Trocknung grosser rotierender Maschinen

Autor(en): **Schuler, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 20

PDF erstellt am: **03.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916635

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Trocknung grosser rotierender Maschinen

Von *R. Schuler*, Baden

621.313.12:66.047

Der Feuchtigkeitszustand eines Kraftwerkgenerators oder eines Antriebmotors grosser Leistung wird oft mittels einer Messung des Isolationswiderstands bei Gleichspannung bestimmt. An Hand eigener Untersuchungen wird gezeigt, dass sich heute eine besondere Trocknung von Statorwicklungen in den meisten Fällen erübrigt, und dass selbst neue Maschinen sofort in Betrieb genommen werden können. Bei den nicht mehr hygroskopischen, modernen Isolationen mit härtbaren Kunstharzen oder bei direkt mit Flüssigkeiten gekühlten Wicklungen kommt der Isolationswiderstandsmessung keine grössere Bedeutung mehr zu. Empfehlungen über das zweckmässige Vorgehen beim Trocknen von Maschinen herkömmlicher Foliumisolation, falls dies überhaupt noch als notwendig erachtet wird, und Grenzwerte für den minimalen Isolationswiderstand werden angegeben.

Le degré d'humidité d'un générateur d'usine ou d'un moteur d'entraînement de grande puissance est souvent déterminé au moyen d'une mesure de la résistance d'isolement en tension continue. L'auteur prouve en se basant sur ses propres investigations, qu'un séchage de l'enroulement statorique ne s'impose plus actuellement dans la plupart des cas, et que même des machines neuves peuvent immédiatement être mises en service. La mesure de la résistance d'isolement ne revêt plus une importance majeure dans les isolations non hygroscopiques, les isolations aux résines synthétiques durcissables, ou les enroulements directement refroidis par des liquides. L'exposé fournit des recommandations en vue d'un séchage efficace des machines, pourvues d'isolation à lamelles courante, pour autant qu'un tel séchage soit encore jugé indispensable; les valeurs limites minimales de la résistance d'isolement sont également indiquées.

1. Einleitung

Bei elektrischen Maschinen ist es oft üblich, vor der Inbetriebsetzung eine entsprechende Kontrollmessung durchzuführen, um danach vor allem den Feuchtigkeitszustand der Statorwicklung beurteilen zu können. Ausserdem soll damit auch die Gefahr einer allfälligen Rostbildung an den Blechen des Magnetkreises erkannt werden.

Als Mass für den Trocknungsgrad dient in der Regel der bei Gleichspannung gemessene Isolationswiderstand. Diese Messung hat sich in der Praxis vor allem wegen ihrer Einfachheit in grösserem Umfang eingebürgert. Auch wurde bereits verschiedentlich gezeigt [1][1]), dass die Widerstandsmessung tatsächlich recht gut dazu geeignet ist, um über den Trocknungsgrad eines Isolationssystems ausreichende Unterlagen zu erhalten.

In der vorliegenden Arbeit werden an Hand einiger typischer Beispiele, die aus einer Vielzahl gleichartiger Messungen herausgegriffen sind, Isolationswiderstandsmessungen an einzelnen Wicklungsteilen und an fertigen Wicklungen, isoliert mit Schellack- oder Asphaltmicafolium oder mit einer Kunstharzisolation aufgeführt und besprochen bzw. Empfehlungen über den erforderlichen Isolationswiderstand für die untersuchten Systeme gegeben.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

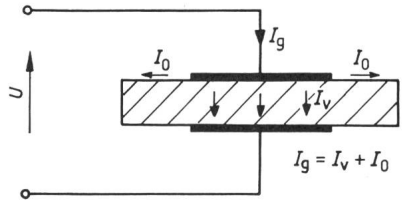

Fig. 1
Prinzipielle Versuchsanordnung
U Gleichspannung; I_0 Oberflächenstrom; I_g Gesamtstrom; I_v Durchgangsstrom

2. Widerstandsmessungen an Wicklungsteilen, verschiedene Einflüsse auf den Isolationswiderstand

Wird an ein Isoliermaterial eine Gleichspannung angelegt (Fig. 1), so fliesst ein zeitlich abnehmender Strom I_g mit den zwei Anteilen Oberflächenstrom I_0 und Durchgangsstrom I_v. Der Durchgangsstrom kann als Summe von drei zeitlich verschieden verlaufenden Stromkomponenten aufgefasst werden:

a) Dem kapazitiven Ladestrom, der jedoch in den praktisch vorkommenden Fällen nach sehr kurzer Zeit abgeklungen ist und deshalb in den weiteren Überlegungen nicht mehr berücksichtigt wird;

b) Dem Isolationsstrom I_i, der durch die geringe Leitfähigkeit, die auch das beste Dielektrikum aufweist, bedingt und praktisch zeitunabhängig ist;

c) Dem sog. Nachlade- oder Absorptionsstrom I_a, der auf Ladungsverschiebung im Dielektrikum zurückzuführen ist; vielfach kann für seine zeitliche Abhängigkeit gesetzt werden:

$$I_a = k\,t^{-n}$$

mit n und k als Konstanten unter vorgegebenen Bedingungen.

Den zeitlichen Verlauf des Gesamtstromes, des Isolationsstromes und des Nachladestromes stellt Fig. 2 in einem speziellen Fall dar (Stabstücke nach Fig. 3). Durch Schirme am Ende des Messbelages war dabei der Oberflächenstrom eliminiert.

Als Isolationswiderstand R_I wird üblicherweise der Quotient aus angelegter Spannung U zum Stromwert I_g, eine Minute nach Anlegen der Spannung, bezeichnet. Der zeitliche Verlauf des Gesamtstromes wird charakterisiert durch die sog. Nachladezahl N_p (auch Polarisationsindex genannt als Verhältnis der Widerstandswerte gemessen nach 10 min bzw. nach 1 min ab Anlegen der Spannung:

145 – 159

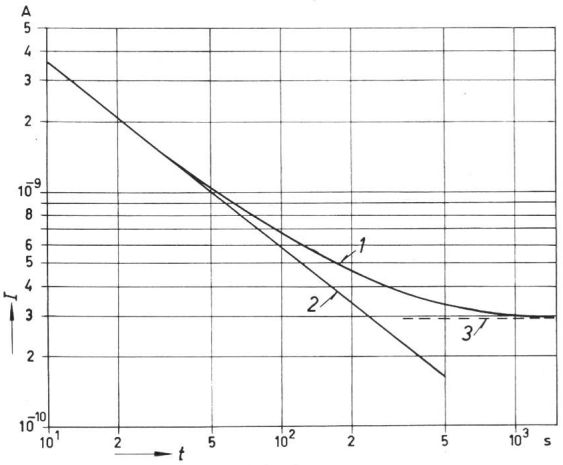

Fig. 2
Prinzipieller Stromverlauf in Funktion der Zeit t
I Strom; *1* Gesamtstrom I_g; *2* Absorptionsstrom I_a; *3* Isolationsstrom I_i

$$N_p = \frac{R_{10}}{R_1}$$

Der Isolationswiderstand wird oft mit einem Kurbelinduktor gemessen, bei längeren Messzeiten erlaubt allerdings nur ein Motorantrieb eine ausreichend genaue Messung. Genauere Werte erhält man bei Verwendung einer Batterie von einigen hundert Volt, wobei mit einem empfindlichen Galvanometer der Isolationsstrom gemessen wird. Die beschriebenen Messungen wurden so durchgeführt.

Der Isolationswiderstand einer elektrischen Maschine ist nebst der Feuchtigkeit noch von verschiedenen anderen Faktoren abhängig, auf die nachfolgend eingegangen wird.

2.1 Art der Isolation

Die in Europa bis vor wenigen Jahren praktisch ausschliesslich verwendeten Isolationen bestanden meist aus einer Foliumisolation (Asphalt- oder Schellackmicafolium) im Nutteil und einer Bandisolation (Glimmer-Glas-Baumwolle-Lackband) im Wicklungskopf. Die Übergangsstelle von der Folium- zur Bandisolation ist dabei sorgfältig auszuführen, um eine Schwächung der Isolierung an dieser Stelle zu vermeiden (Fig. 4a). Bei Kunstharzisolationen, wie sie in den letzten Jahren speziell bei grossen Turbogeneratoren fast allein noch Anwendung finden, wird dagegen ein geeignetes Isolierband kontinuierlich über Nut- und Bügelteil gewickelt und anschliessend mit einem lösungsmittelfreien härtbaren Kunstharz durchtränkt [2]; man erhält auf diese Weise eine durchgehend gleichmässig aufgebaute Isolation (Fig. 4b). Dieser unterschiedliche Aufbau ist, neben den verschiedenen Eigenschaften der verwendeten Materialien, für die Grösse des Isolationswiderstandes von Bedeutung und geht in hohem Masse in die Widerstandsmessung ein. Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Widerstandswerte haben auch die heute allgemein verwendeten halbleitenden Schutzlacke im Wicklungskopf.

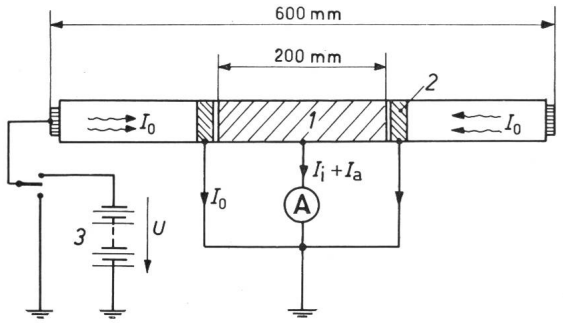

Fig. 3
Verwendete Versuchsanordnung
1 Messbelag; *2* Schirmbeläge; *3* Spannungsquelle 500 V
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

2.2 Temperatur

Die Temperatur übt einen entscheidenden Einfluss auf den Isolationswiderstand aus. Manche Ungereimtheiten bei der Auswertung von Maschinenmessungen rühren von einer ungenauen Erfassung der massgeblichen Temperatur der Wicklungsisolation her. Zum besseren Vergleich der Messwerte ist es üblich, den Widerstandswert auf eine Bezugstemperatur (Raumtemperatur) von 20 °C (in den USA 40 °C [3]) umzurechnen:

$$R_{20} = R_\vartheta k_\vartheta$$

wobei R_ϑ den gemessenen Widerstandswert bei der Temperatur ϑ und k_ϑ eine von der Isolation und der Temperatur abhängige Kennzahl darstellen. Die auf Grund zahlreicher Messungen an Versuchsstäben bestimmte Temperaturabhängigkeit erwies sich sowohl für klassische Micafoliumisolationen als auch für die untersuchte Kunstharzisolation praktisch gleich (Fig. 5).

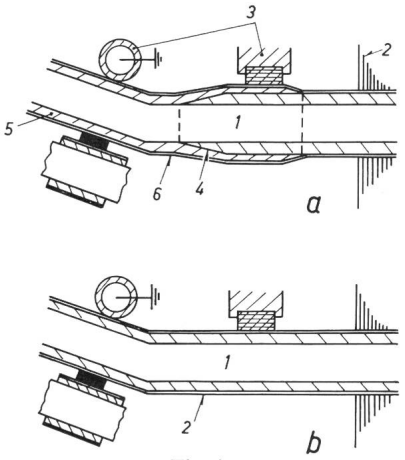

Fig. 4
Prinzipielle Ausführungsarten der Stabisolierung
a diskontinuierliches System mit Stoßstelle. *1* Stabkupfer; *2* Statorblechung; *3* Wickelkopfabstützung; *4* Stoss; *5* Bügelisolation; *6* Schutzlack; *b* kontinuierliche Bandisolation. *1* Teilleiterpaket; *2* Schutzlack

Widerstand und Strom hängen von der Temperatur in beiden Fällen exponentiell ab:

$$R = R_0 \, e^{-\alpha\vartheta}$$

mit $\alpha \approx 0{,}06$.

Die Darstellung nach Fig. 6 mit $k_\vartheta = f(\vartheta)$ erlaubt die rasche und einfache Umrechnung. Für die vorliegenden Isolationen ergab sich eine ungefähre Verdoppelung von k für jeweils 12 °C Temperaturzunahme (s. z. B. [4]).

Bei der Trocknung von kompletten Maschinenwicklungen fand man praktisch die gleichen Abhängigkeiten, wie sie bereits für das einzelne Wicklungselement angegeben wurden (Fig. 7).

Die Nachladezahl ist auch temperaturabhängig und zwar über dem interessierenden Temperaturbereich ebenfalls exponentiell (Fig. 8). Bei neuwertigen Isolationen werden zwar anfänglich vielfach gewisse Abweichungen von diesem Verlauf festgestellt [5]; nach mehrmaligem Erwärmen der Isolation waren diese Unregelmässigkeiten jedoch nahezu verschwunden. Ferner hat sich ergeben, dass der Isolationsstrom

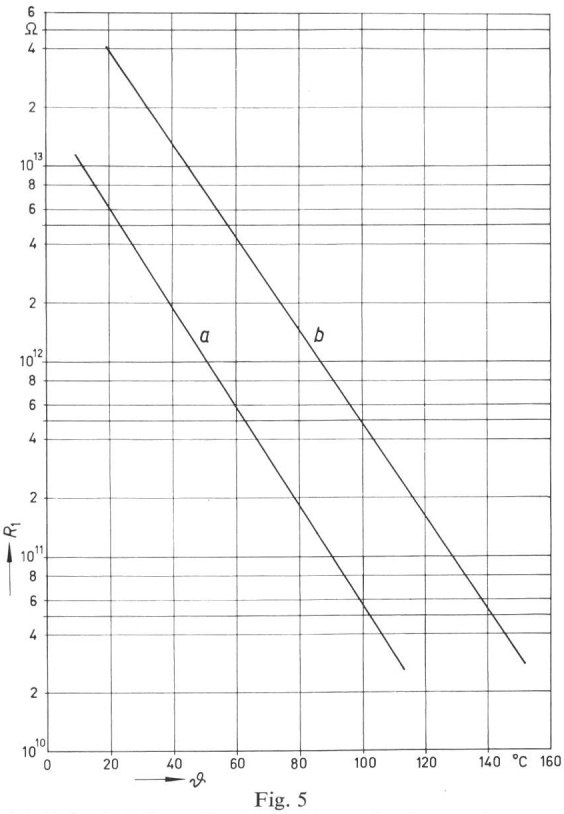

Fig. 5
Abhängigkeit des Isolationswiderstandes R_1 von der Temperatur ϑ, gemessen an Stäben nach Fig. 3
a Asphaltmicafoliumisolation; *b* Kunstharzisolation (Micadur)

bei doppeltlogarithmischer Auftragung in diesen Fällen praktisch geradlinig verläuft, währenddem die Abhängigkeit des Absorptionsstromes von der Temperatur weniger übersichtlich ist.

2.3 Meßspannung

Der Isolationswiderstand wird heute meist bei Spannungen zwischen 500 V und 2500 V gemessen. In diesem Bereich ist die Spannungsabhängigkeit relativ klein (Fig. 9).

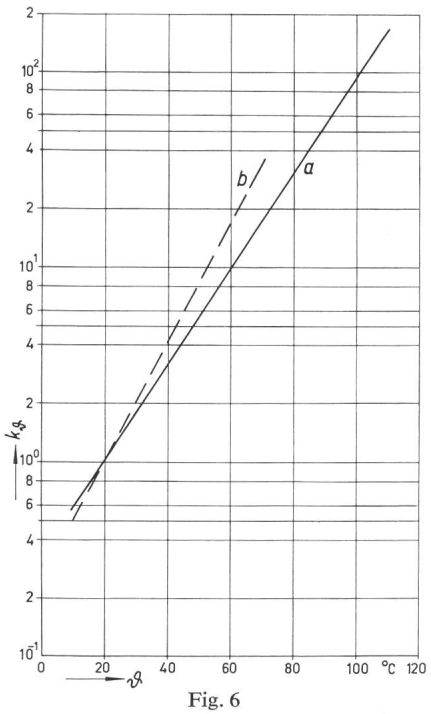

Fig. 6
Isolationswiderstand-Temperaturkoeffizient k_ϑ in Funktion der Wicklungstemperatur ϑ
a gültig für die hier untersuchten Systeme; *b* nach AIEE Nr. 43 [3]

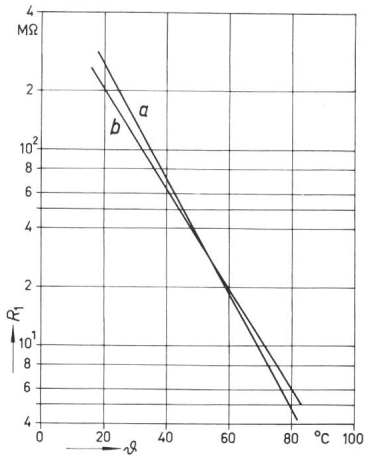

Fig. 7
Abhängigkeit des Isolationswiderstandes R_1 von der Temperatur ϑ, gemessen an eingebauten Wicklungen mit Asphaltmicafolium-Isolierung
a 31,2 MVA, 36 kV, 3000 U./min; *b* 60 MVA, 13,6 kV, 150 U./min

2.4 Feuchtigkeit und andere Einflüsse

An verschiedenen Versuchsstäben nach Fig. 3 mit Kunstharz- oder Asphaltmicafolium isoliert, wurde der Verlauf des Isolationsstromes über der Zeit mit und ohne Abschirmungen gemessen, und danach die Stäbe während 2 Monaten in feuchter Luft (relative Feuchtigkeit > 90 %, ϑ = 40 °C) gela-

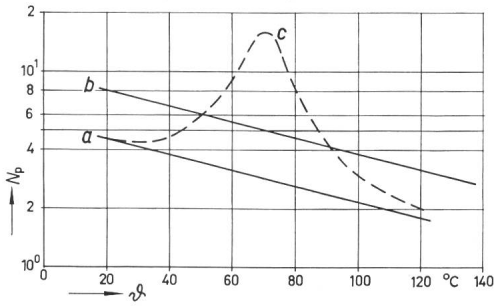

Fig. 8
Abhängigkeit der Nachladezahl N_p von der Temperatur, gemessen an Stäben nach Fig. 3
a Asphaltmicafolium; *b* Kunstharzisolation (Micadur); *c* Asphaltmicafolium [5]

gert und die gleichen Messungen wiederholt. Die Resultate für das Asphaltmicafolium sind in Fig. 10 wiedergegeben. Die Stromwerte hatten sich durch die feuchte Lagerung deutlich geändert, vor allem fällt der grosse Einfluss des Oberflächenstromes auf. Oberflächliches Trocknen der isolierten Stabenden verringerte sofort den Gesamtstrom I_g (Kurve 3).

Bei kunstharzisolierten Stäben erhält man dagegen auch nach einer Feuchtigkeitslagerung die gleichen Stromwerte wie

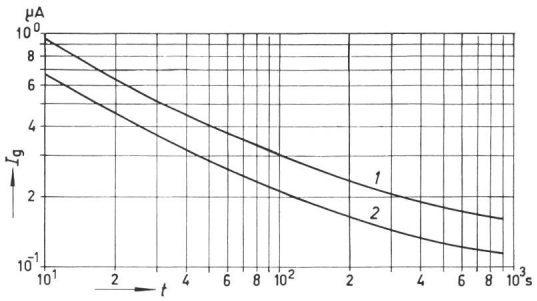

Fig. 9
Messung des Isolationsstromes I_g in Funktion der Zeit t bei verschiedenen Messpannungen
Generator 100 MVA, 13 kV, 600 U./min
1 3000 V, N_p = 2,13; *2* 500 V, N_p = 2,15

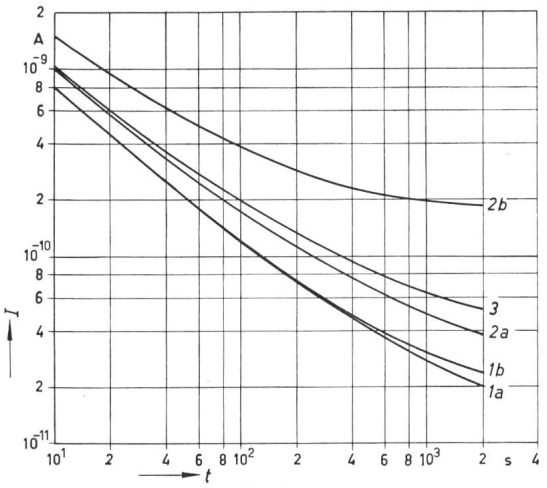

Fig. 10

Messung des Stromverlaufes in Funktion der Zeit t an mit asphaltmicafolium-isolierten Stäben nach Fig. 3 (Messung bei 20 °C)

1a i_v abgeschirmt gemessen, $N_p = 4{,}5$ } Isolation trocken
1b i_g ohne Abschirmung, $N_p = 4{,}3$

2a i_v abgeschirmt gemessen, $N_p = 3{,}7$ } Isolation feucht
2b i_g ohne Abschirmung, $N_p = 2{,}3$

3 i_g ohne Abschirmung, $N_p = 3{,}5$; Isolation feucht, Kopfpartien oberflächlich trocken

zuvor. Ohne abgeschirmte Messelektroden wurden zwar für den feuchten Zustand etwas grössere Oberflächenströme gemessen, die aber nach kurzer Trocknung auf den ursprünglichen Wert abgesunken waren.

Bei einer feuchten Isolation (Wicklung) spielt somit hauptsächlich die Oberflächenleitfähigkeit eine grosse Rolle, während der Querwiderstand beim aufgebügelten Asphaltmicafolium im allgemeinen nur wenig, bei einer Kunstharzisolation praktisch überhaupt nicht beeinflusst wird.

Selbstverständlich können diese Oberflächenleitfähigkeiten bei starker Verschmutzung und Feuchtigkeit (herrührend von der Montage oder bei Maschinen, die schon längere Zeit im Betrieb waren) noch wesentlich höhere Werte annehmen. Eine zusätzliche visuelle Beurteilung ist daher immer zu empfehlen.

3. Messungen an eingebauten Wicklungen

3.1 Meßschaltung

Zur Beurteilung des Trocknungsgrades einer Wicklung genügt es im allgemeinen, den Isolationswiderstand der ganzen Wicklung, d. h. aller Phasen gegen das Gehäuse, zu messen. Bei phasenweiser Messung werden meist nur unbedeutende Unterschiede zwischen den einzelnen Messwerten beobachtet. Als Richtwert mag gelten, dass der Isolationswiderstand einer Phase das Doppelte des für die gesamte Wicklung gegen Erde zu erwartenden Wertes beträgt (Tabelle I). (Man erhält weniger als das Dreifache, weil zu jeder Phase parallel noch Ableitwiderstände liegen, herrührend von den Abstützelementen und Leitlacken im Wicklungskopf [siehe Ersatzschema Fig. 11].

Isolationswiderstände eingebauter Wicklungen (Neuzustand)

Tabelle I

Maschinendaten	Isolationsart	Isolationswiderstand R_1 pro Phase MΩ	Isolationswiderstand R_1 gesamte Wicklung MΩ
19,5 MVA/10,5 kV	Schellackfolie	98,5	48
100 MVA/13 kV	Asphaltfolie	386	185
220 MVA/11 kV	Kunstharz	2720	1395

Nachfolgend soll unter dem Isolationswiderstand immer der für die gesamte Wicklung gegen Gehäuse gemessene Wert (bezogen auf eine Temperatur von 20 °C) verstanden werden.

3.2 Notwendigkeit der Trocknung vor der Inbetriebsetzung

Wie bereits gezeigt wurde, erübrigt sich eine Trocknung der Maschine vor der Inbetriebsetzung bei den kontinuierlichen Kunstharz- oder auch Silikongummiisolationen. Lediglich auf eine allfällige Oberflächenfeuchtigkeit oder Verschmutzung (z. B. an den Durchführungsklemmen) ist dabei zu achten. Der Isolationswiderstand solcher Maschinen ist hauptsächlich vom konstruktiven Aufbau (z. B. nicht isolierte Stabenden) und von den verwendeten Schutz- und Überzugslacken im Wicklungskopf abhängig, während der eigentliche Widerstand der Isolation um Zehnerpotenzen höher liegt. Auch im Hinblick auf die vieljährigen Erfahrungen mit solchen Isolationen gilt die Aussage, dass kunstharzisolierte Wicklungen im allgemeinen keiner Trocknung, wie z. B. Maschinen mit hygroskopischen Wicklungen, bedürfen.

Ausgedehnte Untersuchungen über das betriebsmässige Vorgehen bei Maschinen mit klassischen Isolationen der untersuchten Fabrikate haben gezeigt, dass bei den heutigen Ausführungen auch bei diesen Maschinen nur noch selten eine Trocknung vor der Inbetriebsetzung vorgenommen wird. Falls dies doch der Fall sein sollte, so geschah es nur aus Vorsicht oder weil der Widerstandswert der Isolation zu tief erschien. In Fällen, wo die Wicklung im Kraftwerk selbst eingebaut wird, ist es allerdings oft üblich, die Maschine während der Montage von unten her zu wärmen. Auf solche Hilfsmittel kann jedoch verzichtet werden. In Fig. 12 ist der Isolationswiderstand für eine in einem Kavernenkraftwerk zusammengebaute Maschine dargestellt. Ein im Klemmenraum der Maschine aufgestelltes Warmluftaggregat blies während der ganzen Montagezeit warme Luft durch die Maschine. Bei hoher Luftfeuchtigkeit blieb der Isolationswiderstand praktisch konstant, bei Inbetriebnahme der Klimaanlage des Maschinenhauses stieg er sofort an, was deutlich auf den Oberflächeneinfluss hinweist. Bei der Montage der weiteren Maschinen wurde daher auf eine Vortrocknung verzichtet; ohne nachteilige Folgen konnten sie mit niedrigen Widerstandswerten von ca. 30 MΩ in Betrieb genommen werden.

Auch bei der Montage von Vertikalsynchronmaschinen für ein Flusskraftwerk wurde bei starker Änderung der Luftfeuchtigkeit eine gewisse Widerstandsänderung festgestellt, doch brachte eine Trocknung nur mit Heizaggregaten keine wesentliche Widerstandszunahme mehr. In allen Fällen war es möglich, die vorgeschriebene Spannungsprüfung ohne

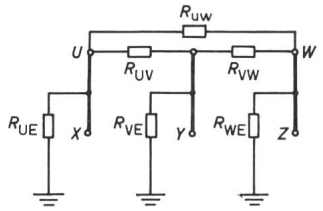

Fig. 11

Ersatzschaltbild für verschiedene Isolationswiderstände einer eingebauten Wicklung

$R_{UE}, R_{VE}, R_{WE} \approx R_1$ Widerstand der Nutisolation Phase-Erde;
$R_{UV}, R_{VW}, R_{UW} \approx R_2$ Widerstand der Kopfisolation Phase-Phase

Widerstand der ganzen Wicklung gegen Erde: $R = \dfrac{R_1}{3}$

resultierender Widerstand bei Messung einer Phase $R' = \dfrac{R_1 R_2}{2R_1 + R_2}$

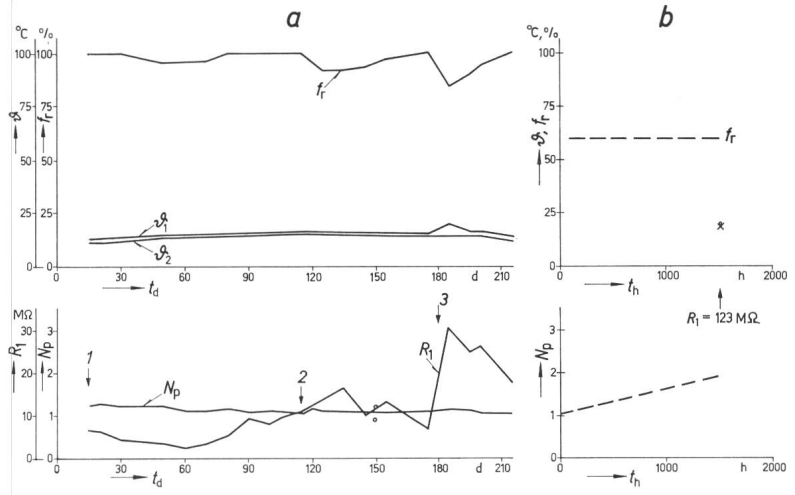

Fig. 12
Messung des Isolationswiderstandes R_1 während der Montage *(a)* **und Inbetriebsetzung** *(b)* **an zwei 3-Phasen-Generatoren von 100 MVA, 13 kV, n = 600 U./min**
f_r relative Luftfeuchtigkeit; ϑ' Wicklungstemperatur; ϑ_2 Raumtemperatur; N_p Nachladezahl; R_1 Isolationswiderstand
1 Heizanlage im Klemmenraum im Betrieb; *2* Klimaanlage der Kavernenzentrale in Betrieb (kurzzeitig); *3* Maschine 14 Stunden im Leerlauf getrocknet; (○) Maschine Nr. 2 ohne Klimaanlage, während der Montage gemessen; t_d Zeit in Tagen; t_h Zeit in Stunden

Schwierigkeiten durchzuführen, trotzdem z. B. die Nachladezahl nur den Wert von 1,2 erreichte.

Die öfters erhobene Forderung, dass sowohl der Isolationswiderstand als auch die Nachladezahl gewisse Minimalwerte übersteigen sollten [3], bevor eine Maschine in Betrieb genommen wird, erscheint auf Grund dieser Messungen und für die untersuchten Isolierungen nicht am Platze. Besonders die Nachladezahl kann auch noch nach mehrwöchiger Betriebs- oder Trocknungszeit relativ klein sein, ohne dass deswegen die Betriebssicherheit in Frage gestellt wäre (Fig. 13). In jedem Fall sollte es dem Hersteller überlassen bleiben, der die Isolation der Maschine und den Wicklungsaufbau am besten kennt, ob bei relativ niedrigem Isolationswiderstand der Betrieb aufgenommen werden kann. Damit liessen sich oft lange Trocknungszeiten vermeiden, und die Maschine steht früher für den Betrieb zur Verfügung.

Sofern eine Trocknung überhaupt noch notwendig erscheint, hat sich Trocknen im Leerlauf bei Belüftung und gedrosselter Kühlung oder bei kurzgeschlossener, schwach erregter Maschine gut bewährt. Das Trocknen vor einer Inbetriebsetzung mit Heizkörpern unter der Maschine und zusätzlichen Gebläsen ist weniger wirksam. Es ist darauf zu achten, dass die Wicklungstemperatur, gemessen am Nutthermometer, 60...70 °C nicht überschreitet. Sie ist unter gleichmässiger Steigerung innerhalb von einigen Stunden auf die Ausheiztemperatur zu bringen. Dabei muss man für ausreichende Abfuhr der feuchten Luft sorgen.

3.3 Richtwerte für den Isolationswiderstand

Der Messung des Isolationswiderstandes kommt demnach nicht die ihr bisher oft zugeschriebene grosse Bedeutung zu bei der Inbetriebsetzung einer Maschine. Trotzdem empfiehlt es sich informativ eine solche Messung durchzuführen; manchmal können dadurch gewisse Mängel festgestellt werden (z. B. von der Montage herrührende starke Verunreinigungen oder sonstige Ungleichmässigkeiten). Als Richtwert erscheint der in [3] angegebene Wert:

$$R_1 = C(n+1) \qquad \text{M}\Omega$$

zweckmässig.

R_1 1-min-Widerstandswert bei 20 °C; n Maschinenspannung in kV; C Umrechnungsfaktor auf die in Europa übliche Bezugstemperatur von 20 °C; $C = 3$ für die untersuchten Isolationssysteme.

Für den Isolationswiderstand einer Maschinenwicklung sollten bei 20 °C z. B. folgende Richtwerte nicht unterschritten werden:

$U_n = 11$ kV: $R_1 = 36$ MΩ;
$U_n = 21$ kV: $R_1 = 66$ MΩ

Als weitere Kenngrösse wird oft auch die Nachladezahl N_p ausgewertet. Bei einer neuen sauberen Maschine misst man:

$N_p \approx 1{,}5$ für Asphalt- oder Schellackmicafolium;
$N_p \approx 2$ für kontinuierliche Kunstharzisolation.

Gerade bei neuen Maschinen ist aber der Zahlenwert der Nachladezahl stark beeinflussbar und hängt z. B. auch vom Aushärtungsgrad der Schutzlacke ab.

Im Betrieb steigen die erwähnten Werte meist noch an, wobei diese Zunahme bei Kunstharzwicklungen oft schon nach kurzer Zeit beträchtlich sein kann.

Sonstige, gelegentlich schon vorgeschlagene Formeln zur Berechnung des zu erwartenden Isolationswiderstandes [7], etwa in Abhängigkeit von Maschinenspannung, Leistung und Drehzahl der Maschine, Nutenzahl und ähnlichem sind mehr von theroretischem Interesse und geben meistens keinen weiteren Aufschluss.

Auch in den neuesten AIEE-Empfehlungen [3] zur Widerstandsmessung wird auf die frühern Formeln zur Widerstandsberechnung verzichtet. In diesem Zusammenhang mag es auch interessieren, dass z. B. für einen 13,8-kV-Generator (10 MVA, 3600 U./min, Klasse B) in den Empfehlungen vom Jahre 1946 ein minimaler Widerstand bei 40 °C von 165 MΩ, in den Empfehlungen 1950 von 100 MΩ und in den neuesten von 1961 von nur noch 14,8 MΩ vorgeschrieben wird.

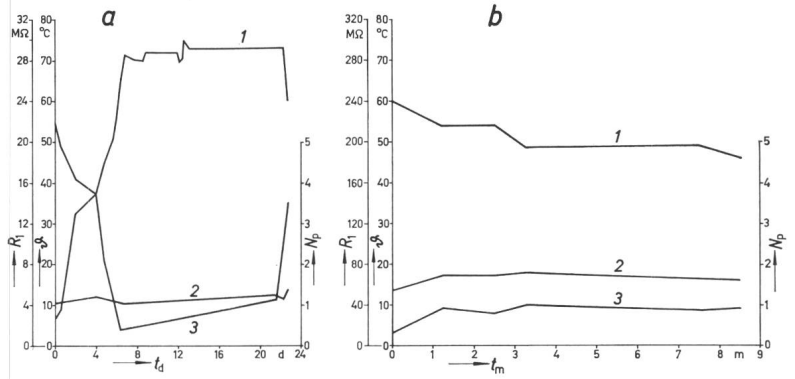

Fig. 13
Messung des Isolationswiderstandes R_1 und der Nachladezahl N_p in Funktion der Trocknungs- *(a)* **bzw. Betriebszeit** *(b)*
(60-MVA-Generator, Spannung 13,8 kV, Isolation Asphaltmicafolium) Messung mit einem 2500-V-Motor-Megger in **der Anlage**
1 Temperaturverlauf; *2* Nachladezahlverlauf; *3* Widerstandsverlauf (1-min-Wert); t_d Zeit in Tagen: t_m Zeit in Monaten

Vergleich des 1-min-Widerstandswertes mit der Isolationszeitkonstante [1])

Tabelle II

Maschinendaten	Isolationsart	Isolationswiderstand R_1 MΩ	Nachladezahl N_p	Isolationszeitkonstante τ [2])	Zustand der Maschine
A: 125 MVA/13 kV	KH	210	2,3	242	neu
B: 75 MVA/10,5 kV	KH	278	2,6	545	neu
C: 19,5 MVA/10,5 kV	SF	69	1,3	144	neu
D: 100 MVA/13 kV	AF	87	1,7	181	neu
E: 100 MVA/13 kV	AF	91	1,7	213	neu
F: 220 MVA/11 kV	KH	3440	3,5	7860	6 Jahre in Betrieb
G: 22 MVA/11 kV	AF	664	3,1	1980	35 Jahre in Betrieb
H: 32,5 MVA/10,3 kV	SF	42	4,7	563	25 Jahre in Betrieb

KH Kunstharzisolation; SF Schellackmicafolium; AF Asphaltmicafolium

[1]) Messungen an neuen und an in Betrieb stehenden Wicklungen.

[2]) Empfehlung nach [6] $\tau_{20} < 300$ s Wicklung feucht
$\tau_{20} > 300$ s Wicklung trocken

Die auch schon vorgeschlagene [6] «Isolationszeitkonstante»

$$\tau = R_{10}\, C$$

R_{10} 10-min-Widerstand; C Wicklungskapazität gemessen bei 0,2 U_n, 50 Hz, und Raumtemperatur;

für die Trocknungsbeurteilung einer Wicklung heranzuziehen, bringt ebenfalls keine eindeutigere Aussage, wie aus Tabelle II hervorgeht. Da dabei in den Messungen auch die Grösse der Kapazität eingeht, ergäbe sich ein zusätzlicher Messaufwand. Wie aus Tabelle II ersichtlich, wären nach den in der Literatur gegebenen Empfehlungen [6] für τ die meisten der aufgeführten Wicklungen feucht gewesen. In allen Fällen wurden die Maschinen jedoch anstandslos in Betrieb genommen; der in der zitierten Veröffentlichung angegebene Wert für τ kann daher keinesfalls als genereller Richtwert angenommen werden.

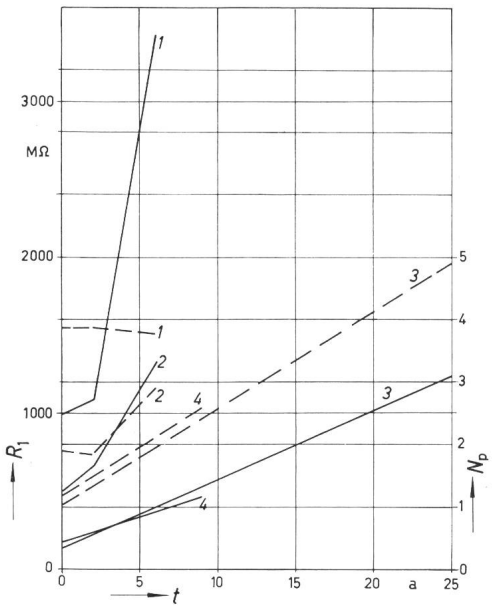

Fig. 14

Änderung des Isolationswiderstandes R_1 im Verlaufe der Betriebsjahre t, gemessen an einigen Maschinenwicklungen

1 11-kV-Generator, 220 MVA, Kunstharzisolation; *2* 13-kV-Generator, 87,5 MVA, Kunstharzisolation; *3* 11-kV-Generator, 22 MVA, Schellackmicafolium; *4* 12-kV-Generator, 32 MVA, Asphaltmicafolium

——— Widerstand ———— Nachladezahl N_p

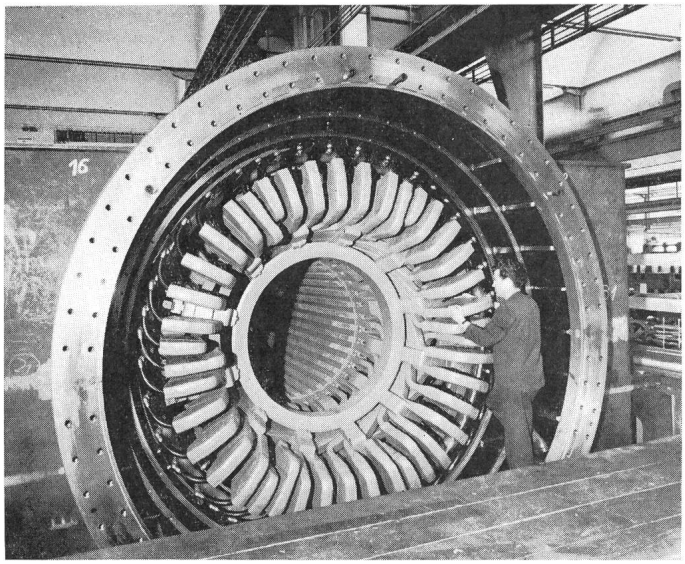

Fig. 15

Ansicht auf den Wickelkopf eines Turbogenerators mit Isolierschläuchen zur Zuführung der Kühlflüssigkeit

3.4 Isolationswiderstand von im Betrieb stehenden Maschinen

Im allgemeinen findet man eine Zunahme sowohl des Isolationswiderstandes als auch der Nachladezahl mit zunehmender Betriebsstundenzahl (Fig. 14). Auf Grund der Isolationswiderstandswerte allein ist jedoch keine Aussage über den Alterungszustand der Isolation möglich. Soll dieser beurteilt werden, so sind andere Messungen durchzuführen.

Die Grösse des Widerstandswertes im spätern Betrieb hängt hauptsächlich von der Verschmutzung im Wickelkopf und der Oberflächenfeuchtigkeit ab.

Als Ergänzung zu einer visuellen Inspektion kann eine Erfassung des Isolationswiderstandes trotzdem wertvolle Informationen liefern und ist daher z. B. im Zusammenhang mit Messungen zur Bestimmung des Alterungszustandes der Isolation, durchaus zu empfehlen.

3.5 Sonderfall der flüssigkeitsgekühlten Maschinen

Bei den heute bei Grossmaschinen vielfach vorkommenden direkten Flüssigkeitskühlungen der Wicklungen ergibt sich ein neuer Gesichtspunkt bezüglich Isolationswiderstandsmessungen. Da das Kühlmittel üblicherweise über Isolierschläuche jedem Stab einzeln zugeführt wird (Fig. 15), ergeben sich entsprechend viele Parallelwiderstände zur Wicklung gegen Erde, die den Gesamtwiderstand der Wicklung stark heruntersetzen. Nur bei Verwendung von Öl als Kühlmittel ist der Einfluss der zusätzlichen Parallelwiderstände auf die Grösse des Gesamtisolationswiderstandes vernachlässigbar. Bei Verwendung von Wasser als Kühlflüssigkeit wird hingegen der Gesamtwiderstand hauptsächlich vom Widerstand der parallel zur Wicklung gegen Erde angeschlossenen Wassersäulen in den Isolierschläuchen bestimmt. So wurde für einen grossen Wasserkraftgenerator vor dem Einfüllen der Kühlflüssigkeit ein Isolationswiderstand von $1{,}9 \cdot 10^9\ \Omega$ gemessen; nach dem Füllen der Schläuche war der Gesamtwiderstand trotz der Verwendung von reinem (deionisiertem) Wasser auf $2{,}3 \cdot 10^5\ \Omega$ gesunken. Auf Grund des sehr niedrigen Gesamtwiderstandes ist es in solchen Fällen nicht mehr sinnvoll, eigentliche Oberflächen- oder Feuchtigkeitseffekte an der Wicklungsisolation mittels einer der heute üblichen Widerstandsmessung festzustellen.

Literatur

[1] *A. Wichmann:* Die Trocknung elektrischer Maschinen. ETZ-A 76(1955)10, S. 340...347.

[2] *B. Doljak, M. Moravec* und *O. Wohlfahrt:* Micadur — eine neue Isolation für Statorwicklungen elektrischer Maschinen. Brown Boveri Mitt. 47(1960)5/6, S. 352...360.

[3] Recommanded Guide for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. AIEE-Standard No. 43 (1961).

[4] *J. Wainwright* and *D. J. Harrison:* Drying out Generator Windings. Electr. Rev. 171(1962)4, S. 133...135.

[5] *A. Wichmann:* Der Temperatureinfluss bei Isolationsprüfungen mit Gleichspannung an elektrischen Maschinen. ETZ-B 12(1962)10, S. 237...243.

[6] *K. Edwin* und *W. H. Zwicknagl:* Neue Ergebnisse bei Alterungsmessungen an Hochspannungswicklungen von Synchronmaschinen. E u. M 81(1964)5, S. 95...99.

[7] *H. Pörsch* und *C. Reimer:* Isolationswiderstand von Wechselstrommotoren mittlerer Grösse bei Inbetriebnahme. ETZ-A 84(1963)19, S. 628...633.

Adresse des Autors:
R. Schuler, Ingenieur, AG Brown Boveri & Cie., 5400 Baden.

Mikroschalter

Vielseitige elektrische Schaltelemente

Von *Th. Hofer,* Murten

621.316.542-181.4

Es werden die verschiedenen Mikroschalter-Kippsysteme mit ihren spezifischen Eigenschaften besprochen. Bedingt durch die sehr unterschiedlichen Anwendungsgebiete werden Mikroschalter in den verschiedensten Bauformen angeboten. Optimale Resultate lassen sich aber nur dann erzielen, wenn Betriebsbedingungen und Schaltereigenschaften aufeinander abgestimmt sind. Im letzten Aufsatzteil werden daher die Kriterien aufgezeigt, welche bei der Schalterauslese zu berücksichtigen sind.

L'article traite des divers interrupteurs miniatures avec système à bascule et de leurs propriétés spécifiques. Motivé par les domaines d'application les plus divers, les interrupteurs miniatures sont offerts dans les constructions très différenciées. Les résultats les meilleurs ne sauraient toutefois être obtenus, que si les conditions d'exploitation et les propriétés des interrupteurs sont parfaitement adaptées l'une à l'autre. La dernière partie de l'exposé présente de ce fait les critères entrant en considération lors du choix de tels interrupteurs.

1. Einleitung

Mikroschalter, vor 15 Jahren in Europa noch kaum bekannt, werden heute in einer grossen Zahl elektrischer Apparate, an elektrisch gesteuerten Maschinen und im Traktions- und Förderbau verwendet. Welches sind die Gründe, die zur raschen Verbreitung dieser Schalterart geführt haben?

Mit fortschreitender Technisierung des gesamten Lebens und insbesondere der Automatisierung der Fabrikationsprozesse werden immer mehr Schaltelemente benötigt, welche an Stelle menschlicher Aufmerksamkeit Überwachungs- oder Steuerfunktionen übernehmen können. Mikroschalter eignen sich weitgehend zur Lösung solcher Aufgaben, da sie die Eigenschaft besitzen, durch Lageänderungen mechanischer Glieder ihren Schaltzustand mit hoher Repetiergenauigkeit momentan und eindeutig zu ändern. Viele Grössen wie z. B. Kraft, Temperatur, Druck oder Zeit, lassen sich mit einfachen Umsetzern in Form von Strecken darstellen, so dass auch auf diesen Gebieten die Anwendung von Mikroschaltern gegeben ist, wenn elektrische Überwachungs- oder Regelaufgaben gelöst werden müssen.

Grundausführungen von Mikroschaltern weisen Bauvolumen auf, die zwischen ca. 0,6 und 30 cm³ variieren und damit wohl zu den Miniatur-Schaltelementen gezählt werden können. Trotzdem sind sie zur Schaltung von Wechselströmen bis 20 A und Wechselspannungen bis 500 V bemessen. Die mechanische Lebensdauer erreicht bei gewissen Ausführungen Schaltzahlen bis $50 \cdot 10^6$.

Durch vielseitige Varianten zusätzlicher Schutzgehäuse und Betätigungsorgane lassen sich Mikroschalter den wechselnden Erfordernissen der Praxis individuell anpassen (Fig. 1).

2. Aufbau und Wirkungsweise

Ein Mikroschalter kann in der Grundausführung in folgende Funktionsteile gegliedert werden:

a) Kippsystem mit beweglichem Kontakt;
b) Feste Kontakte;
c) Betätigungsorgan;
d) Isoliergehäuse oder Isoliersockel.

Das Funktions-Prinzip des Kippmechanismus ist für die meisten Mikroschalter analog.

Zwei Federkräfte K_D und K_Z einer mehrschenkligen Kippfeder oder eines mehrteiligen Kippsystems wirken in der Ruhelage unter einem gewissen Winkel α zueinander und ergeben die resultierende Kontaktkraft K (Fig. 2). Durch Veränderung der Lage des Betätigungsorganes wird auch die gegenseitige Lage der einzelnen Kippfederschenkel bzw. der Glieder eines mehrteiligen Kippsystems verändert, und zwar in dem Sinne, dass die Ausgangskräfte einander zugedreht werden. Ist der Zwischenwinkel α zu Null geworden, so wechselt die Resultierende bei kleinster Überschreitung dieser Lage ihr Vorzeichen, wodurch der bewegliche Kontakt vom Öffnungs- zum Schliesskontakt beschleunigt wird und schlagartig seine Stellung wechselt.

Von der Wirkungsweise und Konstruktion des Kippsystems hängt die mechanische Charakteristik und weitgehend auch die mechanische Lebensdauer des Schalters ab.

Bei einer *einteiligen Kippfeder* (Fig. 2 und 3) wird an das Ausgangsmaterial gleichzeitig die Forderung nach guter elektrischer Leitfähigkeit und hoher mechanischer Festigkeit gestellt. Aus dieser Gegebenheit heraus werden die meisten einteiligen Kippfedern aus höchst vergüteter Berylliumbronze gefertigt. Dieses Material hat im ausgehärteten Zustand Festigkeitswerte bis 150 kg/mm² bei einer elektrischen Leitfähigkeit, die 25 % derjenigen von Kupfer beträgt. Da die wirksamen Federkräfte bei derartigen Kippfedern praktisch ausschliesslich durch Biegung von Schenkelteilen erzeugt werden, wird an das Ausgangsmaterial in Bezug auf Dickentoleranz und Oberflächengüte hohe Anforderungen gestellt. Zur Kleinhaltung der Kennwertstreuung von montierten Schaltern werden Kippfedern aus Berylliumbronze vielfach in fixiertem Zustand vergütet,