

Die lineare Darstellung der Erwärmungslinie und verwandter Kurven in einem Exponentialraster und ihre praktische Anwendung

Von Dr. techn. Adolf Ritter, Wien

Es wird auf ein Verfahren aufmerksam gemacht, das trotz seiner vielseitigen Anwendungsmöglichkeit nie allgemein bekannt wurde. Es wird gezeigt, daß einfache Beziehungen zwischen der Darstellung und dem linearen und dem quadratischen Mittelwert der Funktion bestehen und ihre Anwendung durch Beispiele erläutert.

Viele Aufgaben in Physik und Technik führen zu einer Funktion von der Form (Abb. 1 a)

$$y = y_0 + (y_\infty - y_0)(1 - e^{-t/T}). \quad (1)$$

y_0 und y_∞ sind die den Zeiten $t = 0$ und $t = \infty$ entsprechenden Funktionswerte, T ist die sogenannte Zeitkonstante. Für die Anwendung dieser Funktion in der Elektrotechnik seien nur einige Beispiele angeführt.

1. Erwärmung oder Abkühlung eines homogenen Körpers bei konstanter Wärmeentwicklung,
2. Anstieg oder Abklingen von Strom oder Spannung in Stromkreisen mit Widerstand und Selbstinduktion oder Kapazität,
3. demgemäß auch Verlauf des Gleichstromgliedes während der Ausgleichvorgänge in Wechselstromkreisen,
4. aperiodisch gedämpfte mechanische Einschwingvorgänge und deren elektrische Folgen wie z. B. der Übergang vom Stoßkurzschlußwechselstrom zum Dauerkurzschlußstrom,
5. Verlauf der Drehzahlen bei Schwungmassenantrieben bei linearer Antriebskennlinie usw.

Die numerische Auswertung der Funktion ist nicht sehr bequem, man muß den Wert von $e^{-t/T}$ mit Logarithmen berechnen, wenn man nicht eine Exponentialtafel zur Verfügung hat. Es ist auch häufig notwendig, mehrere derartige Funktionen aneinanderzuschließen, etwa um einen Verlauf bei Aufeinanderfolge verschiedener Belastungen darzustellen, wobei sich verhältnismäßig komplizierte Ausdrücke ergeben. Es fehlte daher bis in die jüngste Zeit nicht an Vorschlägen, die die praktische Arbeit mit diesen Funktionen erleichtern sollen.¹

Es ist merkwürdig, daß ein sehr einfaches und anschauliches Verfahren von F. Wolf zur linearen Darstellung fast unbeachtet geblieben ist, obwohl es schon vor fast drei Jahrzehnten entwickelt wurde.² Seither sind — zumindest in der allgemein zugänglichen Literatur — nur wenige Arbeiten erschienen, die Hinweise auf dieses Verfahren enthielten.³ Die anderen, in der Anzahl überwiegenden Arbeiten über Erwärmungen bei aussetzendem Betrieb und über mathematisch ähnliche Aufgaben ziehen das Verfahren von Wolf nicht heran.⁴ Wäre die Kenntnis des Wolfschen Verfahrens Allgemeingut der Techniker — wie etwa die Kennt-

nis der Erwärmungskurve schlechthin — gewesen, so hätte zumindest mancher Beweis weit anschaulicher und mit weniger Rechenarbeit durchgeführt werden können. Es dürfte daher am Platze sein, dieses Verfahren mit einigen Ergänzungen weiteren Kreisen zugänglich zu machen und seine vielseitige Anwendungsmöglichkeit durch Beispiele zu erläutern.

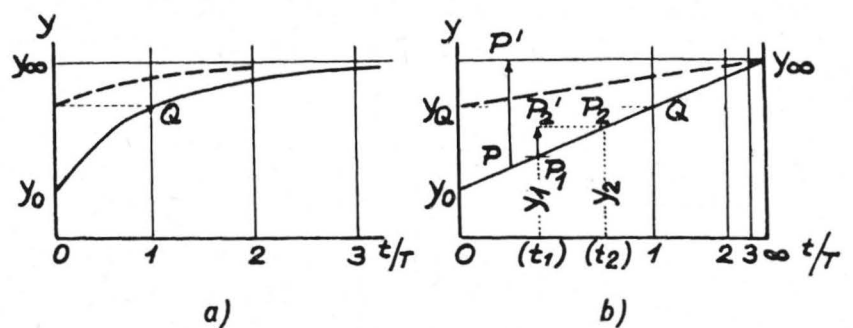


Abb. 1. Funktion (1) oder (2)

a) in der gewöhnlichen Darstellung b) im Exponentialraster

Zur leichteren Verständlichkeit soll zuerst die konkrete Anwendung auf Erwärmungsfragen erläutert werden. Abb. 1 a möge daher vorläufig als Bild der bekannten Erwärmungsgleichung

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_\infty - \vartheta_0)(1 - e^{-t/T}) \quad (2)$$

betrachtet werden. ϑ_0 ist die Ausgangserwärmung, ϑ_∞ die Enderwärmung und es ist die Zeitkonstante

$$T = \frac{c G}{\alpha O}. \quad (3)$$

(Gewicht G , spezifische Wärme c , Abkühlungskoeffizient α und Kühlfläche O). Setzt man

$$z = 1 - e^{-t/T}, \quad (4)$$

so erhält man in einem Koordinatensystem (z, ϑ) eine Gerade

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \cdot z. \quad (5)$$

Wird die Abszisse mit den entsprechenden Werten von t/T beziffert, so kann bei bekannter Zeitkonstante die zu jeder Zeit gehörende Erwärmung unmittelbar abgelesen werden (Abb. 1 b). Die Zeit t von Null bis Unendlich ist auf eine Strecke von der Länge Eins zusammengedrängt, so daß die Funktion in ihrem ganzen Verlauf überblickt werden kann. Trotz des gedrängten Zeitmaßstabes ist das Bild ungemein anschaulich. Aus der Tatsache, daß in diesem Koordinatensystem alle Erwärmungslinien als Gerade erscheinen und demnach je zwei Punkte zu ihrer Festlegung genügen, sind lediglich aus der physikalischen Anschauung ohne mathematischer Beweisführung sofort folgende drei für den praktischen Gebrauch wichtige Folgerungen abzuleiten:

1. Verfahren zur Herstellung des Rasters (Abb. 2). An Stelle der Erwärmungsgeraden e_0 treten die Geraden e_1, e_2, \dots , wenn die Erwärmung anstatt bei $t = 0$ erst bei $t/T = 1, 2, \dots$ begonnen wird. Da diese den gleichen Erwärmungsverlauf bloß mit verschiedenem Beginn der Zeitzählung wiedergeben, müssen die Ordinaten ϑ bei gleichen Zeitunterschieden gleich sein. Dies gibt die Möglichkeit aus einem einzigen berechneten Punkt den Raster zu konstruieren. Es wird eine Erwärmungsgerade z. B. e_0 von 0 nach $\vartheta_\infty = 100\%$ gezogen. Für $t/T = 1$ ergibt die Rechnung $\vartheta = (1 - e^{-1}) \vartheta_\infty = 63,2\%$. Damit erhält man den Abszissenpunkt $t/T = 1$. Von diesem Punkt wird die nächste Erwärmungsgerade e_1 gezogen. Nach weiterem Zeitablauf $t/T = 1$ muß auf e_1 $\vartheta = 63,2\%$ erscheinen, wodurch man den Skalenpunkt $t/T = 2$ erhält usw. (Eine feinere Teilung erhält man, wenn man von $t/T = 0,1, \vartheta = 9,52\%$ ausgeht.)

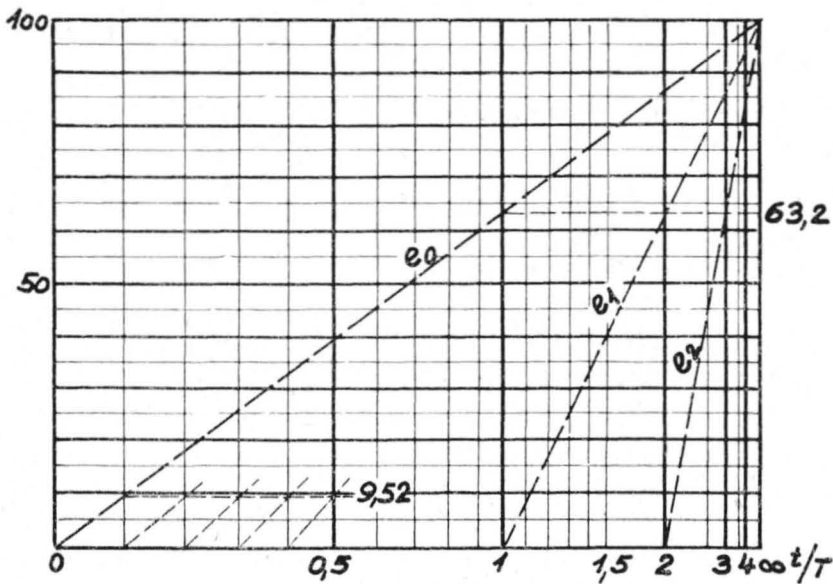


Abb. 2. Konstruktion des Exponentialrasters

2. Zerrung des Zeitmaßstabes für den oberen Zeitbereich. Durch die gedrängte Teilung im oberen Zeitbereich wird die Ablesung erschwert. Es ist aber möglich, die Erwärmungslinie an beliebiger Stelle abzubrechen und von dort aus die Zeit neu zu zählen. Die neue Gerade ist durch y_Q bei $t/T = 0$ und den ursprünglichen Punkt ϑ_∞ gegeben (Abb. 1 b).

3. Fortsetzung der Erwärmungslinie mit anderer Belastung (Abb. 3 a). Die Belastung, die zu $\vartheta_{\infty 1}$ führen würde, wird nach t_1 geändert; zur neuen Belastung gehört eine andere, zum Beispiel kleinere Enderwärmung $\vartheta_{\infty 2}$. Die entsprechende Gerade ist durch den Endpunkt der ersten Erwärmungsstrecke und durch $\vartheta_{\infty 2}$ bestimmt. Bei Fortsetzung des Verfahrens erscheint ein durchgehendes Linienzug, der den Verlauf der Erwärmung anschaulich wiedergibt. Zur Verbesserung der Ablesemöglichkeit kann aber auch, wie schon früher erläutert wurde, die Zeitzählung nach jeder Änderung der Belastung neu begonnen werden (Abb. 3 b).

Von besonderer technischer Bedeutung sind periodisch wechselnde Belastungen. In Abb. 4 ist

ein solcher Fall dargestellt. Bei Fortsetzung der ersten Belastung würde sich der Körper schließlich auf $\vartheta_{\infty 1}$ erwärmen. Nach t_1 wird die Belastung

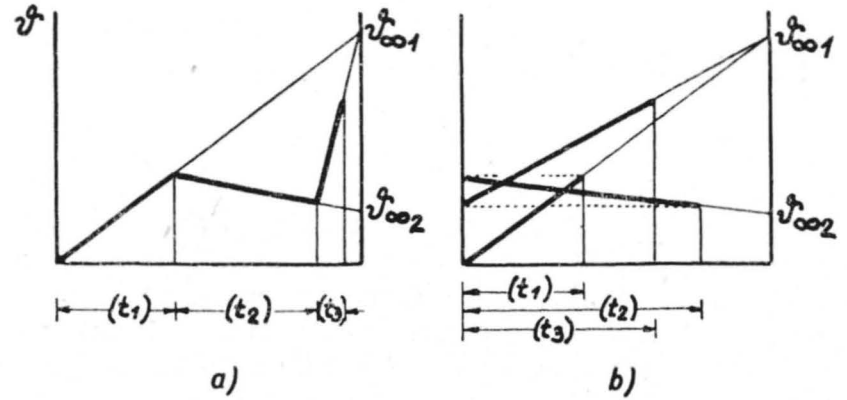


Abb. 3. Aufeinanderfolge verschiedener Belastungszustände a) als fortlaufender Linienzug b) mit Neubeginn der Zeitzählungen

aber derart geändert, daß sich die Enderwärmung $\vartheta_{\infty 2}$ ergeben würde. Nach einer weiteren Zeitspanne t_2 , also nach $t_1 + t_2 = t_s$ (Spieldauer) wiederholt sich das Belastungsspiel. Durch fortgesetzte Eintragung der Spiele könnte man die Werte der Erwärmung im Beharrungszustand ermitteln (A_∞, B_∞). Der Verlauf im Beharrungszustand kann dann in den linken Teil des Diagrammes projiziert werden ($A'_\infty, B'_\infty, A_\infty$). Es genügt jedoch die Eintragung eines einzigen, zum Beispiel des ersten Spieles A_1, B_1, A_2 . Die Gerade durch A_1, A_2 gibt bereits A_∞ , parallele Gerade hierzu geben entsprechende Punkte des Beharrungszustandes (zum Beispiel: B_1 gibt B_∞). Für periodische Belastungen gilt nämlich folgender Satz: Entsprechende Punkte verschiedener Spiele liegen auf einer Geraden; alle diese Geraden sind parallel.

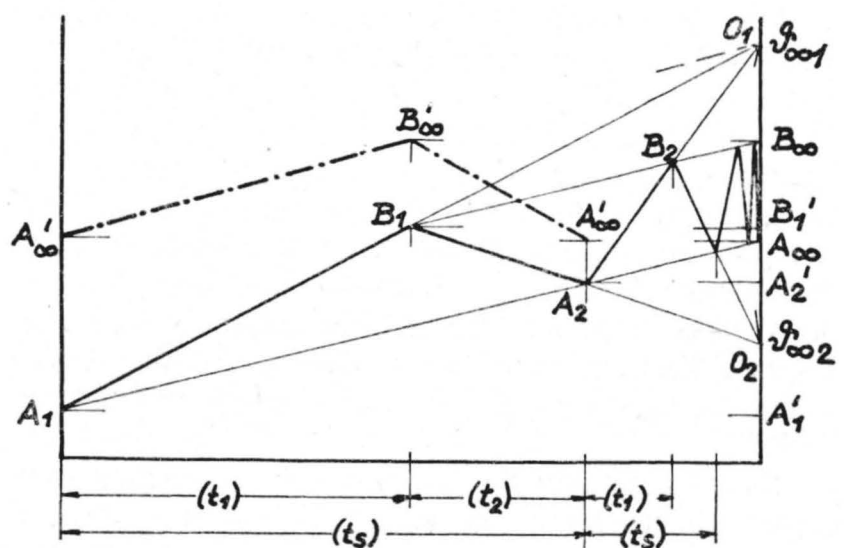


Abb. 4. Dauerbetrieb mit aussetzender Belastung

Der Beweis sei bloß angedeutet, er gilt ganz allgemein auch für „krummlinige“ Belastungsfälle: Entsprechende Punkte (zum Beispiel A_1 und A_2 oder B_1 und B_2) aus benachbarten Spielen unterscheiden sich stets um die Spieldauer t_s . Ihr Abstand von der Endordinate ist jeweils

$$1 - z = e^{-t/T} \text{ bzw. } e^{-(t+t_s)/T}$$

Das Verhältnis der Abstände von der Endordinate ist daher konstant:

$$\frac{A_1 A_1'}{A_2 A_2'} = \frac{B_1 B_1'}{B_2 B_2'} = \dots = \frac{1}{e^{-t/T}}$$

Konstruktionsgemäß schneiden sich entsprechende Strahlen aus verschiedenen Spielen in Punkten (O_1, O_2) in der Endordinate. Es liegt somit Affinität vor. Die Endordinate ist Affinitätsachse. Affinitätsstrahlen müssen parallel sein, ihre Richtung ist bekannt, wenn ein einziger solcher Strahl, zum Beispiel durch A_1 und A_2 bekannt ist.

Es besteht kein Hindernis, den einzelnen Teilen des Belastungsspieles verschiedene Zeitkonstanten zuzuordnen, wie dies zum Beispiel bei Motoren mit Selbstlüftung nötig ist, wenn Lauf und Stillstand abwechseln. Ebenso wie die entsprechenden Rechenverfahren ist das graphische Verfahren natürlich nur soweit zulässig als der betreffende Vorgang durch die klassische Erwärmungsgleichung nach genügend genau dargestellt werden kann. Hier wie dort wird man unter Umständen Korrekturen anbringen müssen. So ist zum Beispiel bei Öltransformatoren der der jeweiligen Belastung entsprechende Temperaturanstieg vom Öl zur Wicklung der Ölerwärmung zuzuschlagen.

Nachdem das Wesen des Verfahrens in der Anwendung auf eine konkrete Aufgabe, nämlich auf Erwärmungsfragen veranschaulicht wurde, sollen noch einige Beziehungen angeführt werden, die bei anderen Aufgabengruppen von Bedeutung sind.

1. Der Differentialquotient y' der Funktion (1) kann in der Form

$$y' = \frac{1}{T}(y_\infty - y) \tag{6}$$

geschrieben werden, wenn man nach der üblichen Berechnung $e^{-t/T}$ mit Hilfe der Gl. (1) durch y ausdrückt. $(y_\infty - y)$ kann als Resthöhe aus dem Diagramm abgelesen werden (Strecke PP' in Abb. 1 b).

2. Zur Berechnung des linearen Mittelwertes braucht man das Integral der Funktion. Auch dieses ist wenigstens teilweise aus dem Diagramm zu bestimmen. Es lautet nach entsprechender Umformung

$$\int_{t_1}^{t_2} y dt = y_\infty(t_2 - t_1) - T(y_2 - y_1) \tag{7}$$

(Endwert mal Zeitstufe minus Zeitkonstante mal Funktionswert-Stufe) $(y_2 - y_1)$ kann dem Diagramm entnommen werden (Stufe P_1, P_2' in Abb. 1 b). Folgen mehrere Belastungen verschiedener Größe und Zeitkonstante aufeinander, so wird

$$\int_{t_0}^{t_n} y dt = \Sigma y_\infty \Delta t - \Sigma T \Delta y. \tag{7 a}$$

In Abb. 5 a sind einige Belastungen in einem gewöhnlichen Koordinatensystem (t, y) aneinandergestuft. Das erste Glied ist die von den Rechtecken $y_\infty \Delta t$ gebildete Fläche und würde dem

Fall entsprechen, daß die Einrichtung den einzelnen Belastungsphasen sofort unstetig folgen würde, das zweite Glied bildet die Korrektur für die Abrundungen. Ist $\Delta t \gg T$, so kann mit dem ersten Glied allein gerechnet werden (Linie a in Abb. 5 a), das heißt, es kann das elementare Ver-

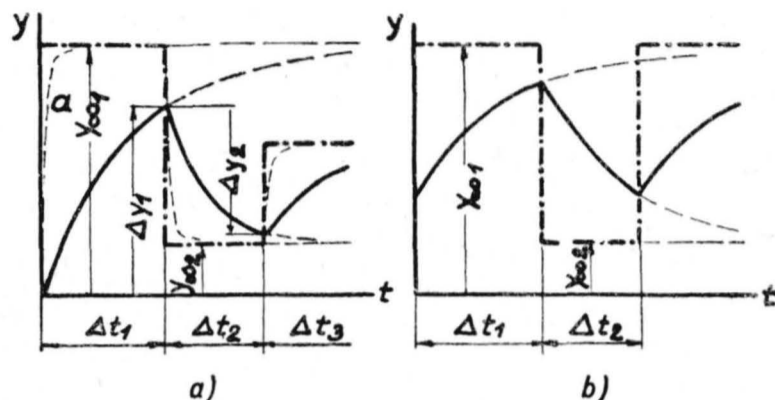


Abb. 5. Zur Erläuterung der Mittelwertflächen
a) allgemein b) DAB im Beharrungszustand

fahren zur Mittelwertbildung für einzelne an sich konstante Zustände angewendet werden. Wenn die Zeitkonstante durchgehend gleich ist, kann T vor das Summenzeichen gesetzt werden und es verbleibt in der Klammer nur der erste und letzte Wert der Funktion y , die Zwischenwerte sind dann ohne Interesse:

$$\int_{t_0}^{t_n} y dt = \Sigma y_\infty \Delta t - T(y_n - y_0) \tag{7 b}$$

Der Beharrungszustand ist dadurch gekennzeichnet, daß y am Anfang und am Ende eines Spieles gleich ist ($y_n = y_0$). Wenn überdies eine einheitliche Zeitkonstante besteht ($T_1 = T_2 = \dots = T$), so vereinfacht sich die Gleichung auf

$$\int_{(t_2)} y dt = \Sigma y_\infty \Delta t \tag{7 c}$$

und es kann also dann das elementare Verfahren für die Bestimmung des linearen Mittelwertes angewendet werden.

3. Zur allfälligen Bestimmung des quadratischen Mittelwertes

$$Y = \sqrt{\frac{1}{\Sigma t} \left(\int_0^{t_1} y^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt + \dots \right)} \tag{8}$$

benötigt man das Integral

$$\int_0^{t_1} y^2 dt = y_\infty^2 t_1 - T(y_1 - y_0) \left(y_\infty + \frac{y_0 + y_1}{2} \right). \tag{9}$$

Es ist hier nur für den Fall berechnet, daß die untere Zeitgrenze Null ist, da dann die Rechnung einfacher als mit allgemeinen Grenzen wird. Wie schon erläutert, läßt sich jede Funktionsgerade durch neue Zeitählung so legen, daß sie bei $t = 0$ beginnt. Das erste Glied entspricht wieder dem üblichen Vorgang zur Bestimmung des quadratischen Mittelwertes bei Zusammenfügen von Rechtecken, das zweite Glied berücksichtigt die Abrundungen. Für den praktisch wichtigen Fall Beharrungszustand, einheitliche Zeitkonstante und

bloß zwei verschiedene Belastungsphasen in einem Spiel vereinfacht sich das Integral auf

$$\int_{(t_s)} y^2 dt = y_{\infty_1}^2 \Delta t_1 + y_{\infty_2}^2 \Delta t_2 - \frac{1}{T} (y_{max} - y_{min})(y_{\infty_1} - y_{\infty_2}). \quad (9 a)$$

Es kann aber nicht verschwiegen werden, daß sich bei Ablesung der y aus dem Raster etwaige Ungenauigkeiten infolge der Differenzbildung in Gl. (9) oder (9 a) stark auswirken können. Wenn die Schwankungen $(y_{max} - y_{min})$ nicht ganz besonders groß sind, unterscheiden sich aber linearer und quadratischer Mittelwert nur um wenige Prozente, so daß der aus anderen Gründen meist übliche Sicherheitszuschlag zur Deckung des Fehlers genügt und oft auf die Berechnung des quadratischen Mittelwertes ganz verzichtet werden kann, zumindest aber durch die überschlägige Rechnung nachzuweisen ist, daß der Unterschied nicht erheblich ist.

Nach dieser theoretischen Vorbereitung soll die vielseitige Anwendbarkeit des Exponentialrasters an Beispielen aus anderen Aufgabengruppen vorgeführt werden.

In einer Schaltung nach Abb. 6 mit einer ungesättigten Drosselspule ist der Schalter periodisch je 0,5 Sekunden geschlossen und je 0,3 Sekunden offen. Es sollen für den Beharrungszustand die Stromschwankungen, der lineare Mittelwert des Stromes und der Effektivwert bestimmt werden.

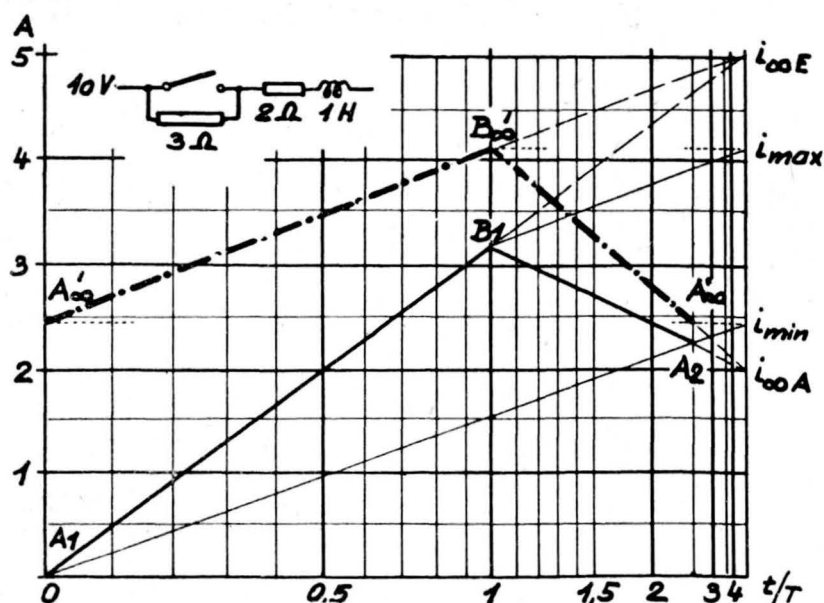


Abb. 6. Stromverlauf in einer Blinkerschaltung

Der Strom verläuft bekanntlich nach Funktion (1), die Zeitkonstante ist L/R . Demnach gilt für das Einschalten

$$T_E = 0,5 \text{ s}, t_E = 0,5 \text{ s}, t_E/T_E = 1, i_{\infty E} = 5 \text{ A}$$

und für das Ausschalten

$$T_A = 0,2 \text{ s}, t_A = 0,3 \text{ s}, t_A/T_A = 1,5, i_{\infty A} = 2 \text{ A}.$$

Damit läßt sich das erste Spiel $A_1 B_1 A_2$ zeichnen und daraus in der bereits geschilderten Art das Spiel im Beharrungszustand $A_{\infty} B_{\infty} A_{\infty}$ konstruieren. Aus dem Diagramm ist abzulesen: $i_{min} = 2,45 \text{ A}$, $i_{max} = 4,1 \text{ A}$. Mit diesen Werten erhält man aus Gl. (7 a) und der Spieldauer $t_s = 0,5 \text{ s} + 0,3 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$ den linearen Mittelwert $i_{mittel} = 3,25 \text{ A}$. Zur Bestimmung des Effektiv-

wertes, das ist des quadratischen Mittelwertes, wird aus Gl. (9) für beide Belastungsphasen das Zeit-Stromquadrat berechnet. Mit Gl. (8) erhält man dann $I_{eff} = 3,3 \text{ A}$, also nicht wesentlich verschieden von I_{mittel} , so daß ein gewisser Sicherheitszuschlag zu I_{mittel} ausreichend ist.

Die Drehzahlen bei Antrieben mit Schwungmassen gehorchen unter bestimmten Bedingungen gleichfalls der Funktion (1). Im weiteren bedeuten:

- GD^2 . . . Schwungmoment,
- J Massenträgheitsmoment,
- M Drehmoment,
- P Leistung,
- n Drehzahl je Minute,
- s Schlupf
- ω Winkelgeschwindigkeit.

- Indices: M . . . Motor,
- L . . . Last,
- B . . . Beschleunigung,
- N . . . Nennbetrieb,
- s . . . Leerlauf („synchron“),
- o und ∞ für Zeit $t = 0$ und $t = \infty$ wie vor.

In vielen Fällen kann innerhalb eines gewissen Bereiches eine lineare Abhängigkeit des Antriebsmomentes von der Drehzahl (Winkelgeschwindigkeit) werden:

$$M_M = M_N \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s - \omega_N}$$

oder mit Einführung des Schlupfes $s = (\omega - \omega_s)/\omega_s$

$$M_M = M_N \cdot \frac{s}{s_N}$$

Für die Beschleunigung verbleibt $M_B = M_M - M_L$. Führt man dies in die Bewegungsgleichung

$$M_B = J \omega'$$

ein, so erhält man die Differentialgleichung

$$s' + \frac{M_N}{s_N \omega_s J} \cdot s = \frac{M_L}{\omega_s J}.$$

Ist M_L konstant, so entspricht das Integral der Funktion (1):

$$s = s_0 + (s_{\infty} - s_0)(1 - e^{-t/T})$$

mit der Zeitkonstante

$$T = \frac{s_N \omega_s J}{M_N} \quad (10)$$

oder als Zahlenwertgleichungen für T in s, GD^2 in kpm^2 , n in min^{-1} , M_N in kpm , P_N in kW :

$$T = \frac{1}{375} GD^2 n_s \frac{s_N}{M_N} \quad (10 a)$$

$$T = 2,74 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot GD^2 \cdot \frac{s_N}{(1 - s_N)} \cdot \frac{1}{P_N}. \quad (10 b)$$

Diesen Bewegungsgesetzen unterliegen zahlreiche Antriebe wie bei Webstühlen, Walzwerken, Stanzen, Scheren usw. Es sei zum Beispiel von einem Antrieb einer derartigen Werkzeugmaschine folgendes gegeben:

- Spieldauer 2,5 Sekunden,
- Drehmoment 10 kpm während 1 Sekunde
- Drehmoment 1,5 kpm während 1,5 Sekunden
- Antrieb durch Asynchronmotor 7,5 kW,
- 1425 U/min, also Nennschlupf 5%,

Schwungmoment von Maschine und Motoren, bezogen auf die Motorwelle 75 kpm².

Nach Gl. (10 b) ist dann die Zeitkonstante $T = 2,9$ s. Aus dem Nennmoment $M = 5,13$ kpm und dem Nennschlupf $s_N = 0,05$ erhält man durch proportionale Umrechnung die Schlupfwerte s_{\sim} , die auftreten würden, wenn der Motor dauernd mit dem oben angegebenen größten oder kleinsten Moment belastet werden würde. Damit hat man alle Unterlagen für den Entwurf des Diagrammes:

Spitzenlast:

$$t_a = 1 \text{ s, } t_a/T = 0,343, s_{\sim a} = 9,75\%$$

Grundlast:

$$t_b = 1,5 \text{ s, } t_b/T = 0,515, s_{\sim b} = 1,46\%.$$

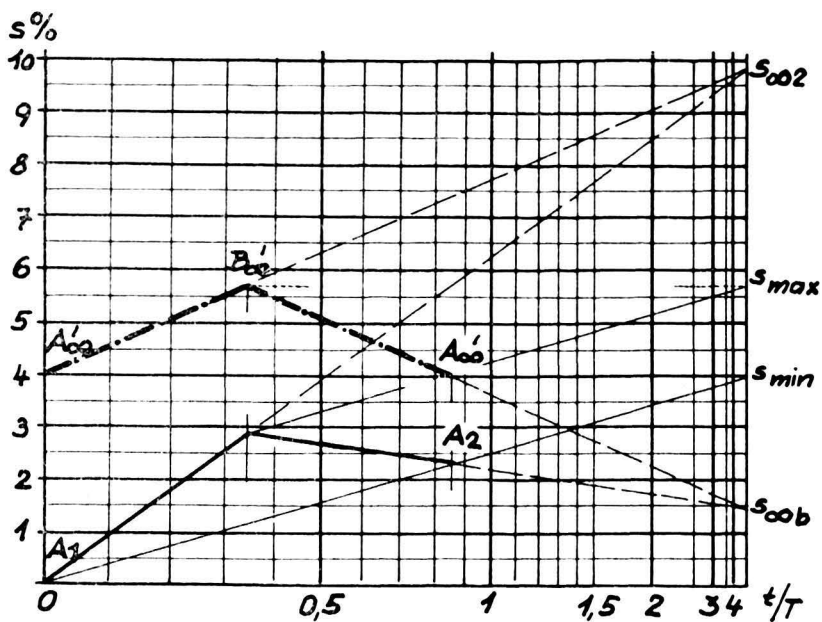


Abb. 7. Verlauf des Schlupfes eines Antriebes mit periodischer Belastung

Da hier nicht mit der Drehzahl, sondern mit dem Schlupf gerechnet wurde, ist das Spiel A_1, B_1, A_2 (Abb. 7) natürlich nicht das erste Spiel des Anlaufes. (Es kann als erstes Spiel aufgefaßt werden, das auftritt, wenn dem Motor nach vollkommenem Leerlauf $s=0$ obige periodische Belastung auferlegt wurde.) Aus A_{\sim} und B_{\sim} erhält man $s_{\text{min}} = 4\%$, $s_{\text{max}} = 5,7\%$. Der mittlere Schlupf nach Gl. (7 c) ist $s_{\text{mittel}} = 4,77\%$. Die thermische Belastung des Motors wird durch den quadratischen Mittelwert des Stromes gekennzeichnet. Dieser kann in gewissem Bereich proportional dem quadratischen Mittelwert des Schlupfes angenommen werden. Aus den Gl. (9b) und (8) erhält man dafür $s_{\text{eff}} = 4,8\%$. Der Motor mit 5% Nennschlupf wird also gerade ausreichen. Es wäre an Hand des Diagrammes möglich, den Einfluß der verschiedenen Konstanten, wie Nennleistung, Nennschlupf, Schwungmoment zu untersuchen. Dies würde aber den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Es sei noch erwähnt, daß die Zählertriebe den gleichen Bewegungsgesetzen gehorchen, bei ihnen ist aber nicht die Drehgeschwindigkeit, sondern deren Zeitintegral, die Gesamtanzahl der Umdrehungen von Interesse. Die Betrachtung der Gl. (7 c) zeigt aber sofort, daß der Zähler bei periodisch schwankender Last richtig zeigt, selbst wenn die stationären Drehzahlen nicht erreicht werden. Bei

$i^2 t$ - und $u^2 t$ -Zählern ist es allerdings anders, es verbliebe ein Fehler entsprechend dem zweiten Glied der Gl. (9 a).

Der Wert des geschilderten Verfahrens liegt darin, daß zahlreiche Fragen aus der Praxis ohne Anwendung transzendenter Gleichungen gelöst werden können, und zwar

1. so einfach, daß auch mathematisch minder-geschulte Kräfte die Lösung der Aufgaben übernehmen können,

2. so rasch, daß es keine Mühe macht, Aufgaben, die einer strengen Lösung widerstehen, versuchsweise durch verschiedene Annahmen näherungsweise zu behandeln,

3. so anschaulich, daß der Lösungsvorgang ständig überwacht werden kann, was bei rein rechnerischen Verfahren nicht möglich ist. Man gewinnt einen Überblick über etwa vorhandene Möglichkeiten und erforderliche Maßnahmen und kann deren Einfluß leicht abschätzen. Es ist sogar in vielen Fällen einfacher, allgemeine Formeln nicht unmittelbar, sondern an Hand des Diagrammes abzuleiten. Nach Berechnung der Schnittpunkte der Geraden mit linearen Gleichungen erhält man nach Ersatz von z durch Gl. (4) das gewünschte Ergebnis.

Es braucht nicht besonders erläutert zu werden, daß das Verfahren auch auf anderen Gebieten von Wert sein dürfte, zum Beispiel für gewisse vereinfachte Regelvorgänge, Diffusions- und Lösungsvorgänge oder andere asymptotische einem Gleichgewichtszustand zustrebende Reaktionen in der Physik, Chemie und Biologie.

Literaturverzeichnis

- ¹ Mič H., Ableitung einer allgemeinen Erwärmungskurve und deren Anwendung, E und M 48 (1930) S. 389; Kayser K. M., Fluchtlinientafel zur Ermittlung der Enderwärmung, ETZ 64 (1943) S. 683; Feichtinger H., Erwärmungsverhältnisse beim periodischen Betrieb in graphischer Behandlung, E und M 67 (1949) S. 250. — ² Wolf F., Nomographisches Verfahren zur Lösung wärmetechnischer Probleme sowie mathematisch verwandter Aufgaben, Wiss. Veröff. Siemens-Werke 3 (1923/24), S. 77. Referat E und M 42 (1924) S. 221. — ³ Dantscher F., Nomographische Bestimmung der Erwärmung und Überlastbarkeit von Öltransformatoren, Siemens-Z. 14 (1934) S. 136; Kother H., Zeichnerisches Verfahren zur Vorausbestimmung der betriebsmäßigen Erwärmung, insbesondere von Bahnmotoren, ETZ 58 (1937) S. 632; Franzen J., Exponentialtafel zur Ermittlung der Enderwärmung, ETZ 65 (1944) S. 269. — ⁴ Zum Beispiel Lenk H., Zur Berechnung asynchroner Antriebe mit stoßartiger Drehmomentcharakteristik, E und M 49 (1931) S. 293; Heiler L., Über die Berechnung des elektrischen Antriebes mit Schwungmassen, E und M 53 (1935) S. 519; Heiler L., Eine neue Formel zur Berechnung des elektrischen Antriebes mit Schwungmassen, E und M 56 (1938) S. 33; Wagner L., Der Zusammenhang zwischen Anlaßzahl und Schalthäufigkeit, E und M 56 (1938) S. 489; Knaack W., Erwärmungsberechnung von Öltransformatoren mit Selbstkühlung und regelmäßig schwankender Belastung, E und M 58 (1940) S. 69; Lesch G., Antriebe mit stoßweiser oder wechselnder Belastung in durchlaufendem Betrieb, ETZ 71 (1950) S. 316.

Das Saalachkraftwerk der Stadt Salzburg

Von Dipl.-Ing. H. Lechner, Salzburg und H. Rotter-Woletz, Wien

Allgemeines

Im Frühjahr 1951 konnte nach langer, unter denkbar schwierigsten Umständen vor sich gegangener Bauzeit das Saalachwerk der Stadt Salzburg mit allen drei vorgesehenen Maschineneinheiten dem Betrieb übergeben werden. Damit ist ein Abschnitt erreicht, der zu einem kurzen Bericht über das Bauwerk selbst berechtigt, zumal es sich nicht um eine übliche, auf langjährigen Erfahrungen und in der Praxis bewährten Bauweise handelt, sondern, wie ja hinreichend bekannt ist, um ein sogenanntes überflutbares Wehrkraftwerk mit Rohrturbinen (ehemalige Bauart Unterwasserkraftwerk System Arno Fischer). Die Vorgeschichte des Baues erklärt diesen Umstand.

In Fluß-km 2,94 der Saalach, also unweit der Einmündung der Saalach in die Salzach, war seinerzeit ein Grundwehr dicht unterhalb der Reichsbahnbrücke (Strecke Salzburg—München) errichtet worden, welches zuletzt im Jahre 1940 beim großen Hochwasser derart zerstört wurde, daß die Brücke bezüglich der Standfestigkeit ihrer Gründung so sehr gefährdet war, daß mit ihrem Ausfall gerechnet werden mußte, — ein Umstand, der während der Kriegszeit, nicht zuletzt aus strategischen Gründen, die zuständigen Stellen zur Abhilfe veranlaßte. Die dauernde Beseitigung der Gefahr schien nur durch Errichtung eines festen Stützwehres zur Verringerung der Fließgeschwindigkeit bei hohen Wasserständen gegeben zu sein, wobei die Untersuchungen die Zweckmäßigkeit des Baues in km 2,5, das sind kaum 500 m unterhalb der Bahnbrücke, ergaben. Die Auswertung des hiedurch in unmittelbarer Nähe der Stadt Salzburg gelegenen Stauwerkes zur Stromerzeugung war naheliegend. Das entsprechende Anbot veranlaßte daher die Stadtgemeinde, nachdem die von der Deutschen Reichsbahn und den Ländern Bayern und Salzburg in Aussicht gestellten Beiträge zufriedenstellend waren, das Kraftwerk zu errichten, konnte doch mit Rücksicht auf die aufgezwungene Bauweise und die Notwendigkeit der Brückensicherung mit einer höheren Dringlichkeitseinstufung gerechnet werden. Sie wurde durch die Forcierung anderer Kraftwerksbauten leider nicht gewährt, so daß weder die im Jahre 1941 aufgezugene Baustelle selbst, noch die Herstellerfirmen der Maschinen und Wehrrmaturen jene staatliche Unterstützung bei der Beistellung von Arbeitskräften und Material erhielten, die zur Einhaltung der ursprünglich vorgesehenen Bauzeit von zwei Jahren notwendig gewesen wäre. Bei Kriegsende war daher von dem in drei Bauabschnitten zur Ausführung gelangten Wehr nur das linke und rechte Wehrdrittel erstellt, während das mittlere Drittel erst gegründet war. Es konnte so nicht verhindert werden, daß das Bauwerk in den Maitagen 1945 versoff.

Mittlerweile war die Saalach wieder Grenzfluß geworden, die zum Teil weitgehendst fertiggestell-

ten Maschinen- und Anlageteile mußten bei anderen Firmen neu in Auftrag gegeben werden. Grenz- und Devisenschwierigkeiten taten ein übriges, um den an sich schon zögernd vor sich gegangenen Baufortschritt zu erschweren. Nur so erklärt sich die lange Bauzeit und abschließend die Freude am Gelingen des Werkes.

Die Bauart selbst ist heute in Fachkreisen noch sehr umstritten. Es wird speziell in Österreich vielleicht sogar an Hand der Betriebsergebnisse des Saalachwerkes möglich sein, die Vor- und Nachteile gegeneinander so abzuwägen, daß ein endgültiges gerechtes Urteil gefällt werden kann, wobei von vorneherein zu beachten ist, daß hydraulische Erwägungen die Verwendungsmöglichkeit begrenzen. Den Verfechtern der gewählten Bauweise, welche als wesentlichste Vorteile das vorzügliche Einfügen in die Landschaft, den Gefällsrückgewinn, die krümmungsarme Triebwasserführung, die Überflutbarkeit des gemeinsamen Wehrkörpers, geringe Spaltwasserverluste, das Vermeiden einseitiger Wasserführung im Fluß, sowie die tiefe Lage der Turbineneinläufe ins Treffen führen, stehen gewichtige Argumente bezüglich des Turbinenwirkungsgrades, des Reparaturaufwandes, der zahlreicheren Betriebsausfälle und des größeren Bauaufwandes der ablehnenden Kreise gegenüber. Nur auf echten Voraussetzungen basierende Vergleiche werden dem Ingenieur in Zukunft Diskussionsgrundlage für die Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Bauform geben können.

Wasser- und Energiehaushalt

Als Ausbauwassermenge wurden $60 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt, wobei diesem Gedankengang auch die Erwägung Pate stand, daß von den 60 für den Lech- ausbau bestimmt gewesenen Turbineneinheiten vorerst zwei Stück mit einer Schluckfähigkeit von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ abgezweigt werden konnten. Als dritte Turbine war schon bei der ursprünglichen Projektierung eine doppelregulierte Propellerturbine vorgeschlagen, weil nur dadurch ein günstiger Werkswirkungsgrad erreicht werden kann.

Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 1135 km^2 und ist orographisch bestens erschlossen. In Abb. 1 sind die Abflußmengen Dauerlinien (Überschreitungsdauer) der Saalach bei Freilassing und Rott gemäß genaueren Aufzeichnungen der bayrischen Landesstelle für Gewässerkunde dargestellt. In Tab. 1 werden zur Übersicht das größte, kleinste und mittlere Monatsmittel des Abflusses in m^3/s für einzelne Zeitabschnitte angegeben. Demnach wird im vorgesehenen Ausbau eine mittlere Gesamtjahresdarbietung für das Normaljahr von 22,3 GWh errechnet, eine Menge, die heute schon fast zur Gänze im eigenen Netz untergebracht werden kann und die vor allem deshalb in ihrer Wertigkeit gewinnt, weil die bestehenden Wasserkraftwerke der Stadt Salzburg

Mitteldruckspeicherwerke sind und in Zukunft unter Berücksichtigung des stetig steigenden Stromabsatzes rationeller eingesetzt werden können.

Tabelle 1

Monatliche Abflußmenge	Jänner	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Größtes Monatsmittel	55	49	66	118	186	129	116	101	135	58	55	58
Kleinstes Monatsmittel	10	11	16	28	41	40	30	16	12	14	12	12
Mittleres Monatsmittel	22	21	35	71	93	75	65	58	49	31	25	23

Aus Tab. 1 ist ferner ersichtlich, daß das mittlere Monatsmittel der Abflußmenge im Mai infolge der starken Schneeschmelze am größten ist. Als

Energiedarbietung im allgemeinen günstig auswertet läßt. Auch das vielfach um die Jahreswende eintretende Regen- und Tauwetter bringt dem alpinen Saalachfluß Schmelzwasser in einer für die Stromerzeugung brauchbaren Größenordnung. Unangenehme Erscheinungen der Saalach sind sowohl die Intensität der auftretenden Hochwässer als auch das niederste Niederwasser. Es betragen im Zeitraum 1901—1930

- NQ = 7,3 m³/s
- HQ = 770,0 „
- MNQ = 10,7 „
- MQ = 44,9 „
- MHQ = 378,0 „

Das Stützwehr mußte jedoch um das Katastrophenhochwasser abführen zu können, für eine Schluckfähigkeit von 1000 m³/s also HHQ berechnet werden.

Baulicher Teil

Die geologischen Erhebungen zeigten keine günstigen Ergebnisse. Im Bereich der Wehrfundierung wird nach einer relativ geringen Kies-schicht schon Schwemmsand angetroffen, der schluffig und schlufftonig ist und allmählich in Schluffton übergeht. Als Gegenmaßnahme gegen eine allfällige Unterströmung des Bauwerkes wurde eine Gründungsspundwand von 8 m Bohlenlänge unter dem Bauwerk geschlagen, sowie an der Wehrsohle ein Terzaghi-filter angeordnet und so eine Entspannung der Gründungssohle auf der Wehrunterseite sowie die Standfestigkeit sichergestellt, Kontrollmanometer welche im Maschinenhaus ablesbar sind und deren Standrohre in den Filterkoffer reichen, zeigen die hydrostatische Druckhöhe und somit jede allfällige Veränderung der Gründungsfuge an.

Zum Schutz gegen seitliche Umströmung wurden auf der Oberwasserseite in einer Länge von 40 m Spundwände mit den Ufermauern vorgezogen, während im Unterwasser als Böschungssicherung eine 60 m lange, mit einer Spundwandschürze versehene Betonstützmauer, die speziell verankert ist, geschaffen wurde, was auch im Hinblick auf die Schwemmsandfundierung zweckmäßig erschien.

Die unbedingte Sicherheit der Abführung des Katastrophenhochwassers bestimmt die Wehrlänge. Die gesamte Ausdehnung des quer zur Flußachse liegenden Bauwerkes beträgt 80 m, wovon 66,5 m auf den Wehrteil mit den 7 aufgesetzten je 9,5 m langen und 2,15 m hohen Wehrklappen, 10 m auf das am österreichischen Ufer liegende Eingangsbauwerk und 3,5 m auf das am bayrischen Ufer liegende Ausgangsbauwerk entfallen.

Vier Leerschüsse und drei Turbineneinläufe sind, wie aus Abb. 2 ersichtlich, im Wechsel nebeneinander angeordnet. Bei einer lichten Weite der Grundablaßöffnung von 8,0 × 3,2 m kann nach Öffnen der Gleitschützen eine Wassermenge von je 140 m³/s abgeführt werden, welche zusammen mit der über die Wehrklappen möglichen Über-

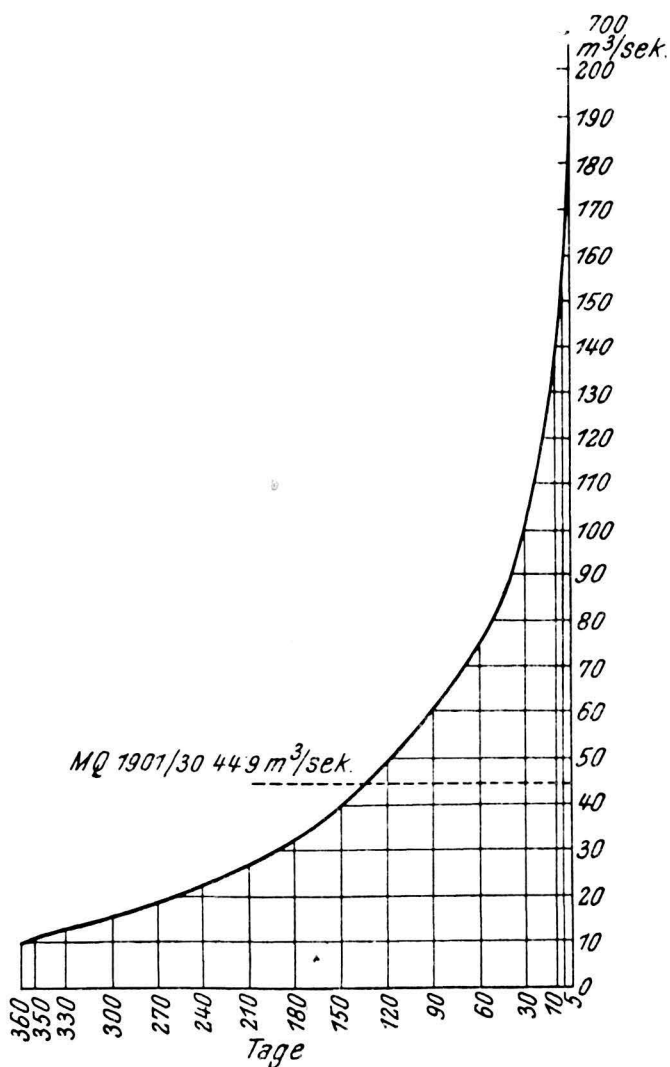


Abb. 1. Wasserdarbietung

kennzeichnendes Merkmal für den alpinen Abfluß aus den Kalkalpen ist noch zu ersehen, daß starke Über- und Unterschreitungen der Monatsmittel der einzelnen Jahre gegenüber dem langjährigen Monatsmittel eintreten. Diese Tatsache läßt darauf schließen und dies wurde auch während des Baues oft genug empfunden, daß bei starken Regenfällen oder auch geringerem Tauwetter die Saalach wesentlich früher und rascher ansteigt als beispielsweise die Salzach oder andere Hochgebirgsflüsse mit weniger steil abfallendem Niederschlagsgebiet, ein Umstand, der sich in der

fallsmenge von 460 m³/s die geforderte Abfuhr von 1000 m³/s gestattet.

den Turbinen und Generatoren und andererseits günstigere Lüftungsverhältnisse des Umspannerraumes oder die Unterteilung des Umspannerraumes oder die Unterteilung in zwei Transformatoreinheiten geschaffen werden können.

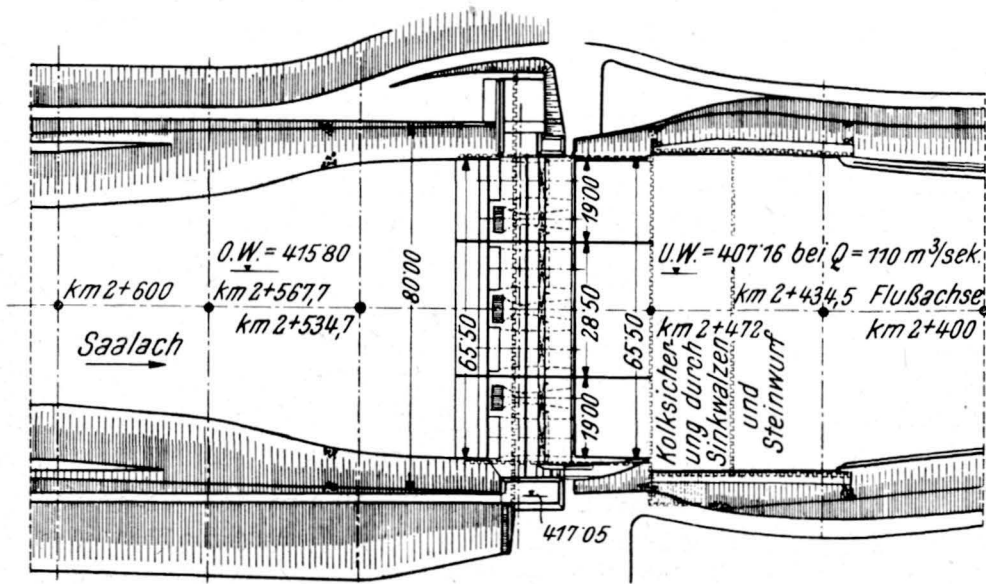


Abb. 2. Grundriß

Den Hauptquerschnitt des Bauteiles zeigt Abb. 3. Es handelt sich um einen massiven Grundbau, der keilförmig in den Baugrund eingreift. Eine genauere Darstellung bleibt einem später folgenden Bericht, der auch den Gesamtaufwand an Baustoffen und Eisen bekanntgibt, vorbehalten. Die beiden Trennungsfugen zwischen den drei Bauabschnitten sind mit Quelhölzern, Teerstricken und Aluminiumblechen bestens gedichtet. Völlige Trockenheit der Innenräume des überfluteten Wehres wird durch Porösbetonschichten erreicht, die auf allen Innenflächen des Bauwerkes angebracht wurden. Auf die im Beton haftenden Porösplatten wurde in drei Lagen eine Spritzputzschicht aufgetragen, die dann normal verputzt wurde.

Von Decken- und Wandzubringerkanälen wird das Entwässerungssystem des ganzen Bauwerkes gebildet. Sie münden in Sammelkanäle, die ihrerseits wieder in den kreisförmig und leicht bekriechbar ausgebildeten, in der Wehrachse liegenden Entwässerungskanal geführt werden, der an den Enden durch zwei reichlich bemessene Pumpenräume abgeschlossen wird.

Infolge der über den ganzen Staubereich sich hinziehenden großen Flußtiefe konnten die zu errichtenden Uferdämme mit relativ geringen Ausmaßen erstellt werden. Sie haben selbst in unmittelbarer Nähe des Werkes nirgends die Höhe von 3 m überschritten.

Die bauliche Gliederung läßt — hätten nicht kriegsbedingte Beschränkungen berücksichtigt werden müssen — den Wunsch nach Verbesserungen offen, die ohne eine ins Gewicht fallende Überschreitung der Baukosten in einer Vergrößerung der Turbinengruben und in einer Erweiterung des Eingangsbauwerkes bestehen müßten. Dadurch hätten einerseits eine leichtere Zugänglichkeit zu

Maschinelles Teil

Entsprechend einer Ausbauwassermenge von 60 m³/s gelangen drei Maschinengruppen in Schräglage (Neigung 1 : 2) zur Aufstellung. Zwei Rohrturbineneinheiten mit 19,96 m³/s Schluckfähigkeit leisten bei einem Bruttogefälle von 8,45 m und der Nenndrehzahl von 214,3 U/min je 1855 PS. Sie sind mit festem Laufrad und beweglichem Leitrad versehen und mit je einem Drehstromsynchrongenerator von 1750 kVA gekuppelt. Die dritte Turbine soll mit Doppelregulierung versehen werden, analog der von der Erzeugerfirma Escher Wyss Ravensburg, bereits an der Illerstufe 8 zum Einbau gelangten Maschine. Um jedoch die Betriebserfahrungen mit dieser Erstlingskonstruktion abzuwarten und um noch allfällige Verbesserungen durchführen zu können, wurde zunächst ein festes Laufrad für 15 m³/s eingebaut, das später nach vollendeter Entwicklung gegen ein solches mit verstellbaren Schaufeln vertauscht werden soll. Der Generator für die doppelregulierte Turbine wurde für 2000 kVA ausgelegt, so daß das Werk eine installierte Generatorscheinleistung von 5500 kVA erhielt.

Es darf als bekannt vorausgesetzt werden, daß das Charakteristikum der Rohrturbine der ohne Umlenkung durchflossene Generator ist, das heißt über den axial angeströmten Leitapparat wird das

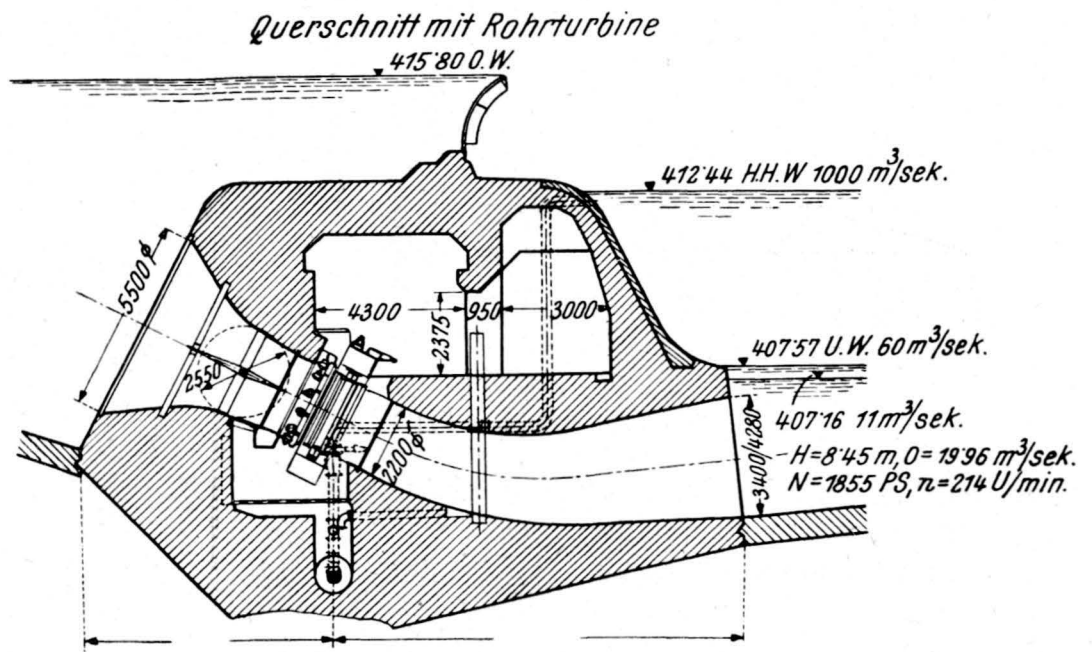
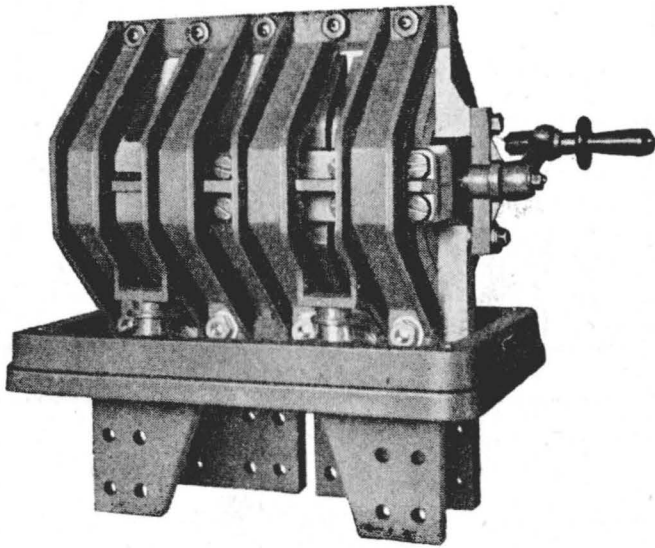


Abb. 3. Hauptquerschnitt

Laufrad getrieben, auf dessen äußerem Kranz der Rotor des Generators aufgeschraubt ist. Das auf der Turbinenwelle fest aufgekeilte fünfblügelige Laufrad ist in einem vorderen und einem rückwärtigen Armstern in zwei Führungslagern ge-

SEIT DEM JAHRE 1893



Spindelumschalter 10.000 A

sind wir an vielen Stufen der Weiterentwicklung der Elektrotechnik mitbeteiligt. Einer der wertvollsten Beiträge ist die Lösung des Problems, Motoren einwandfrei gegen Überlast zu schützen: unser Motorschutzschalter PHYLAX.

Zahlreiche Ausführungen von Schützen, Fern- und Selbstschaltern bis zu den höchsten Stromstärken, daneben alle Arten Schalt- und Sicherheitsgeräte für Nieder- und Hochspannung sind in unseren Werkstätten seither gebaut worden.

ELEKTROTECHNISCHE FABRIK **SCHEIBER & KWAYSSER**

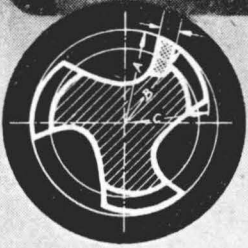
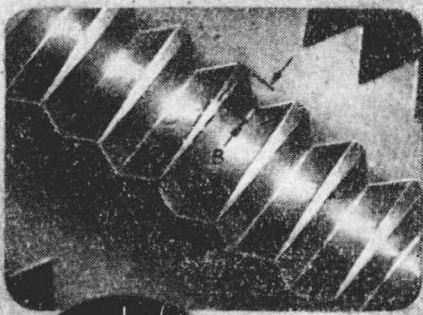
GESELLSCHAFT MBH

GEGRÜNDET 1893

Wien XIV, Linzer Straße 16 **A 312 90/91**

des Werkmeisters Erfahrung:

nur Ultra-Freischliff
> Gewindebohrer <



GERADE
KONISCH
SPIRAL



E. SCHRACK
- ELEKTRIZITÄTS - A. G. -

WIEN, XII, POTTENDORFERSTR. 25-27 · TEL. R32-500



KOCH & KÖRNER

ELEKTRO GESELLSCHAFT M. B. H.
WIEN XX, OSPELGASSE 22-24

TELEFON: A 46-2-40

Telegramm-Adresse: THERMOKOCH

Hochleistungsluftschütze

40, 60, 100, 200, 350, 600 Amp.
Drehstrom bis 500 V, Gleichstrom bis 440 V

Betätigungsgeräte, Schaltanlagen

Schützensteuerungen

Elektroheizte Industrieöfen für die Eisen-, Metall-,
chemische und keramische Industrie

MOTORKONDENSATOREN



für Einphasen Kond.-Motore und
für Anschluß von Drehstrom-
motoren an das Einphasennetz

KONDENSATOREN für Leuchtstoffröhren
GANGBARE TYPEN AB LAGER LIEFERBAR

KONDENSATORENFABRIK
DR. KÖNIG & Co., WIEN

VII, KAISERSTRASSE 46

B 35-2-83




SIEMENS
AUSTRIA

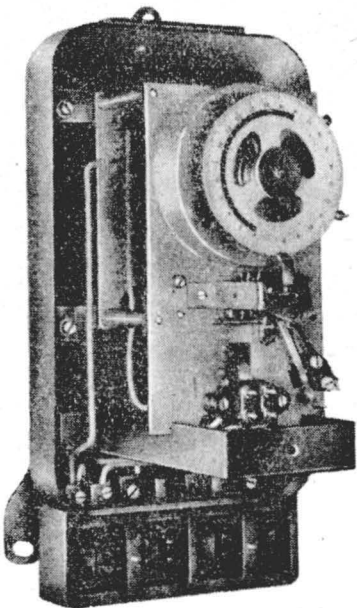
PRÄZISIONS- Z-STROMWANDLER

Klasse 0,1 bei 5 VA

Primäre Nennströme: 10, 25, 30, 50
100, 125, 150, 200
250, 300, 500, 600A
sekundärer Nennstrom: 5 A
Prüfspannung: 3 kV

SIEMENS & HALSKE
GESELLSCHAFT M. B. H.
WIEN III, APOSTELGASSE 12
TELEFON U 19-5-80

G R A Z, KEESGASSE 4 — TELEFON 7111
SALZBURG, SCHWARZSTRASSE 8 — TELEFON 46-97
KLAGENFURT, BENEDIKTINERPLATZ 10 — TELEFON 26-71
L I N Z, MOZARTSTRASSE 1 — TELEFON 26 301
INNSBRUCK, BISMARCKPLATZ 1 — TELEFON 21-08
B R E G E N Z, R Ö M E R S T R A S S E 12 — TELEFON 31-21/22



TARIF- und ZEITSCHALTUHREN

mit elektrischem Aufzug

ÖSTERREICHISCHE QUALITÄTSARBEIT

DANUBIA A.G.

WIEN XIX

KROTTENBACHSTR. 82-88

FERNRUF B 11-506 △

lagert, wobei das rückwärtige Führungslager mit dem Spurlager zusammengebaut ist.

Die ursprünglich an der Turbine aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Beherrschung des Spaltwassers wurden an Hand der am Lech und an der Iller gewonnenen Erfahrungen vollends durch Spezialgummidichtungen im Laufradspalt des oberwasserseitigen und unterwasserseitigen Turbinengehäuses behoben. Man ist heute damit einwandfrei in die Lage versetzt, den Spaltwasserverlust auf jenes Minimum herabzudrücken, das zur Schmierung und Kühlung der Gummidichtungen nötig ist. Es wird das an den Laufraddichtungen auftretende Wasser, ebenso wie das am Turbinengehäuse allenfalls auftretende Kondenswasser, in Fanggehäusen und Fangschalen gesammelt und dem Leckwasserkanal zugeleitet.

Vielfach mit Skepsis beurteilt wurde bisher nicht nur der Verlauf der Turbinenwirkungsgradkurve sondern auch der optimale Wirkungsgrad, woran auch die während des Krieges verfügte Geheimhaltung schuldtragend war. Jedenfalls wurden an der Lechstufe 10 unter der objektiven Leitung des Herrn Professors R. Dubs der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich im Beisein des Herrn Geheimrates Dr. Ossanna der Technischen Hochschule München, Abnahmeversuche mit einer Rohrturbine gleicher Konstruktion, jedoch horizontaler Achslage vorgenommen, über deren Ergebnisse in allernächster Zeit in der Fachliteratur berichtet werden soll. Ohne diesen Mitteilungen vorzugreifen, kann jedoch heute aus den Schlußfolgerungen der hydraulischen Sachverständigen gesagt werden, daß die von der Herstellerfirma garantierten Leistungen nicht nur erreicht, sondern sogar um 14% überschritten wurden und daß die Wirkungsgrade speziell bei höheren Belastungen ebenfalls wesentlich besser sind als garantiert wurde und optimale Werte von über 90% erreichen, welche bei Schräglage und Anwendung einer niedrigeren Drehzahl von 187 U/min sowie Vorverlegung der Drosselklappe zur Erreichung einer noch günstigeren Anströmung nicht unerheblich überschritten werden.

Der Ständer der 3150 Volt erzeugenden Generatoren (Herstellerfirma Brown Boveri & Cie. Mannheim) ist jeweils axial fast um seine ganze Breite verschiebbar, so daß rasche Kontrollen und Reparaturen an den Wicklungen sowie am Laufrad vorgenommen werden können.

Alle Generatoren besitzen Fremderregung und Schnellregelung. Die Erregerumformer sind mit Schwungmassen versehen, um bei Sammelschienen- oder Leitungskurzschlüssen die Kurzschlußerregung liefern zu können.

Die Rohrturbinenaggregate sind mit allen notwendigen Sicherheitseinrichtungen, welche auf Schnellschuß arbeiten, versehen. Zu ihnen gehören: Kritische Lagertemperatur, Überdrehzahl, Mindestöldruck am Windkessel, axiale Laufradverschiebung, Ausfall der Steuerspannung sowie ein vollständiger Generatorschutz.

Als Turbinenabschlußorgane sind oberwasserseitig hydraulisch angetriebene Drosselklappen, unterwasserseitig von Hand zu betätigende Stahlblechschieber verwendet. Die Praxis zeigte, daß Notverschlüsse, wenn schon nicht unbedingt notwendig, so doch sehr zweckmäßig sind. Entgegen der ursprünglichen Konstruktion wurde deshalb noch nachträglich eine Wehrrückenverlängerung ausgeführt, in welcher die unterwasserseitigen Dammbalken im Turbinenauslauf mittels eines Schwenkmastes eingesetzt werden können, oberwasserseitig werden die am linken Ufer betriebsbereit gelagerten Dammbalken von einem Versetzwagen, der zugleich die Rechenreinigungsmaschine

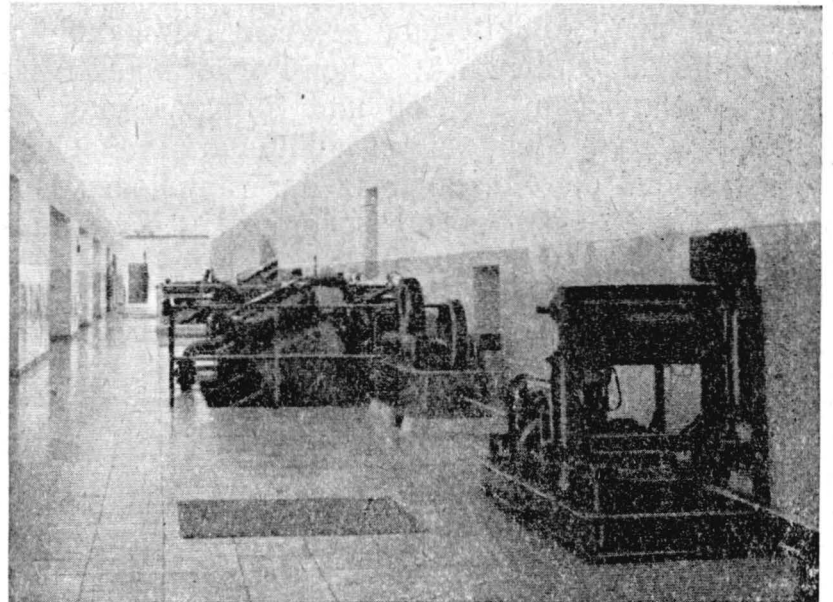


Abb. 4. Maschinenhalle mit Grundablaß und Generator trägt, ohne Spiegelabsenkung eingebracht.

Sämtliche Abschlußorgane und auch alle Wehrrarmaturen sind von der MAN, Werk Gustavsburg, als in der Praxis vielfach bewährte Konstruktionen geliefert und werden mit Ausnahme der Schieber elektrisch oder hydraulisch betätigt, wobei für den Antrieb der Wehrklappen Einzel- und Zentralsteuerung vorgesehen ist.

Bemerkenswert erscheint auch die Tatsache, daß der Kraftbedarf sämtlicher Hilfsbetriebe (Wehrantriebe, Leckwasserpumpen, Ölpumpen, Erregerumformer, Druckluftherzeugung und so fort) nach bisherigen Feststellungen im Mittel kaum 2% der Gesamterzeugung beträgt.

Von außerordentlicher Bedeutung für den Betrieb jedes in einem Flußlauf liegenden Kraftwerkes ist die einwandfreie Leckwasserhaltung. Größten Ansprüchen genügen die beiden je 2500 l/min fördernden Sumpfpumpen, deren tägliche Laufzeit zusammen zirka 20 Minuten erreicht. Weiters ist noch daran gedacht, eine Unterwasserpumpe aufzustellen, die direkt über das im Ausgangsbauwerk aufgestellte automatische Dieselaggregat angeschlossen wird.

Elektrische Anlage

Die Unterbringung der gesamten Schaltanlage für die 3 kV-, als auch für die 30 kV-Seite einschließlich des Transformatorenraumes, geschah im Wehrkörper und in dem am rechten Ufer gele-

genen Eingangsbauwerk, so daß außer den Betriebswohngebäuden keine weiteren Nebengebäude zu erstellen waren. Sowohl die Disposition, als auch die Gesamtlieferung der Anlage erfolgte durch die Firma Österreichische Brown Boveri Werke A. G., Wien.

Die Bauart eines Unterwasserkraftwerkes weist, sowohl hinsichtlich der elektrischen Einrichtungen, als auch deren Unterbringung einige Besonderheiten auf. So ist zum Beispiel die Anordnung von direkt getriebenen Erregermaschinen und Spurlager-Ölpumpen nicht möglich. Auch der Turbinenregler hat gewisse besondere Merkmale, die durch das Fehlen der Pendeldynamo und des Sicherheitspendels gegeben sind. Damit ergeben sich für die Projektierung gewisse Bedingungen, wobei hier noch die zusätzlichen Forderungen nach vollautomatischem Betrieb und Fernsteuerung zu erfüllen waren. Nicht zuletzt mußte darauf geachtet werden, daß die Anlage trotz der räumlichen Benegtheit möglichst betriebssicher und gefällig ausgebildet wird (Abb. 5 u. 6).

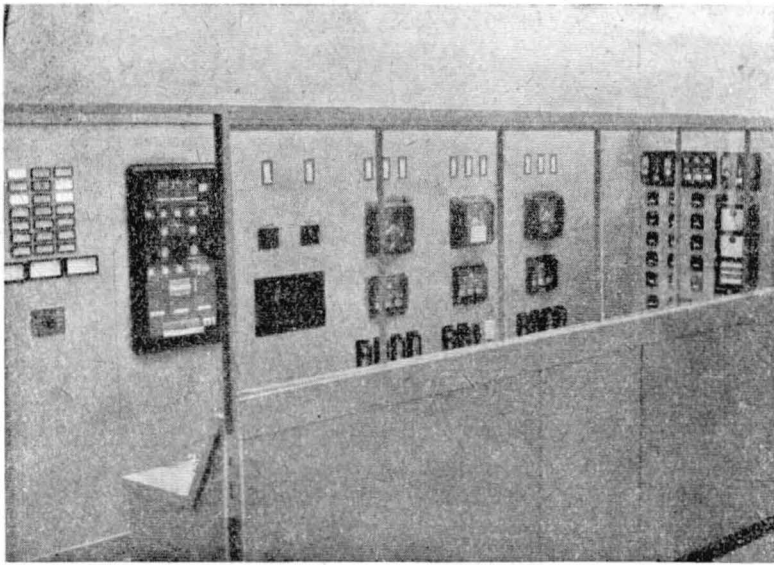


Abb. 5. Ansicht der Warte vom Maschinengang aus

Da es sich um das erste in Österreich erbaute Unterwasserkraftwerk handelt, soll auf die Einzelheiten besonders eingegangen werden:

Wie bereits erwähnt, ist bei dieser Maschinenbauart die Anwendung von direkt gekoppelten Erregermaschinen nicht möglich und es müssen daher Erregerumformer aufgestellt werden. Hierbei muß beachtet werden, daß die Anspeisung derselben nur dem allgemeinen Netz entnommen werden kann, da eine eigene Energiequelle (zum Beispiel Hausturbine) bei so einem, verhältnismäßig kleinen, Kraftwerk unwirtschaftlich wäre. Damit sind aber die Antriebsmotoren auch allen Netzspannungsschwankungen und Störungen ausgesetzt. Um diese herabzusetzen, erfolgt in Saalach die Anspeisung normal über die 3 kV-Sammelschiene, auf die auch die Generatoren arbeiten. Bricht diese Spannung länger als etwa 1 s zusammen, so schaltet sich der Eigenbedarf automatisch auf die 30 kV-Anspeisung um. Es muß nun sichergestellt werden, daß während dieses kurzen Netzausfalles und vor allem auch im Kurzschluß-

falle, wo die Netzspannung ebenfalls zusammenbricht, die Generatoren hinreichend erregt werden. Dafür bestehen zwei Möglichkeiten. Erstens Aufstellung von Stütztransformatoren und zweitens Aufspeicherung der benötigten Erregerleistung in den rotierenden Massen der Erregerumformer selbst. Die erste Form hat den Nachteil, daß die Stütztransformatoren einen verhältnismäßig großen Platzbedarf haben, teurer sind und, da im Hochspannungskreis liegend, auch eine Störmöglichkeit bedeuten. Erregerumformer mit vergrößertem Schwungmoment vermeiden dies und wurden daher im vorliegenden Falle angewandt. Sie haben zusätzlich den Vorteil, daß bei kurzzeitigem Eigenbedarfsausfall, zum Beispiel durch Überlastung, die Maschinen trotzdem normal am Netz bleiben. Die maximale zulässige Dauer des Ausfalles der Eigenbedarfsanspeisung beträgt im vorliegenden Falle etwa 10 Sekunden bei Vollast.

Um bei einem Netzzusammenbruch bei stillstehenden Maschinen diese wieder anfahren zu können, ist ein Notstromaggregat vorhanden, wel-

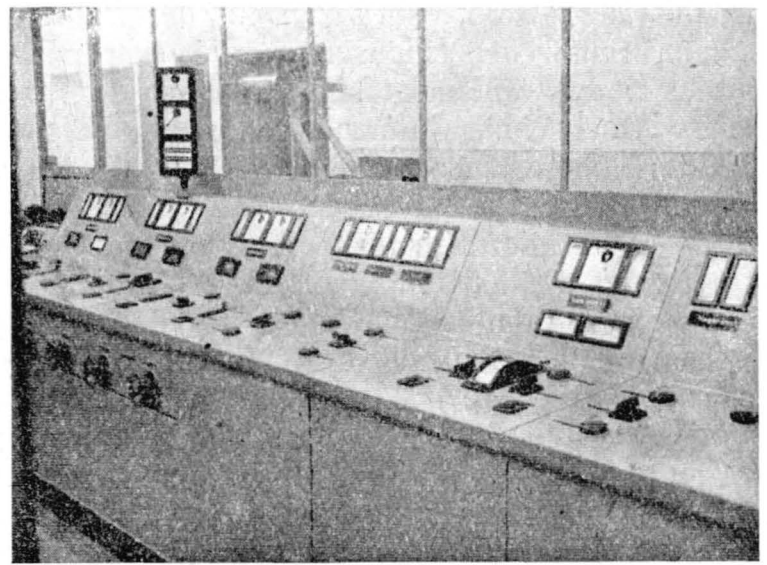


Abb. 6. Bedienungspult in der Warte

ches bei totalem Ausfall des Eigenbedarfes automatisch angelassen wird. Es speist die wichtigsten Notverbraucher, und zwar die Reglerölpumpen, die Leckwasserpumpen und die Wehrmotoren. Ferner kann ein Erregerumformer angelassen werden; wobei dann die anderen verriegelt sind, um eine Überlastung und ein Zusammenbrechen des Notstromaggregates zu vermeiden.

Da die Maschine keine angebaute Pendeldynamo besitzt, wird der Pendeldynamo über einen eigenen Transformator direkt von der Maschine gespeist. Der Turbinenregler besitzt daher auch kein Sicherheitspendel, sondern bei Ausfall des Pendelmotors wird durch ein Spannungsüberwachungsrelais mittels einer Unterstellvorrichtung der Leitapparat der Turbine auf 70% der Leerlaufdrehzahl geschlossen.

Da nicht immer alle Maschinen in Betrieb sind und längere Stillstandzeiten auftreten können, wurde eine zusätzliche Heizung der Generatoren vorgesehen. Sie erfolgt vom Eigenbedarf aus mit Niederspannung. Selbstverständlich ist durch be-

sonders sorgfältige Verriegelung dafür gesorgt, daß keine Hochspannung in den Eigenbedarf gelangen kann. Gegen die Sammelschiene ist je eine mechanische, elektrische und pneumatische Verriegelung eingebaut. Nach dem Generator erfolgt die Verriegelung gegen Erregerumformer, Magnetfeldschalter und Drosselklappe.

Das Werk soll vollautomatisch arbeiten können und fernsteuerbar sein. Es wurde daher die gesamte Gefahrmeldung und Überwachung besonders sorgfältig ausgeführt, wobei praktische jede Gefahrstelle doppelt überwacht wird.

Im einzelnen werden überwacht: Lagertemperatur, Lagerölströmung, Regleröldruck, Rotoraxialverschiebung, Überdrehzahl, Überspannung, Überstrom, Wechselstromausfall, Gleichstromausfall. Um in allen Fällen eine einwandfreie Abschaltung zu gewährleisten, sind Arbeitsstrom- und Ruhestromschaltungen so kombiniert, daß jede Störungsmöglichkeit erfaßt wird. So arbeitet zum Beispiel der Turbinenschnellschluß mit Arbeitsstromauslösung. Desgleichen der 3 kV-Leistungsschalter. Fällt jedoch der Gleichstrom aus, so wird die Maschine durch die zusätzlich am Leistungsschalter vorhandene Nullspannungsauslösung vom Netz getrennt. Gleichzeitig werden die Ölsteuerventile, welche bisher elektromagnetisch die Drosselklappe geöffnet hielten, durch Federkraft geschlossen. Damit wird auch die Drosselklappe geschlossen und die Maschine abgestellt. In ähnlicher Form erfolgt die Störungsüberwachung auch in allen anderen Fällen.

Die Bedienung der Maschinen kann auf verschiedene Art erfolgen, und zwar entweder am Turbinenregler und an der Turbinentafel oder von der Warte aus. In ersterem Fall kann jede einzelne Phase einzeln eingeleitet werden, wobei bei eventuellen Fehlschaltungen die Maschinen sofort stillgesetzt werden. Wird die Maschine von Hand gesteuert, so ist die Warte ausgeschaltet, das heißt, es kann selbstverständlich von dort der Betrieb geführt werden, das Abstellen der Turbine aber ist nur von der Maschine aus möglich. Anders hingegen wenn die Maschine an die Warte übergeben wurde. Dann kann sie durch einen Doppeldruckknopftaster von hier aus mittels Relais in Betrieb genommen und abgestellt werden. Die Relais überprüfen hierbei vor Einleitung des Befehls die Stellungen von Leistungsschalter, Trennschalter, Heizungstrenner und so weiter und bringen diese in die gewünschte Lage. Bei der Fernsteuerung ist der Vorgang analog wie bei der Bedienung von der Warte aus. Hierbei ist zusätzlich vorgesehen, daß bei durch Überstrom gefallenen Leistungsschalter, das „Ein“-Kommando mit demselben Befehl erfolgt, wie bei stehender Maschine das Anlassen.

Für die Synchronisierung ist ein Wahlschalter und ein automatischer Parallelschaltapparat vorgesehen. Der Wahlschalter hat zehn Stellungen. Eine für automatischen Betrieb und die anderen für Handsynchronisierung zur Auswahl der einzelnen Abzweige. Beim Befehl zum Anlaufen einer

Maschine, wird über Synchronisierrelais dieser Abzweig an den Parallelschaltapparat gelegt, welcher anschließend die Maschine parallel schaltet. Durch ein anderes Fernsteuerkommando kann auch die 30 kV- gegen die 3 kV-Schiene synchronisiert werden. Es ist durch geeignete Schaltung dafür gesorgt, daß bei einem immerhin möglichen Versagen eines Relais die Schaltung nicht weiter durchgeführt wird.

Wenn das Kraftwerk zur Spitzendeckung herangezogen werden soll, wird jede Maschine einzeln ferngesteuert. Es ist jedoch eine Einrichtung vorgesehen, durch die das Kraftwerk automatisch die gesamte dargebotene Energie verarbeitet, wobei darauf geachtet wird, daß die Maschinen immer in ihrem günstigsten Wirkungsgradbereich laufen. Wie bereits in vorhergehenden Kapiteln erwähnt, wird das Werk mit zwei einfachgeregelten und einer doppelt-geregelten Turbine ausgerüstet sein, wobei letztere eine etwa 20% größere Scheinleistung hat. Wird nun durch entsprechenden Befehl das Kraftwerk veranlaßt, daß es vollautomatisch läuft und die Maschinen selbsttätig zu- und abgeschaltet werden, so wird als erstes die doppelt-geregelte Maschine angelassen. Über ein Maximalkontakt am Oberwasserpegelmessers (+ 5 cm über Normalstau) wird, falls diese erste Maschine volle Öffnung hat, eine Propellerturbine angelassen, synchronisiert und vollbelastet. Die doppelt-geregelte Turbine wird entsprechend ihrer größeren Leistung auf die verbleibende Restleistung (mindestens 20%) oder je nach dem Wasserstand zurückgeregelt. Sinkt die Öffnung dieser Maschine infolge fehlenden Wassers (gesteuert durch Minimalkontakt am Pegelmessers 2 bis 5 cm Normalstau) auf 20%, so wird die Propellerturbine wieder abgeschaltet und die doppelt geregelte übernimmt die verfügbare Wassermenge. In analoger Weise erfolgt im Bedarfsfalle das Zu- und Abschalten auch der zweiten einfachgeregelten Maschine.

Zu all den vorstehenden Bedingungen, die zu erfüllen waren, kamen noch zwei weitere hinzu, nämlich die räumliche Unterbringung und das Bestreben, eine möglichst sinnvolle und schöne Anordnung zu finden. Diese Forderungen waren keineswegs leicht zu erfüllen. Durch die in die Anlage reichenden Köcher der Wehrklappenantriebe wurde die Schaltanlage zerrissen. Sie wurde daher so aufgebaut, daß jeder Maschine ein geschlossener Block umfassend Erregerumformer, Generatortafel und Generatorschaltzelle zugeordnet wurde. Dazwischen wurden die restlichen Zellen (Kabelabgänge und 5000 kVA-Transformator), die Druckluftanlage und ein Eigenbedaristransformator mit der Eigenbedarfsverteilung untergebracht. Am Ende des Schaltanlagenganges befindet sich noch der Ladegleichrichter und anschließend der Batterieraum. Am Anfang des Schaltganges wurde eine kleine Warte, umfassend eine achtfeldrige Schalttafel und ein sechsfeldriges Bedienungspult, eingebaut. Wie aus den Abb. 5, 6 ersichtlich ist, konnte trotz der gedrängten Anordnung eine ansprechende und übersichtliche

Lösung gefunden werden. Daß bei dem großen Umfang der eingebauten Geräte und Instrumente die Anlage auch von der Rückseite der Schalttafel sauber und gefällig erscheint, ist durch die Verlegung der Leitungen in Kanälen erreicht, die bei einem minimalen Platzbedarf ein Höchstmaß an

Verdrahtung zulassen. Mit Rücksicht auf den Bau war die Anordnung eines Kabelbodens selbstverständlich nicht möglich und die Unterbringung aller Klemmen und Leitungen nicht einfach. Bemerkenswert erscheint auch der minimale Aufwand an Relais trotz vollautomatischer Anlage.

Einfluß der Kettenlinie auf die Zustandsänderung beliebig geneigter Spannungsfelder von Freileitungen

Von K. Kohler, Karlsruhe

Übersicht: Eine Untersuchung der mechanischen Dehnungen hängender Seile führt für den Ausgleich der thermischen und elastischen Formänderungen infolge von Temperatur- und Belastungsschwankungen zu einer neuen Zustandsgleichung, welcher als Seilkurve die Kettenlinie zugrunde liegt.

Die Änderung der mechanischen Spannung einer Freileitung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Last wird allgemein durch die sogenannte Zustandsgleichung dargestellt, welcher gewöhnlich als Seilkurve eine Parabel zweiter Ordnung zugrunde liegt und bei welcher die thermischen und elastischen Dehnungen näherungsweise aus der Sehlenlänge des Spannungsfeldes bestimmt werden. Bei straff gespannten Leitern mögen keine Bedenken gegen diese Annahmen bestehen. Da sich aber diese Beziehung grundsätzlich aus sehr kleinen Differenzen großer Zahlen ergibt, scheint es für Fehlerabschätzungen und zur Feststellung von Gültigkeitsbereichen zweckmäßig, den Vorgang genauer unter Verwendung der Kettenlinie zu erfassen. Wenn es gelänge die elastische Kettenlinie handlich darzustellen, würde die Gleichung dieser Kurve die fraglichen Zusammenhänge über das Längenintegral sofort übersehen lassen. Da dies nicht zutrifft, ist man gezwungen von der gemeinen Kettenlinie auszugehen und den Einfluß der Wärme auf die Spannungsverteilung im Leiter durch besondere Überlegungen getrennt zu beschreiben.

Regelmäßig wird vorausgesetzt, daß sich die Spannungsfeldabmessungen nicht ändern und man betrachtet lediglich die Temperatur ϑ , die Spannungen insbesondere die in Richtung der Feldsehne wirkende Komponente σ_m und das immer über das ganze Feld gleichförmig verteilte, bezogene Seilgewicht (γ) je Einheit des Querschnitts und der Länge als Zustandswerte, die in Wechselwirkung zu einander stehen. Läßt man aber beim Vergleich zweier Zustände auch noch eine Änderung der Feldgrundmaße zu, dann nehmen auch die Waagrechtspannweite a , der Senkrechtabstand h und die daraus abgeleiteten Größen, die Schrägspannweite a' und die Feldneigung $\tan \beta = h/a$ eine ähnliche Stellung ein. Die Zustandsgleichung bestimmt dann auch bei dieser Verallgemeinerung jede einzelne dieser Größen wenn die übrigen vorgegeben sind und wenn ausreichende Eingangsbedingungen, d. h. eine Gruppe von Kenngrößen bekannt sind, welche das Seil und seine Lage im sogenannten Ausgangszustand voll kennzeichnen. Üblicherweise wird vorausgesetzt, daß die ursprüngliche,

d. h. entspannte Seillänge, bzw. die am Vorgang beteiligte Seilmasse unverändert bleibt. Da sich bei Temperaturwechsel Änderungen der Seilkurvenlänge ergeben, bieten sich grundsätzlich keine Schwierigkeiten, auch noch für den veränderten Zustand eine Zunahme der ursprünglichen Seillänge zuzulassen; hierbei müßten lediglich diese Längenänderungen den thermischen Dehnungen zugefügt werden. Die beiden mit einander zu vergleichenden Zustände sollen mit den Indices „0“ und „1“ bezeichnet werden.

Die Wärmedehnungen hängen nicht von der Seilkurvenform ab, sondern ergeben sich aus der Ausgangslänge L_0' , dem Temperaturunterschied $(\vartheta_1 - \vartheta_0)$ und der linearen Dehnungszahl ϵ ; es ist $L_1' = L_0' [1 + \epsilon (\vartheta_1 - \vartheta_0)]$ und damit die Längenänderung $\Delta L_w'$

$$\Delta L_w' = \epsilon (\vartheta_1 - \vartheta_0) L_0' \quad (1)$$

Die elastischen Änderungen sind weniger einfach darzustellen. Die Anwendung der Dehnungszahl $\alpha = 1/E$ (E = Elastizitätsmodul) erfordert für die Bestimmung einer Längenzunahme eine konstante Spannung σ , die längs des Seiles bekanntlich nicht vorhanden ist. Das Hookesche Gesetz gilt hier nur differentiell, d. h. in kleinsten Seilabschnitten, in denen mit einer konstanten Spannung gerechnet werden kann.

In einem schiefwinkligen $(\xi - \eta)$ -Achsenkreuz sei die Seilkurve gemäß Abb. 1 dargestellt; die ξ -Achse sei parallel zur Feldsehne und η sei die Schwererichtung.¹ Im beliebigen Punkt ξ sei

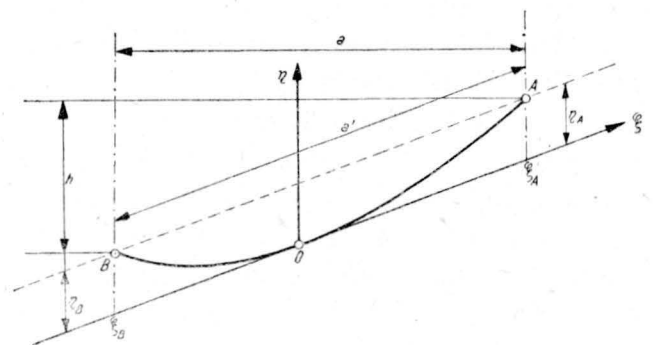


Abb. 1. Festlegung der Bezugsachsen

das Bogenelement ds und die Seilspannung σ_{ξ} . Im entspannten Zustand ist dann die entsprechende Länge des Elementes $ds' = ds (1 - \alpha \sigma_{\xi})$ und damit die Längenzunahme $d \Delta L_e' = ds - ds' = \alpha \sigma_{\xi} ds$. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke der Differentiale und Kräfte folgt andererseits: $\sigma_{\xi} : \sigma_m = ds : d \xi$ bzw.

$\sigma_\xi = \sigma_m ds/d\xi$. Die gesamte Längenänderung infolge der elastischen Dehnung wird dann

$$\Delta L_{e'} = \alpha \int_{(A)}^{(B)} \sigma_\xi ds = \alpha \sigma_m \int_{(A)}^{(B)} \left(\frac{ds}{d\xi}\right)^2 d\xi \quad (2)$$

Da die Achse des Bezugssystems mit der Waagrechten den Winkel β bildet, folgt unter Anwendung des Pythagoreischen Lehrsatzes $ds^2 = (d\xi \cos \beta)^2 + (d\eta + d\xi \sin \beta)^2$ bzw. $(ds/d\xi)^2 = 1 + 2 \sin \beta (d\eta/d\xi) + (d\eta/d\xi)^2$. Mit $\eta_A = \eta_B$ erhält man durch Einsetzen des letzten Wertes in

Gl. (2) $\Delta L_{e'} = \alpha \sigma_m [a' + \int_{(A)}^{(B)} (d\eta/d\xi)^2 d\xi]$ bzw. mit

$$\kappa_e = 1 + \frac{1}{a'} \int_{(A)}^{(B)} \left(\frac{d\eta}{d\xi}\right)^2 d\xi \quad (3)$$

$$\Delta L_{e'} = \kappa_e \alpha \sigma_m a', \quad (4)$$

also ein Dehnungsgesetz, das von dem auf die

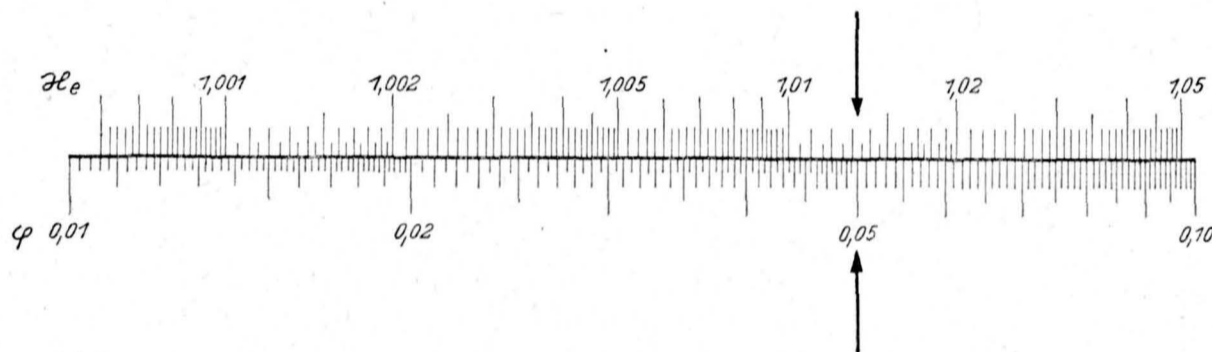


Abb. 2. Doppelleiter zur Bestimmung der Hilfsgröße κ_e für die Parabel. (Beispiel: für $\varphi = 0,05 = 5\%$ wird $\kappa_e = 1,0133$)

Sehnenlänge bezogenen Hookeschen Gesetz nur durch den Faktor κ_e abweicht. Unter Verwendung der für die Parabel² bzw. die Kettenlinie¹ in Frage kommenden Kurvengleichungen liefert (3) nach Durchführung der Integrationen

für die Parabel:

$$\kappa_{ep} = 1 + \frac{16}{3} \varphi^2 = 1 + \frac{1}{3} \psi^2 \quad (5)$$

für die Kettenlinie:

$$\kappa_{ek} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\sin 2\psi}{2\psi} - 1 \right) + \sin^2 \beta \left[2(\cos \psi - 1) - \left(\frac{\sin 2\psi}{2\psi} - 1 \right) \right] \right\} \quad (6)$$

wenn $\varphi = f/a'$, den bezogenen Durchhang bzw. $\psi = a' \gamma/2 \sigma_m$ die Feldkenngröße bedeuten. Die Werte (5) und (6) können der Doppelleiter Abb. 2 bzw. Fluchtentafel Abb. 3 entnommen werden. Im Rahmen der üblichen Ersetzung der Kettenlinie durch die Parabel ist näherungsweise $\kappa_{ek} = \kappa_{ep}$.

Für die Zustandsgleichung ergibt sich dann die Bedingung $L_1' - L_0' = \Delta L_{w'} + (\Delta L_{e_1'} - \Delta L_{e_0'}) = (L_1'^2 - L_0'^2)/(L_1' + L_0')$. Nun ist aber bei der Kettenlinie beliebiger Feldneigung $L'^2 = L^2 + h^2$ mit $L/a = \sin \psi/\psi$. Berücksichtigt man noch, daß $\sigma_m = a' \gamma/2\psi$ ist, dann erhält man als allgemeine Zustandsgleichung

$$\frac{1}{1 + \frac{L_1'}{L_0'}} \left(\frac{a_1}{a_0}\right)^2 \left\{ \left[\left(\frac{\sin \psi_1}{\psi_1}\right)^2 + \left(\frac{h_1}{a_1}\right)^2 \right] - \left[\left(\frac{\sin \psi_0}{\psi_0}\right)^2 + \left(\frac{h_0}{a_0}\right)^2 \right] \right\} = \varepsilon' (\delta_1 - \delta_0) + \frac{1}{2} \alpha' a' \left[\left(\frac{a_1'}{a_0'}\right)^2 \frac{\kappa_{e_1}}{\kappa_{e_0}} \frac{\gamma_1}{\psi_1} - \frac{\gamma_0}{\psi_0} \right] \quad (7)$$

wenn man

$$\varepsilon \left(\frac{L_0'}{a_0'}\right) = \varepsilon' \quad (8) \text{ und } \frac{\kappa_{e_0} \cdot \alpha \left(\frac{L_0'}{a_0'}\right)}{\cos^2 \beta_0} = \alpha' \quad (9)$$

setzt. Das Verhältnis (L_0'/a_0') kann man mit einer Fluchtentafel einer früheren Arbeit¹ leicht bestimmen.

Für den Regelfall starrer Aufhängepunkte wird $a_1 = a_0$ und $h_1 = h_0$ außerdem ist insbesondere für große Spannweiten ohne merkliche Auswirkung $\kappa_{e_1} = \kappa_{e_0}$ und $1 + (L_1'/L_0') = 2$; man erhält dann als Zustandsgleichung dieses Sonderfalls

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sin \psi_1}{\psi_1}\right)^2 - \left(\frac{\sin \psi_0}{\psi_0}\right)^2 \right] = \varepsilon' (\delta_1 - \delta_0) + \alpha' a' \left(\frac{\gamma_1}{2\psi_1} - \frac{\gamma_0}{2\psi_0} \right) = \varepsilon' (\delta_1 - \delta_0) + \alpha' (\sigma_{m_1} - \sigma_{m_0}) \quad (10)$$

eine Form also, die im Aufbau mit der üblichen Gleichung gut übereinstimmt. Beachtet man, daß eine Reihenentwicklung

$$\left(\frac{\sin \psi}{\psi}\right)^2 = 1 + \frac{1}{3} \psi^2 + \frac{1}{45} \psi^4 + \frac{1}{315} \psi^6 + \dots$$

liefert, dann gehen beide Gleichungen ineinander

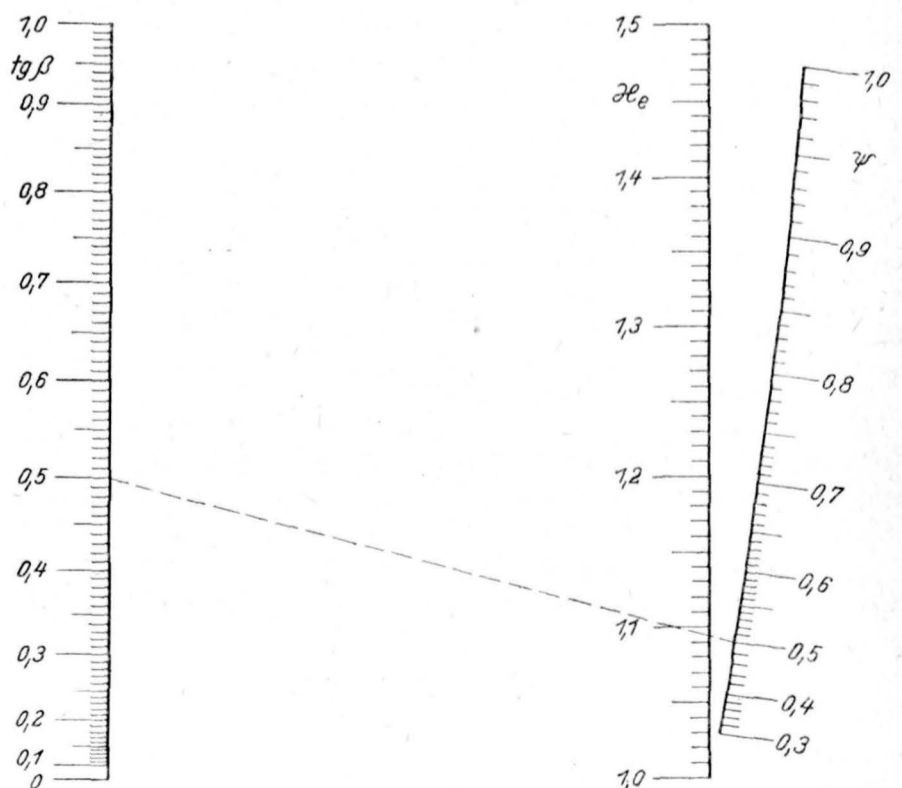


Abb. 3. Fluchtentafel zur Ermittlung des Faktors κ_e für die Kettenlinie. (Beispiel: Für $\psi = 0,5$ und $\text{tg } \beta = 0,5$ wird $\kappa_e = 1,095$)

über, wenn man $\varepsilon' = \varepsilon/\cos^2 \beta$, $\alpha' = \alpha/\cos^2 \beta$ setzt und in dieser Reihe höhere Glieder als zweiter Ordnung vernachlässigt. Grundsätzlich ist daher die der Kettenlinie entsprechende Gl. (10) für die üblichen Fragestellungen in derselben Weise wie bei der Parabel zu behandeln. Sie läßt sich insbesondere nach δ_1 auflösen und führt damit zur punktweisen Berechnung der Zustandskurve; außerdem ist es möglich, alle zeichnerischen Darstellungen der gebräuchlichen Zustandsgleichung auf (10) zu übertragen.

Für den Fall, daß der mit Zeiger „o“ gekennzeichnete Zustand durch eine zusätzliche Belastung des Seiles g_z je Längeneinheit bei der Temperatur $\vartheta_0 = \vartheta_z$ gegeben ist, kann auf der rechten Seite von (10) nach üblicher Überlegung σ_{m0} , bzw. σ_{mz} durch den Scheitelwert $\sigma_{mz}' = \sigma_{mz} g_n/(g_n + g_z) = \sigma_{mz}/[1 + (g_z/g_n)]$ ersetzt werden,³ wenn man gleichzeitig an Stelle von ϑ_0 , bzw. ϑ_z die sogenannte kritische Temperatur

$$\begin{aligned} \vartheta_{krit} &= \vartheta_z + \frac{\alpha'}{\varepsilon'} \sigma_{mz} \frac{g_z}{g_n + g_z} = \\ &= \vartheta_z + \varkappa_e \frac{\alpha}{\varepsilon} \sigma_{mz} \frac{\left(\frac{g_z}{g_n}\right)}{1 + \left(\frac{g_z}{g_n}\right)} \end{aligned}$$

und für γ_0 das entsprechende Gewicht des nicht vereisten Leiters (g_n/q , q = tragender Querschnitt des Leiters!) einführt; hierbei bedeutet g_n das Längeneinheitsgewicht des Seiles ohne Zusatz. Da ψ_0 durch diese Transformation unverändert bleibt, führen die beiden Ausgangswertetriplett ($\psi_0, \delta_z, \gamma_0 = \gamma_n + \gamma_z$) und ($\psi_0, \delta_{krit}, \gamma_0 = \gamma_n$) zu gleichen Zustandsänderungen. Rein anschauungsmäßig entsteht dadurch die Möglichkeit, die Unstetigkeit von Laständerungen zu umgehen, bzw. die Vorgänge auf nur temperaturbedingte Ausgleiche des nicht zusätzlich belasteten Seiles zurückzuführen.

Der Begriff der kritischen Spannweite behält auch für die exaktere Gleichung seine ursprüngliche Bedeutung. Die Bestimmung dieser Größe ist jedoch nur über eine geschlossen nicht lösbare transzendente Gleichung möglich, weil hier die

unbekannte Spannweite in beiden Werten ψ_0 und ψ_1 zugleich vorkommt. Da diese Spannweiten immer verhältnismäßig klein sind, ist nicht zu erwarten, daß nennenswerte Abweichungen gegenüber den näherungsweise ermittelten Größen auftreten.

Zusammenfassung

Zur Herbeiführung des Gleichgewichtes ist bei jedem Seil eine Änderung der inneren Spannungen längs der Seillinie notwendig. Das Hookesche Gesetz gilt hier dann nur in kleinsten Bereichen, erfordert also für die Darstellung der endlichen Dehnungen ganzer Spannweiten eine von der Art der Gleichgewichtslinie abhängige Integration. Sowohl für die Parabel, als auch für die Kettenlinie werden diese Rechnungen durchgeführt; der entsprechende Formeinfluß wird dann durch Anwendung eines vom Durchhang, bzw. der Feldkenngröße abhängigen Faktors berücksichtigt, für dessen Bestimmung Leitertafeln angegeben werden.

Für den Ausgleich der thermischen und elastischen Dehnungen eines Spannungsfeldes wird dann unter allgemeinsten Voraussetzungen, d. h. für wechselnde Temperaturen und Seilbelastungen bei gleichzeitiger Änderung der Feldmaße und nach Einführung korrigierter Dehnungszahlen eine Bedingung abgeleitet, welche für festgehaltene Endpunkte des Spannungsfeldes zu einer verhältnismäßig einfachen Gleichung mit Hyperbelfunktionen führt und im übrigen leicht durch Reihenentwicklung in die allgemein gebräuchliche Zustandsgleichung des hängenden Seiles übergeht. Der übereinstimmende Aufbau beider Gleichungen sichert die Anwendung aller seitheriger Lösungsverfahren auch für die neue Beziehung.

Literatur

¹ K. Kohler, Fluchtentafeln zur Berechnung von Kettenlinien beliebig geneigter Spannungsfelder von Freileitungen. E und M (1951) H. 14. — ² K. Köhler, Die Anwendung einer Parabeleigenschaft auf Messung und Auswertung des Durchhangs von Freileitungen ATM 1948 V 1123—11. — ³ K. Kohler, Der Einfluß ungleicher Spannweiten auf Zugspannung und Durchhang von Freileitungen mit Stützenisolatoren. E und M 52 (1935) H. 48.

Die Berechnung des Wicklungsfaktors

Von Prof. Dipl.-Ing. Josef K. Huber, Wien

Im Folgenden wird gezeigt, daß man den Wicklungsfaktor außer nach den gebräuchlichen Verfahren in den meisten Fällen auch einfach als mittleren Sehnungsfaktor der einzelnen gleichachsigen Spulen berechnen kann. Sind die Spulen ungleichachsig, so kann man sie durch gleichwertige gleichachsige Spulen ersetzt denken. Die bisher übliche Zerlegung des Wicklungsfaktors in Zonenfaktor und Spulenfaktor erübrigt sich dabei. Die praktische Bedeutung des Wicklungsfaktors wird dargelegt.

Bei einer Wechselstrom-Ankerwicklung wird die von einem Sinusfeld in einem Strang erzeugte Spannung (Phasenspannung) bekanntlich nach folgender Formel berechnet:

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w f_w \Phi 10^{-8} \text{ Volt.} \quad (1)$$

Dabei ist f die Frequenz, w die Zahl der in Reihe geschalteten Windungen je Strang, Φ der magnetische Fluß in Maxwell und f_w der Wicklungsfaktor. Durch diesen Faktor, der die Verschiedenheit der Flußverkettungen berücksichtigt, unterscheidet sich die Formel (1) von der Transformatorformel.

Die mit dem Wicklungsfaktor f_w multiplizierte Windungszahl w kann man als eine reduzierte Windungszahl $\bar{w} = w \cdot f_w$ auffassen, so daß die Formel für die Strangspannung dann einfach lautet:

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \bar{w} \Phi 10^{-8} \text{ Volt.} \quad (2)$$

\bar{w} kann man als „wirksame Windungszahl“ im

Gegensatz zur „tatsächlichen Windungszahl“ w bezeichnen, wobei $\bar{w} \leq w$ ist.

Der Wicklungsfaktor ist dann definiert als

$$f_w = \frac{\bar{w}}{w} \tag{3}$$

Eine Wicklung mit $f_w < 1$ gibt unter sonst gleichen Umständen bei gleicher tatsächlicher Windungszahl w nur f_w mal so viel Spannung als eine Einloch-Durchmesserwicklung, bzw. es muß ihre Windungszahl $\frac{1}{f_w}$ mal so groß gemacht werden, damit man die gleiche Spannung erhält wie bei letzterer.

Soll eine Wicklung mit dem Wicklungsfaktor f_{w_1} unter sonst gleichen Verhältnissen durch eine andere Wicklung mit dem Wicklungsfaktor f_{w_2} ersetzt werden, so muß die wirksame Windungszahl \bar{w} in beiden Fällen gleich groß sein, das heißt, es muß $w_2 f_{w_2} = w_1 f_{w_1}$ sein. Daher ist dann

$$w_2 = w_1 \frac{f_{w_1}}{f_{w_2}} \tag{4}$$

Diese Formel ist zum Beispiel für die Wicklungserneuerung bei Drehstrommotoren von Bedeutung, wenn dabei die Wicklungsart geändert wird.

Wenn nichts anderes vermerkt ist, so gilt der Wicklungsfaktor f_w für Sinusfeld oder für die Grundwelle eines nicht sinusförmigen Flusses. Die Wicklungsfaktoren für die Oberwellen eines solchen Flusses sollen durch Wahl einer entsprechenden Wicklungsart immer möglichst niedrig gehalten werden.

Für gebräuchliche Wicklungsanordnungen hat man die Werte des Wicklungsfaktors (für Grundwelle und Oberwellen) ein für allemal bestimmt und in Tabellen niedergelegt, die in einschlägigen Fachbüchern zu finden sind (zum Beispiel Lehrbuch von Richter „Ankerwicklungen“ oder 1. Band des Handbuches von Sequenz „Die Wicklungen elektrischer Maschinen“).

Für diejenigen, denen solche Behelfe nicht zur Verfügung stehen, sollen nun einfache Wege zur rechnerischen Ermittlung des Wicklungsfaktors in verschiedenen Fällen gezeigt und dabei ein wenig bekanntes Verfahren besonders behandelt werden.

Es ist üblich, den Wicklungsfaktor f_w (von Sonderfällen abgesehen) als das Produkt zweier Teilfaktoren und zwar des Gruppen- oder Zonenfaktors f_z und des Spulen- oder Sehnungsfaktors f_s zu betrachten. Ersterer berücksichtigt den Einfluß der Wicklungsverteilung, letzterer den der Abweichung der mittleren Spulenweite von der Polteilung. Man setzt daher

$$f_w = f_z f_s \tag{5}$$

Der Zonenfaktor tritt immer dann in Erscheinung, wenn — wie es die Regel ist — eine Spulen-seitengruppe auf mehr als eine Nut verteilt ist (Mehrlochwicklung).

Der Sehnungsfaktor kommt noch hinzu, wenn die mittlere Spulenweite kleiner oder größer als die Polteilung ist. Die Weite einer Spule wird

manchmal auch durch den Nutenschritt y_n , gemessen in Nutenteilen, ausgedrückt. Bei Durchmesserwindungen ist $y_n = \frac{N}{2p}$ und bei Sehnwindungen ist $y_n < \frac{N}{2p}$, wobei N die Nutenzahl und $2p$ die Polzahl bedeutet. Eine Nutenteilung beträgt $\tau_n = \frac{D\pi}{N}$.

Der Spulenfaktor oder Sehnungsfaktor f_s läßt sich bei kosinusartiger Flußverteilung an Hand der Abb. 1 als

Verhältniswert $\frac{\text{Spannung in der Sehnspule}}{\text{Spannung in der Durchmesserwindung}}$ berechnen.

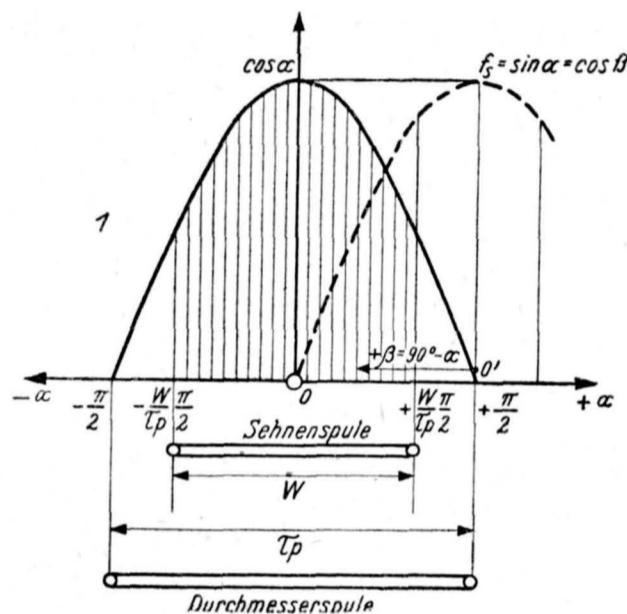


Abb. 1. Ermittlung des Sehnungsfaktors

Der von einer Sehnspule umfaßte maximale Fluß und damit die zugehörige Spannung ist durch die schraffierte Fläche F_1 ausgedrückt. Diese beträgt

$$F_1 = \int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos \alpha \, d\alpha = \sin \alpha \Big|_{-\alpha}^{+\alpha} = 2 \sin \alpha.$$

α ist der der halben Spulenweite entsprechende elektrische Winkel

$$\frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \quad \left(\text{denn bei } W = \tau_p \text{ ist } \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \right).$$

Der elektrische Winkel, der der halben Schrittverkürzung oder Schrittverlängerung $\pm \frac{\tau_p - W}{2}$ entspricht, ist $\beta = \pm (90^\circ - \alpha)$.

Mit $\alpha = \frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2}$ ist $F_1 = 2 \sin \frac{W}{\tau_p} \frac{\pi}{2} = 2 \sin \frac{W}{\tau_p} 90^\circ$.

Der von der Durchmesserwindung umfaßte Gesamtfluß bzw. ihre Spannung ist durch die ganze Fläche F_2 der Halbwelle dargestellt. Für $W = \tau_p$ ist nach obiger Formel

$$F_2 = 2 \sin \frac{\pi}{2} = 2 \cdot 1 = 2.$$

Es ist also

$$f_s = \frac{F_1}{F_2} = \frac{2 \sin \frac{W}{\tau_p} 90^\circ}{2} = \sin \frac{W}{\tau_p} 90^\circ = \sin \alpha = \cos \beta. \tag{6}$$

Der Sehnungsfaktor ändert sich also bei zunehmender relativer Spulenweite nach dem Sinusgesetz (siehe Abb. 1) und erreicht den Höchstwert 1 bei $W = \tau_p$. Wird $W > \tau_p$ (Schrittverlängerung) so nimmt f_s wieder ab.

Da $\sin(90^\circ + \beta) = \sin(90^\circ - \beta)$ ist, ist der Sehnungsfaktor bei gleicher absoluter Abweichung des Nutenschrittes von der Polteilung für Verlängerung oder Verkürzung desselben übereinstimmend; z. B. bei $W = \frac{5}{6} \tau_p$ ist f_s genau so groß wie bei $W = \frac{7}{6} \tau_p$, da die Abweichung von τ_p in beiden Fällen den gleichen absoluten Betrag $\frac{1}{6} \tau_p$ hat.

Die Werte von f_s für häufig vorkommende Verhältniswerte von $\frac{W}{\tau_p}$ sind einer Sinus-Tafel entnommen und in Tab. 1 zusammengestellt.

Bis zu etwa 10% Schrittverkürzung oder Schrittverlängerung ist der Sehnungsfaktor nahezu 1, wie man aus Tab. 1 ersehen kann.

Durch passende Schrittverkürzung aller Spulen kann man gewisse Oberwellen der Spannung in der Wicklung unterdrücken. Wenn man z. B. den Schritt um $\frac{1}{5}$ der Polteilung verkürzt (d. h. $\frac{W}{\tau_p} = 0,8$), so verschwindet die 5. Oberwelle der Spannung, da die Spule genau zwei positive und zwei negative Halbwellen der 5. Oberwelle des magnetischen Flusses umfaßt, die sich in ihrer induzierenden Wirkung aufheben. Bei Verkürzung des Schrittes um $\frac{1}{3} \tau_p$ verschwindet die 3. Oberwelle der Spannung.

Der Zonenfaktor f_z hängt wie erwähnt, von der Wicklungsverteilung ab. Es sei zunächst Ganzlochwicklung (Nutenzahl je Pol und Strang $q = \frac{N}{2pm} = \text{ganze Zahl}$) vorausgesetzt, die als Einschicht- oder Zweischichtwicklung ausgeführt werden kann. Alle Spulen mögen die gleiche Windungszahl w_s besitzen. Bei Einschichtwicklungen für $m = 3$ Phasen handelt es sich meistens um sogenannte Sechszonenwicklungen mit unverkürztem mittlerem Nutenschritt (Durchmesserwicklungen). Man versteht darunter eine Wicklungsanordnung, bei der eine Spulenseitengruppe, die in q benachbarten Nuten liegt, ein Sechstel einer doppelten Polteilung also 60 elektrische Grade einnimmt. Als Beispiel hierfür diene Abb. 2,

die oben eine Spulengruppe einer 3phasigen Zwei-Etagenwicklung mit $q = 3$ Nuten je Pol und Strang zeigt und deren Spulen ungleiche Weite haben. Die Weite der äußeren Spule ist um $2 \tau_n$ größer und jene der inneren Spule um $2 \tau_n$ kleiner als die Weite der mittleren Spule, die gleich $\tau_p = 9 \tau_n$ ist. Obwohl die einzelnen Spulen zum Teil Sehnenspulen sind, bilden die Spulengruppen doch eine Durchmesserwicklung, da ihre mittlere Weite gleich τ_p ist. Bei Beurteilung einer ganzen Spulengruppe kommt es genau genommen immer nur auf den Abstand der Zonenmitten im Verhältnis zu τ_p an. Den Bereich, der die Gesamtheit der gleichsinnigen Spulenseiten je Pol und Strang umfaßt, nennt man nämlich eine Wicklungs-Zone; daher auch der Name „Zonenfaktor“. Die Zonenbreite wird auch durch den zugehörigen elektrischen Winkel $\gamma = \frac{360^\circ}{\text{Zonenzahl}}$ ausgedrückt.

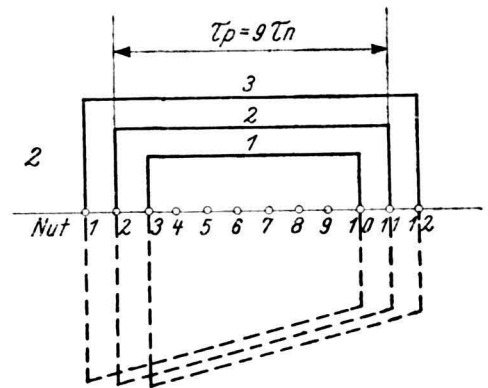


Abb. 2. Spulengruppe einer Sechszonen-Einschichtwicklung (Etagen-, bzw. Schablonenwicklung)

Die Ermittlung des Zonenfaktors erfolgt gewöhnlich derart, daß man die q ungleich weiten Spulen durch ebensoviele gleich weite Spulen — also die Zwei-Etagenwicklung durch eine gleichwertige Schablonenwicklung — ersetzt denkt, wobei man dann lauter Durchmesserwindungen erhält (Abb. 2 unten). Maßgebend ist ja nicht die Lage der Wickelköpfe sondern nur die Lage der Spulenseiten und daran hat sich bei der Umwandlung der Wicklung nichts geändert. Geändert hat sich nur die Reihenfolge der Hintereinanderschaltung der Spulenseiten, die aber belanglos ist. Durch diese Maßnahme ist der Sehnungsfaktor f_s gleich 1 geworden, so daß nur der Zonenfaktor f_z verbleibt. Es ist also $f_w = f_z$ und $f_z < 1$, da die Spannungen der Ersatzspulen ungleichphasig sind.

Bei Durchmesserwindungen besteht jede Spulenspannung aus zwei innerhalb der Spule gleichphasigen Spulenseitenspannungen. Das Vektordiagramm der Spulenseitenspannungen stellt hier

Tabelle 1. Sehnungsfaktoren (Spulenfaktoren)

$\frac{W}{\tau_p}$	1	$\frac{17}{18} =$	$\frac{11}{12} =$	$\frac{8}{9} =$	$\frac{5}{6} =$	$\frac{4}{5} =$	$\frac{7}{9} =$	$\frac{3}{4} =$	$\frac{13}{18} =$	$\frac{2}{3} =$	$\frac{7}{12} =$	$\frac{1}{2} =$	$\frac{4}{9} =$
		0,945 oder $\frac{19}{18}$	0,917 oder $\frac{13}{12}$	0,89 oder $\frac{10}{9}$	0,834 oder $\frac{7}{6}$	0,8 oder $\frac{6}{5}$	0,78 oder $\frac{11}{9}$	0,75 oder $\frac{5}{4}$	0,72 oder $\frac{23}{18}$	0,667 oder $\frac{4}{3}$	0,584 oder $\frac{17}{12}$	0,5 oder $\frac{3}{2}$	0,445 oder $\frac{14}{9}$
f_s	1	0,996	0,991	0,985	0,966	0,951	0,940	0,924	0,906	0,866	0,793	0,707	0,643

ELEKTROMOTOREN

ab Lager,
bis zu Höchstleistungen
nur Markenerzeugnisse

neu und gebraucht, mit
Fabriksgarantie,
seit 42 Jahren bei:



Proksch & Co.

Werk für Elektrotechnik
Wien XVI, Wattgasse 11

Fernrufe:

A 20-2-42, A 20-2-88, B 44-5-48

Drahtanschrift: Prokschmotor Wien



JAHRE

SIMMON LUFT-TECHNIK

Wir bauen

RINGLAUF-KÜHLER

für

Luft-Kühlung

elektrischer Maschinen

jeder Leistung

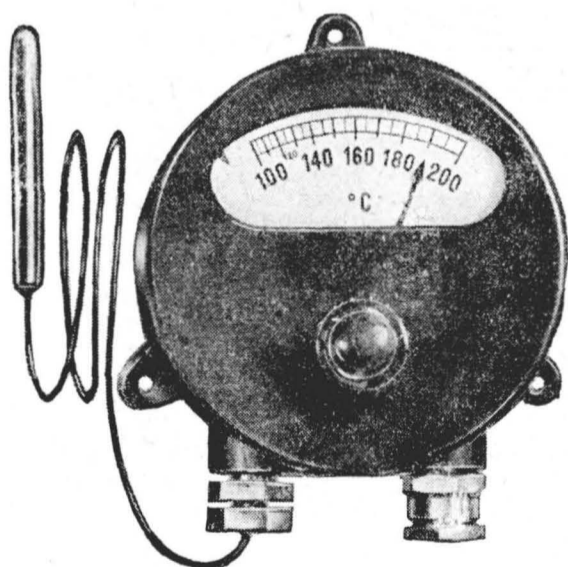
in jeder gewünschten Ausführung

MASCHINENFABRIK

SIMMON
WIEN XVI/107 AUSTRIA

THERMOSTATE

mit Temperaturanzeige



INGRICHARD
FONOVITS
KOMMANDITGESELLSCHAFT
WIEN
XVII. RANFTLGASSE 17

Metall-Lang-Sägeblätter für Hand- und Maschinen-
gebrauch, Durkord Extra, Durkord SS, Pegasus
Metall-Kreis-Sägeblätter, Durkord SS, DIN 135 / 136
Metall-Sägebogen Durkord, österr. Patent
Einstrichsägen Durkord
Stichsägen (Lochsägen) Durkord
Laubsägeblätter
Federringe Durkord nach DIN 127, glatte und aufge-
bogene Enden
Unterlagscheiben, Eisen, blank DIN 134 und 125
Unterlagscheiben aus Messing
Kolbenbolzensicherungen
Vorstecksplinte aus Eisen nach DIN 94
Fahrrad-Gepäckträger
Heftzwingen mit und ohne Rand
Wurfkarniesen 60 S mit 60 mm breiter, vernickelter
Deckschiene in gestufter Form österr. Patente
Wurfkarniesen 70 M mit 70 mm breiter holzartig
lackierter Metalldeckschiene und verchromten
Ecken, österr. Patente
Stahlgartenrechen und Häufler, Original Jetor
Drahtstifte ab Werk Imst/Tirol
Dunggabeln / Dungkrallen / Heugabeln / Streugabeln
Grabegabeln / Rübengabeln / Kartoffel-Ladegabeln
Worbegabeln / Koksgabeln / Schottergabeln, Original
Jettor, österr. Patent
Afra-Drahtverpackungsapparate

Brüder Wüster

STAHLWARENFABRIK

Gründungsjahr 1873

Zentrale: WIEN I / WERDERTORG. 14

Telephon A 16 5 25 - 27

Telegrammadresse: Stahlwüster



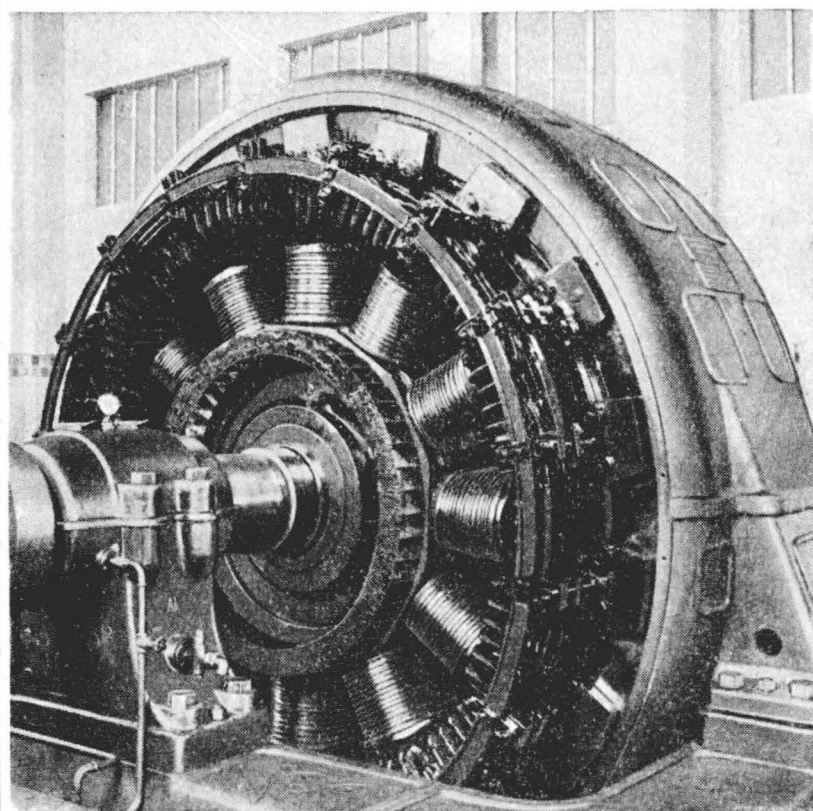
Vertretung:

Dipl.-Ing. Fritz Tausche

Innsbruck, Aldrans 105

Telefon: Innsbruck 77 104

HAEFELY NEUWICKLUNG
des Stators zu ACE-Ds-Generator 11.000 kVA, 10.000 V n=500



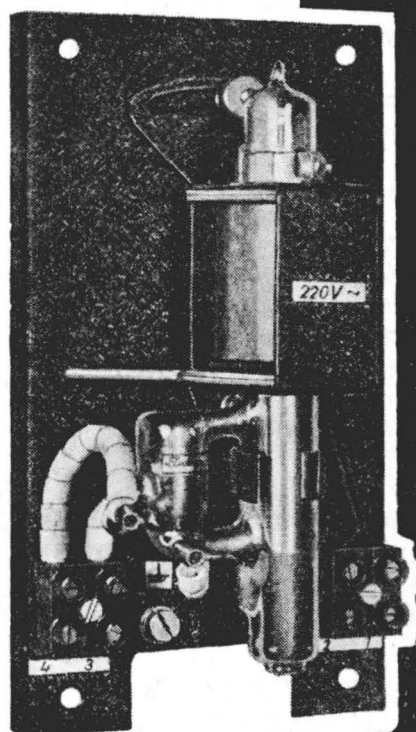
Wir haben bis heute mehr als 4.000.000 kVA
Maschinenleistung neu- oder umgewickelt!
Angebote und Referenzen durch die Vertretung

Ing. Karl Wrba

Wien III, Weyrgasse 6

Ruf U 17 2 72

ZEIT-
AUTOMATEN



TREPPENHAUS-
AUTOMATEN
VERZÖGERUNGS-
RELAIS
QUECKSILBER-
SCHALTER

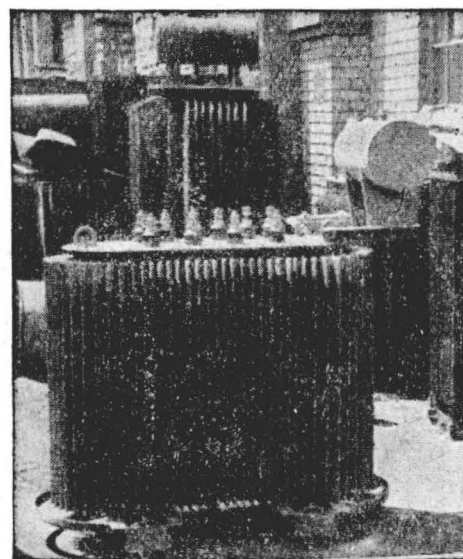


ELECTROVAC

HACHT & CO.

WIEN XX., FORSTHAUSGASSE 10

1926 **25 Jahre** 1951



Drehstromtransformator 300 KVA, 380/220 Volt,
geliefert an Elektrobüro Dr. techn. Hans Holat, Wien

Wir erzeugen

Transformatoren jeder Art
bis 400 KVA und 20 KV

Umwicklungen und Reparaturen bis zu 1000 KVA

Ing. Adalbert STIFTER

Wien XIX, Rampengasse, Telefon B 16-0-91

Stadtbahnbogen 258—261

im doppelten Maßstab auch das Vektordiagramm der Spulenspannungen dar. Durch geometrische Addition der einzelnen Spannungsvektoren kann man die resultierende Spannung einer Gruppe von q in Reihe geschalteten Spulen bilden. In Abb. 3 ist dies für $q = 3$ durchgeführt. Man erhält

$$f_z = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB+BC+CD}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{A'D'}} = \frac{\text{geom. Summe}}{\text{arithm. Summe}} \text{ der Teilspannungen}$$

und allgemein

$$f_z = \frac{2r \sin \frac{\gamma}{2}}{q 2r \sin \frac{\gamma}{2q}} = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{q \sin \frac{\gamma}{2q}} \quad (7)$$

Für $\gamma = 60^\circ \left(= \frac{2\pi}{6} = \frac{360^\circ}{6} \right)$ für Sechszonenwick-

lung) und $q = 3$ (gemäß dem Beispiel der Abb. 2 und 3) ist

$$f_z = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} = \frac{\sin 30^\circ}{q \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{\sin 30^\circ}{3 \cdot \sin 10^\circ} = \frac{0,5}{3 \cdot 0,17365} = \underline{0,96}$$

Bei $q = 2$ berechnet sich f_z nach Formel (10) zu 0,966.

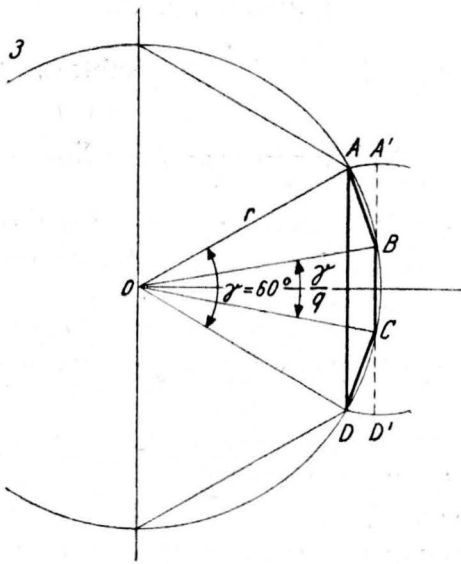


Abb. 3. Vektordiagramm der Spulenspannungen einer Gruppe einer Sechszonenwicklung

Bei fein verteilten Wicklungen (mit $q > 6 \sim \infty$) ist

$$f_z \approx \frac{\text{Sehne}}{\text{Bogen}} \text{ des Spannungskreises} = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \quad (7a)$$

$$\text{Für } \gamma = 60^\circ = \frac{\pi}{3} \text{ ist dann } f_z = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{0,5 \cdot 6}{\pi} = \frac{3}{\pi} = \underline{0,955}$$

f_z liegt also für $q = 2$ bis ∞ zwischen 0,966 und 0,955, weshalb man ohne nennenswerten Fehler mit dem Durchschnittswert $f_z = 0,96$ rechnen kann.

Für alle Oberwellen des Flusses ist der Zonenfaktor bei $q = 1$ (Einlochwicklung) durchwegs 1, sinkt aber bei $q = 2$ und mehr (Mehrlochwicklung) mit Zunahme der Oberwellenordnungszahl ν beträchtlich, da die relative Zonenbreite proportional mit ν wächst, was in den Formeln (7) und (7a) dadurch zum Ausdruck kommt, daß $\nu \gamma$ an Stelle von γ zu setzen ist. Für eine fein verteilte Sechszonenwicklung ist

$$f_{z\nu} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{6}}{\nu \frac{\pi}{6}} \quad (8)$$

Auch mit wachsendem Wert von q fällt f_z für die Oberwellen stärker für die Grundwelle. Beispielsweise ist für die 5. Oberwelle ($\nu = 5$)

$$\text{bei } q = 2 \dots f_{z_5} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{6}}{q \sin \nu \frac{\pi}{6q}} = \frac{\sin 5 \cdot 30^\circ}{2 \sin 5 \cdot \frac{30^\circ}{2}} = \frac{\sin 150^\circ}{2 \sin 75^\circ} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,966} = \underline{0,259}$$

$$\text{und bei } q = \infty \dots f_{z_5} = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{6}}{\nu \frac{\pi}{6}} = \frac{\sin 5 \cdot 30^\circ}{5 \frac{\pi}{6}} = \frac{6 \sin 150^\circ}{5 \pi} = \frac{6 \cdot 0,5}{5 \pi} = \underline{0,191}$$

Die 5. Oberwelle der Spannung hat also bei Mehrlochwicklung nur 25,9 bis 19,1% des Wertes, den sie bei Einlochwicklung mit gleicher gesamter Windungszahl hätte. Das von einer Mehrlochwicklung erzeugte Feld ist auch oberwellenärmer. Es ergibt sich daraus, daß man Einlochwicklungen tunlichst vermeiden und bei Mehrlochwicklungen — insbesondere bei Generatoren — q möglichst groß machen soll (mindestens 3 bis 4). Bei kleineren Werten von q wendet man mit Vorteil an Stelle von Ganzlochwicklungen ($q = \text{ganze Zahl}$) sogenannte Bruchlochwicklungen (mit $q = g + \frac{z}{n} = \text{ganze} + \text{gebrochene Zahl}$) an. Diese sind insofern günstig, als ihr Grundwellenwicklungs-Faktor nicht oder nur wenig kleiner ist als bei Ganzlochwicklungen, während ihre Oberwellen-Wicklungsfaktoren zum Teil noch niedriger liegen als bei letzteren.

Die Oberwellen-Zonenfaktoren können in manchen Fällen auch negativ werden, doch ist immer nur ihr absoluter Wert maßgebend.

(Fortsetzung folgt.)

Rundschau

Elektrische Maschinen

Direkte Messung der Übergangsreaktanzen von Synchronmaschinen. Von Dr.-Ing. Stephan Matena.

Der Verfasser nimmt die Schwierigkeiten bei der meist üblichen Ermittlung der transienten und subtransienten Reaktanzen einer Synchronmaschine aus Kurzschlußoszillogrammen zum Anlaß, ein Verfahren zu entwickeln, welches einerseits die betriebsmäßig ungünstigen Begleiterscheinungen des Klemmenkurzschlusses vermeidet und andererseits durch den geringeren Größenunter-

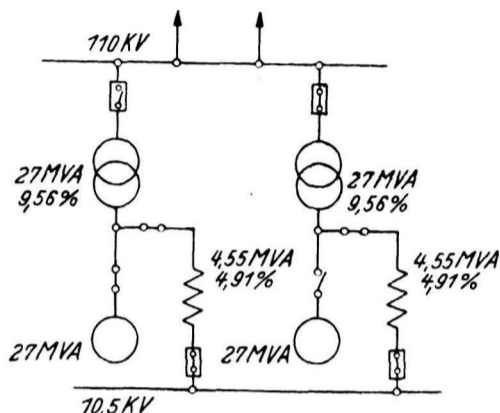


Abb. 1

schied zwischen dem stationären Strom und dem Strom während des Schaltvorganges eine genauere Auswertung der Oszillogramme ermöglicht. Abb. 1 zeigt die Schaltung

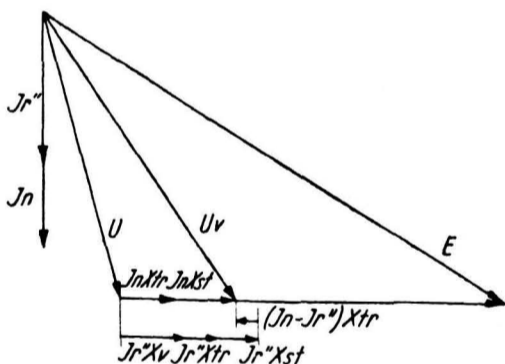


Abb. 2

zur Vornahme der Laständerung, Abb. 2 die Auswertung der in Abb. 3 dargestellten, bei der Messung erhaltenen Oszillogramme.

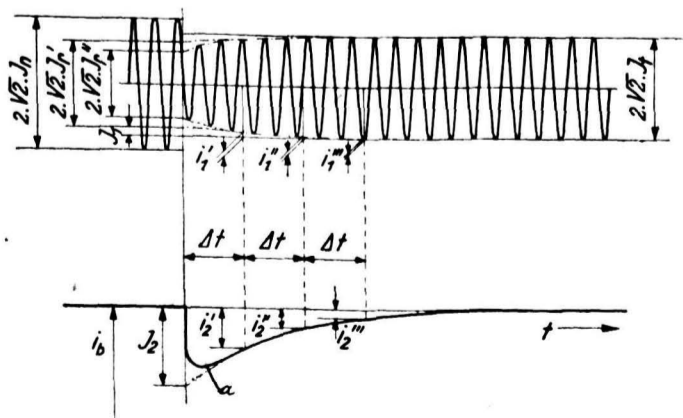


Abb. 3

Die Synchronmaschine liegt dabei am starren Netz und führt ungefähr den Nennstrom.

Die theoretische Grundlage des Verfahrens sei im Folgenden kurz angeschrieben.

Definitionen:

- J_N Ankerstrom
- J_r'' Stoßstrom entsprechend der subtransienten Reaktanz
- X_s Streureaktanz des Generators
- X_{tr} Streureaktanz des Transformators
- X_v Äußere Reaktanz, zusätzlich eingeschaltet
- X'' Subtransiente Reaktanz, das ist diejenige Reaktanz, welche ihre Ursache in der Verkettung des Feldes mit dem Dämpferkäfig hat
- X_{tl} Streureaktanz des Dämpferkäfiges
- U Klemmenspannung
- U_v Induzierte Maschinenspannung

Voraussetzungen:

Für den Schalt Augenblick bleiben sowohl die Klemmenspannung als auch die induzierte Maschinenspannung der Größe und Richtung nach erhalten.

Für das Spannungsdiagramm der Synchronmaschine im Übergangszustand gilt dann die Gleichung:

$$J_N (X_{tr} + X_{st}) = J_r'' (X_{tr} + X_{st} + X_v) + (J_r'' - J_N) X_{tl} \quad (1)$$

Daraus erhalten wir nach einer Umformung:

$$\frac{X_{tr} + X_{p''}}{X_{tr} + X_v + X_{p''}} = \frac{J_r''}{J_N} = K'' \quad (2)$$

In diesem Ausdruck ist als Abkürzung eingeführt:

$$X_{p''} = X_{st} + X_{tl}$$

Daraus ergibt sich nun für die subtransitive Reaktanz die Form:

$$X_{p''} + \frac{K''}{1 - K''} (X - X_{tr})$$

Nach diesem Verfahren hat der Verfasser insgesamt an 10 Maschinen Messungen vorgenommen und vergleicht die Ergebnisse mit den bisher erhaltenen Werten für die subtransiente Reaktanz. Die Übereinstimmung ist gut. In analoger Weise wird sodann die transiente Reaktanz ermittelt.

Ein Teil der Auswertung der erhaltenen Oszillogramme ist in die Arbeit mit aufgenommen worden und gibt ihr Lebendigkeit. Dipl.-Ing. E. Slamecka

(Elektrotechnicky Obzor, Juli 1950, S. 249 bis 259.)

Die Überlegenheit des Drehstrommotors mit gewickeltem Läufer über den Käfigmotor beim Anlauf unter Last. Der Motor mit gewickeltem Kurzschlußläufer. Von J. Le Monnier.

Wie die Versuche von Le Monnier ergeben, weicht beim Käfigankermotor das wahre Drehmoment wesentlich von dem scheinbaren Drehmoment ab, das aus der an den Klemmen verbrauchten Leistung bestimmt wird. Wenn der Käfigmotor aus der Drehung in Gegenrichtung unter stetigem Durchgang durch die Drehzahl Null auf die Synchrondrehzahl in normaler Drehrichtung gebracht wird, liegt im Bereich der Bremsung, gegen die Drehzahl Null hin, die Kurve der wahren Drehmomente wesentlich über der Kennlinie der scheinbaren Momente, schneidet die letztere ungefähr bei der Drehzahl Null in einem Wendepunkt, und bleibt dann im weiteren Verlauf ziemlich bedeutend unter ihr. Beim Motor mit gewickeltem Läufer tritt dieser Unterschied nicht auf, die Kurven des scheinbaren und des wahren Drehmoments nach der Drehzahl decken sich ziemlich genau. Diesen gleichen

normalen Verlauf erreicht man aber mit einer von vornherein kurzgeschlossenen Dreiphasenwicklung am Läufer.

Die Versuche wurden an einem 7,5 PS-Drehstrommotor nach einer bereits 1927 von Setch Nagaoka und Komagata* angegebenen Methode derart durchgeführt, daß das wahre Drehmoment des durch zwei schwere Schwungräder belasteten Motors aus dem Ladestrom eines Kondensators bestimmt wurde, der an die Klemmen der Tachometerdynamo mit konstantem Feld angeschlossen war. Das wahre Drehmoment des Motors ist bei dieser Anordnung dem Ladestrom des Kondensators proportional, da beide der Drehbeschleunigung proportional sind. Zwecks Vergleich konnte am Läufer der Käfig durch eine Dreiphasenwicklung ersetzt werden. Zur Ausschaltung der Trägheit der Meßeinrichtung beim Anlauf, namentlich wegen des Diagramms des Kondensatorstroms, wurde der Motor aus der Synchrondrehzahl in Gegenrichtung durch Phasenkreuzung auf die Synchrondrehzahl in normaler Drehrichtung gebracht, womit stetiger Durchgang durch die Drehzahl Null erreicht wurde. Es wurden die Kennlinien für die Drehzahl und den Kondensatorladestrom, sowie für die an den Klemmen verbrauchte Leistung und den entsprechenden Strom nach der Zeit bestimmt, und aus ihnen die Kennlinien des wahren und des scheinbaren Drehmoments nach der Drehzahl abgeleitet. Zur Bestimmung des Schwungmoments der drehenden Massen, zwecks Eichung der Kondensatorstromkurve in Drehmomenten, wurden auf die Schwungräder aufsetzbare Ringe von bekanntem Trägheitsmoment benützt.

Die eingangs geschilderte Abweichung des wahren Drehmoments vom scheinbaren beim Käfiganker wurde durch Versuche an einem normalen 4 PS-Käfigmotor bestätigt. Die gegenüber dem gleichen Motor mit gewickeltem Läufer auftretenden zusätzlichen Verluste zeigten sich in einer Erhöhung der bei gleicher Belastung im Anlauf auf die gleiche Drehzahl verbrauchten Leistung. Diese Erhöhung betrug beim untersuchten 7,5 PS-Spezialmotor 19%. Dieser relative Unterschied war sowohl bei den Registrierungen, als auch bei den Verbrauchsmessungen am Zähler der gleiche, obwohl die absoluten Leistungsangaben am Zähler höher waren. Beim Einphasen-Käfigmotor ist dieser Unterschied noch viel größer.

Die Ursache dieser Erscheinung ergibt sich aus dem Vergleich des Schlupfs beim Käfiganker und beim gleichwertigen gewickelten Anker. Sie ist die Verkürzung der mittleren Windung des Käfigankers gegenüber dem gewickelten Anker mit normalem Drehfeld. Dies bedingt eine tiefgehende Abweichung des Käfigankerfeldes von der sinusförmigen Verteilung, die sich dann auf sein Drehmoment auswirkt und das „Kriechen“ des Käfigmotors erzeugt.

Dieser Mangel des Käfigankers läßt sich durch Bewicklung des Läufers mit einer kurzgeschlossenen Dreiphasenwicklung aus Aluminiumstäben beseitigen. Eine solche Wicklung ist von der Compagnie Générale Electrique in Nancy entwickelt worden.

Für die vorschablonierten Aluminiumstäbe, zwei pro Nut, genügt eine durch Anodenoxydation erzeugte Isolierung aus Aluminiumoxyd, die vollkommen wärmebeständig ist. Die Stäbe werden nach dem üblichen Dreiphasenschema autogen verschweißt. Die Wicklung ist durch einen stirnseitigen Ring kurzgeschlossen. Der größere Leiterquerschnitt infolge Wegfall einer besonderen Isolierung gleicht den Leitfähigkeitsunterschied gegen Kupfer aus, und das Leichtmetall erlaubt in den meisten

Fällen den Verzicht auf den Schleuderschutz der Läuferwicklung. Bei Großmotoren können zur Aufrechterhaltung normalen Wirkungsgrades bei Vollast, bei sehr guten Anlaufeigenschaften, ohne weiteres zwei solche kurzgeschlossene Wicklungen mit Trennung durch einen magnetischen Nebenschluß übereinander angeordnet werden. Diese Motoren sind überall dort vorteilhaft, wo der Anlauf unter Last ein Hauptmoment des Betriebes darstellt.

M. C.

(Revue Générale de l'Electricité, 59 [1950] Nr. 4, 7 S., 12 Abb.)

Schaltanlagen

Die Isolationsbemessung als Problem des Schaltanlagenbaues. Von K. Reiske.

Im Schaltanlagenbau verlangen die praktischen Betriebsbedürfnisse, die Forderungen nach Sicherheit und die vorhandenen Spannungen bestimmte Abstände und Abmessungen der Isolatoren. Ob alle Möglichkeiten zur Verkleinerung der Schaltanlagenabmessungen ausgenützt sind, soll am Beispiel der 10 kV-Innenraumanlage erörtert werden, da hier die heute vorgeschriebene Isolationsbemessung die Abmessungen entscheidend beeinflußt.

Amerika kommt zu kleinen gekapselten Schaltanlagen durch Verwendung unpreßter Stromschiene unter völliger oder teilweiser Vermeidung von Stützisolatoren. Für europäische Verhältnisse ist auch die offene Bauweise wichtig.

Die Raumabmessungen sind hauptsächlich von folgenden Faktoren abhängig:

1. von der Konstruktion der Geräte, z. B. Ersatz der Ölschalter durch ölarme oder ölfreie Schalter;
2. von der Anordnung der Geräte, z. B. Mehrgeschoßanordnung wird durch Eingeschoßanlage abgelöst;
3. von der Isolatorengröße und den Luftschlagweiten entsprechend VDE 0101, z. B. Schlagweite 125 mm für 10 kV.

Die glatten Isolatoren mit 125 mm Fadenmaß — Reihe 10 für 10 kV (früher Serie III, 12 kV) — gehen auf 1914 zurück. Bis dahin wurden auch Rillenisolatoren von etwa 85 mm benützt. Die Formgebung und Bemessung der Isolatoren wurde vor allem theoretisch begründet. Da kein Unterschied zwischen Isolator- und reiner Luftstreckenschlagweite gemacht wurde, sind größere Schlagweiten als bis dahin vorgeschrieben worden. Als 1929 die Prüfformel $U_p = 2,2 U + 20$ kV eingeführt wurde, bestand keine Schwierigkeit, diese Formel mit dem ungewöhnlich großen additiven Glied auch auf die unteren Spannungsreihen anzuwenden.

Für die Nennspannung 10 kV ist die zugehörige Schlagweite von 125 mm und die Prüfspannung von 42 kV im Verhältnis sehr hoch. In der Abb. 1 ist die spezifische Schlagweite, das ist die Schlagweite dividiert durch die Reihenspannung und die spezifische Durchschlagspannung der entsprechenden Stabfunkenstrecke für die Reihenspannungen dargestellt. Die Spannungsreihen 1 bis 10 sind als überdimensioniert zu erkennen.

Die vergrößerte Schlagweite (125 mm) verlangt einen wirtschaftlichen Mehraufwand, man erwartete jedoch dafür geringere Störungsanfälligkeit der Anlagen durch Ungeziefer und nach Einführung der Überspannungsschutzgeräte eine praktische Überschlagsfreiheit. De facto werden dennoch Überschläge beobachtet, für deren Erklärung ungewöhnlich hohe Überspannungen oder Einflüsse, die sich unmittelbar an den glatten Stützern auswirken, anzunehmen sind.

Die britische Vorschrift BSS Nr. 116—1932 für Ölschaltgeräte von 11 kV legt zwei Schlagweiten fest: eine

* Shoji Setch, Junkichi Nagaoka und Sakuji Komagata: Journal of the Institution of Electrical Engineers of Japan, Dezember 1927.

mit 76 mm für Geräte bis 500 MVA Abschaltleistung, die andere mit 114 mm für Abschaltleistung über 500 MVA. Die schwedische Vorschrift SEN 30—1944 E läßt für

Die Begrenzungsspannung moderner Überspannungsableiter überschreitet den Wert $3 U_n \cdot \sqrt{2}$ nicht. Damit ist aber auch die untere Grenze für die Stehstoßspannung der Isolatoren festgelegt. Für Reihe 10 ist der Wert $3 \cdot 10 \cdot \sqrt{2} = 42 \text{ kV}$, während die Stoßspannung des 125 mm-Stützers rund 100 kV beträgt, also überdimensioniert ist.

Weiters ist die Isolationsminderung, das ist der Einfluß der Verschmutzung und der Betauung auf das Isoliervermögen, zu beachten. Versuche haben ergeben, daß die Isolationsminderung eines Isolators mit glatter Oberfläche durch Verschmutzung wesentlich größer ist als die eines mit gerillter Oberfläche.

Die Siemens-Schuckert-Werke AG haben die Versuche weitergeführt und einen genormten Stützer (125 mm) sowie einen neu entwickelten Rillenstützer (85 mm) im trockenen, betauten und verschmutzten Zustand Spannungsprüfungen unterzogen. Das Ergebnis ist in Abb. 3 und in folgender Übersicht zusammengestellt:

Art der Prüfung	Isolator	
	125 mm	85 mm
trocken, 50 Hz Prüfspannung	rd. 60 kV	rd. 44 kV
Stoßspannung (1/50)	rd. 100 kV	rd. 80 kV
betaut, Isoliervermögen	rd. 15 kV	rd. 15 kV
„normale“ Verschmutzung	rd. 11 kV	rd. 13 kV

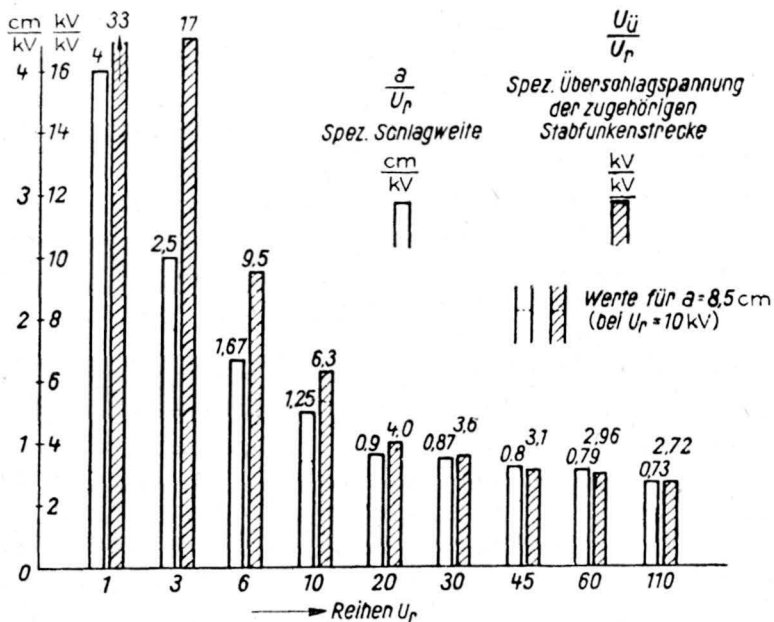


Abb. 1. Verhältniszahlen von Schlagweite und zugehöriger Überschlagnspannung bezogen auf die Reihenspannung (nach VDE 0670/XII, 40)

10 kV eine Schlagweite von 75 mm für solche Anlagen zu, die durch die Lage oder durch Ableiter vor Gewitterüberspannung ungewöhnlicher Art geschützt sind.

Neuere Untersuchungen zeigen, daß seinerzeit wichtige Gesichtspunkte nicht berücksichtigt wurden. Das Verhalten eines in der Regel verschmutzten, gelegentlich betauten Isolators ist durch die Form der Oberfläche ausschlaggebend bestimmt. Der glatte Isolator ist hier ungünstig. Es ist zu unterscheiden zwischen Schlagweiten durch freie Luftstrecken (Luftschlagweiten), Schlagweiten entlang der Oberfläche der Isolatoren (Oberflächenschlagweiten) und Kriechwegen. Das Isoliervermögen einer Kriechstrecke ist sehr stark von äußeren, isolationsmindernden Einflüssen abhängig.

Innere Überspannungen übersteigen im allgemeinen nicht den 2,5fachen Wert der Betriebsspannung, nur in Ausnahmefällen erreichen sie den 3,5fachen Wert. Mit in deutschen Hochspannungsnetzen eingebauten Stabfunkenstrecken wurden die Grundschatzweiten, das sind die kleinsten Schlagweiten zwischen Stabelektroden, bei denen während längerer Betriebsdauer kein Luftdurchschlag erfolgt, ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2

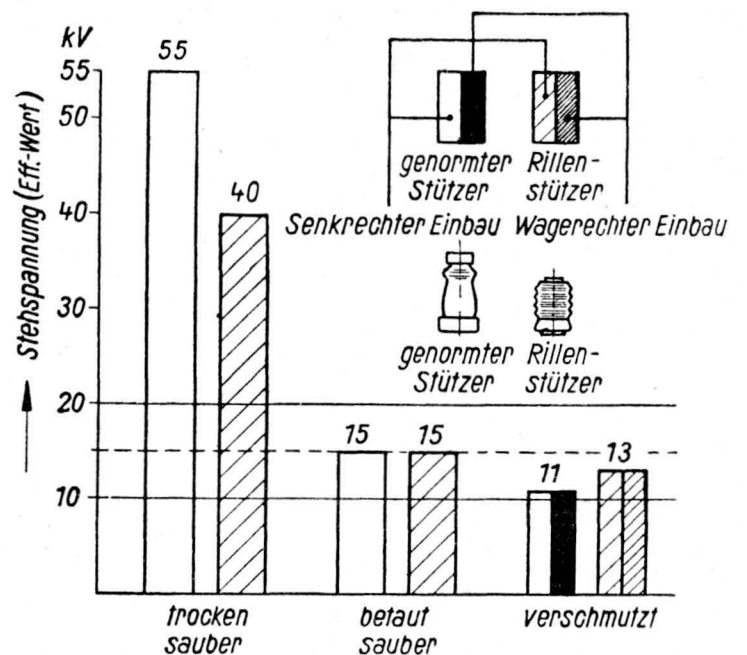


Abb. 3. Isoliervermögen von Normstützern und Rillenstützern 10 kV

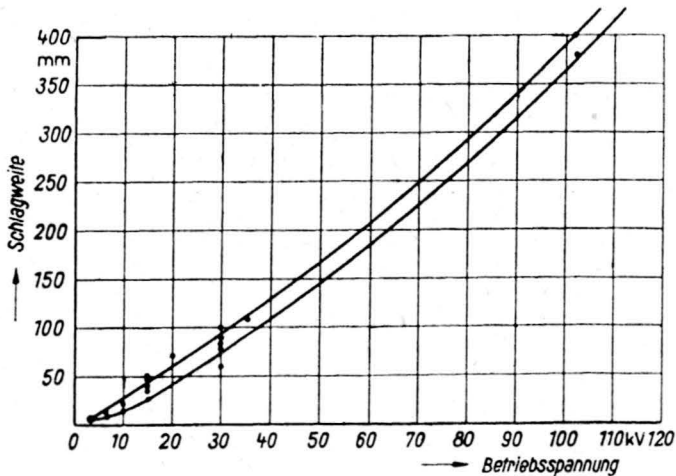


Abb. 2. Grundschatzweiten, in Hochspannungsnetzen, mit Stabfunkenstrecken festgestellt

dargestellt; bei 10 kV beträgt die Grundschatzweite höchstens 25 mm.

Gegen Gewitterüberspannungen können Anlagen durch Schutzrichtungen einwandfrei gesichert werden.

Die Verschmutzung wurde durch Flugaschenstaub erreicht, ihre Dauer bis auf zwei Stunden ausgedehnt. Bei „normaler“ Verschmutzung zeigte der 85 mm-Stützer in senkrechter und wagrechter Anordnung die günstigeren Ergebnisse (13 kV). Damit ist durch Versuche gefunden, daß die Abmessungen der Isolatoren für 10 kV und damit die der Anlagen verkleinert werden können.

Der neu entwickelte Rillenisolator mit seinen wenigen, flachen Rillen ist leicht zu reinigen. Er kann für die gleichen Umbruchkräfte wie der bisher genormte Stützer gebaut werden. Im Kurzschlußfall ist die Beanspruchung am Stützerfuß infolge der geringeren Höhe des Isolators kleiner.

Der Artikel enthält noch Vorschläge für neue Verschmutzungsvorschriften und zeigt an Bildern die Schrumpfung der Abmessungen von Geräten und Schaltzellen durch Verwendung der neuen Rillenstützer.

Schutzeinrichtungen

Überspannungsschutz durch Ableiter. Von Ing. P. L. Lecuona.

Elektrische Maschinen und Anlagen sind im Betrieb oft durch atmosphärische Überspannungen gefährdet. Direkte und induzierte Überspannungen breiten sich in Form von Wanderwellen auf der Leitung aus. Die Höhe der Überspannungswelle wird durch die Stoßüberschlagsfestigkeit der Leitungsisolierung begrenzt. Um eine unzulässig hohe Beanspruchung der Isolierung zu vermeiden, werden heute Ableiter mit Ventileigenschaft und Rohrableiter verwendet. Bei den Ableitern mit Ventileigenschaft werden die Ableiter mit spannungsabhängigem Widerstand und die Ableiter mit Glimmentladung hoher Stromdichte unterschieden.

Ableiter mit spannungsabhängigem Widerstand bestehen aus einer Vorfunkstrecke, Löschfunkstrecke und aus dem, aus Scheiben zusammengesetzten Widerstand. Die Strom-Spannungs-Charakteristik des Widerstandes ist stark gekrümmt, so daß bei einem Stoßstrom von 1500 A der Spannungsabfall nur 2- bis 2,7mal zunimmt. Bei Nennspannung wird der Strom durch den Widerstand auf 10 bis 60 A begrenzt.

Bei Ableitern mit Glimmentladung besteht das aktive Element aus einer fein gekörnten Masse oder aus einem porösen Block. In den vorhandenen Luftzwischenräumen von 0,1 bis 0,01 mm können sich stromstarke Glimmentladungen ausbilden. Die Strom-Spannungs-Charakteristik weist die Form einer Schleife, ähnlich der Kennlinie einer Glimmlampe auf. Als Beispiel wird der Pellet-Ableiter der General Electric Co. beschrieben, der eine stickstoffgefüllte Funkenstreckenkommer besitzt, wodurch die Stabilität der Überschlagscharakteristik der Vielfachfunkenstrecke erreicht wird. Seine aktive Masse besteht aus Bleisuperoxyd. Bei anderen Ableitern dieser Art verwendet man Siliziumkarbid, das durch Behandlung bei hohen Temperaturen mit einer porösen dünnen Schicht von Siliziumdioxid überzogen wird. Man stellt die Zündspannung der Ableiterfunkenstrecke auf den zwei- bis dreifachen Scheitelwert der Nennspannung ein. Es muß besonders bei Ableitern für Spannungen über 60 kV das Verhältnis der Ansprechspannung bei Stoß zur Ansprechspannung bei Niederfrequenz möglichst klein sein, damit ein verzögerungsfreies Ansprechen erfolgt. Man erreicht das durch geeignete Ausgestaltung der Funkenstrecke. Der Ableiterwiderstand muß den bei Betriebsspannung fließenden Strom so weit begrenzen, daß dieser auch im Erdschlußfalle in weniger als einer Halbperiode gelöscht wird.

Die Rohrableiter, die auch Hartgasableiter oder Blasfunkenstrecken genannt werden, bestehen aus einer Funkenstrecke, die von einem Fiber- oder Hartgummirohr umgeben ist. Bei Auftreten einer Überspannung spricht die Funkenstrecke an und leitet diese an Erde ab. Der stehengebliebene Betriebsstromlichtbogen verdampft eine dünne Schicht des Rohrmaterials, wodurch eine turbulente Gasströmung entsteht, die den Lichtbogen löscht. Der Nachteil dieser Ableiter ist, daß sie beim Ansprechen eine heiße Gaswolke ausstoßen. Auch erweitern sich die Blasrohre durch Abbrand. Ein Austausch der Rohre ist jedoch erst nach vielen Jahren erforderlich. Man baut diese Ableiter dort ein, wo der Einbau eines kostspieligen Ventilableiters wirtschaftlich nicht gerechtfertigt ist. Der Rohrableiter muß so bemessen sein, daß er an der Einbaustelle den größtmöglichen Stoßkurzschluß-Wechselstrom noch einwandfrei abschaltet.

Beim Einbau von Ableitern ist allgemein zu beobachten, daß diese möglichst nahe an der gefährdeten Stelle mittels kurzer Zu- und Erdleitungen angeschlossen wer-

den. Die Ableitererde ist mit der Hochspannungsschutz-erde zu verbinden. Läuft eine Wanderwelle gegen ein offenes Leitungsende, so verdoppelt sich ihre Spannung. Es müssen daher in einer Station in jedem Leitungsabzweig Ableiter eingebaut werden, damit Überschläge am offenen Leistungsschalter vermieden werden. Besonders hohe Überspannungen sind auf Leitungen mit Holzmasten zu erwarten, da hier zu der Stoßüberschlagsfestigkeit der Isolatoren noch die des Holzmastes kommt. Wicklungen im Zuge der Leitung (Stromwandler, Regeltransformatoren) können durch Überbrückung mit Ableitern vor Überspannungswellen geschützt werden. Bei Übergang von Freileitung auf Kabel ist auf jeden Fall ein Ableiter anzuordnen, da hier die Überspannungswelle durch Änderung des Wellenwiderstandes erhöht reflektiert wird. Wenn Ableiter zur Vermeidung von Nullpunktschwingungen von Transformatoren oder Generatoren verwendet werden, sind sie für die Phasenspannung auszulegen. Arbeitet ein Generator direkt auf ein Netz, so ist er besonders zu schützen. Der Verfasser empfiehlt hier, parallel zu den Ableitern Kondensatoren zu schalten, um die Wellenstirn abzuflachen. Außerdem sollen in 700 m Entfernung vom Generator weitere Ableiter auf der Leitung angeordnet und dieses Leitungsstück durch Erdseil geschützt werden. Bei gelöschten Netzen sind die Ableiter für die verkettete Spannung zu bemessen, bei Netzen mit fest geerdeten Sternpunkt für die 0,8fache verkettete Spannung.

E. Alzinger

(Der Elektrotechniker 3 [1951] H. 4, S. 103 bis 106, 10 Abb.)

Meßtechnik

T-Spulinstrumente, meßtechnische Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Von H. R. Eggers.

Bei dem Neuaufbau der Meßgerätfertigung hat die AEG Berlin dem bereits schon in früheren Jahren gebauten T-Spulenmeßwerk wieder besonderes Augenmerk zugewendet. Sowohl bei Betriebskontrollgeräten (wärmetechnischen Meßgeräten) als auch bei Messungen rein elektrischer Größen wurde diesem Instrument ein weitgehender Vorrang eingeräumt. Das T-Spulenmeßwerk, eine Weiterentwicklung der Kreuzspulmeßwerke, kann bei tragbaren Instrumenten, Schalttafel-Anzeigeelementen, ebenso bei Fallbügelreglern, Punkt- und Linien-schreibern verwendet werden.

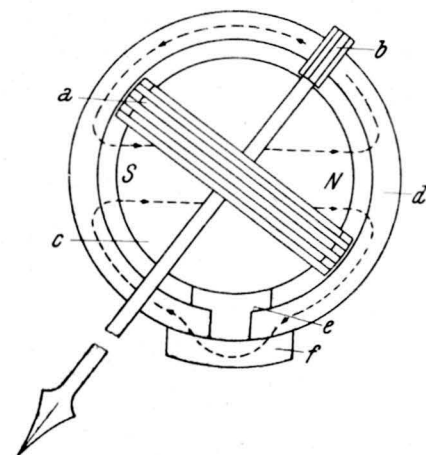


Abb. 1. T-Spulinstrument mit Kernmagnet

a Hauptspule c Kernmagnet e Systemträger
b Hilfsspule d Rückschlußring f Schlußstück

Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau. Der magnetische Kreis besteht aus einem Kernmagnet c und einem Rückschlußring d, der zur Erleichterung der Montage der Spulen geschlitzt ist. Der Schlitz wird durch ein Schlußstück f überbrückt. Das bewegliche Organ besitzt

zwei unter 90° zueinander, in Form eines T angeordnete Spulen, die dem Instrument ja auch den Namen geben. Die Hauptspule a entspricht der Spule eines Drehspulmeßwerkes mit Nullpunkt in der Skalenmitte. Die Hilfsspule b umschließt den Rückschlußring; sie bewegt sich mit ihrer inneren Seite in einem Luftspalt veränderlicher Induktion und erzeugt die Richtkraft. Die Stromzuführung zu den Spulen erfolgt über weitgehend richtkraftfreie Bänder. Der Systemträger e ist zugleich Bindeglied für die Bauteile des magnetischen Kreises.

Aus diesem einfachen Meßwerksaufbau lassen sich folgende Eigenschaften ableiten: kleine Meßwerksabmessungen; geringes Gewicht; leichtes bewegliches Organ; die Hilfsspule übernimmt zum Teil die Aufgabe der Gegengewichte; geringer Fremdfeldeinfluß; je nach Magnetisierung und daher je nach dem Induktionsverlauf im Luftspalt, kann eine sinus-förmige, eine tangens-förmige oder, als meistangestrebte Zwischenlösung, eine weitgehend lineare Skala erreicht werden; die Hauptspule ist bei der Normalausführung halbiert, erlaubt daher Ausführung in Stromverzweigungs-, Serien- oder Gegenschaltung beider Hälften; Drehspulinstrumente können mit dem gleichen Eisenkreis gebaut werden.

Mit Rücksicht auf eine ausreichende Einstellsicherheit muß bei der Normalausführung der Mindeststrom in einer Hauptspulenhälfte $\pm 0,5$ mA betragen, wenn der Strom in der anderen Spulenhälfte 0 ist. Der Widerstand beider Spulenhälften und der Hilfsspule beträgt etwa 75 Ohm, woraus sich eine Mindestleistung für eine Hauptspulenhälfte von $20 \mu\text{W}$ ergibt. Für Profilinstrumente genügen, wegen des geringeren Zeigerausschlages und wegen der meßtechnisch günstigeren vertikalen Systemachse, bereits $2 \mu\text{W}$ bei etwa $\pm 0,16$ mA.

Der Einfluß der Hilfsspannung ist der gleiche wie bei den übrigen Ausführungen von Kreuzspulmeßwerken. Bei Ausfall der Hilfsspannung bringt zur Vermeidung von Fehlablesungen ein Rückstellrelais den Zeiger an den Anschlag. Der Temperatureinfluß der Verbindungsleitungen bis zur Meßstelle liegt in der üblichen Größenordnung. Ein Temperatureinfluß des Anzeigeinstrumentes selbst kann bei Anschluß an Widerstandsgeber bereits mit einfachen Mitteln weitgehend vermieden werden.

Die Anwendungsgebiete für das beschriebene Meßwerk sind zahlreich. Als wichtigstes Beispiel für die Messung eines Einzelwertes sei die Widerstandsthermometerschaltung dargestellt (Abb. 2). In Reihe zur Stromverzweigungsschaltung der Hauptspulhälften a_1 und a_2

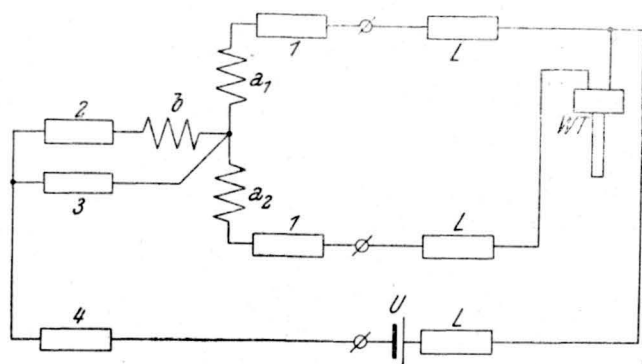


Abb. 2. Dreileiterschaltung für Widerstandsthermometer

a_1 a_2 . . . Hauptspule
 b Hilfsspule
 1, 2, 3, 4 Widerstände
 L Verbindungsleitungen
 WT Widerstandsthermometer
 U Spannungsquelle

liegt die Hilfsspule b mit einem Serienwiderstand 2 zur Temperaturkompensation, einem Parallelwiderstand 3 zur Einstellung des Meßbereiches und einem Widerstand 4 zur Einstellung des Gesamtstromes.

Die Zweileiterschaltung für kleinere Leitungswiderstände ist ganz analog aufgebaut. Ebenso ist aus Abb. 2

leicht die Widerstandsgeberschaltung zu erhalten, indem man sich das Widerstandsthermometer WT durch einen Widerstandsgeber mit der Spannungszuführung am Schleifer ersetzt denkt. — Bei Eichung als Ohmmeter kann je nach Schaltung der Meßwert direkt in Ohm oder als Verhältniszahl zu einem Festwert abgelesen werden. Bei Anschluß an eine Thomsonbrücke ist die Messung sowohl nach dem Nullabgleich- als auch nach dem Ausschlagverfahren durchführbar. Ferner ist eine Verwendung als Leistungsfaktormesser möglich, wenn je ein Wirk- und Blindleistungszähler mit einer Vorrichtung ausgerüstet wird, die eine Impulsfrequenz auf eine Fernleitung überträgt; der Empfänger formt diese beiden Impulsfrequenzen in zwei der Wirk- oder Blindleistung proportionale Gleichströme um, die über die Hauptspulenhälften des T-Spulinstrumentes geführt werden. Der bisher erreichte Skalenverlauf ist allerdings noch wenig befriedigend.

Die Erfassung des Zusammenhanges mehrerer Meßgrößen ist meßtechnisch eine heikle Aufgabe. Die einfache Summierung zweier Meßwerte, die von Widerstandsgebern erfaßt werden, kann zu einer Differenzmessung gemacht werden, wenn die Ausschlagrichtung eines Gebers umgekehrt wird; der Skalenumfang soll bei der Differenzmessung wegen unvermeidlicher Ungleichmäßigkeiten der Geber nicht kleiner als 0 bis 30% gewählt werden. Summen- und Differenzmessung setzen Linearität der Geber voraus; ist dies nicht der Fall, wie z. B. bei Mengmessungen, sind besondere Mittel erforderlich. Ebenso ist die Messung des Verhältnisses zweier Drehzahlen als Verhältnis der Spannungen zweier Gleichspannungsgeber theoretisch exakt möglich, desgleichen die Messung des Quotienten zweier durch Widerstandsgeber erfaßbarer Meßgrößen. Dagegen sind einige weitere angegebene Schaltungen noch mit Ungenauigkeiten behaftet, die durch geeignete Wahl von Widerstandswerten wohl klein gemacht, aber nicht gänzlich weggeschafft werden können. Zu dieser Gruppe von Meßproblemen gehören:

Die Summenbildung von drei oder mehr Meßwerten von Widerstandsgebern; die Produktbildung, die bei einer Änderung eines Faktors um 50% derzeit noch einen Multiplikationsfehler von $\pm 2\%$ aufweist; die Wärmemengemessung; bei der Wirkungsgradmessung, z. B. an Dampfkesseln, kommen noch einige weitere Schwierigkeiten hinzu, so daß ein recht verwickeltes Meßproblem entsteht.

— sm —

(AEG-Mitteilungen 41 [1951], H. 3/4, S. 42 bis 53, 21 Abb., 6 Tabellen.)

Nachrichten aus Industrie, Gewerbe und Wirtschaft

Überblick über das Fertigungsprogramm der Firma Electrovac

Der Ausgangspunkt der elektro-vakuumtechnischen Arbeiten des Unternehmens fällt in das erste Nachkriegsjahr, zu welcher Zeit die Ereignisse zwangen, auch in Österreich eine moderne Fertigung auf dem schwierigen Gebiet der Schaltrohrentechnik aufzunehmen. Zunächst konnte mit der Erzeugung von Quecksilberschaltern erfolgreich begonnen werden. Bis jetzt liegen allein bei Quecksilberschaltern mehr als 150 Lagertypen vor. Um den Forderungen der Industrie und des Gewerbes nachzukommen, setzte bald eine weitverzweigte Fertigung verschiedener Spezialschaltrohren ein, andererseits erschien es aber auch zweckmäßig und notwendig, die Fertigung auf die Erzeugung kompletter mit den Schaltrohren bestückter Relais, Zeitschalter, Temperaturregler, usw. auszudehnen.

Quecksilberschaltröhren. Die Verwendung von Quecksilberschaltröhren hat sich in der Starkstromtechnik sehr verbreitet. Der Grund hierfür liegt in einer sehr großen Zahl von Vorteilen gegenüber Dreh- oder Hebelschaltern mit Festmetallkontakten, wie etwa: Verhinderung der Oxydation der Metallkontakte durch Abschluß der Schaltstellen in einem evakuierten, zumeist mit einem Schutzgas gefülltem Rohr, großer Lebensdauer, geringer Kraftaufwand beim Schalten, Momentumschaltung auch bei langsamer Schalterbewegung, großer Überlastbarkeit und anderes mehr. Bevorzugte Anwendungsgebiete finden Quecksilberschaltröhren bei Relais, Temperaturreglern, Druckreglern, Signalanlagen, elektrischen Uhren, Steuergeräten für elektrische Maschinen, Treppenhäusautomaten, Notlicht- und Blinkanlagen und so weiter.

Hochleistungsschaltröhren. Unter Ausnutzung einer reichen Erfahrung und auf Grund sorgfältiger meßtechnischer Untersuchungen und Dauerproben, kann die Firma Electrovac Schaltröhren auch für ganz große Schaltleistungen, Schalthäufigkeiten und ungünstige Belastungsarten (Metallfadenlampen, Induktivitäten) fertigen.

Gebaut werden Hochleistungs-Kippschaltröhren und Hochleistungs-Tauchschaltröhren. Erstere (Abb. 1), aus

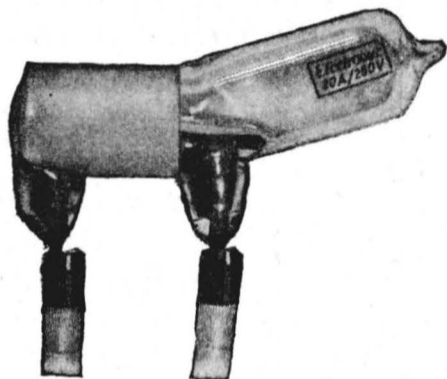


Abb. 1. Electrovac-Hochleistungskippschaltröhre für 20 A/250 V aus Spezialhartglas mit eingeschmolzener Porzellan-Funkenschürze

Spezialglas hergestellt, besitzen zum Schutz des Glases vor dem Schaltfunken eine eingeschmolzene Funkenschürze aus keramischem Material. Solche Schaltröhren werden listenmäßig bis 100 A bei 250 V gebaut.

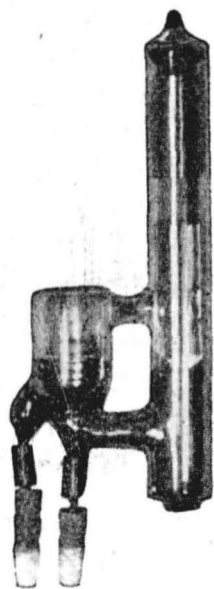


Abb. 2. Electrovac-Hochleistungs-Tauchschaltröhre

Eine besonders interessante Konstruktion stellen die Hochleistungs-Tauchschaltröhren (Abb. 2) dar, die normal bis 50 A Arbeitsstrom bei 250 V lieferbar sind und sich speziell für hohe Schalthäufigkeiten eignen. Die Röhren bestehen aus dem eigentlichen Schaltraum mit keramischer Funkenschürze und einem von diesem vollkommen getrennten zylindrischen Tauchkörperraum, in dem ein eiserner Tauchkörper durch eine Magnetspule bewegt werden kann. Bei Erregung der Spule verdrängt der Tauchkörper in geeigneter Weise das Quecksilber und bewirkt indirekt die Kontaktgabe.

Tauchschaltrélais. Die Verbindung der Tauchschaltröhre mit der Magnetspule ergibt das Tauchschaltrélais. Bei Ausführung des Tauchschaltrélais mit einer kalibrierten Düse, durch die beim Verschieben des

Tauchkörpers Quecksilber gedrückt wird, lassen sich Relais mit verzögerten Ein- oder Ausschaltzeiten zwischen 1 bis 30 s bauen.

Nach diesem Prinzip werden Blinkrelais mit Arbeits- oder Ruhestromblinking hergestellt. Für Verkehrssignale, Reklamebeleuchtung und ähnliches steht (Abb. 3), eine nach dem Prinzip der Selbstunterbrechung arbeitende Sonderkonstruktion eines Tauchschaltrélais zur Verfügung. Die Blinkgeschwindigkeit kann durch Verschieben der Magnetspule zwischen 60 bis 90 Blinkungen/min, das Hell-Dunkel-Verhältnis durch Neigen des Relais geändert werden.

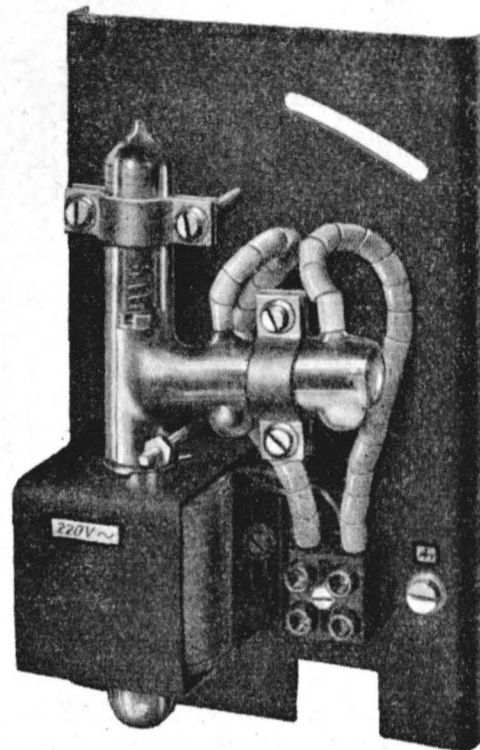


Abb. 3. Electrovac-Blinkrelais für Verkehrssignale, Reklamebeleuchtung usw. mit regelbarer Blinkzahl und regelbarem Blinkverhältnis

Andere Tauchschaltrélais der Firma Electrovac zeichnen sich durch platzsparende Konstruktion (Tauchschaltrélais-Kleinrelais), geringe Erreger-Kontaktbelastung (empfindl. Kontakt-Instr. Relais), durch Verwendungsmöglichkeit zur Steuerung zwischen Grenzwerten oder durch besonders kleinen Eigenverbrauch aus. So kann das Electrovac-Starkstrom-Anschaltrelais direkt durch den Rufwechselstrom des Telefonnetzes betrieben werden (Inbetriebsetzung von Hupen, Sirenen oder Lichtsignalen neben dem normalen Telefonwecker).

Treppenhäusautomaten. Es handelt sich um einpolige Gasdruckschalter mit thermischer Ausschaltverzögerung. Bei diesem Gerät verblüfft die Einfachheit der Konstruktion. Es besteht aus einem U-förmig gebogenen, mit Quecksilber und Gas gefüllten Rohr, in dessen einem Schenkel sich über dem Quecksilberspiegel ein kurzzeitig an die Netzspannung anschaltbarer Widerstand befindet. Wird dieser Widerstand durch Drücken des Treppenhäus-Drucktasters eingeschaltet, erwärmt sich das ihn umgebende Gas, dieses dehnt sich aus und schaltet indirekt durch Verschieben des Quecksilberspiegels einerseits die Treppenbeleuchtung ein, zugleich andererseits aber den Widerstand ab. Nach erfolgter langsamer Abkühlung des Gases (3—5 min, je nach Einstellung), wird die Treppenbeleuchtung wieder abgeschaltet.

Temperaturregler und Thermoschalter. Das Erzeugungsprogramm umfaßt auch die Serienfertigung von Temperaturreglern verschiedenster Bauart wie z. B. Temperatur-Stabregler zur Temperaturregelung mit direkter Schaltung über Quecksilberschaltröhren.

Diese werden hauptsächlich bei Heißwasserspeichern verwendet (Abb. 4). Auch Temperaturregler mit Metall-

pressen, Backöfen, Öl- und Wasserbäder, Trockenschränke und anderes) werden laufend erzeugt.

In diesem Zusammenhange ist auch auf die Fertigung von Thermoreglern mit Ausdehnungs-dosen für die verschiedensten Verwendungszwecke (Temp. Bereiche 25 bis 120° C, Regelempfindlichkeiten $\pm 0,15$ bis $\pm 2^\circ$ C), sowie auf Thermoschalter hinzuweisen. Letztgenannte Geräte sind besonders einfache, praktische Temperaturkonstanthalter für Haushalt-, aber auch Gewerbe- und Industriezwecke aller Art (Heißwasserspeicher, Bügeleisen, Vulkanisier- und Kunstharzpreßanlagen, Schmelzöfen). Ihre besonderen Merkmale, kleinste Abmessungen, hohe direkte Schaltleistungen, große Reglerempfindlichkeit, Staub- und Feuchtigkeitsunempfindlichkeit rechtfertigen ihre zunehmende Verbreitung.

Neuerdings hat die Firma Electrovac zuverlässig arbeitende Kontaktthermometer mit festen Kontakten herausgebracht, deren leichte Adaptierung mit Zusatzgeräten, individuelle Abänderbarkeit der Form und Konstruktion und gute Eichfähigkeit hervorzuheben ist.

Glasdurchführungen werden in großen Stückzahlen sowohl in der Starkstrom- als auch in der Schwachstromtechnik verwendet. Die den Starkstromtechniker interessierenden Eigenschaften sind hohe elektrische Spannungsfestigkeit und mechanische Druckdichte, während geringe Kapazität und kleine dielektrische Verluste Merkmale für den Schwachstromtechniker sind. Die technischen Schwierigkeiten, die vor allem durch die erforderliche Reinheit und Präzision an die Fertigung gestellt werden, sind nur durch vollautomatische Fabrikation zu lösen.

Electrovac
Hacht & Co. K. G.

Wien 20., Forsthausg. 10

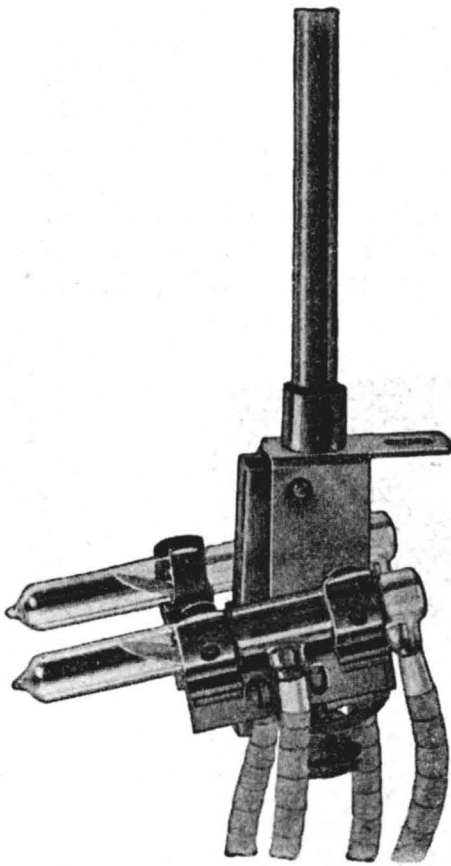


Abb. 4. Electrovac-Temperaturstabregler mit Quecksilberschaltröhre für Heißwasserspeicher

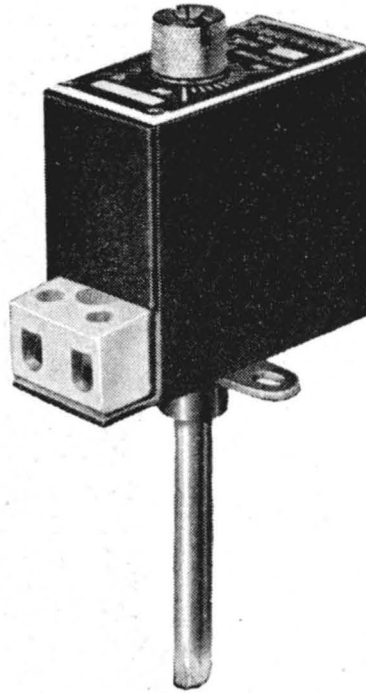


Abb. 5. Electrovac-Temperaturregler mit Metallkontakten

kontakten (Abb. 5), zur indirekten Schaltung von Heizanlagen der Industrie über Steuerrelais (Kunstharz-

Buchbesprechungen

Relaisbuch. Vierte, erweiterte Auflage. Bearbeitet von M. Walter. Herausgegeben von der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke. Mit 177 Textabb., 308 S. Stuttgart: Franck'sche Verlagshandlung. 1951. Geb. DM 20,—.

Das wohl bereits weiten Kreisen auch in Österreich bekannte „Relaisbuch“ der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke ist in einer erweiterten Auflage wieder erschienen. Es ist im wesentlichen die letzte (2. und 3.) Auflage bestehen geblieben, es sind nur die Abbildungen der Schnelldistanzrelais erneuert und am Schluß ein Nachtrag angefügt worden, der die wichtigsten Neuerungen des letzten Jahrzehntes enthält. Insbesondere erwähnt dieser — leider zu kurz — das Konduktanzrelais, vereinfachte Ausführungen des Drehfeldrelais für Mittelspannungsnetze, die Schnellwiedereinschaltung, Verwendung von HF-Kanälen sowie die Gegenleistungsrelais für den Generatorschutz, die unter dem nicht sehr glücklich gewählten Namen „Schieflastrelais“ angeführt werden. Unter Störungsklärung wird ein neuer Störungsschnellschreiber angegeben, der den Störungsablauf in 6 Systemen bereits eine Sekunde vor Beginn der Störung erkennen läßt.

Im übrigen ist das Buch ein Neudruck der zweiten und dritten Auflage, in dem neben einer Übersicht über die Fehlerarten, die grundsätzlichen Eigenschaften und Schaltungen der Relais und Wandler enthalten sind. Dafür, daß hierbei auch ältere Ausführungen noch beschrieben werden (z. B. Polygonschutz), wird besonders der Betriebsmann danken, der sie auch heute noch

vielfach in seinem Netze hat und gerne die Wirkungsweise nachlesen möchte.

Als besonders wertvoll in diesem leicht verständlichen Buche ist die Zusammenstellung der Begriffserklärungen zu bezeichnen, nach der man sich, um Verwechslungen zu vermeiden, in der Praxis mehr als bisher richten sollte. Sie wurde seinerzeit gemeinsam von Verbraucher und Erzeuger erarbeitet und verdient besondere Beachtung.

H. Titze

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik.

Von H. Schönfeld. Mit 296 Textabb., XI, 258 S. Leipzig: S. Hirzel. 1951. Geb. DM 19,—.

Der Inhalt gliedert sich in die Kapitel:

Elektrische Erscheinungen in Leitern — Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern — Elektromagnetische Erscheinungen — Rückblick über die drei Erscheinungsgebiete an Hand der Wechselströme.

Die Titelangabe „wissenschaftliche Grundlagen“ ist wohl nicht ganz zutreffend. Es handelt sich um eine — didaktisch sorgfältig gestaltete — Einführung in die Elektrotechnik wobei Mathematik und höhere Theorie nahezu keine Verwendung finden. Der Studierende wird dieses Buch als erste Einführung mit Vorteil verwenden.

L. Kneissler

Anschriften der Verfasser der Aufsätze dieses Heftes:

Dr. techn. Adolf Ritter, Wien XVIII, Gentzgasse 132.
Dipl.-Ing. H. Lechner, Dir. der Städt. Elektrizitätswerke Salzburg, Salzburg, Elisabeth-Kai 52; Dipl.-Ing. H. Rotter-Woletz, c/o Brown Boveri-Werke, Wien I, Franz-Josefs-Kai 47.
Dr. Ing. habil. K. Kohler, Karlsruhe-Rh., Butlitzstraße 8.
Prof. Dipl.-Ing. K. Huber, Wien V, Margaretengürtel 38.