

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 41 (1950)

Heft: 16

Artikel: Eisenverluste im elliptischen Drehfeld

Autor: Uri, Joseph Ben

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061267>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 16.01.2026

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

denn die verschiedensten Faktoren spielen hier eine massgebende Rolle, vor allem allein schon die Probenahme. Der Fachmann wird dem vorgesehenen Zweck entsprechend die geeignete Spannungsprüfung wählen.

Die «Regeln für Isolieröl» des SEV sehen eine Dauerspannungsprüfung vor. Das Öl wird dabei in einer genormten Anordnung bei einer Elektroden-distanz von 5 mm mit einer Spannung von 30 kV, entsprechend einer Feldstärke von 60 kV/cm, beansprucht. Dabei gilt die Prüfung als bestanden, wenn während 30 min kein vollständiger Durchbruch stattfindet, und wenn während der letzten 5 min keine Teilentladungen festgestellt werden. Nach den seit der Ausgabe der Regeln für Isolieröl im Jahre 1936 gemachten Betriebserfahrungen hat sich gezeigt, dass diese Spannungsprüfung den Anforderungen der Praxis so gut wie möglich nachkommt. Sie reagiert speziell auf sehr feine, in grosser Zahl vorhandene Schwebeteilchen, während sie gegenüber zufälligen, vereinzelten, kleinen Verunreinigungen wenig empfindlich ist.

In den Anforderungen an neues Isolieröl der «Regeln für Isolieröl» (Publ. Nr. 124 des SEV) ist die Einhaltung der SEV-Spannungsprüfung nicht verlangt. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass alle Durchschlagsspannungsprüfungen — auch

diejenige des SEV, wie soeben erklärt wurde — praktisch keine Rückschlüsse auf die Qualität des Öls zulassen, sondern lediglich über den momentanen Reinheitszustand des Öls orientieren. Es soll daher dem Ermessen des Betriebsmannes überlassen werden, wie weit die Einhaltung einer Ölreinheit, die die Einhaltung einer Spannungsprüfung, z. B. derjenigen des SEV, erlaubt, angezeigt erscheint. In diesem Zusammenhang ist unbedingt zu betonen, dass eine unnötige Schärfe zu vermeiden ist, und die gestellten Anforderungen in Berücksichtigung der Konstruktionsart des Apparates den vorhandenen Betriebsbedingungen angepasst werden sollen.

Ferner sei noch darauf hingewiesen, dass Spannungsprüfungen keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Alterungszustand des Öls gestatten.

Auf Grund der oben angeführten Feststellungen empfiehlt das FK 10 des CES,

1. *nach wie vor für die Normallieferung von neuem Öl keine Spannungsprüfung zu verlangen,*
2. *für die Abnahme von vorbehandelten Ölen einzig die Spannungsprüfung nach den Regeln des SEV durchzuführen.*

Adresse der Autoren:

Korrespondenzen sind an Herrn Dr. M. Zürcher, Materialprüf-anstalt des SEV, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, zu richten.

Eisenverluste im elliptischen Drehfeld

Von Joseph Ben Uri, Tel Aviv (Israel) *

621.3.013.23 : 621.3.017.3

Obwohl die Berechnung der Eisenverluste elektrischer Maschinen mit elliptischen Drehfeldern heute weniger von Bedeutung scheint als zu Anfang des Jahrhunderts, als man viele einphasige Kollektormaschinen baute, bietet sie trotzdem noch Interesse für Erbauer von Einphasen-Asynchronmotoren und von Bahnmotoren. Auch für die Konstrukteure von Dauermagneten für Lautsprecher und von Drosselpulen wird eine Berechnung der Hysteresisverluste erwünscht sein, die einer endgültigen Lösung näher rückt, als es die Angaben von Radt tun. Der Autor gibt eine mathematische Ableitung an, die verhältnismässig einfach zu dem von ihm angestrebten Ziel führt.

De nos jours, le calcul des pertes dans le fer des machines à champs tournants elliptiques a moins d'importance qu'au début de ce siècle, lorsque l'on construisait de nombreuses machines monophasées à collecteur. Il offre néanmoins de l'intérêt pour les constructeurs de moteurs asynchrones monophasés et de moteurs de traction. Un calcul des pertes par hystéresis est également utile pour les constructeurs d'aimants permanents, car il fournit des résultats plus précis que les données de Radt. L'auteur indique une formule qui permet d'atteindre d'une manière relativement simple le but proposé.

Die Berechnung der Eisenverluste elektrischer Maschinen mit elliptischen Drehfeldern ist ein ziemlich kompliziertes Problem. Am Anfang des Jahrhunderts war diese Frage von grosser Bedeutung, da man damals viele einphasige Kollektormaschinen gebaut hat. In den letzten Jahren werden meistens Drehstrom-Maschinen verwendet. Unser Problem ist aber noch von Interesse für Berechner von Einphasen-Asynchronmotoren und von Bahnmotoren. Die letztgenannten sind heute meist mit voller Ankerfeld-Kompensation ausgestattet, so dass der Anker in einem reinen Wechselfeld rotiert. Dies ist ein Grenzfall unseres Problems.

Die Aufgabe, die wir uns stellen, wurde 1910 von M. Radt [1]¹⁾ ausführlich behandelt, und seine Ergebnisse hat E. Arnold in sein Standardwerk [5] übernommen. Der Verfasser gibt selbst zu, dass zwar die Berechnung der Wirbelstromverluste ziemlich genau sei, dass es ihm aber nicht gelungen

sei [6], für die Berechnung der Hysteresisverluste, eine theoretisch begründete Gleichung zu finden. Die durch ihn angegebene basiert auf experimenteller Erfahrung und dürfte zweifelhaft sein. Es ist in Wirklichkeit kein Grund dafür vorhanden, dass die Kurven der Verlustfaktoren für Synchronismus unstetig sein sollen [7].

Das Problem ist sehr kompliziert; daher möchte ich nur versuchen, der endgültigen Lösung näher zu kommen. In Wirklichkeit müsste man in Betracht ziehen, dass das Feld nicht sinusförmig verteilt ist, und dass auch die Ströme nicht dem Sinusgesetz folgen, da man doch heute ziemlich hochgesättigte Maschinen baut. Wenn wir alle diese Faktoren berücksichtigen wollten, glaube ich nicht, dass es uns gelingen würde, jemals theoretisch begründete Formeln aufzustellen; daher wollen wir in vorliegender Arbeit wie üblich räumliche und zeitliche Sinusfelder annehmen. Unter dieser Bedingung dürfen die Angaben von Radt für die Berechnung der Eisenverluste im Stator und auch für die Berech-

*) Eingang des Manuskriptes: 9. Dezember 1946.

¹⁾ Siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

nung der Wirbelstromverluste im Rotor stimmen, und wir wollen nur versuchen, eine neue Gleichung für die Hysteresisverluste im rotierenden Anker aufzustellen.

Es ist bekannt, dass ein elliptisches Drehfeld durch das Zusammenwirken zweier oder mehrerer Wechselfelder entsteht, die räumlich und zeitlich phasenverschoben sind. Der Einfachheit halber wollen wir zunächst zwei Wechselfelder von der Amplitude \hat{b} und $k \hat{b}$ annehmen, die räumlich und zeitlich um 90° gegeneinander verschoben sind. Die verschiedenen Wicklungsarten elektrischer Maschinen können meistens durch diese Annahmen ersetzt werden.

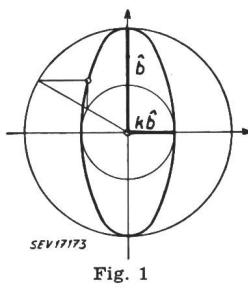


Fig. 1

Fig. 1 zeigt die Amplituden der beiden Wechselfelder und auch das resultierende elliptische Drehfeld. Dieses kann mathematisch ausgedrückt werden durch die Gleichung

$$B_t = \hat{b} [\cos \omega t \cos (\lambda \omega t - \gamma) + k \sin \omega t \sin (\lambda \omega t - \gamma)]; \quad (1)$$

dabei ist $\lambda = n/n_0$ die relative Drehzahl und γ der räumliche Winkel, um den ein beliebiger Punkt P des Ankerumfangs zur Zeit $t = 0$ aus der vertikalen Hauptachse gedreht ist.

Es ist auch bekannt, dass für $k = 0$ ein reines Wechselfeld und für $k = 1$ ein reines Drehfeld entstehen. Für alle anderen Werte von k hat das magnetische Feld eine elliptische Form.

Die Gleichung (1) kann man umformen in

$$B_t = \hat{b} \left\{ \frac{1+k}{2} \cos [\omega t (1-\lambda) + \gamma] + \frac{1-k}{2} \cos [\omega t (1+\lambda) - \gamma] \right\} \quad (2)$$

womit die zwei bekannten invers rotierenden Drehfelder verschiedener Grösse ausgedrückt sind.

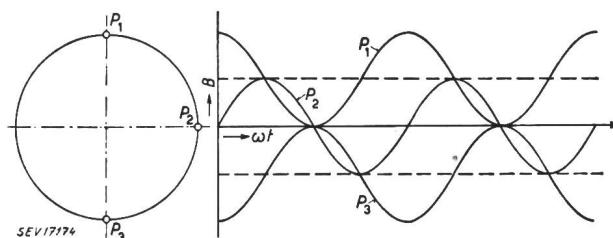


Fig. 2

Die Ummagnetisierungskurven einzelner Punkte des rotierenden Ankers sind komplizierter Natur. Fig. 2 und 3 zeigen solche für Wechselfelder für Synchronismus (Fig. 2) und bei halbsynchroner Drehzahl (Fig. 3). Das mitlaufende Drehfeld magnetisiert einzelne Punkte des Ankerumfangs, wie die gestrichelten Linien zeigen; aber die Wirkung des invers rotierenden Feldes muss superponiert werden, so dass die resultierenden Ummagnetisierungs-

kurven keinen zyklischen Charakter mehr haben. Weitere Einzelheiten gibt die Arbeit von Radt [8]. Man sieht sofort, dass die Maxima und Minima der Magnetisierungskurven nicht gleich und auch für verschiedene Punkte des Ankerumfangs verschieden sind, so dass das Steinmetzsche Gesetz nicht unmittelbar angewandt werden kann.

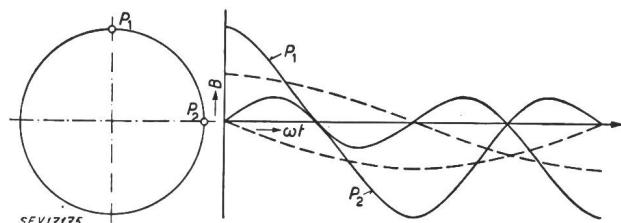


Fig. 3

Das Problem der Berechnung erscheint sofort sehr verwickelt, aber schon Radt hat gezeigt, dass bei der Aufstellung der Gleichung für die Wirbelstromverluste die beiden inversen Drehfelder sich superponieren; daher wird der Wirbelstromverlust

$$P_w = k_w k_f G_w \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{\hat{b}}{10000} \right)^2 V_z \text{ Watt} \quad (3)$$

mit

$$k_w = \frac{1}{2} [(k - \lambda)^2 + (1 - k \lambda)^2]$$

Der Verlustfaktor k_w ist in Fig. 4 als Funktion der relativen Drehzahl dargestellt. Diese Kurven sind der Vollständigkeit halber der Arbeit von Radt entnommen [9].

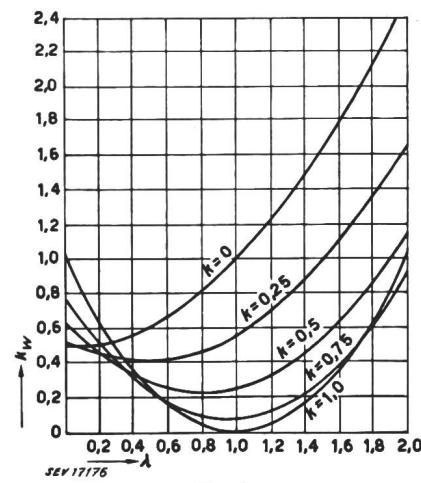


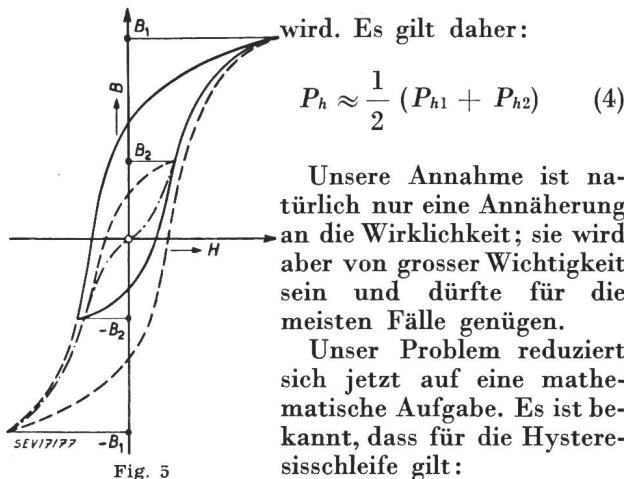
Fig. 4

Bei Berechnung der Hysteresisverluste kann man natürlich nicht die Wirkung der beiden invers rotierenden Drehfelder addieren, sondern muss die Verluste punktweise nach den Maxima und Minima der Ummagnetisierungskurven berechnen.

Fig. 5 gibt uns eine Basis zu einer solchen Berechnung; dort ist der Fall angenommen, dass die Ummagnetisierung von B_1 auf $-B_2$ erfolge. Wir nehmen zunächst an, dass bei symmetrischer Ummagnetisierung von B_1 auf $-B_1$ die Verluste der normalen Hysteresisschleife proportional sind und

durch P_{h1} ausgedrückt werden können. Ebenso ist P_{h2} die Verlustfläche der Ummagnetisierungsschleife von B_2 auf $-B_2$. Man sieht sofort, dass bei einer unsymmetrischen Ummagnetisierung von B_1 auf $-B_2$ und zurück die Verlustfläche

$$P_h \leq P_{h1} - \frac{1}{2} (P_{h1} - P_{h2})$$



$$P_h = k_h \sigma_h \frac{f}{100} \left(\frac{\hat{b}}{10000} \right)^{1.6} V_z \text{ Watt} \quad (5)$$

Der Verlustfaktor k_h kann berechnet werden nach Differenzierung von Gleichung (1) und (2), Berechnung der Maxima und Minima und Einführung einer neuen Variablen $\beta = \lambda \omega t - \gamma$ (siehe Anhang). Es wird dann:

$$\begin{aligned} k_h &= \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi/2} F_m^{1.6} C d\beta \\ F_m &= \frac{\cos^2 \beta + k b \sin^2 \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta}} \\ b &= \frac{\lambda - k}{\lambda k - 1} \\ C &= \left| 1 - \frac{\lambda b}{\cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

Das Integral wurde graphisch (mit Hilfe der Simpsonschen Regel) gelöst und das Ergebnis ist in Fig. 6 dargestellt, und zwar ist hier der Verlustfaktor k_h gezeichnet als Funktion der relativen Drehzahl λ für verschiedene Werte von k , d. h. für verschiedene elliptische Drehfelder.

Das Resultat ist sehr interessant. Der Verlauf der Verlustkurven ist nicht mehr unstetig für Synchronismus, und man sieht, dass für ein reines Wechselfeld (Bahnmotor) der Verlustfaktor für Stillstand $k_h = 0,555$ ist, wie auch Radt angegeben hat, aber für Synchronismus ist der Verlustfaktor $k_h = 0,846$ und nicht 0,555 wie nach Radt. Der geradlinige Verlauf des Verlustfaktors als Funktion der relativen Geschwindigkeit λ [7] ist kaum zu erwarten und die neue Methode, die hier besprochen wurde, erlaubt

vielleicht eine genauere Angabe. Man erkennt, dass die Radtsche Berechnungsart um rund 35% zu niedrige Werte für die Hystereseverluste des synchron rotierenden Ankers ergibt. Auch für doppelten Synchronismus, gewöhnlich bei Leerlaufdrehzahl des Bahnmotors, dürften die Radtschen Werte um rund 12% zu niedrig sein.

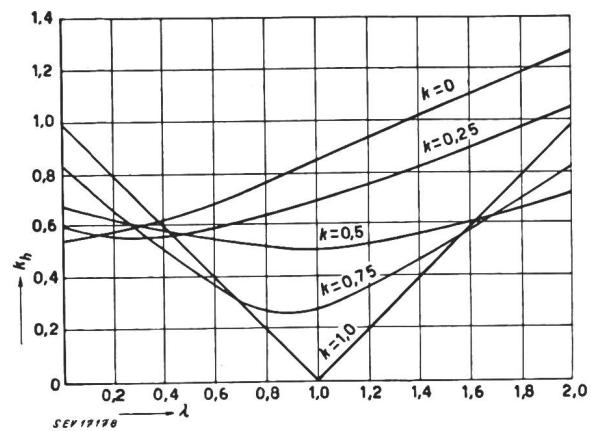


Fig. 6

Die Berechnung der Eisenverluste im Ankerkern dürfte nach den bekannten Formeln (siehe z. B. [12]) erfolgen. Die Gesetze, die von Radt und in vorliegender Arbeit behandelt wurden, gelten ziemlich genau auch für den Ankerkern; im besonderen dürfte die Ummagnetisierung der einzelnen Punkte des rotierenden Ankerkerns ähnlich verlaufen, wie oben für die Ankerzähne beschrieben, natürlich mit einer gewissen räumlichen Phasenverschiebung, die jedoch den Endwert der Verluste nicht wesentlich beeinflussen dürfte.

Es würde von Interesse sein, die Versuche von Radt zu wiederholen, sowohl bei verschiedener Feldverteilung des Stators als auch bei hoher Eisenättigung, da die obigen Berechnungsmethoden alle diese Faktoren nicht in Betracht ziehen. Leider steht mir die hierzu nötige Spezialmaschine nicht zur Verfügung. Eine zusätzliche theoretische Betrachtung in Erweiterung der Arbeit von Töfflinger [10], die besonders den Zeitverlauf des Stromes und Feldes zu ermitteln ermöglichen würde, könnte auch für uns von Nutzen sein. Es sei mir vorbehalten, diese Frage in einer nächsten Abhandlung zu bearbeiten. Ich glaube jedoch, dass die oben beschriebene Methode zur Berechnung der Hystereseverluste nicht nur für den Berechner elektrischer Maschinen von Interesse sein wird, da diese, besonders Gleichung (4), auch bei anderen Aufgaben zu Rate gezogen werden kann. So dürfte z. B. die Berechnung der Hystereseverluste sowohl von Dauermagneten für Lautsprecher, als auch von Drosselpulsen, die mit Gleichstrom vormagnetisiert werden [11], von Interesse sein.

Anhang

In der Gleichung (2)

$$F = \frac{B_t}{\hat{b}} = \frac{1+k}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1-k}{2} \cdot \cos(\alpha + \beta),$$

wo $\alpha = \omega t$ und $\beta = \lambda \omega t - \gamma$ ist, sollen die Maxima und Minima ausgewertet werden.

$$\frac{dF}{d\alpha} = 0 = -\sin \alpha \cos \beta - \lambda \cos \alpha \sin \beta + k \cos \alpha \sin \beta + k \lambda \sin \alpha \cos \beta$$

Hieraus folgt:

$$\tan \alpha = b \tan \beta, \text{ wo } b = \frac{\lambda - k}{\lambda k - 1}$$

und

$$F_m = \frac{\cos^2 \beta + kb \sin^2 \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta}}$$

Der Verlustfaktor für einen vollen Anker wird

$$k_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_m^{1.6} \cdot d\gamma$$

Nehmen wir jetzt β als neue Variable, so wird

$$d\gamma = d\beta \left(\lambda \cdot \frac{d\alpha}{d\beta} - 1 \right)$$

und da $\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{b}{\cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta}$

so wird, wie in Gl. (6),

$$k_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_m^{1.6} C d\beta$$

mit $C = \left| 1 - \frac{\lambda b}{\cos^2 \beta + b^2 \sin^2 \beta} \right|$

Literatur

- [1] Radt, Martin: Die Eisenverluste im elliptischen Drehfeldern. Diss. TH Fridericiana Karlsruhe. — Berlin, 1911. [Auch in: Arbeiten aus dem Elektrotechnischen Institut der Grossherzoglichen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe, Bd. 2, 1910—1911, S. 249...296.]
- [2] Rüdenberg, Reinhold: Über die Verteilung der magnetischen Induktion in Dynamoaankern und die Berechnung von Hysterese- und Wirbelstromverlusten. Elektrotechn. Z. Bd. 27(1906), Nr. 6, S. 109...114.
- [3] Rüdenberg, Reinhold: Wirbelstromverluste in Wechselstrommaschinen mit elliptischem Drehfelde. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 25(1907), Nr. 27, S. 533...536.
- [4] Rother, Erich: Beiträge zur Messung und Berechnung der Eisenverluste in elliptischen Drehfeldern und Wechselfeldern. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 27(1909), Nr. 42, S. 961...966, und Nr. 43, S. 990...995.
- [5] Arnold, E.: Die Wechselstromtechnik. Bd. 5, 2. Teil, S. 430 ff. — Berlin, 1912.
- [6] siehe [1], S. 24.
- [7] siehe [1], S. 25, Fig. 15.
- [8] siehe [1], S. 19...22, Fig. 7...13.
- [9] siehe [1], S. 14 u. S. 17, Fig. 6.
- [10] Töfflinger, Karl: Der Einphasen-Bahnmotor. — München u. Berlin, 1930.
- [11] Vance, P. A.: Saturable Reactors for Load-Control. Gen. Electr. Rev. Bd. 50(1947), Nr. 8, S. 17...21, u. Nr. 9, S. 42...44.
- [12] Arnold, E.: Die Wechselstromtechnik. Bd. 5, 1. Teil, S. 215 ff. — Berlin, 1912.

Adresse des Autors:

Dr. ing. Joseph Ben Uri, 4, Oliphant Street, P.O.B. 4071, Tel-Aviv (Israel).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Eine programmgesteuerte elektrische Rechenmaschine

518.5

Im Januar 1948 wurde der Eidgenössischen Technischen Hochschule ein Institut für angewandte Mathematik angegliedert, das den Zweck hat, die angewandte und numerische Mathematik in unserem Lande zu fördern. Das Institut, das unter der Leitung von Professor Dr. E. Stiefel steht, hat also die Aufgabe, die an der Schule an sich theoretisch dozierte Mathematik in praktischen Fällen anzuwenden und zwar in Fällen, die ein theoretisches Rüstzeug erfordern, wie es nur die Hochschule besitzt, und die Industrie nur in Ausnahmefällen aufbringen kann.

Eine der wichtigsten Aufgaben des neuen Institutes ist zweckgemäß die Entwicklung von Rechengeräten. Es arbeitet denn auch mit der «Kommission zur Entwicklung von Rechengeräten in der Schweiz» eng zusammen. Bekanntlich stellen sich in der Praxis Aufgaben, deren konsequente Durchrechnung jahrzehntelanges Rechnen erfordert, auch wenn die einfacheren Operationen durch die handelsüblichen Rechenmaschinen erleichtert werden. Besonders in Amerika wurden denn auch geradezu phantastische Rechenmaschinen gebaut, die solche Berechnungen in Tagen und Stunden ausführen. In Europa hingegen ist die allgemeine Entwicklung grösßerer Rechenmaschinen eher zurückgeblieben.

Nur wenig bekannt ist und war die Tatsache, dass sich in Deutschland gleichzeitig und von der amerikanischen Entwicklung unabhängig aus privater Initiative eine parallele Entwicklung vollzog, die weitgehend zu den gleichen Ergebnissen kam. Der 1910 in Berlin geborene Bauingenieur Konrad Zuse plante schon während seiner Studien den Bau einer programmgesteuerten Rechenmaschine. Schon in den Jahren 1937...1938 erstellte er mit Freunden zusammen aus privaten Mitteln die ersten Versuchsmodelle. Während des Krieges entwickelte er dann in staatlichem Auftrag Spezialgeräte für aerodynamische Berechnungen. Diese Aufgabe und die zwangsweise Beschränkung der Mittel trugen wesentlich zur Konstruktion des heutigen Modells Z4 bei. Der Erfinder legte dabei das Hauptgewicht auf die Möglichkeit der flexiblen Programmgebung, das heißt auf die

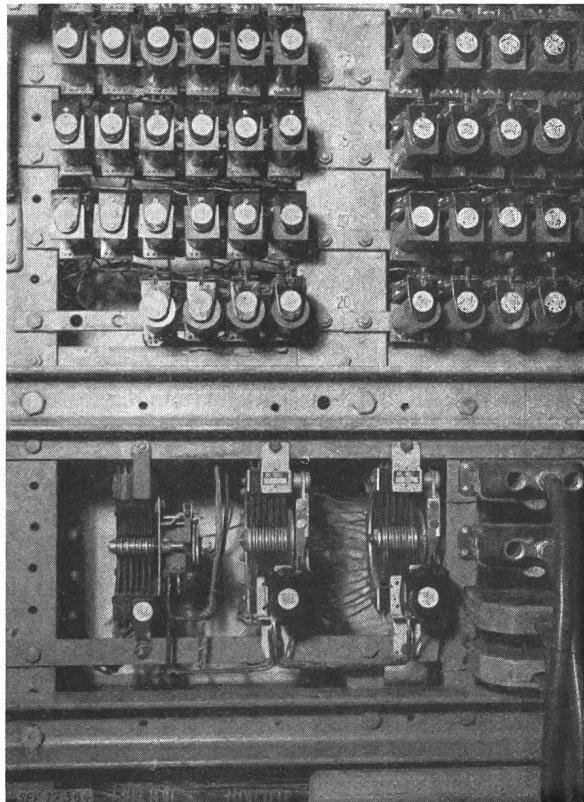


Fig. 1

Teil eines Relais-Schranks

oben: elektromagnetische Telephonrelais
unten: 3 Schrittschalter zur Ausführung von immer gleich ablaufenden Operationen