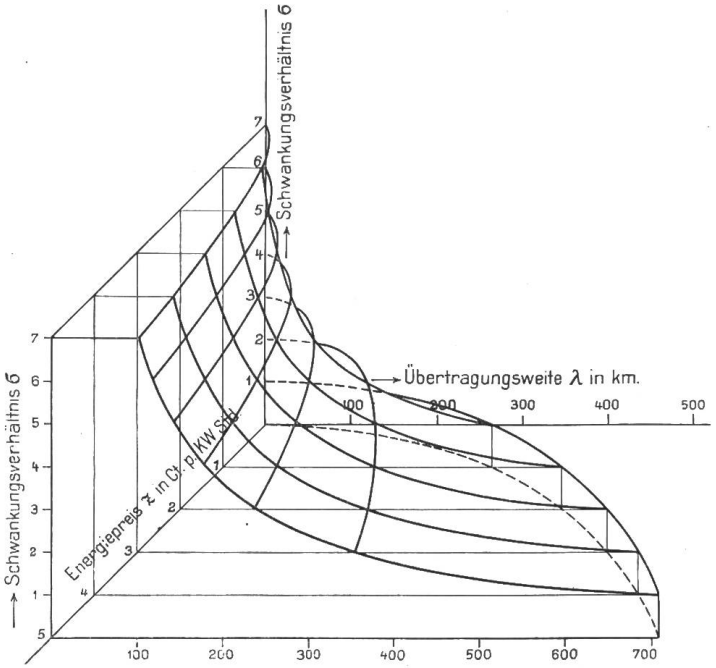

Abbildung 4. Einfluss des Schwankungsverhältnisses σ und des Energiepreises z auf die wirtschaftliche Uebertragungslänge λ bei gegebenem Spannungsabfall $\varepsilon_1 = 12\,\%$. Hyperbolisches Paraboloïd des wirtschaftlichen Spannungsabfalles.

[1]) Schweizerische Techniker-Zeitung, 1909, S. 65.

struieren lassen können — allerdings nur so lange, als es sich um generelle Rechnungen handelt.

Die Verkehrsleistungen der Linien, die bei einem von uns betrachteten grossen Bahnnetz auf die einzelnen Transformatorenstationen entfallen, variieren von 315 000 bis 1 779 000 tkm pro Tag. Eine einzelne Uebertragungsleitung speist aber in der Regel 2 bis 3 dieser Transformatorenstationen, so dass die auf eine Uebertragungsleitung entfallende Verkehrsquote im Minimum 815 000 tkm, im Maximum 3 450 000 tkm, im Mittel aber 1 400 000 bis 1 500 000 tkm pro Tag beträgt. Diesen mittlern Verhältnissen dürfte daher ein Wert von

$$c = 1{,}07$$

ungefähr entsprechen.

2. Schwieriger gestaltet sich die Bestimmung des Verhältnisses $\frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1}$. Hier sind wir vorläufig ganz auf Schätzungen und Mutmassungen angewiesen, indem wir wohl den Verlauf der Kurven einzelner Motoren und Züge [1]) kennen, nicht aber das Verhalten ganzer Netze mit ihren variierenden Verhältnissen [2]). Allgemein ist zu sagen, dass im Momente der Maximalbelastung einer Linie die meisten der in Fahrt begriffenen Züge mit gutem Wirkungsgrad und geringer Phasenverschiebung arbeiten; der $\cos \varphi_1$ des Netzes wird sich also dem $\cos \varphi_1$ des Zuges (der ca. 0,9 bis 0,93 beträgt) nähern, ihn jedoch nie erreichen, da auch im Momente der grössten Netzanstrengung einzelne Züge nicht unter den günstigsten Verhältnissen arbeiten werden. Hinwiederum nähert sich $\cos \varphi_m$ des Netzes demjenigen eines einzelnen Zuges sehr, so dass wir sie näherungsweise gleich setzen; es ist daher jedenfalls:

$$\left[\frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1}\right]_{\text{Netz}} > \left[\frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1}\right]_{\text{Zug}}$$

Auf Grund überschlägiger Rechnungen setzen wir für das betrachtete Netz:

$$\frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1} = \frac{0{,}7}{0{,}85} = 0{,}824.$$

3. Der Koeffizient b, eine von dem Kupferpreis, dem spezifischen Gewicht, der Montierung des Drahtes usw. abhängige Konstante lässt sich für gegebene Verhältnisse genügend genau bestimmen. Durch die verschiedene Wahl des Gestänges (Holz, Eisen, Beton) wird wesentlich nur der Koëffizient a in der Formel (4) für die Leitungskosten:

$$(a + b\,q)\,\lambda \cdot \frac{p}{100}$$

beeinflusst. Der Koëffizient b hat für die bei uns üblichen Hochspannungsleitungen auf Holzgestängen den Wert 28 bis 40; für die Betonmastenleitung des Albulawerkes [3]) ist $b = 23{,}7$, während für die mit Eisenmasten ausgerüstete Fernleitung Brusio-Castellanza [4]), die 159 km lang ist und mit 50 000 Volt Spannung arbeitet, $b = 20{,}4$ beträgt. Für unsere Rechnung machen wir, entsprechend einer Normalkonstruktion mit Eisenmasten und grossen Spannweiten die Annahme:

$$b = 22.$$

---

[1]) Vgl. *W. Kummer,* Schweiz. Bauzeitung, Bd. XLVIII, 1906, S. 159; *R. Dahlander,* Versuche mit elektr. Betrieb auf schwedischen Staatseisenbahnen, S. 164 u. f., München und Berlin 1908.

[2]) Eine Berechnung des $\cos \varphi_1$ lässt sich relativ einfach durchführen; die Berechnung des $\cos \varphi_m$ bleibt aber immer eine Sache der mehr oder weniger glücklichen Schätzung, bis einmal Betriebsresultate vorliegen, so dass sich eine genauere Berechnung, die einen grossen Zeitaufwand erfordert, nicht wohl lohnen würde, namentlich auch mit Rücksicht darauf, dass ein Fehler in der Schätzung des $\cos \varphi_m$ um 5 % das ε_1 auch nur um 5 % beeinflusst, was von ganz untergeordneter Bedeutung ist.

[3]) Berechnet nach: Die Erstellung der elektr. Kraftübertragungsanlage an der Albula für die Stadt Zürich. Zürich 1904.

[4]) Die Kraftwerke Brusio. Schweiz. Bauzeitung, 1908, Bd. LI, S. 110.

4. Den Prozentsatz p für Verzinsung, Amortisation und Unterhalt der Fernleitungen setzen wir zu 9,5 an.

5. Die Leitfähigkeit des Kupfers ist $k = 57$.

6. Die jährliche Betriebszeit t der Leitungen sei 8500 Stunden.

Fassen wir diese Werte zusammen, also:

$$\alpha = \frac{1000}{c} \cdot \frac{\cos \varphi_m}{\cos \varphi_1} \sqrt{\frac{200 \cdot b \cdot p}{k \cdot t}} = \frac{1000}{1{,}07} \cdot 0{,}824 \sqrt{\frac{200 \cdot 22 \cdot 9{,}5}{57 \cdot 8500}} = 226{,}5$$

und setzen wir für die Betriebsspannung $E = 60\,000$ Volt ein, ein Wert, wie er sich aus verschiedenen andern Ueberlegungen als für die vorliegenden Verhältnisse passend empfiehlt, so erhalten wir als Formel für unsern Fall

$$\varepsilon_1 = \frac{226{,}5}{60\,000} \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma}{\sqrt{z}} = \frac{1}{265} \cdot \frac{\lambda \cdot \sigma}{\sqrt{z}}$$

welche in den Abbildungen 1 bis 4 raumbildlich dargestellt ist. In denselben bedeuten also: λ die Uebertragungsweite in km, σ das Schwankungsverhältnis $\frac{L_1}{L_m}$, z den Preis der KWStd. ab Werk in Franken.

Es sollen nunmehr für das bereits betrachtete Netz, das von mehreren Kraftwerken gespiesen wird, und für das die im Vorhergehenden angegebenen Verhältnisse im Mittel zutreffen, für die Uebertragungsleitungen von den Kraftwerken nach den Transformatorenstationen die wirtschaftlichen Spannungsabfälle mit diesen Kurven bestimmt werden. Der Einfachheit halber werden dabei nicht alle Transformatorenstationen jeder einzelnen Leitung einzeln aufgeführt, sondern es wird für jede Uebertragungsleitung nach dem Prinzip der fiktiven Leitungslänge eine einzige in der fiktiven Entfernung λ angreifende Last gedacht. Die Uebertragungsspannung sei, wie schon erwähnt, 60 000 Volt. Mit Hülfe der Diagramme gemäss den Abbildungen 1 bis 3 lassen sich die gesuchten Werte sofort herauslesen bezw. interpolieren; das Ergebnis ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Kraftwerk und Uebertragungsleitung	Maximale Last L_1 KW	Fiktive Leitungslänge λ km	Schwankungsverhältnis σ	Selbstkosten der KWStd. ab Werk bei Vollast Cts.	Selbstkosten der KWStd. ab Werk bei Halblast Cts.	Wirtschaftlicher Spannungsabfall ε_1 bei Vollast %	Wirtschaftlicher Spannungsabfall ε_1 bei Halblast %
Kraftwerk A, Strang 1	15 200	97	4,0	2,0	3,0	10,5	8,5
„ B, „ 1	11 000	116	3,65	2,4	2,4	9,5	9,5
„ 2	3 500	205	3,94	2,4	2,4	20,5	20,5
„ 3	13 500	119	3,96	2,4	2,4	12,0	12,0
„ C, „ 1	5 160	140	3,4	2,0	2,5	14,1	12,2
„ 2	6 700	140	3,6	2,0	2,5	14.1	12,2
„ D, „ 1	9 000	63,3	4	1,6	2,1	8,0	7,0
„ E, „ 1	8 700	72	3,75	2,4	4,7	6,6	4,8
„ F, „ 1	15 400	118	4,08	1,8	3,1	13,0	11,0

Aus der Tabelle ergibt sich, dass die meisten Werte des wirtschaftlichen Spannungsabfalles im Intervall von 10 bis 14 % variieren, so dass 12 % als ungefährer Mittelwert betrachtet werden kann. Für diesen Wert $\varepsilon_1 = 12$ ist die Abbildung 4 berechnet worden, aus der namentlich der Einfluss des Schwankungsverhältnisses σ deutlich ersichtlich ist.