

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 47 (1956)

Heft: 11

Artikel: Die wirtschaftliche Nutzung des Bimetalls in Thermoauslösern

Autor: Kirchdorfer, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060094>

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: 17.02.2026

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

Fortsetzung von Seite 504

Experimentelle und theoretische Untersuchung der Erd-schlussüberspannung in isolierten Wechselstromnetzen, sowie der Eigenschaften von Erdchlusslichtbogen (Fortsetzung)

die wohl die geringe Beanspruchung durch die normale Phasenspannung ohne weiteres aushalten, die aber nicht mehr imstande sind, eine Prüfung während Minuten oder Stunden mit verketteter, oder eine Prüfung mit doppelter verketteter Spannung während z. B. einer Sekunde, zu bestehen. Solche unsichtbare Fehlerstellen in den «gesunden» Phasen kommen unfehlbar während des Erd-schlusses zum Vorschein; sie erwecken dann oft zu Unrecht den Eindruck sehr hoher Überspannungen. Würde das gesamte Netz eine Wechselstromprüf-spannung von der Höhe der Katalogwerte des Materials (mindestens $2,2 U_n + 20 \text{ kV}$) bei jeder Witterung anstandlos und sicher halten, so würde

kaum jemand mehr von Erdchlussüberspannungen sprechen.

Literatur

- [1] Berger, K.: Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oszillograph der durch Erdchluss hervorgerufenen Überspannungen in einem 8-kV-Verteilnetz. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 23, Dezember, S. 756...788.
- [2] Interner FKH-Bericht 10/46: Bericht über die Messung der Erdchluss-Überspannungen im 50-kV-Netz der BKW, Herbst 1945...Frühjahr 1946.
- [3] Petersen, W.: Der aussetzende (intermittierende) Erd-schluss. ETZ Bd. 38(1917), Nr. 47, 22. November, S. 553...555, u. Nr. 48, 29. November, S. 564...566.
- [4] Rüdenberg, Reinhold: Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen. 4. Aufl. Berlin: Springer 1953.
- [5] Fallou, Jean: Les réseaux de transmission d'énergie. p. 376. Paris: Gauthier-Villars 1935.
- [6] Interner FKH-Bericht A54/12b: Anhang zum Bericht über Versuche am Lichtbogen.
- [7] Peters, J. F. und J. Slepian: Voltages Induced by Arcing Grounds. J. Instn. Electr. Engrs. Bd. 42(1923), Nr. 8, August, S. 781...792.
- [8] Willheim, R.: Das Erdchlussproblem in Hochspannungs-netzen. p. 85. Berlin: Springer 1936.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.
R. Pichard, Ingenieur der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstr. 301, Zürich 8.

Die wirtschaftliche Nutzung des Bimetalls in Thermoauslösern

Von J. Kirchdorfer, Aarau

621.316.925.44

Nach einer kurzen Darstellung der Anforderungen an Thermoauslöser und Diskussion einiger vereinfachender Annahmen werden die Bedingungen abgeleitet, die zur Erzielung minimaler Gesamtkosten für das Bimetal bei vorgegebener Öffnungsarbeit einzuhalten sind.

Après un bref exposé des exigences posées aux déclencheurs thermiques et la justification de quelques simplifications admises, les conditions qui doivent être observées pour obtenir le total minimum des frais concernant le bimétal sont déterminées pour un travail d'ouverture prescrit.

Beim Entwurf technischer Apparate und Geräte sieht sich der Konstrukteur in der überwiegenden Anzahl der Fälle vor die Aufgabe gestellt, einen günstigen Kompromiss zwischen dem technisch Möglichen und dem wirtschaftlichen Aufwand zu dessen Erreichung zu finden. Die Lösung dieser Aufgabe erweist sich schon bei verhältnismässig kleinen Apparaten wegen der vielen Kombinationsmöglichkeiten und wechselseitigen Einflüsse einzelner Elemente als ziemlich schwierig. Anderseits zwingt die ausserordentliche Bedeutung dieses Problems dazu, für die Erarbeitung dieses Kompromisses Formeln zu suchen, welche womöglich eine mathematisch exakte Auffindung des Optimums gestatten. Sollen diese Formeln einfach und die Zusammenhänge überblickbar bleiben, so muss die Entwicklung zwangsläufig zu der Behandlung von Teilproblemen führen, bei der für eine gewählte Gesamtdisposition die Ermittlung optimaler Verhältnisse im Hinblick auf bestimmte, preislich besonders interessante Einzelteile angestrebt wird. Für die praktische Behandlung eines solchen Detailproblems kann die folgende Studie über die wirtschaftliche Nutzung des Bimetalls in Thermoauslösern als gutes Beispiel gelten.

a) Allgemeines

Wie in den meisten Fällen, bei denen eine optimale Ausnützung angestrebt wird, handelt es sich auch hier um eine Aufgabe, bei welcher der Rahmen der Leistung durch Vorschriften und betriebsinterne Forderungen klar umrissen ist und das Minimum an

materiellem Aufwand zur Erfüllung dieser Forderungen gefunden werden soll.

Betrachtet man zunächst die Anforderungen, welche an Thermoauslöser gestellt werden, so findet man, dass die wesentlichsten jene nach

1. Funktionsbeständigkeit
 2. Rüttelfestigkeit
 3. Kurzschluss-Sicherheit¹⁾ und
 4. grossem Einstellbereich der Nennströme
- sind.

Von diesen Forderungen sind für die weiteren, vorwiegend mechanischen Betrachtungen, jene nach Ziff. 1 und 2 die interessantesten, während die Forderungen nach 3 und 4 hauptsächlich in thermischer Hinsicht eine wesentliche Rolle spielen. Eine gegenseitige Beeinflussung besteht jedoch insofern, als diese Anforderungen durchwegs gegenläufiger Art sind. Während z. B. die Funktionsbeständigkeit oder Sicherheit dafür, dass die Auslösung unter den verschiedensten Betriebsbedingungen stets innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen erfolgt, um so grösser wird, je weniger man von dem für die Auslösung verfügbaren Weg tatsächlich ausnutzt, nimmt die Rüttelfestigkeit mit geringer Ausnutzung des verfügbaren Weges ab.

Um zu einem günstigen Kompromiss zu gelangen, sollte der verfügbare Auslöseweg möglichst gross sein. Dieser logischen Folgerung steht aber die For-

¹⁾ Unter Kurzschluss-Sicherheit wird hier die Fähigkeit verstanden, Temperaturerhöhungen zu ertragen, welche bis zum Ansprechen der dem Relaisbereich zugeordneten Vorsicherung entstehen können.

derung nach grossem Einstellbereich und hoher Kurzschluss-Sicherheit entgegen, welche im Sinne einer Verkleinerung des verfügbaren Auslöseweges wirken.

Nach diesen allgemeinen Feststellungen sollen nun die Vorgänge am Auslöser näher betrachtet und rechnerisch erfasst werden. Hierbei finden folgende Symbole Verwendung:

f Ausbiegung in mm, f_f freie, unbehinderte Ausbiegung; f^* unterdrückte Ausbiegung

I Stromstärke in A

ϑ Temperatur in °C

F Kraft in g

C Federkonstante in g/mm

W_o Öffnungsarbeit in gmm

a spezifische thermische Ausbiegung in 1/°C

E Elastizitätsmodul in g/mm²

V Volumen in mm³

P Preis in Fr.

b, h, l, s, x Länge bzw. Weg in mm

$\varrho, \chi, \varepsilon, \eta, \varphi$ Verhältniszahlen

b) Vereinfachende Annahmen

Fig. 1 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Auslösers, auf den sich die folgenden Überlegungen beziehen. Durch Erwärmung und Krümmung des Bimetalls infolge der Heizwirkung durch den Strom *I* bewegt sich der Hebel *H*, löst die Verklinkung und damit den elektrischen Kontakt. Gegenstand der weiteren Betrachtungen soll es sein, eine Beziehung zwischen dem Preis des Bimetalls und den Eigenschaften der Rüttelfestigkeit bzw. der Funktionsbeständigkeit abzuleiten. Um diese Beziehung einigermaßen übersichtlich zu gestalten, ist es nötig, einige vereinfachende Annahmen zu treffen, welche kurz begründet werden sollen.

Diese Annahmen sind die folgenden:

1. Bei Erschütterungen in der in Fig. 1 angegebenen Richtung (Schlagrichtung des Schützes) sollen in bezug auf ein Öffnen der Verklinkung die Wirkungen der Trägheitskräfte aller übrigen Teile vernachlässigbar gegenüber der Wirkung der Trägheitskraft der Klinke sein.

Die Annahme in Ziff. 1 wäre streng erfüllt, falls ein rein einachsiger Schwingungszustand vorläge und alle beweglichen Teile mit Ausnahme der Klinke genau in der Schwingungsrichtung angeordnet wären. Soweit dies praktisch möglich ist, sind diese Voraussetzungen bei einer Anordnung gemäss Fig. 1 erfüllt. Da sich funktionstechnisch eine Reihe anderer Lösungen denken lassen, welche allerdings einer theoretischen Betrachtung weniger gut zugänglich wären, sei darauf hingewiesen, dass der hier be-

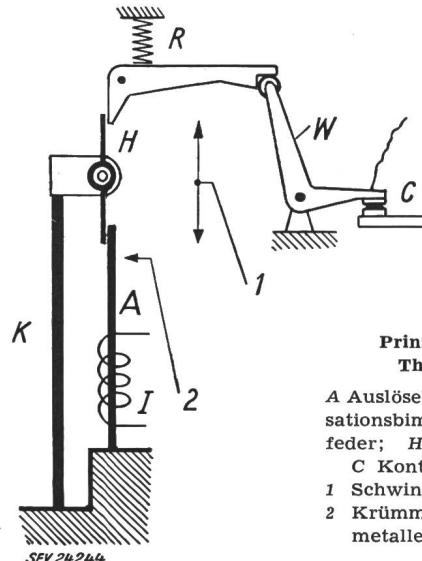


Fig. 1

Prinzipschema eines Thermoauslösers

A Auslösebimetall; K Kompressionsbimetall; R Rückdruckfeder; H Hebel; W Wippe; C Kontakt; I Heizstrom; 1 Schwingungsrichtung; 2 Krümmungsrichtung des Bimetalls bei Erwärmung

trachtete Aufbau hauptsächlich durch die konstruktive Forderung nach geringer Einbauhöhe bedingt ist und der Praxis entnommen wurde.

Die Annahme in Ziff. 2 bedeutet den Ersatz der wirklichen Temperaturverteilung [1, 2]²⁾, durch eine fiktive Ersatztemperatur, welche sich durch den Ausdruck

$$\vartheta = \frac{1}{l^2} \int_0^l dx \int_0^x \vartheta_{(x)} dx$$

l Messort der Ausbiegung
O Einspannstelle

darstellen lässt und gleiche Ausbiegung des Bimetalls bewirkt.

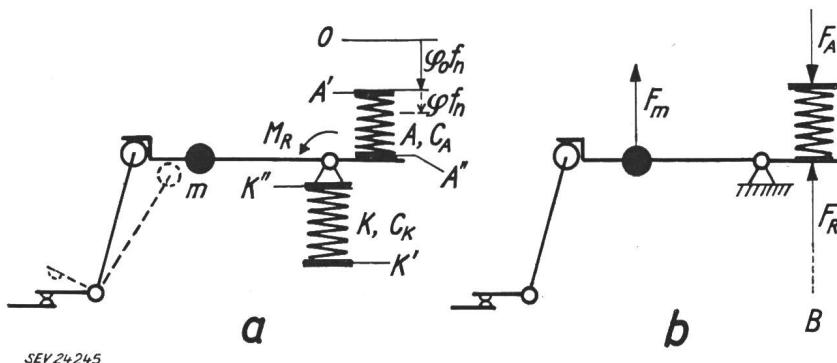
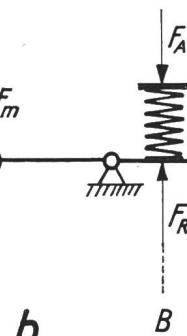


Fig. 2

Ersatzbild des Prinzipschemas Fig. 1

a mechanisches Ersatzbild; b vereinfachtes, mechanisches Ersatzbild zu Fig. 1; m Klinkenmasse; M_R Rückstellmoment
Weitere Bezeichnungen siehe im Text



2. Die Temperatur sei konstant über die ganze Länge des Bimetalls.

3. Das durch die Feder *R* auf die Klinke übertragene Drehmoment gilt im Bereich der Klinkenöffnung als konstant.

Die Annahme in Ziff. 3 ist in guter Näherung erfüllt, sobald die Feder an der Klinke eine flache Federcharakteristik aufweist, welche mit Rück-

²⁾ siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

sicht auf die geringere Toleranzempfindlichkeit im allgemeinen angestrebt wird.

c) Weg- und Kraftverhältnisse

Unter Zuhilfenahme des in Fig. 2 dargestellten, vereinfachten Ersatzbildes, sollen nun die Weg- und Kraftverhältnisse am Auslöser näher betrachtet werden. In dieser Figur werden A' und K' als Platten aufgefasst, auf welchen Federn mit den Federkonstanten C_A bzw. C_K befestigt sind. Einer Veränderung der Lage der Platte entspricht am Bimetall eine freie, unbehinderte Ausbiegung f_f infolge Temperaturveränderung³⁾, einer Zusammendrückung der Feder eine Rückbiegung bzw. unterdrückte Ausbiegung des Bimetalles, die im folgenden mit f^* bezeichnet werden soll. Die Bewegung von A'' bzw. K'' gibt dann die wirkliche Bewegung des Bimetalles wieder:

$$f_w = f_f - f^*$$

Die Ausbiegung ist hiebei auf einen Nullpunkt bezogen, welcher dem Zustand $I = 0$ entspricht und ist ebenso wie die Rückbiegung als Vielfachwert der Nennausbiegung f_n (stationäre Ausbiegung bei Nennstrom I_n) angegeben. In der Fig. 2a ist der Zustand gezeichnet, bei dem das Moment M_R durch den Rollenhebel aufgenommen wird und die beiden Federn spiellos, aber kraftfrei am Klinkenhebel anliegen. Nimmt die Ausbiegung bis zum Punkt φf_n zu, so wird eine Zusammendrückung der Federn A und K erfolgen, deren Summe $f_K^* + f_A^*$ in der Bezugslinie B gleich der Wegänderung

$$\Delta f = (\varphi - \varphi_0) f_n$$

sein muss. Setzt man

$$f_K^* = k f_A^*$$

so wird

$$(\varphi - \varphi_0) f_n = (1 + k) f_A^* \quad (1)$$

Damit errechnet man die Kraft zu

$$F_{(\varphi)} = f_A^* C_A = \frac{(\varphi - \varphi_0) f_n}{1 + k} C_A \quad (2)$$

Zu diesem Resultat kommt man auch, wenn man die beiden Federn zu einer einzigen mit der Federkonstanten $C_A/1 + k$ zusammenfasst und die Wirkung von M_R durch eine fiktive Kraft F_R erzeugt denkt, wie dies in Fig. 2b dargestellt ist.

Gl. (2) hat Gültigkeit, bis die Kraft F_A gross genug ist, um die Wirkung der Kraft F_R zu überwinden. Dann beginnt sich die Klinke zu bewegen, während die Kraft F_R voraussetzungsgemäss konstant bleibt. Diesen Zusammenhang zeigt Fig. 3, in welcher beim Erreichen des Wertes $\varphi_2 f_n$ die Bewegung der Klinke beginnt. Das Ende des Auslöseweges ist hier mit $\varphi_3 f_n$ bezeichnet und als jener Grenzwert verstanden, bei dem die Auslösung gemäss einer Konstruktions-Vorschrift (z. B. Publ. Nr.

³⁾ Die unbehinderte Ausbiegung ist im stationären Zustand der zugeführten Leistung proportional und daher einem bestimmten Belastungsstrom eindeutig zugeordnet. Da die Vorschriften als Funktion des Stromes ausgedrückt sind, liefert dieser theoretische Ausbiegungswert eine sehr bequeme Berechnungs- und Vergleichsmöglichkeit.

138 des SEV) spätestens beendet sein muss. Man erhält so den *theoretisch* verfügbaren Auslöseweg.

$$f_a = f_n (\varphi_3 - \varphi_2) \quad (3)$$

Von diesem theoretischen Wert wird man Abzüge machen müssen, welche die zeitliche Veränderung des Kraftbedarfes, die Inkonstanz der elektrischen Übergangswiderstände, das «Hystereseverhalten» der Bimetallpakete und den Einfluss des Ver-

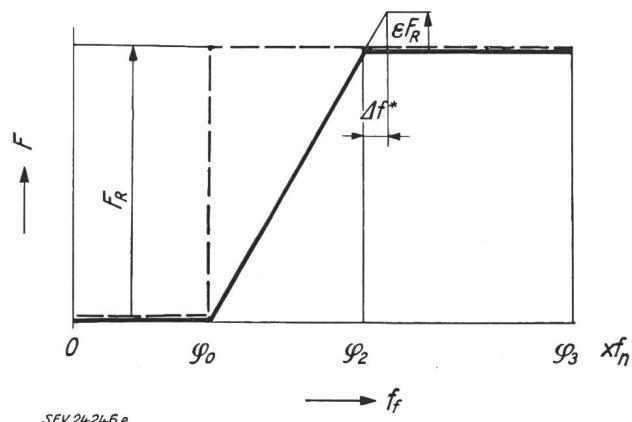


Fig. 3

Kraft-Weg-Diagramm des Auslösevorganges als Funktion der freien Ausbiegung

φ	Verhältniszahl der freien Ausbiegung zur Nennausbiegung
F	Kraft
F_R	Rückdruck-Kraft
f_n	Nennausbiegung
f_f	freie, unbehinderte Ausbiegung
Δf^*	Ausbiegungsunterschied infolge der Kraftschwankung
ϵF_R	Kraftschwankung
- - -	Kurve der Rückstellkraft (auf das Bimetall bezogen)
— — —	Kurve des Kraftverlaufes am Bimetall

schleisses durch mechanische Erschütterungen berücksichtigen. Diese Berücksichtigung kann z. B. so erfolgen, dass man eine Kraftschwankung $\Delta F = \epsilon F_R$ im Sinne einer Krafterhöhung in Rechnung setzt und den ihr entsprechenden Weg

$$\Delta f^* = \epsilon f_n (\varphi_2 - \varphi_0) \quad (4)$$

vom theoretischen Auslöseweg abzieht. Auf diese Weise erhält man den «reduzierten» Auslöseweg

$$f_a' = f_a - \Delta f^*$$

welcher die verschiedenen Einflüsse berücksichtigt, aber noch keine Sicherheit enthält. Um diese Sicherheit zu erreichen, multipliziert man den reduzierten Auslöseweg mit einem Faktor $\eta < 1$ und erhält nun den tatsächlichen Auslöseweg:

$$S_a = \eta (f_a - \Delta f^*)$$

bzw.

$$S_a = \eta f_n [\varphi_3 + \epsilon \varphi_0 - \varphi_2 (1 + \epsilon)] \quad (5)$$

In dieser Formel ist mit dem Parameter η ein Mass für die Funktionsbeständigkeit enthalten, welches bei den weiteren, die Rüttelfestigkeit betreffenden Überlegungen berücksichtigt wird.

d) Verhalten bei Erschütterungen

Tritt am Auslöser eine Erschütterung auf, so wird bei entsprechender Grösse der Trägheitskraft

F_m , welche am Klinkenhebel angreift, ein ungewolltes Öffnen der Verklinkung erfolgen. Hierbei ist von der Trägheitskraft eine Arbeit zu leisten, welche wegen des nötigen Beschleunigungsanteiles grösser sein muss als das Produkt aus Rückstellkraft mal Auslöseweg. Für eine gegebene Klinke mit einem bestimmten Trägheitsmoment wird demzufolge die Wahrscheinlichkeit einer ungewollten Öffnung als Folge einer Erschütterung um so geringer, je grösser das Produkt $F_R S_a$ bzw. das Integral $\int_0^{S_a} F(s) ds$ ist.

Man wird daher zur Erzielung hoher Rüttelfestigkeit danach trachten, die erforderliche Öffnungsarbeit W_o möglichst gross zu machen. Während der Weg S_a gemäss Gl. (5) bereits festliegt, ist für die resultierende Rückstellkraft $F_{r(s)} = F_R - F_{A(s)}$ noch eine Beziehung abzuleiten, welche den Vorspannzustand der Bimetalle im Moment des Auftretens der Trägheitskraft berücksichtigt. Legt man fest, dass die Erschütterung in einem Augenblick erfolgt, in welchem die unbefindete Ausbiegung f_f den Wert $\varphi_1 f_n$ hätte und setzt der Ordnung halber noch voraus, dass für die sehr kurze Öffnungsduer keine nennenswerte Änderung dieses Wertes f_f bzw. der diesem Wert proportionalen Temperatur eintritt, so erhält man nach der Darstellung in Fig. 4 folgende Beziehungen:

Für $\varphi_1 \leq \varphi_0$ wirkt an der Klinke nur die Kraft $F_R = \text{konst}$. Die Öffnungsarbeit W_o errechnet man damit:

$$W_o |_{\varphi_1 \leq \varphi_0} = F_R S_a = \\ = \frac{C_A f_n^2}{1+k} (\varphi_2 - \varphi_0) \eta [\varphi_3 + \varepsilon \varphi_0 - \varphi_2 (1+\varepsilon)] \quad (6)$$

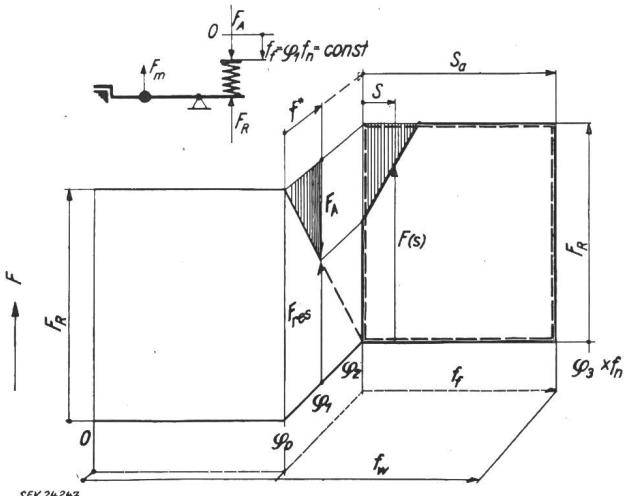


Fig. 4

Kraftverlauf an der Klinke bei der Öffnung durch die Trägheitskraft F_m nach einer freien Ausbiegung von $\varphi_1 f_n$
— — — freie Ausbiegung des unbelasteten Bimetall
— — — wirkliche Ausbiegung des belasteten Bimetall
Bezeichnungen siehe im Text

In Fig. 4 ist die Arbeit W_o durch die gestrichelt umrandete Fläche dargestellt.

Für $\varphi_0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2$ wirkt neben F_R auch die Kraft F_A , welche durch die Rückbiegung (unterdrückte Ausbiegung) des Bimetall um den Betrag

$f^* = (\varphi_1 - \varphi_0) f_n$ entstanden ist. Sobald sich die Klinke infolge des Wirkens der Trägheitskraft zu bewegen beginnt, wird das Bimetall entlastet, und die Kraft F_A verringert sich proportional der Wegänderung (Proportionalitätsfaktor = Federkonstante) bis zum Wert 0. Dadurch ergibt sich ein Verlauf der resultierenden Kraft und eine Arbeitsfläche wie sie im rechten Teil der Fig. 4 durch den stark ausgezogenen Linienzug dargestellt sind. Man erkennt, dass sich die Arbeitsfläche gegenüber der nach (6) ermittelten nur durch das senkrecht schraffierte Dreieck unterscheidet, für dessen Fläche W_Δ man schreiben kann:

$$W_\Delta = \frac{C_A}{1+k} \frac{f^{*2}}{2}$$

Es gilt demnach für die Öffnungsarbeit

$$W_o |_{\varphi_0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2} = F_R S_a - W_\Delta$$

bzw.

$$W_o = \frac{C_A f_n^2}{1+k} \left\{ \eta (\varphi_2 - \varphi_0) [\varphi_3 + \varepsilon \varphi_0 - \varphi_2 (1+\varepsilon)] - \frac{(\varphi_1 - \varphi_0)^2}{2} \right\} = \frac{C_A f_n^2}{1+k} \Phi_0 \quad (7)$$

Da die Gl. (6) als Grenzfall in der Gl. (7) enthalten ist, gilt für die weitere Betrachtung für W_o stets der Ausdruck gemäss Gl. (7). Von den in Gl. (7) enthaltenen Grössen sind nur φ_2 und φ_0 frei wählbar, während alle übrigen Grössen als genau oder zumindest annähernd bekannte Parameter einzusetzen sind. Um das Optimum der Funktion $W_o(\varphi_0, \varphi_2)$ zu finden, kann man entweder die Bedingungen

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi_2} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial W}{\partial \varphi_0} = 0$$

sowie

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi_2^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi_0^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi_0 \partial \varphi_2} \right)^2 > 0$$

und

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi_2^2} \left(\text{oder} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi_0^2} \right) < 0$$

anwenden [3] oder so vorgehen, dass man von den zwei Veränderlichen zunächst die eine auch als Parameter auffasst und z. B. aus $W_o(\varphi_2)$ durch Differentiation und Nullsetzen der Ableitung den Wert

$$\varphi_{2 \max} = \frac{\varphi_3 + \varphi_0 + 2 \varepsilon \varphi_0}{2(1+\varepsilon)} \quad (8)$$

ermittelt. Dieser Wert in Gl. (7) eingesetzt, ergibt eine Öffnungsarbeit

$$W_o(\varphi_1) = \frac{C_A f_n^2}{1+k} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\eta (\varphi_3 - \varphi_0)^2}{2(1+\varepsilon)} - (\varphi_1 - \varphi_0)^2 \right] = \\ = \frac{C_A f_n^2}{2(1+k)} \Phi_1 \quad (9)$$

welche nur noch von einer Veränderlichen, nämlich φ_1 abhängt. Durch erneute Differentiation und Nullsetzung erhält man

$$\varphi_{1 \max} = \frac{2(1+\varepsilon) \varphi_1 - \eta \varphi_3}{2(1+\varepsilon) - \eta} \quad (10)$$

Diesen Wert in Gl. (9) eingesetzt, erhält man die maximale Öffnungsarbeit

$$W_{\text{ö}} \max = \frac{C_A f_n^2 \Phi}{2(1+k)} \quad (11)$$

mit

$$\Phi = \frac{\eta(\varphi_3 - \varphi_1)^2}{2(1+\varepsilon) - \eta}$$

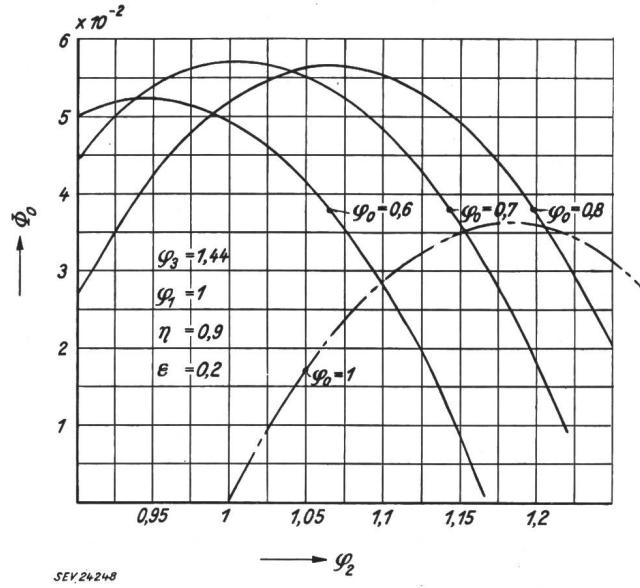


Fig. 5

Darstellung der Öffnungsarbeit W_{o} gemäss Gl. (7) durch die Vergleichsgröße Φ_2

Die Arbeit erhält man durch Multiplikation der Ordinaten mit $C_A f_n^2 / 1 + k$

Bezeichnungen siehe im Text

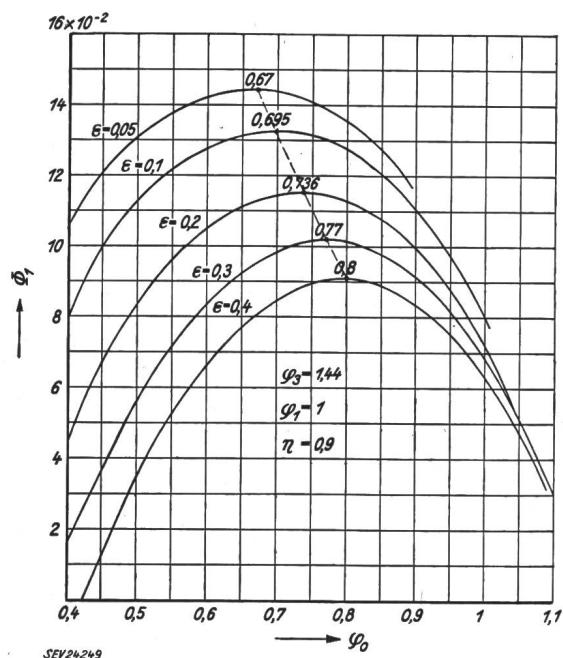


Fig. 6

Darstellung der Öffnungsarbeit gemäss Gl. (9) durch die Vergleichsgröße Φ_1

Die Arbeit erhält man durch Multiplikation der Ordinaten mit $C_A f_n^2 / 1 + k$
ε Parameter

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Der besseren Anschaulichkeit halber sind in den Fig. 5, 6, 7 und 8 einige abgeleitete Gleichungen graphisch dargestellt.

Von den in Gl. (11) enthaltenen Größen ist zunächst nur Φ als feststehend zu betrachten, während $C_A f_n^2$ und k einen gewissen Spielraum der Wahl offen lassen. Von diesen beiden Größen wird im folgenden der Wert k so bestimmt, dass sich für eine vorgegebene Öffnungsarbeit ein Minimum an Gesamtkosten ergibt. Dabei wird $C_A f_n^2$ als konstant angenommen. Auf die Variationsmöglichkeit dieses Ausdruckes, der hauptsächlich von thermischen Erscheinungen im Zusammenhang mit der Bimetallform abhängt, wurde an anderer Stelle [1] ausführlich eingegangen.

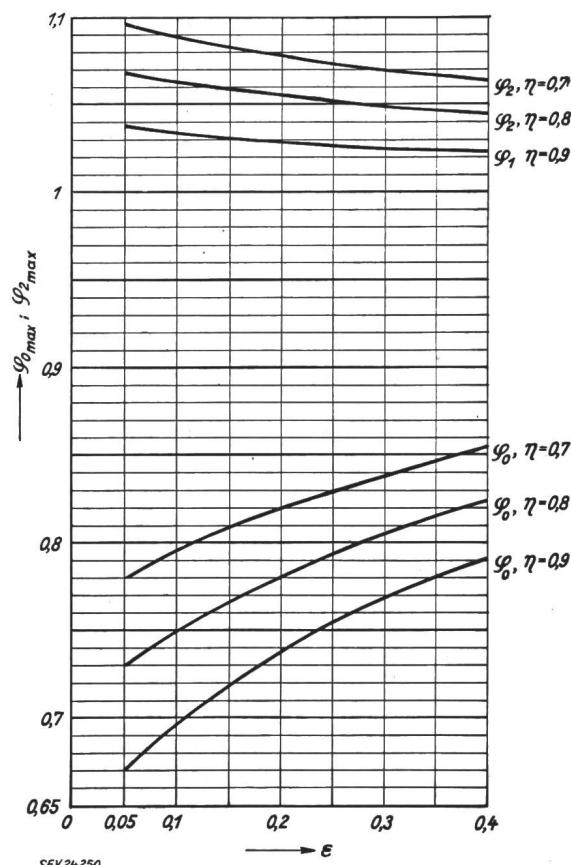


Fig. 7

Darstellung der Gl. (8) und (10) mit η als Parameter
Bezeichnungen siehe im Text

e) Bestimmung des günstigsten Rückbiegungsverhältnisses

Soll die Verhältniszahl k so bestimmt werden, dass minimale Bimetallkosten bei einer bestimmten Arbeit entstehen, so ist ein Ansatz zu suchen, der die Kosten des Bimetalltes in Abhängigkeit von der Arbeit ausdrückt. Diese Aufgabe lässt sich schrittweise durch

1. Bestimmung eines einfachen Zusammenhangs zwischen Arbeit und aktivem Auslöservolumen,
2. Ermittlung des aktiven Kompensationsvolumens in Abhängigkeit vom aktiven Auslöservolumen

und

3. Darstellung des Preises unter Verwendung der Beziehung nach Ziff. 1 und 2.
lösen.

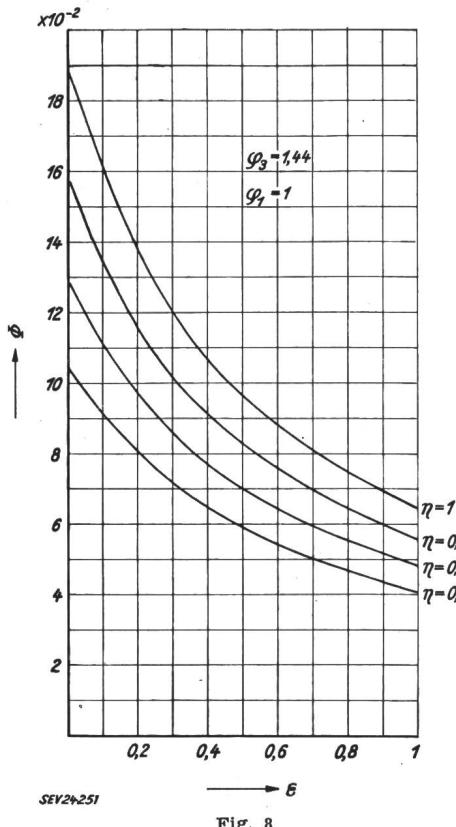


Fig. 8

Darstellung der Arbeit gemäss Gl. (11) durch die Vergleichsgrösse Φ

Die Arbeit erhält man durch Multiplikation der Ordinaten mit $C_A f_n^{2/1} + k$
Bezeichnungen siehe im Text

1. Das aktive Auslöservolumen

Den Zusammenhang zwischen Öffnungsarbeit und Bimetallvolumen der Auslösepakete erhält man, wenn man für C_A und f_n die bekannten Formeln [4], [5], [6] einsetzt:

$$C_A = \frac{E b h^3}{4 l^3} \quad (12)$$

und

$$f_n = \frac{a \vartheta_n l^2}{h \cdot 10^4} \quad (13)$$

Damit wird

$$C_A f_n^2 = \frac{E_A b_A h_A^3 a_A^2 \vartheta_n^2 l_A^4}{4 l_A^3 \cdot 10^8 h_A^2} = \alpha V_A \quad (14)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{E a^2 \vartheta_n^2}{4 \cdot 10^8} \text{ und } V_A = l_A b_A h_A$$

Aus Gl. (11) folgt nach Einsetzen von Gl. (14) für $C_A f_n^2$

$$V_A = \frac{2(1+k) W_{\max}}{\alpha \Phi} \quad (15)$$

Mit dieser Formel ist der gewünschte Zusammenhang zwischen Öffnungsarbeit und Auslöservolumen gefunden.

2. Das aktive Kompensationsvolumen

Das aktive Kompensationsvolumen lässt sich in einfacher Weise aus den folgenden Beziehungen errechnen, in welchen der Index A für Auslöser, K für Kompensation gesetzt wird. Da zwischen Auslöser und Kompensation ein Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} < 1$ besteht, muss die Rückbiegung an der Kompensation selbst, welche zum Unterschied von der bisher im gemeinsamen Bezugspunkt betrachteten Rückbiegung f_K^* mit f_{KK}^* bezeichnet werden soll, in diesem Verhältnis kleiner und die Kraft im gleichen Verhältnis grösser sein.

Demnach gilt

$$f_{KK}^* = \ddot{u} f_K^* = \ddot{u} k f_A^* \quad (16)$$

und

$$F_{KK} = F_A \frac{1}{\ddot{u}}$$

Daraus folgt mit $F = c f^*$

$$C_K f_{KK}^* = \frac{1}{\ddot{u}} C_A f_A^*$$

und nach Einsetzen von Gl. (16) für f_{KK}^*

$$C_A = C_K \ddot{u}^2 k \quad (17)$$

Aus der erforderlichen Gleichheit der freien Ausbiegung f_f im gemeinsamen Bezugspunkt lässt sich mit

$$\frac{\vartheta a_K l_K^2}{10^4 h_K} = \ddot{u} \frac{\vartheta a_A l_A^2}{10^4 h_A}$$

der Wert für \ddot{u} in der Form

$$\ddot{u} = \frac{a_K l_K^2 h_A}{a_A l_A^2 h_K} \quad (18)$$

ermitteln.

Mit diesem Wert in Gl. (17) erhält man nach Einsetzen von C_A und C_K gemäss Gl. (12) für V_K nach einer einfachen Umformung

$$V_K = \frac{a_A^2 E_A V_A}{a_K^2 E_K k} = \frac{\delta}{k} V_A \quad (19)$$

3. Der Preis des Bimetalles

Zur Errechnung des Preises P ist nicht das Aktiv-, sondern das Totalvolumen V_{tot} einzusetzen, welches die inaktive Einspannlänge und den Stanzabfall berücksichtigt.

Mit

$$V_{tot} = \chi V$$

erhält man bei Verwendung der Indizes A für Auslöser und K für Kompensation

$$V_{tot,A} = \chi_A V_A \quad V_{tot,K} = \chi_K V_K$$

Berücksichtigt man weiter den Unterschied des Preises pro Volumeneinheit durch die Verhältniszahl p , so erhält man schliesslich den Gesamtpreis zu

$$P = \chi_A p_A V_A + \chi_K p_K V_K = \chi_A p_A V_A + \chi_K p_K \frac{\delta}{k} V_A$$

und nach Einsetzen von Gl. (11) für V_A zu

$$P = \frac{2(1+k)W}{\Phi \alpha} \left(\chi_A p_A + \chi_K p_K \frac{\delta}{k} \right) \quad (20)$$

Um das Minimum des Preises in Abhängigkeit von k zu finden, hat man Gl. (20) nach k zu differenzieren und aus der Nullsetzung der Ableitung den Wert k_{max} zu ermitteln. Man erhält

$$k = \pm \frac{a_A}{a_K} \sqrt{\frac{\chi_K p_K E_A}{\chi_A p_A E_K}}$$

wovon der positive Wert nach Einsetzen in Gl. (20) das gewünschte Minimum des Preises liefert.

f) Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, einen Weg zu zeigen, wie an einem Thermoauslöser optimale Eigenschaften bei einem Minimum an Materialaufwand zu erreichen sind. Es war notwendig, einige vereinfachende Annahmen zu treffen, deren man sich bei der Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse bewusst bleiben muss.

Im einzelnen wurde gezeigt, bei welchem Ausbiegungs- bzw. Stromwert die Berührung der Bimetalle mit der Auslösetraverse erfolgen und wann die Klinkenbewegung beginnen soll, wenn man für einen bestimmten Bezugsstrom einen Größtwert

an äusserer Öffnungsarbeit verlangt, welche man als gutes Vergleichsmass für die Rüttelfestigkeit betrachten kann.

Weiter wurde noch gezeigt, in welchem Verhältnis das Kompensationsvolumen zum Auslösevolumen stehen soll, damit minimale Gesamtkosten für das Bimetall entstehen.

Zum Abschluß möchte ich der angenehmen Pflicht nachkommen, Ingenieur H. Vogler zu danken, der die Grundstudien zu dieser Arbeit durchgeführt hat und mich bei der detaillierten Ausarbeitung durch wertvolle Hinweise unterstützte.

Literatur

- [1] Kirchdorfer, J.: Eine qualitative Betrachtung der stationären Erwärmung an Thermoauslösern. Arch. Elektrotechn. Bd. 42(1955), Nr. 1, S. 32...42.
- [2] Kirchdorfer, J.: Theoretische Darstellung des Betriebsverhaltens thermischer Auslöser. Arch. Elektrotechn. Bd. 42 (1955), Nr. 2, S. 126...136.
- [3] Granville, W. A. und P. F. Smith: Differential and Integral Calculus. War Dep. Educational Manual, EM 324, U.S.A.F. Inst., Wisconsin.
- [4] Dubbel, H.: Taschenbuch für den Maschinenbau, 10. Aufl., Bd. 1, Berlin: Springer 1949. S. 408.
- [5] Bovet, H.: Termobimetalle. Pro-Metal Bd. 2(1949), Nr. 12, S. 511...520.
- [6] Kirchdorfer, J.: Die Ausbiegung des Bimetall. Österr. Maschinenmarkt Bd. 7(1952), Nr. 20, S. 471...475.

Adresse des Autors:

J. Kirchdorfer, Sprecher & Schuh A.-G., Aarau.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Überwachungsgerät zur Anzeige von Formänderungen bei Dampfturbinenwellen

621.317.39 : 621.165-233.1

[Nach D. Anrich, H. W. B. Gardiner und R. K. Hilton: Supervisory Equipment for the Indication of Shaft Distortion in Steam Turbines. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 102(1955), Part A, Nr. 2, S. 121...130]

Entsprechend der heutigen Tendenz, Dampfturbinen in stets grösseren Einheiten zu bauen und diese gleichzeitig schärfere auszunützen, besteht ein grosser Bedarf nach einem Gerät, welches die im Betrieb auftretenden elastischen und thermischen Verformungen des Turbinenrotors kontinuierlich misst und aufzeichnet. Die wichtigsten dieser Formänderungen bestehen in der ungleichen axialen Wärmeausdehnung von Rotor und Stator sowie in der Verlagerung der Wellenachse bezüglich des Lagerzentrums, welche mannigfaltige Ursachen haben kann. Für die Analyse dieser Störungen ist überdies die Kenntnis der Geschwindigkeit, bei welcher sie auftreten, unerlässlich. Das im Folgenden beschriebene Messgerät gestattet, vier Grössen direkt zu messen, aus denen die Bewegung des Turbinenrotors in jedem Zeitmoment genau bestimmt werden kann:

1. Die vertikale Exzentrizität des Wellenendes (Δy);
2. Die horizontale Exzentrizität des Wellenendes (Δx);
3. Die axiale Verschiebung des Wellenendes in bezug auf das Gehäuse (Δz);
4. Die momentane Drehzahl der Welle (n).

Zusätzlich wird auch die mittlere Verschiebung der Zapfenmitte gegenüber der Lagermitte angezeigt, sowohl horizontal wie vertikal.

Als Messgeber wird auf der Turbinenwelle, ausserhalb des Lagers, eine Stahlscheibe aufgepresst, oder mit der Welle aus einem Stück geschmiedet. Um diese Scheibe herum sind drei Paare Magnetspulen am Turbinengehäuse befestigt, wie in Fig. 1 angedeutet, wobei sich die beiden Spulen eines Paares gegenüberliegen. Das erste Spulenpaar ($A-A$ in Fig. 1) wirkt in vertikaler Richtung, das zweite ($B-B$) in horizontaler und das dritte ($C-C$) in axialer Richtung. Zur Erleichterung der Montage sind die Spulen $B-B$ etwas unterhalb der Mittelebene angeordnet. Die beiden Spulen eines Paares sind zusammen

mit zwei Widerständen zu einer Brücke geschaltet, wie aus Fig. 2 ersichtlich ist. Wird diese Brücke mit einer Spannung gespeist, deren Frequenz wesentlich höher liegt als die Rotationsfrequenz der Turbine — im vorliegenden Fall wurde eine Frequenz von 1000 Hz gewählt —, so erscheint infolge der Veränderung der Spuleninduktivitäten bei exzentrischem Lauf der Turbinenwelle bzw. axialem Verschiebung gegenüber dem

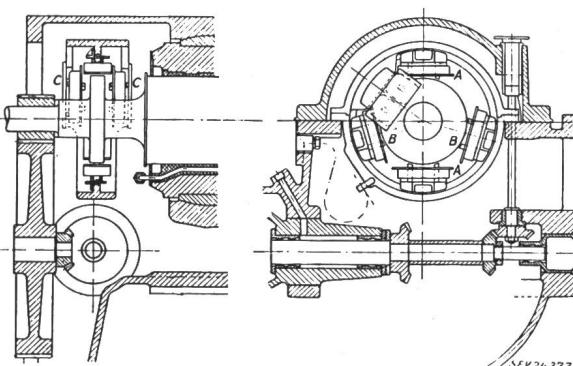


Fig. 1
Anordnung der Geber an der Turbine
A vertikale Geberspule; B horizontale Geberspule;
C axiale Geberspule

Gehäuse am Isoliertransformator 3 die Trägerfrequenz im Takt der Störungen moduliert. Diese Spannung wird nun gleichgerichtet und die Trägerfrequenz durch ein Tiefpassfilter 5 herausgesiebt. Es bleibt die niederfrequente Störspannung, der ein Gleichspannungsanteil überlagert ist. Dieser konstante Anteil ist ein Mass für die mittlere Exzentrizität des Lagerzapfens und kann in einem Gleichstrominstrument 6 direkt gemessen werden. Der Wechselspannungsanteil wird über einen weiteren Transformator 7 abgegriffen und gleichgerichtet und speist sodann über einen magnetischen Verstärker 9 ein Anzeige- und Registrierinstrument 10, mit welchem somit sämtliche Bewegungen des Wellenendes in der