

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 10

Artikel: Ueber Schwingungen von Freileitungsseilen, ihre Behebung und Kontrolle
Autor: Jaquet, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059842>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.04.2025

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

Die selbsterregte Spannung ist klein, da sie nur die Verlustspannung zu decken hat. Sie tritt neben der Netzspannung kaum in Erscheinung. Demgegenüber ist der Fremdstrom relativ gross, weil er nicht durch Induktivitäten gehemmt ist. Er bewirkt eine erhebliche Verzerrung des Netzstromes. Geht der Fremdstrom durch Null, so haben Netzstrom und Netzspannung normale Grösse. Erreicht der Fremdstrom seinen Amplitudenwert, so findet der Netzstrom gesättigtes Eisen vor, der magnetische Widerstand ist für ihn kleiner und seine Stromamplitude wird grösser. Andererseits wird seine Spannungsamplitude kleiner. Innert der Fremd-

stromperiode ändert der Netzstrom von normalem Wert auf ein Maximum, während die Netzspannung von normalem auf minimalen Wert ändert. Der Fremdstrom ist die Grundwelle und der Netzstrom die Oberwelle des zusammengesetzten Stromes (Fig. 7). Wie in der Fussnote ¹⁾ an einem konkreten Beispiel gezeigt ist, ist die Fremdfrequenz klein, ungefähr in der Nähe von $1/s$. Der Fremdstrom bewirkt also für sich sowohl geringe Eisenverluste als auch geringe Reaktanzspannungen. Der Fremdstrom geht demnach auch in der Bildung der Frequenz den Weg des geringsten Widerstandes.

Ueber Schwingungen von Freileitungsseilen, ihre Behebung und Kontrolle.

Von E. Jaquet, Basel.

621.315.056.3

Es wird für das Entstehen der Leiterschwingungen eine einfache physikalische Erklärung gegeben und gezeigt, wie man die Schwingungsfrequenz angenähert berechnen kann. Hierauf wird der Schwingungszähler Jaquet beschrieben, der erlaubt, die Zahl der ausgeführten Leiterschwingungen auf einem Zifferblatt abzulesen. Die Zahl der Schwingungen gibt ein Kriterium der Gefährdung der Leiter durch die Schwingungen.

L'auteur donne une explication physique simple de la formation des vibrations des conducteurs et montre comment calculer approximativement la fréquence de ces vibrations. Il décrit ensuite le compteur d'oscillations Jaquet qui permet de lire sur un cadran le nombre de vibrations du conducteur. Ce nombre est un critérium du danger auquel le conducteur est exposé du fait des vibrations.

Seit einigen Jahren wird sowohl in Europa als auch in Amerika den Schwingungen von Freileitungsseilen eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet, da es schon wiederholt vorgekommen ist, dass Seile nachweisbar infolge von Schwingungsermüdung gerissen sind. Diese Schwingungen erfolgen in einer vertikalen Ebene und weisen, wie experimentell festgestellt wurde, Frequenzen bis zu 60, in extremen Fällen sogar bis zu 100 in der Sekunde auf. Man stellt sich die Entstehung dieser Schwingungen folgendermassen vor:

Wenn der Wind horizontal gegen das Seil bläst, so lösen sich von der Ober- und Unterseite des Seiles periodisch Wirbel ab, die hinter dem Seil eine Kármánsche Wirbelstrasse bilden, wie Fig. 1 schematisch zeigt. Da bekanntlich die beiden Wirbel-

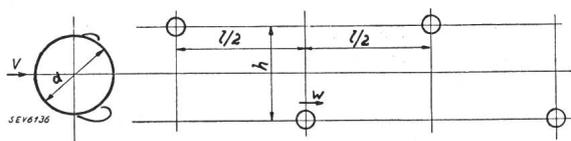


Fig. 1.
Wirbelstrasse (schematisch).

reihen um die halbe Teilung gegeneinander versetzt sind, kann man daraus schliessen, dass eine entsprechende Phasenverschiebung bei der Ablösung selbst besteht. Infolge der unsymmetrischen Strömungsverhältnisse bei der Wirbelablösung wird somit das Seil einer zusätzlichen periodischen Wechselkraft ausgesetzt, die annähernd senkrecht zur Windrichtung steht. Fällt die Frequenz der Impulse mit einem Frequenzbereich einer Oberschwingung des Seiles zusammen, so treten stehende Wellen auf, deren Amplituden unter Umständen mehrere cm gross sein können.

Die Frequenz und die Wellenlänge kann man, wenigstens näherungsweise, rechnerisch bestimmen. Man denkt sich zunächst das Seil als zylindrischen Draht vom Durchmesser d . Der Wind treffe senkrecht zum Seil auf mit der Geschwindigkeit $v = \text{const}$.

Der Abstand beider Wirbelreihen sei h und die Teilung l . Die v. Kármánsche Stabilitätsbedingung lautet:

$$h/l = 0,281 \quad (1)$$

Die Wirbel entfernen sich vom Seil mit einer Geschwindigkeit

$$w = v - u \quad (2)$$

Nach Versuchen von v. Kármán und Rubach ¹⁾ an glatten Zylindern ergeben sich folgende, im Bereich des quadratischen Widerstandsgesetzes nur von der Körperform abhängige Zahlenwerte:

$$\begin{aligned} u/v &= 0,14 \\ l/d &= 4,3 \end{aligned} \quad (3)$$

Aus (1) und (3) folgt, was auch experimentell bestätigt wird:

$$h/d = 1,21 \quad (4)$$

und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wirbel relativ zum Seil

$$w = v(1 - u/v) = 0,86 \cdot v \quad (5)$$

Nach der Periode T hat sich das ganze Wirbelsystem um die Teilung l mit einer Geschwindigkeit $w = l/T$ verschoben, so dass sich für die Frequenz f ergibt:

¹⁾ v. Kármán, Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen 1911/12 — v. Kármán und Rubach, Phys. Z. Bd. 13 (1912), S. 49—59. — Fuchs-Hopf, Aerodynamik.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{l} = 0,86 \frac{v}{l} \quad (6)$$

Setzt man in (6) den aus dem Experiment ermittelten Wert (3) ein, so folgt:

$$f = 0,2 v/d \quad (7)$$

Die Frequenz der Schwingung ist somit proportional der Windgeschwindigkeit und umgekehrt proportional dem Seildurchmesser.

Wenn man weiter das Seil als zylindrischen, vollen Körper betrachtet, so kann man zur Bestimmung der Wellenlänge die bekannten Formeln der Saite verwenden.

Es bedeute:

- L die Länge des Seiles zwischen zwei Tragklemmen,
- λ den Knotenabstand,
- σ die Spannung,
- ϱ die Dichte.

Für die n . Oberschwingung ist der Knotenabstand

$$\lambda = L/n \quad (8)$$

die Frequenz

$$f_n = \frac{1}{2 \lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{\varrho}} \quad (9)$$

Bei Resonanz zwischen Erregung und Eigenfrequenz wird $f = f_n$, so dass sich daraus der Wert für den Knotenabstand λ ergibt:

$$\lambda = 2,5 \cdot \frac{d}{v} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\varrho}} \quad (10)$$

Nach Versuchen der Aluminium Co. of Canada, ausgeführt durch G. Rocherau de la Sablière²⁾, ergibt sich für den Knotenabstand ein etwas geringerer Wert, nämlich nur

$$\lambda_{\text{exp}} = 2,05 \frac{d}{v} \sqrt{\frac{\sigma}{\varrho}} \quad (11)$$

Der Unterschied im Zahlenfaktor zwischen der theoretischen und empirischen Formel ist nicht verwunderlich, wenn man berücksichtigt, dass das Seil aus mehreren Einzeldrähten hergestellt ist. Für ein ruhendes Litzenseil wird einerseits der Wert $h/d > 1,21$ und daher die Frequenz $f < 0,2 v/d$ sein. In Wirklichkeit führt aber das Seil Querbewegungen aus, die oben bei der Ableitung nicht in Betracht gezogen wurden, und solange man den Ablösungsvorgang in seinen Einzelphasen nicht kennt, ist es nicht ohne weiteres ersichtlich, ob diese Bewegung die Frequenz erhöht oder erniedrigt. Die von Schmitt und Behrens³⁾ veröffentlichten Messergebnisse weisen erhebliche Streuungen auf, die wohl auch mit der Messmethode zusammenhängen,

²⁾ Diese Angaben verdanke ich einer freundlichen Mitteilung von Ing. G. Gruner. Die in Canada verwendete Formel lautet: $\lambda = 10,5 \frac{d}{v} \sqrt{F/G}$, λ in feet, d in inches, v in feet/min, F = Seilzug in lbs, G = Gewicht pro Längeneinheit in lbs/feet, was, umgerechnet, den obigen Wert (11) ergibt.

³⁾ Th. Schmitt und P. Behrens, Theoretische und experimentelle Untersuchungen über Seilschwingungen ETZ Bd. 54 (1933), S. 603.

so dass daraus nichts Bestimmtes geschlossen werden kann.

Andererseits darf bei einem Litzenseil nicht die einfache Saitenformel, ohne Berücksichtigung der innern Reibung⁴⁾, verwendet werden. Zweifellos hat ein Seil unter gleichen Verhältnissen eine niedrigere Schwingungszahl als eine Saite. Eine rechnerische Erfassung dieser Einflüsse im einzelnen dürfte ziemlich aussichtslos sein.

In Fig. 2 ist die Frequenz, gerechnet nach (7), in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für Seile von 10, 20, 30 mm \varnothing dargestellt.

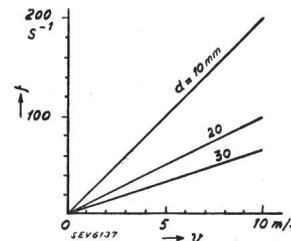


Fig. 2. Frequenz f in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v für verschiedene Seildurchmesser.

In Fig. 3 kann der Knotenabstand λ , gerechnet nach Formel (11) für Aluminiumseile, spez. Gewicht $2,7 \cdot 10^{-3}$ kg/cm³ in Abhängigkeit vom Seildurchmesser für verschiedene Windgeschwindigkeiten abgelesen werden. Die vollen Linien entsprechen einer Spannung von $\sigma = 9$ kg/mm², die gestrichelten $\sigma = 16$ kg/mm².

Fig. 4 stellt ebenfalls den Knotenabstand λ dar, in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, bzw. deren reziproken Wert, für Seile von 10, 20, 30 mm \varnothing .

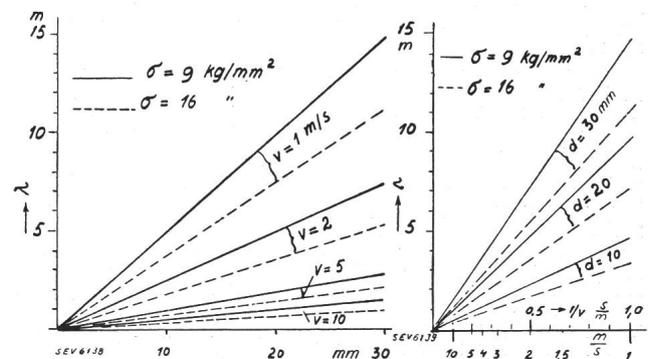


Fig. 3. Knotenabstand λ in Abhängigkeit vom Seildurchmesser d für verschiedene Windgeschwindigkeiten v und Spannungen σ .
Fig. 4. Knotenabstand λ in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v für verschiedene Seildurchmesser d und Spannungen σ .

Um diese Schwingungen zu beheben oder zu mindest zu dämpfen, werden in der Praxis verschiedene Mittel verwendet. Bis jetzt hat man federnde Zusatzgewichte oder Schwinghebelämpfer in einem geeigneten Abstand von der Tragklemme aufgehängt. Durch die erzeugte Störung soll sich dann die stehende Welle wenigstens nicht mit der gleichen Intensität ausbilden können. Auf die Konstruktion der verschiedenen Dämpfer soll hier nicht

⁴⁾ Ueber die Bedeutung der Reibung vgl. ten Bosch, der heutige Stand der Drahtseilforschung, Schweiz. Bauztg. Bd. 108 (1936), Nr. 9.

näher eingegangen werden, da diese grösstenteils schon bekannt sind⁵⁾. Nur eine interessante Lösung sei noch erwähnt, die von M. Preiswerk⁶⁾, Neuhausen, stammt, der vorschlägt, das Seil als Hohlseil auszuführen und in die Höhlung ein dünneres Seil mit Spiel zu verlegen. Durch entsprechende Regulierung der Spannung von Hohl- und Innenseil kann die Schwingung ständig, und zwar schon bei der Entstehung, gestört und die Resonanz somit vermieden werden, was bei den angehängten Dämpfern, vielleicht mit Ausnahme des Schwinghebel-dämpfers nicht der Fall sein wird. Mit diesen kann man höchstens eine Verlagerung der Wellen erhalten und die gefährdeten Teile in der Nähe der Tragklappen schützen.

Um festzustellen, ob ein Seil durch Schwingungen gefährdet ist, muss man wissen, ob und wieviel es schwingt. Nach den vorigen Ueberlegungen ist anzunehmen, dass jedes Seil, wenigstens zeitweise, in Schwingung gerät. Es kommt nun darauf an, wie gross die Amplituden sind und wie lange die betreffenden Schwingungen, bezogen auf eine bestimmte Beobachtungszeit, dauern. Für die Messungen kommen vor allem zwei Apparate in Verwendung: der *Recorder* und der *Schwingungszähler Jaquet*. Der *Recorder* für Freileitungen arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie alle üblichen Recorder. Ein Schreibstift, der mit dem Horizontalpendel verbunden ist, schreibt die Ausschläge auf einen Diagrammstreifen, der von einem Uhrwerk in Bewegung gesetzt wird. Aus den Diagrammblättern ist nur zu ersehen, ob ein Seil schwingt oder nicht. Hingegen ist es unmöglich zu ermitteln, wieviel Schwingungen z. B. in 24 Stunden durchschnittlich erfolgen⁷⁾.

Selbst die Aufzeichnung der Amplitude ist mit Vorsicht zu werten. Besonders nachteilig wird es empfunden, dass die Diagrammblätter öfters ausgewechselt und das Uhrwerk neu aufgezogen werden muss. Da die Versuche oft Wochen, sogar Monate dauern und die Apparate oben an der Leitung hängen, stellt dies jeweils eine Arbeit dar, die mit Zeitverlust und eventuell Stromunterbrechung verbunden ist. Die Erfahrung hat auch gelehrt, dass die Recorder mit ihrem verhältnismässig subtilen Uhrwerkmechanismus den Beanspruchungen auf die Dauer nicht gewachsen sind.

Der *Schwingungszähler Jaquet*⁸⁾ erlaubt, die Zahl der ausgeführten Schwingungen auf einem Zifferblatt abzulesen, und zwar reagiert er nur auf Ausschläge, die grösser als $\pm 0,7$ mm sind. Diese untere Empfindlichkeitsgrenze wurde auf Grund praktischer Erfahrung gewählt, da kleinere Amplituden nicht mehr gefährlich sind. Bis jetzt sind erst etwa 50 solcher Zähler im Gebrauch, so dass

man noch nicht entscheiden kann, ob diese Empfindlichkeitsgrenze zu hoch oder zu niedrig gewählt ist. Der Apparat enthält ein horizontales, federnd aufgehängtes Pendel mit einer relativ niedrigen Eigenfrequenz von $3/8$ s. Die Relativbewegung zwischen der Pendelmasse und den übrigen im Gehäuse gelagerten Teilen erfolgt zwangsläufig durch einen Schaltmechanismus, ohne weitere Zusatzfedern. Auf Fig. 5 ist der wesentliche Teil der Innenkonstruktion dargestellt.

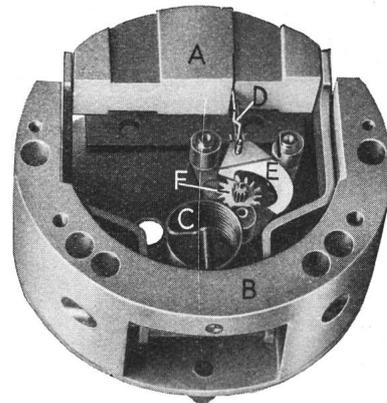


Fig. 5.

Schwingungszähler,
Innenkonstruktion.

Das Pendel A ist im Rahmen B gelagert und an der Feder C aufgehängt. Eine abgekröpfte Leiste D aus gehärtetem Stahl, die in der Pendelmasse befestigt ist, greift zwischen zwei Stahlzapfen, welche in eine doppelarmige Schwinde E eingepresst sind. Bei einer vertikalen Relativbewegung zwischen Leiste und Gehäuse führt die Schwinde horizontale Oszillationen aus, wobei die Enden der Arme das zwischen ihnen befindliche Sperrrad F bei jeder Vollschiwingung um einen Zahn vorwärts schalten. Auf der Achse des Sperrades sitzt ein Zahnradchen, das das Zeigerwerk in gewohnter Weise antreibt. Die Leiste arbeitet nur auf der schiefen Fläche, deren Neigung und Länge so gewählt ist, dass der Zähler bei Amplituden von $\pm 0,7$ mm anspricht. Sind die Amplituden grösser⁹⁾, dann macht die Schwinde keine grösseren Ausschläge infolge der parallelen Enden der Leiste; sind sie kleiner, so genügt der Ausschlag für die Verdrehung des Sperrades nicht mehr. Durch entsprechende Wahl der Abkröpfung kann nun die untere Empfindlichkeitschwelle in gewissen Grenzen beliebig verschoben werden. Das Werk befindet sich in einem Gehäuse aus gepresstem Anticorodal und das Glas ist zwischen zwei Gummidichtungen eingeklemmt, so dass keine atmosphärische Feuchtigkeit eindringen und Korrosionen verursachen kann. Fig. 6 zeigt den Apparat samt Befestigungsklemme. Das totale Gewicht samt Klemme beträgt infolge Verwendung von Anticorodal für alle nicht besonders stark beanspruchten Teile nur 450 g, so dass die Schwingungsform des Seiles durch die zusätzliche Masse nicht erheblich beeinflusst wird. Für einzelne Drähte allerdings dürfte diese Masse noch zu gross sein. Der Durchmesser des Zifferblattes beträgt 60 mm, so dass die Ablesung während des Betriebes

⁹⁾ Von einem gewissen Ausschlag an werden die Amplituden des Pendels durch Gummipolster begrenzt.

⁵⁾ Schmitt und Behrens, ETZ Bd. 54 (1933), S. 603. — Schmitt, ZVDI 1933, S. 52.

⁶⁾ M. Preiswerk Bull. SEV 1934, Nr. 10, S. 252, und 1935, Nr. 19, S. 543.

⁷⁾ Vgl. M. Preiswerk u. G. Dassetto, Conduttori anti-branti, L'Energia Elettrica XII. 1935. Fasc. 1, S. 55. G. Dassetto, Comunicazione XL Riunione ann. dell'AEI. S. Margherita Ligure 1935.

⁸⁾ Herstellerfirma: James Jaquet A.-G., Basel.

vom Boden aus, eventuell mit einem Feldstecher, erfolgen kann.

Eine Umdrehung des grossen Zeigers entspricht 1 Million Schwingungen, eine Umdrehung der kleinen Zeiger 10 bzw. 100 Millionen. Diese Ziffer-

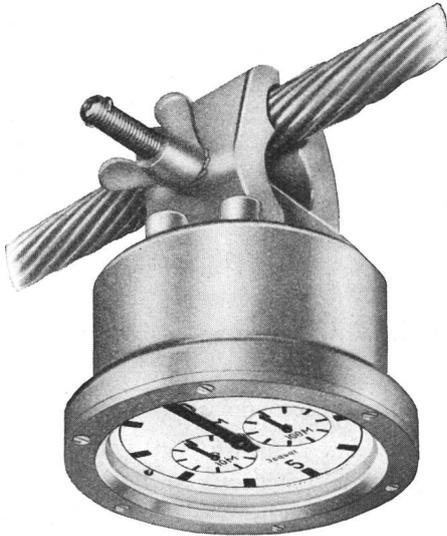


Fig. 6.

Schwingungszähler, auf Leitungsseil montiert.

blatteinteilung hat sich für diese Versuche als zweckmässig erwiesen. Eine Nullstellvorrichtung

für die Zeiger ist absichtlich nicht eingebaut, da sie nicht unbedingt erforderlich ist und, sogar bei sorgfältigster Ausführung, Anlass zu Fehlern geben kann.

Versuche mit künstlich erzeugten Schwingungen im Frequenzbereich von 4 bis 100/s haben bewiesen, dass der Zähler einwandfrei arbeitet. Die obere Empfindlichkeitsgrenze ist infolge des zwangsläufigen Schaltmechanismus nur von der Festigkeit bzw. der Abnutzung des Materials abhängig. Daher sind alle hoch beanspruchten Teile, wie Leiste, Schwinge samt Zapfen, Sperrad u. a. aus gehärtetem Stahl hergestellt. Die Versuche im praktischen Betrieb dauern noch nicht lange genug, um mit Bestimmtheit Angaben über die mittlere Lebensdauer dieser Instrumente machen zu können. Auf alle Fälle sind sie in dieser Hinsicht den Recordern weit überlegen.

Mit Hilfe dieser Instrumente lässt sich in einfacher Weise feststellen, ob ein Seil Schwingungen ausführt, deren Intensität als gefährlich betrachtet wird, und ob die angebrachte Dämpfungsvorrichtung den gewünschten Erfolg hat. Auf Grund der Erfahrung wird man trachten, zu gewissen Normen zu gelangen über zulässige Schwingungszahl für eine bestimmte Beobachtungszeit unter Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse und der Jahreszeit.

Ueber einige Integralreliefs für die nomographische, bzw. nomographisch-graphische Berechnung der Freileitungen vom Standpunkt der Festigkeit aus.¹⁾

Von Alexander Fischer, Prag.

518.3:621.315.056.1

Als Ergänzung zu der im Bull. SEV 1936, Nr. 7, erschienenen gleichbenannten Arbeit wird ein viertes Integralrelief hergeleitet und schematisch entworfen, das die Ermittlung von Durchhang und Beanspruchung auf reinnomographische Weise, d. h. ohne irgendwelche Nebenrechnungen ermöglicht.

Comme supplément à l'étude parue sous le même titre dans le Bull. ASE 1936, No. 7, l'auteur déduit et esquisse un quatrième relief d'intégrale qui permet de déterminer la flèche et la tension d'une manière purement nomographique, c'est-à-dire, sans aucun calcul accessoire.

In der vor einem Jahre unter dieser Ueberschrift erschienenen Arbeit²⁾ habe ich drei Integralreliefs hergeleitet und schematisch entworfen, die die nomographisch-graphische Berechnung des «verhältnismässigen Durchhanges φ » einer Leitung mit gleichhohen Befestigungspunkten ermöglichen sollen. Ich habe hierbei eine «méthode mixte» angewendet, d. h. die Durchführung der wesentlichen Berechnungen den Nomogrammen zugewiesen, während ich für Nebenrechnungen die Benützung des Rechenschiebers empfohlen habe. Ist dieser Vorgang zwar in praktischer Hinsicht durchaus zulässig, da die angeführten Verfahren wohl am einfachsten und genauesten zum Ziele führen, so dürfte dennoch die Frage nach der in nomographischer Hinsicht besten, d. h. mit einem Mindestmass von nicht nomographischen Rechenschritten auskommenden Lösung, nicht ohne Reiz sein, die in der bereits genannten, während der Drucklegung erschienenen Arbeit von V. Hruska-V. Kelbich in den Vordergrund gestellt worden ist. Ich möchte nun

in Kürze zeigen, dass es in der Tat möglich ist, unter Heranziehung der beiden bereits verwendeten Prinzipien, d. i. desjenigen der «Fluchtlinien» und desjenigen der «Doppelknotenpunkte» sowie der Benutzung eines weiteren, anscheinend neuen Gedankens bei der Vertafelung simultaner Funktionsbeziehungen, ein viertes Integralrelief herzuleiten, das ohne irgendwelche Nebenrechnung — und möglicherweise mit einem Mindestmass von «Fluchten» («Ablesegeraden») — nicht nur den verhältnismässigen, sondern gleich den tatsächlichen Durchhang und die Beanspruchung gleichzeitig und auf einfachste Weise ergibt.

1. Herleitung des Integralreliefs.

Die Berechnung von Durchhang und Spannung beruht auf folgendem System simultaner Funktionsbeziehungen:

$$t_i = \frac{16}{6} \frac{10^{-4}}{\alpha} \varphi_i^2 - \frac{1,25}{E \alpha} \frac{\gamma_i}{\varphi_i} + c, \quad (\text{I})$$

$$\varphi_i = \frac{f_i}{a}, \quad (\text{II})$$

¹⁾ Bei der Redaktion eingelangt am 14. April 1936.

²⁾ Bull. SEV 1936, Nr. 7.