Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 26 (1935)

Heft: 16

Artikel: Beitrag zur Dimensionierung von Bimetallrelais

Autor: Erni, Enrico

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060324

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: 08.08.2025

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

Erwähnt sei noch, dass häufig eine bestimmte Kapazität zur Kompensation der auch bei Leerlauf des Transformators vorhandenen Blindleistung *fest* an das Netz angeschlossen wird, so dass also der Begrenzer nur die induktiven Blindleistungsspitzen zu kompensieren hat. Man erreicht dadurch, dass der Regler nur selten zu schalten braucht.

Fig. 7 zeigt den Verlauf der Blindleistung in einem Betriebe bei ein- und ausgeschalteten Kondensatoren. Dabei ist angenommen, dass ein Kondensator mit 15 Kilovar zur Kompensation des Leerlaufbetriebes dauernd am Netz ist. Die Regulierung ist auf «Grob» eingestellt und darf zwischen induktiv 10 und kapazitiv 15 Kilovar schwanken. Vorhanden sind vier Kondensatoren zu je 20 Kilovar, die von dem Blindleistungsbegrenzer entsprechend der auftretenden Blindleistung gesteuert werden. Zwischen A und B ist die Blindleistung ein wenig kapazitiv, da die fest angeschalteten 15 Kilovar einer induktiven Blindleistung von nur 12 Kilovar gegenüberstehen. Bei B wurde der erste Kondensator mit 20 Kilovar automatisch an das Netz geschaltet, so dass zwischen B und C die Blindleistung induktiv ist usw.

Fig. 4 zeigt einen solchen Blindleistungsbegrenzer für 6 Kondensatoren.

Durch diesen Blindleistungsbegrenzer wird die vorteilhafte Zentralkompensation möglich. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich nicht nur auf die zentrale Kompensierung der Blindleistung beim Bezüger, dieses Gerät eignet sich auch zur automatischen Begrenzung der Blindlast in bedienten und unbedienten Unterstationen.

Beitrag zur Dimensionierung von Bimetallrelais.

Von *Enrico Erni*, Solothurn.

621.316.573 : 621.315.554

Es werden Beziehungen abgeleitet über die Wechselwirkung der in den Bimetallrelais auftretenden Kräfte, die Auslösecharakteristik bestimmt und schliesslich die erhaltenen rechnerischen Resultate an einem Beispiel nachgeprüft.

L'auteur développe des relations entre les effets des forces qui apparaissent dans les relais à languette bimétallique, en détermine la caractéristique de déclenchement puis contrôle les résultats de ses calculs à l'aide d'un exemple pratique.

Bimetallrelais erfreuen sich im Apparatebau ihrer Einfachheit, Zuverlässigkeit und nicht zuletzt ihrer Billigkeit wegen wachsender Beliebtheit. Die Elektrotechnik speziell macht davon ausgiebigen Gebrauch, besonders von solchen, die durch direkten Stromdurchgang geheizt werden; auf diese beschränken sich die nachstehenden Untersuchungen.

Alle bis heute in der Literatur bekannten Studien befassen sich hauptsächlich mit der Bestimmung der Durchbiegung [1]). Der Apparatekonstrukteur sollte aber oft das Verhalten der gewählten Dimensionen des Bimetallstreifens nicht nur in Bezug auf Durchbiegung, sondern auch auf die verfügbare Kraft, bzw. Arbeit und Zeit kennen.

Es soll im folgenden versucht werden, diese Lücke auszufüllen und eine Methode zu entwickeln, die bei der Dimensionierung eines Bimetallstreifens gute Dienste leistet. Die Gesetzmässigkeit der Durchbiegung wird als bekannt vorausgesetzt.

A. Die Kraft.

Betrachtet man einen Bimetallstreifen als einen einseitig eingespannten Balken, auf dessen freies Ende eine von einem zu betätigenden Mechanismus abhängige Kraft K_0 wirkt, so muss, damit eine Bewegung zustandekommen und bis zu Ende geführt werden kann

$$K_0 = K = \frac{3\,JE}{l^3} f_1 \qquad (1)$$

$$f_1 + f_0 \leqq f_{tot} \qquad (2)$$

sein, wo f_0 den Weg des zu betätigenden Mechanismus bedeutet, oder:

$$\frac{K_0\, l^3}{3\,JE} + f_0 \leqq f_{tot} = k\,\frac{(t_2 - t_1)}{h}\, l^2 \qquad (3)$$

[1]) $\left[f = k\frac{(t-t_0)\,l^2}{h} \right]$; spezifische Durchbiegung (k), Länge (l) und Dicke (h) in mm, Temperatur (t) in ° C.

Konstruieren wir das Arbeitsdiagramm (Fig. 1), so bedeuten:

die Fläche ABC die Deformationsarbeit des Bimetallstreifens, bis die Kraft K_0 erreicht ist,

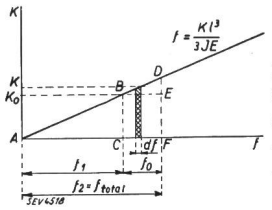

Fig. 1.

l freie Länge des Streifens.
h Dicke des Streifens.
t_1 t_2 Anfangs- und Endtemperatur.
J Flächenträgheitsmoment.
E Elastizitätsmodul.

die Fläche ADF die zur Verfügung stehende Arbeit,

die Fläche CBEF die zu leistende Arbeit.

Berechnen wir den Gütegrad η_g des Vorganges, so ist

$$\eta_g = \frac{\text{Fläche CBEF}}{\text{Fläche ADF}} = \frac{\frac{3\,JE}{l^3} f_0 f_1}{\frac{3\,JE}{l^3}\,\frac{f_2^2}{2}} = \frac{2\,f_0 f_1}{f_2^2} = \frac{2\,f_0 f_1}{(f_1+f_0)^2} \qquad (4)$$

η_g wird ein Maximum für $\frac{d\,\eta_g}{d\,f_1} = 0$

$$\frac{d\,\eta_g}{d\,f_1} = \frac{2\,f_0\,(f_1+f_0)^2 - 2\cdot 2\,f_1 f_0\,(f_1+f_0)}{(f_1+f_0)^4} = 0$$

$$2\,f_0\,(f_1+f_0) - 4\,(f_1 f_0) = 0$$

woraus folgt $\qquad f_1 = f_0 \qquad (5)$

$$\eta_{g\,max.} = 0{,}50$$

oder bei gegebenem Querschnitt q, Dicke h und Länge l des Bimetallstreifens ergibt sich die maximale Kraft, die noch überwunden werden kann:

$$f_0 = f_1 = \frac{f_2}{2} = \frac{K_0\, l^3}{3\, J E} = \frac{4\, K_0\, l^3}{f\, h^3\, E} = \frac{4\, K_0\, l^3}{9\, h^2\, E}$$

$$K_0 = \frac{f_2\, 9\, h^2\, E}{8\, l^3} \qquad (6)$$

Aus Gl. (6) lässt sich der Satz aufstellen: Will man eine möglichst grosse Kraft erzielen, unter voller Ausnützung der im Bimetallstreifen aufgespeicherten Energie, so ist es ratsam, die Länge so klein, die Dicke so gross zu wählen, dass $f_2 = 2\, f_0$ wird.

B. Die Zeit.

1. *Ableitung der Grundgleichung.*

Aus der Wärmebilanz ergibt sich:

$$G\, c\, \mathrm{d}\,\vartheta = P\, \mathrm{d}\, t - \alpha\, O\, (\vartheta - \vartheta_a)\, \mathrm{d}\, t$$

$$\frac{G\, c}{\alpha\, O}\, \mathrm{d}\,\vartheta = \frac{P}{\alpha\, O}\, \mathrm{d}\, t - (\vartheta - \vartheta_a)\, \mathrm{d}\, t$$

$$\frac{G\, c}{\alpha\, O} = T \qquad \frac{P}{\alpha\, O} = \vartheta_m$$

$$T\, \mathrm{d}\,\vartheta = \vartheta_m\, \mathrm{d}\, t - (\vartheta - \vartheta_a)\, \mathrm{d}\, t$$

Das allgemeine Integral lautet:

$$-\, T \lg\, [\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)] = t + C$$

Es bedeuten darin:

ϑ = die augenblickliche Temperatur oder die Temperatur, bei welcher die Bewegung der Vorrichtung beendet ist.
ϑ_a = die Raumtemperatur.
P = $I^2 R$ = zugeführte Wärmeleistung.
R = Ohmscher Widerstand des Bimetallstreifens.
ϑ_m = Beharrungstemperatur bei dem Strom I.
O = Oberfläche des Bimetallstreifens.
α = Wärmeübergangszahl, bezogen auf die Temperatur ϑ_m.
T = Zeitkonstante, bezogen auf die Temperatur ϑ_m.
G = Gewicht des Bimetallstreifens.
c = Spezifische Wärme.

Für $t = 0$ ist $\vartheta = \vartheta_0$, wo ϑ_0 die Temperatur bedeutet, die das Bimetall bei Durchgang des normalen Betriebsstromes I_n annimmt. Es folgt für die Integrationskonstante:

$$C = -\, T \lg\, [\vartheta_m - (\vartheta_0 - \vartheta_a)]$$

und damit

$$t = -\, T \lg\, [\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)] + T \lg\, [\vartheta_m - (\vartheta_0 - \vartheta_a)]$$

$$t = -\, T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)}{\vartheta_m - (\vartheta_0 - \vartheta_a)} \qquad (7)$$

Fliesst normalerweise kein Strom durch den Bimetallstreifen, so ergibt sich sinngemäss

$$t = -\, T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)}{\vartheta_m} \qquad (8)$$

Es ist also auseinanderzuhalten, ob die Zeitkurve für den anfänglich kalten oder betriebswarmen Bimetallstreifen aufgenommen oder berechnet wurde.

2. *Diskussion der Grundgleichung.*

Führen wir als neuen Begriff die relative Belastung ein, definiert durch die Formel

$$\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{I}_n} = \lambda$$

so folgt

$$\vartheta_m = \frac{P}{\alpha\, O} = \frac{I^2\, R}{\alpha\, O} = \frac{\lambda^2 I_n^2 R}{\alpha\, O} = \lambda^2\, \vartheta_0.$$

Voraussetzung ist dabei, dass α und R konstant bleiben oder sich wenig ändern.

Die Gl. (7) und (8) gehen dann über in

$$t = -\, T \lg \frac{\lambda^2\, \vartheta_0 - (\vartheta - \vartheta_a)}{\lambda^2\, \vartheta_0 - (\vartheta_0 - \vartheta_a)}$$

$$t = -\, T \lg \frac{\lambda^2\, \vartheta_0 - (\vartheta - \vartheta_a)}{\lambda^2\, \vartheta_0} \qquad (7a)$$

Gemäss dem logarithmischen Charakter besitzen diese Kurven Asymptoten. Durch Ausrechnung lässt sich zeigen, dass in beiden Fällen diese bei

$$\lambda^2 = \frac{\vartheta - \vartheta_a}{\vartheta_0}$$

liegen, also zusammenfallen.

Ist die relative Belastung kleiner als der oben ausgerechnete Wert, so wird das Bimetallrelais nicht in Funktion treten.

Wir sehen ferner aus Gl. (9), dass die Lage der Asymptote von der Raumtemperatur abhängig ist und sich im λ, t Koordinatensystem dementsprechend verschiebt. Es kommt aber vor, z. B. bei Strombegrenzern, dass diese bei festgelegten maximalen und minimalen Raumtemperaturen innerhalb gewissen Grenzen liegen soll.

Es ist also in den Grenzfällen

$$\vartheta_{a1} > \vartheta_{a2} \qquad \lambda_2 > \lambda_1$$

$$\lambda_1^2 = \frac{\vartheta - \vartheta_{a1}}{\vartheta_0} \qquad \lambda_2^2 = \frac{\vartheta - \vartheta_{a2}}{\vartheta_0}$$

$$\vartheta = \vartheta_0\, \lambda_1^2 + \vartheta_{a1} \qquad \vartheta = \vartheta_0\, \lambda_2^2 + \vartheta_{a2}$$

oder

$$\vartheta_0\, \lambda_1^2 + \vartheta_{a1} = \vartheta_0\, \lambda_2^2 + \vartheta_{a2} \qquad \vartheta_0 = \frac{\vartheta_{a1} - \vartheta_{a2}}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \qquad (10)$$

eine Bedingung, die erfüllt werden muss, um dieser Forderung nachzukommen. Gl. (10) sagt aus, wie hoch der Bimetallstreifen bei $\lambda = 1$ mindestens erhitzt werden muss, damit die vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden. Aus Gl. (9) lässt sich dann die entsprechende Temperatur ϑ bestimmen.

Die bis jetzt durchgeführten Berechnungen führten wir stillschweigend unter der Voraussetzung durch, dass der Bimetallstreifen sich selbst überlassen ist, d. h. dass keine äussern Kräfte seine Bewegungen hemmen. Ist das nicht der Fall, so ist zu untersuchen, unter welchen Umständen die Gl. (7) und (8) Gültigkeit haben.

Zu diesem Zwecke betrachten wir das Arbeitsdiagramm Fig. 1. Wir müssen hier unterscheiden zwischen der Zeit, die die Massen des Mechanismus unter dem Einfluss der Beschleunigungsarbeit brauchen und der Zeit, die das Bimetall benötigt, um denselben Weg f_0 zurückzulegen.

Wir wollen die erste Zeit berechnen und denken uns dabei die Massen des Mechanismus auf das freie Ende des Bimetalles reduziert.

$$K\,\mathrm{d}f - K_0\,\mathrm{d}f = m\,v\,\mathrm{d}v$$

$$\int_0^{f_2} K\,\mathrm{d}f - K_0 \int_{f_1}^{f_2} \mathrm{d}f = m \int_0^{v} v\,\mathrm{d}v$$

$$K = f\frac{3\,J\,E}{l^3}$$

$$\frac{3\,J\,E}{l^3}\int_0^{f_2} f\,\mathrm{d}f - K_0 \int_{f_1}^{f_2} \mathrm{d}f = m\frac{v^2}{2}$$

$$\frac{3\,J\,E}{2\,l^3} f_2^2 - K_0\,(f_2 - f_1) = m\frac{v^2}{2}$$

$$\frac{3\,J\,E\,f_2^2 - 2\,K_0 f_0\,l^3}{2\,l^3} = \frac{m\,f_0^2}{2\,t_{0M}^2}$$

$$t_{0M} = \sqrt{\frac{m\,f_0^2\,l^3}{3\,J\,E\,f_2^2 - 2\,K_0\,l^3 f_0}} = \sqrt{\frac{m\,f_0^2\,l^3}{(f_2^2 - 2 f_1 f_0)\,3\,J\,E}} \tag{11}$$

Wäre das Bimetall frei, so würde der Weg f_0 in der Zeit

$$t_{0B} = t_{f_2} - t_{f_1}$$

$$= -T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)}{\vartheta_m} + T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta_1 - \vartheta_a)}{\vartheta_m}$$

$$t_{0B} = T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta_1 - \vartheta_a)}{\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)} \tag{12}$$

durchlaufen.

Ist nun $t_{0B} > t_{0M}$, so werden die Massen der Bewegung des Bimetalles folgen können.

$t_{0B} > t_{0M}$ stellt also die Bedingung dar, die erfüllt werden muss, damit die Gl. (7) und (8) Gültigkeit haben.

Ausgeschrieben lautet sie

$$T \lg \frac{\vartheta_m - (\vartheta_1 - \vartheta_a)}{\vartheta_m - (\vartheta - \vartheta_a)} = \sqrt{\frac{m\,f_0\,l^3}{(f_2^2 - 2\,f_1\,f_0)\,3\,J\,E}} \tag{13}$$

Ist $t_{0B} < t_{0M}$, so wird die Kurve flacher verlaufen. Der Uebergangspunkt von der steilen zur flachen Kurve wird um so früher eintreten, je früher $t_{0B} = t_{0M}$ wird (Fig. 2).

Wird aus irgendwelchen Gründen gewünscht, dass die Zeitkurve auf einem möglichst grossen Teil ihres Verlaufes unverändert, d. h. möglichst steil bleibe, so ist bei der Konstruktion des betätigten Mechanismus auf möglichst wenig Masse und möglichst kleine Kraft zu achten. Verschiedene Konstrukteure haben bereits diese Erkenntnis wahrgenommen und schalten deswegen zwischen das Bimetallrelais und den zu betätigenden Mechanismus ein mechanisches, bzw. ein elektrisches Hilfsrelais ein.

Verfolgen wir nun die Vorgänge ausserhalb des Geltungsbereiches der Gl. (7) und (8). Es leuchtet ein, dass der Bimetallstreifen den Weg $f_3 - f_1$ in der gleichen Zeit zurücklegt wie die betätigte Vorrichtung den Weg f_0 in der Zeit t_{0M}, was im Arbeits-

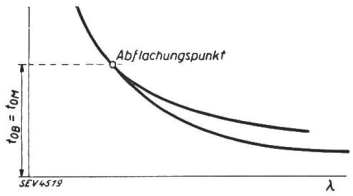

Fig. 2

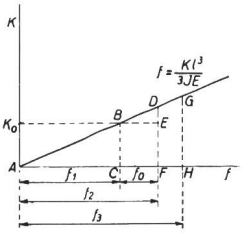

Fig. 3.

diagramm als eine zusätzliche Beschleunigungsarbeit erscheint (Fläche DGHF, Fig. 3). Je grösser nun diese zusätzliche Arbeit ist, um so grösser wird der Weg $f_3 - f_1$ und dementsprechend die Temperatur ϑ_3. Die Temperatur ϑ, die wir bis jetzt als konstant angesehen hatten, wird also auch zu einer Variabeln und kann unter Umständen so hoch werden, dass der Bimetallstreifen verbrennt.

C. Die Auswertung.[2])

Es ist unmöglich, direkt zahlenmässig die in den vorhergehenden Abschnitten abgeleiteten Beziehungen auszuwerten, denn dieses würde die Kenntnis der verschiedenen Temperaturen voraussetzen. Es kommt weiter dazu, dass die Koeffizienten α und ϱ sehr stark von den Temperaturen abhängig sind (es können Temperaturdifferenzen bis 1000 und mehr Grad vorkommen) und nicht mehr als konstant angesehen werden dürfen. Ebenfalls spielt die Form des Profils des Bimetalles eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Um nun diesen Schwierigkeiten aus dem Wege zu gehen, übertragen wir (wir wollen uns zuerst mit der Temperaturbestimmung befassen) das Problem auf ein Vergleichsmaterial, z. B. Widerstandsdraht mit kreisrundem Querschnitt, für welches experimentell festgestellte und tabellarisch zusammengefasste Werte der Stromstärke in $f\,(\vartheta_q)$ vorhanden sind und rechnen diese auf das Bimetall um.

Bei gleichem Querschnitt und Profil verhalten sich die Ströme, welche die gleiche Temperatur in den beiden Baustoffen erzeugen, wie

$$\frac{I_B}{I_w} = \sqrt{\frac{\varrho_w}{\varrho_B}} \tag{14}$$

[2]) Die Unterlagen stammen z. T. aus der Broschüre der Aciéries d'Imphy «Alliages RNC pour résistances électriques».

Aus dem so erhaltenen Werte konstruieren wir eine Berechnungstafel $I = f(\vartheta)$ mit dem Querschnitt q als Parameter entsprechend Fig. 4. Aus derselben lässt sich dann ohne weiteres aus zwei bekannten Grössen die dritte bestimmen.

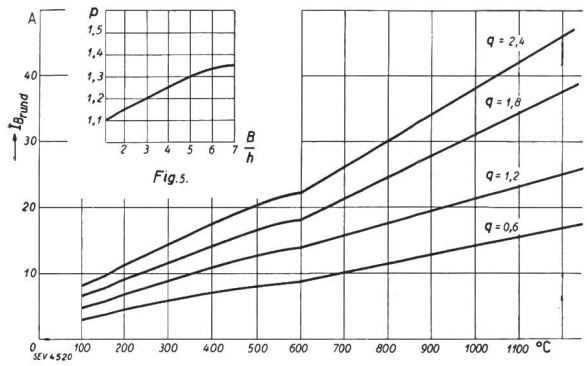

Fig. 4.
(Fig. 5: links oben.)

Berücksichtigt wird der Einfluss des Profiles, d. h. der Uebergang vom runden auf das Vierkantprofil, durch einen Koeffizienten p.

$$I_{vierkant} = p \cdot I_{rund} \tag{15}$$

$$I_{rund} = \frac{I_{vierkant}}{p} \tag{16}$$

p ist experimentell bestimmt und variiert mit dem Verhältnis Breite B zur Dicke h entsprechend Diagramm Fig. 5 und Tabelle I.

Tabelle I.

$\frac{B}{h}$	2	3	4	5	7
p	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35

Aehnlich verfahren wir für die Bestimmung der Wärmeübergangszahl $\alpha = \alpha_{strahlung} + \alpha_{Konvektion}$ und tragen zu einem Diagramme die Werte $\alpha_s = f(\vartheta)$ und $\alpha_K = f(\vartheta)$ zusammen. Ebenfalls wählen wir für α_K q als Parameter (Fig. 6).

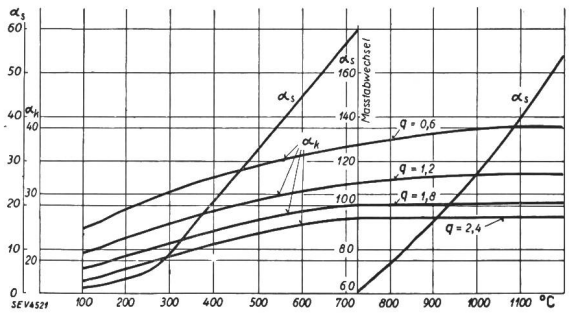

Fig. 6.

Es ist nun leicht, bei gegebenem Strom und Profil mit den Diagrammen Fig. 4, 5 und 6 und Gl. (16) die Temperatur ϑ und $\alpha = \alpha_s + \alpha_K$ zu bestimmen. Kennt man diese Grössen, so lassen sich ebenfalls alle andern Gleichungen zahlenmässig ausrechnen.

Wir wollen nun für verschiedene Belastungen die Schliesszeit eines Kontaktes, welcher direkt an einen Bimetallstreifen angebracht ist, bestimmen. Die Raumtemperatur sei durch Kompensation ausgeschaltet, indem der Gegenkontakt auf einem gleich langen und gleich dicken Bimetallstreifen befestigt ist.

Die Zeit ist dann $t = T \lg \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m}$

Bekannt ist

$$B = 2 \text{ mm} \quad h = 0{,}6 \text{ mm} \quad q = 1{,}2 \text{ mm}^2 \quad \frac{B}{h} = 1{,}33$$

$$p = 1{,}22 \quad I_n = 6{,}5 \text{ A.}$$

Tabelle II.

λ	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0
$I = \lambda I_n$	8,13	9,75	13,0	16,2	19,5
$\frac{I}{p}$	6,68	8,0	10,65	13,2	16,0
ϑ_m	188	256	396	536	685
ϑ	170	170	170	170	170
$\vartheta_m - \vartheta$	18	86	226	366	515
$\frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m}$	0,095	0,36	0,595	0,68	0,75
$\lg \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\vartheta_m}$	2,33	1,01	0,52	0,39	0,30
α_s	6,4	9,8	22,3	36,8	55,0
α_K	23,1	24,6	27,0	29,3	31,3
α	29,5	43,4	49,3	66,1	86,3
$\frac{G c}{O}$	1000	1000	1000	1000	1000
$\frac{G c}{\alpha O}$	33,8	24,0	20,2	15,1	11,55
t	78,0	24,0	10,5	5,9	3,48

Die Resultate dieser Berechnung wurden an einer Ausführung experimentell nachgeprüft und es wurden nachfolgende Werte gefunden:

Tabelle III.

λ	Gemessen s	Gerechnet s	Fehler %
1,5	24,8	24,2	− 2,48
2,0	9,8	10,5	+ 6,2
2,5	5,8	5,9	+ 1,7
3,0	3,6	3,48	+ 3,34

Wenn man bedenkt, dass die Bestimmung der Hauptvariabeln sich auf ein graphisches Verfahren stützt, so kann man sich mit der dabei erzielten Genauigkeit zufriedenstellen und die Methode als vollwertig ansehen.