

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 44 (1953)

**Heft:** 15

**Artikel:** Die Hochfrequenzerwärmung in den USA

**Autor:** Lang, G.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059957>

### 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>**

stellt, dass die Saldi aus den vorjährigen Betriebsrechnungen gemäss den Beschlüssen der Generalversammlung in Freiburg vorgetragen worden sind.

Die Treuhandstelle, deren Berichte wir eingesehen haben, hat wieder eine eingehende Prüfung der verschiedenen Rechnungen vorgenommen.

Auf Grund dieser Prüfungen beantragen wir, die Rech-

nungen und Bilanzen pro 1952 zu genehmigen und dem Vorstand und der Gemeinsamen Geschäftsstelle unter Verdankung Entlastung zu erteilen.

Zürich, den 3. Juli 1953

Die Rechnungsrevisoren:  
W. Rickenbach F. Eckinger

## Die Hochfrequenzerwärmung in den USA

Von G. Lang, Detroit

261.364.15:621.365.52 (73)

Anhand von Zahlenmaterial wird die wirtschaftliche Bedeutung dieser Wärmebehandlung hervorgehoben und ihre Verbreitung auf die verschiedenen Industrien im Falle der dielektrischen Erwärmung angegeben. Die Wichtigkeit, welche die moderne Industrieröhre, früher der schwache Punkt des Röhrengenerators, erlangt hat, wird unterstrichen und die wesentlichsten Verbesserungen werden erläutert. Die hauptsächlichsten Abweichungen amerikanischer Generatoren von der europäischen Norm werden dargelegt und die verschiedenen Arten der Beschickung besprochen.

*L'importance économique que revêt le traitement thermique par haute fréquence est mise en évidence par des chiffres et son application aux diverses industries est indiquée, notamment pour le chauffage diélectrique. Les tubes électroniques industriels, qui constituaient autrefois le point faible des générateurs à haute fréquence, ont subi de notables perfectionnements. Les différences essentielles entre les générateurs européens et ceux en usage aux Etats-Unis sont exposées et les divers modes d'enfournement décrits.*

### Einleitung

Die Bedeutung welche der Hochfrequenzheizung in den Vereinigten Staaten von Nordamerika zukommt, dürfte am besten aus einer kürzlich durchgeführte Umfrage hervorgehen<sup>1)</sup>. Danach stehen gegenwärtig allein in der metallverarbeitenden Industrie ca. 6000 Industriegeneratoren in Betrieb, wobei rund ein Drittel davon erst während der letzten drei Jahre installiert wurden. Diese Zahlen beziehen sich nur auf Generatoren für induktive Heizung inklusive Mittelfrequenz-Motorgeneratoren, nicht aber auf dielektrische Geräte. Zuverlässige Angaben über die Anzahl dieser waren leider nicht erhältlich. Der Bedarf an neuen Apparaten der erstgenannten Kategorie für die nächsten vier bis fünf Jahre wird wertmäßig auf rund 100 Millionen Dollars veranschlagt.

Was die Verbreitung der dielektrischen HF-Heizung anbetrifft, so stehen zur Zeit Anlagen mit einer total installierten HF-Leistung von über 20 000 kW in Betrieb. Sie verteilen sich im wesentlichen auf die folgenden Industrien: Holz 41 %, Plastik 19 %, Gummi 17 %, Giessereien (Formsandtrocknung) 4 %. Diese Zahlen beziehen sich ebenfalls auf die installierte Leistung.

In technischer Hinsicht weichen die Hochfrequenzgeneratoren grundsätzlich wenig von den entsprechenden europäischen Apparaten ab. Hier wie dort werden sie mehr und mehr als ein neuzeitliches Werkzeug angesehen, das man wie irgendeine andere Maschine in den Produktionsgang einschaltet. Diese Auffassung brachte es anderseits mit sich, dass an die Industriegeneratoren ähnliche Anforderungen bezüglich Bedienung, Unterhalt und Abnutzung gestellt werden, wie dies etwa im Fall einer Werkzeugmaschine üblich ist. Noch vor wenigen Jahren war es kaum möglich, derartige Bedingungen einhalten zu können, aus dem einzigen Grunde, weil die Vakuum-Röhre, das Herz eines jeden Röh-

regenerators, damals den ganz anders gearteten Anforderungen noch nicht gewachsen war. Es ist deshalb verständlich, dass zuerst besondere

### Industrieröhren

entwickelt werden mussten, bevor diesbezüglich eine wesentliche Verbesserung erwartet werden konnte. Dabei galt es, sowohl die elektrischen wie vor allem auch die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Durch Verwendung von Kovar, welches nahezu den

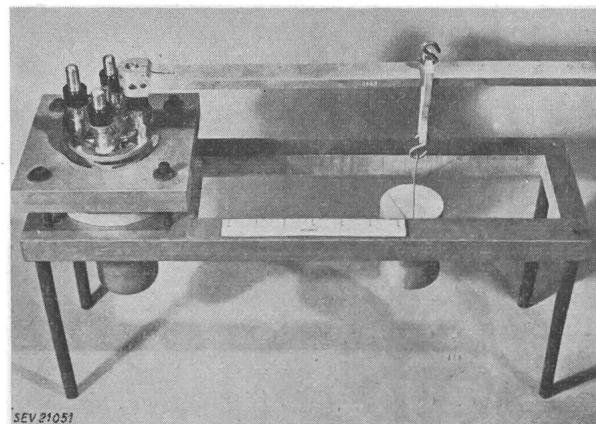


Fig. 1

Gerät zur Prüfung der Festigkeit der Glasdurchführungen von Industrieröhren

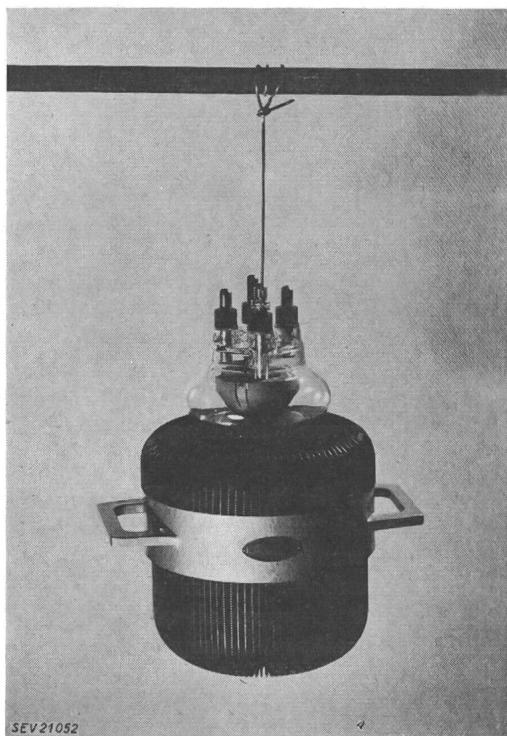
Die Kovar-Glasverbindung hält ein Biegemoment von 3 kg m aus. Dabei treten Änderungen der Elektrodendistanzen auf, die kleiner als 0,05 mm sind. Im Falle von Kupfer führt bereits ein Biegemoment von 0,7 kg m zur Zerstörung der Einschmelzstelle. Gleichzeitig tritt infolge Verschiebung der Elektroden ein Kurzschluss zwischen Gitter und Heizfaden ein.

gleichen Dehnungskoeffizienten wie Glas aufweist, an Stelle des früher benützten Kupfers für die Elektrodendurchführungen war es möglich, die Torsionsfestigkeit ca. fünffach und das Biegemoment rund zehnfach zu erhöhen (Fig. 1 und 2). Kupfer hat nämlich einen rund fünfmal grösseren Dehnungskoeffizienten als Glas, was sich durch innere Spannungen an den Durchführungsstellen bemerkbar macht.

<sup>1)</sup> Basic Marketing Data, Vol. 1 und 2, Jan. 1953 — Metalworking Industry by Industrial Areas. Herausgegeben von The Iron Age.

<sup>1)</sup> Metalworking Industry by Industrial Areas. Basic Marketing Data Bd. 1 u. 2. Hg. v. The Iron Age Jan. 1953.

Eine bedeutende Verbesserung wurde ferner dadurch erzielt, dass für die neuen Röhren besonders kräftige Anodenzyllinder verwendet werden, welche



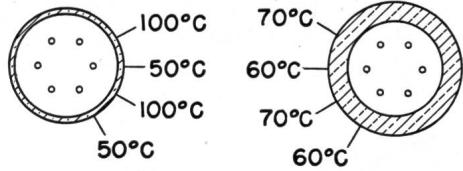
SEV21052

Fig. 2

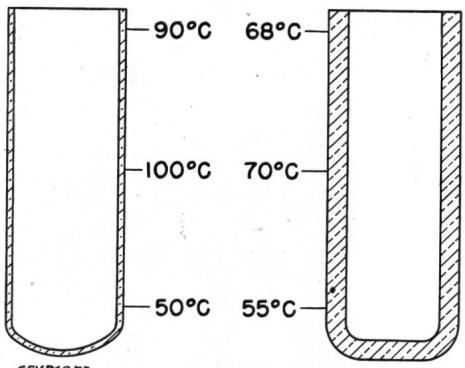
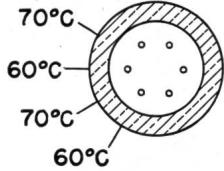
**Forciert luftgekühlte Triode**

Das gesamte Gewicht der Röhre von ca. 20 kg hängt an einem einzigen Heizfadenstift

ML-889A



ML-5666



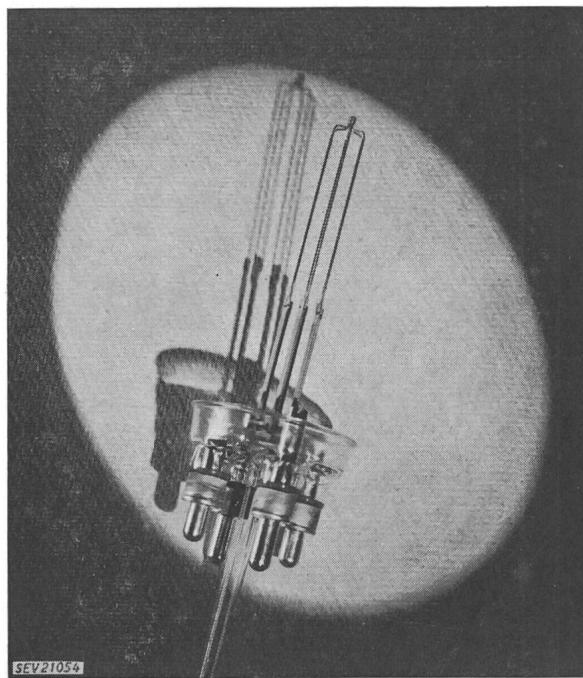
SEV21053

Fig. 3

**Schnitt durch den Anodenmantel zweier wassergekühlter Röhren**

Beim älteren Typ links beträgt die Wandstärke des Kupferzylinders nur 3 mm. Es treten bedeutende Temperaturdifferenzen am Umfang des Zylinders auf. Die verbesserte Konstruktion rechts besitzt einen 12 mm dicken Mantel, was sich in einem günstigeren Temperaturausgleich auswirkt. Gleichzeitig ist die Betriebstemperatur beim neuen Typ beträchtlich niedriger, woraus eine höhere Verlustleistung resultiert. Endlich ist infolge der tieferen Betriebstemperatur die Bildung von Kesselstein reduziert.

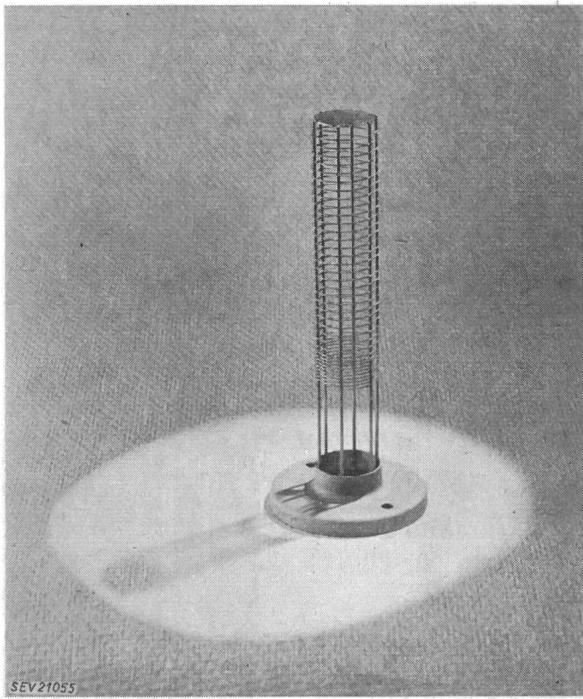
gegenüber der früheren Ausführung eine bis vierfache Wandstärke aufweisen (Fig. 3). Diese Massnahme ermöglicht es, die Verlustleistung der Röhre



SEV21054

**Das Heizfadensystem einer Industrieröhre**

unter Beibehaltung der übrigen Abmessungen rund zu verdoppeln. Überlastungen infolge Fehlanpassung, wie dies im praktischen Betrieb vorkommen kann, sind dadurch weitgehend ausgeschlossen.



SEV21055

Fig. 5

Der käfigartige Aufbau des Gitters besitzt erhöhte Festigkeit gegen Verwindung

In mechanischer Hinsicht wurde auch eine zweckmässigere Methode der Heizfadenaufhängung gefunden. Das bisher verwendete Prinzip, zum Span-

nen des Heizfadens eine Feder zu verwenden, welche die während der Erwärmung auftretende Längenänderung kompensiert, hatte sich nämlich im Falle von Erschütterungen, denen Industriegenera-

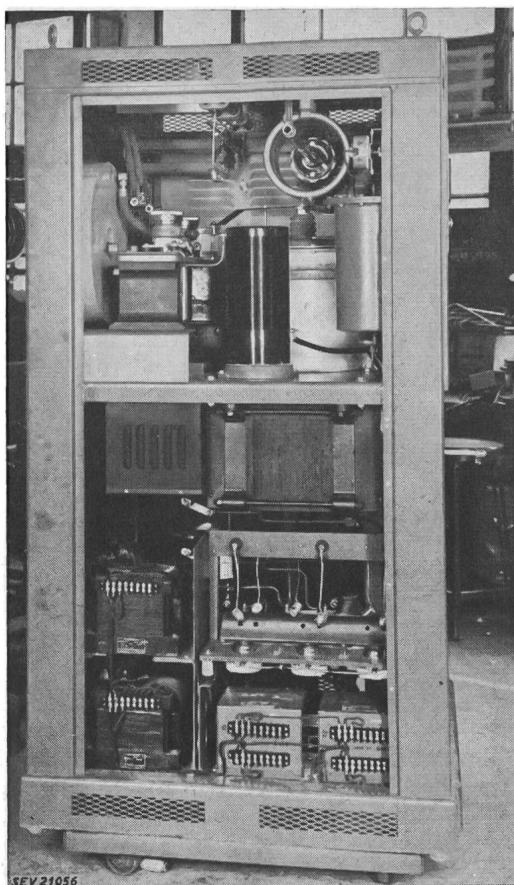


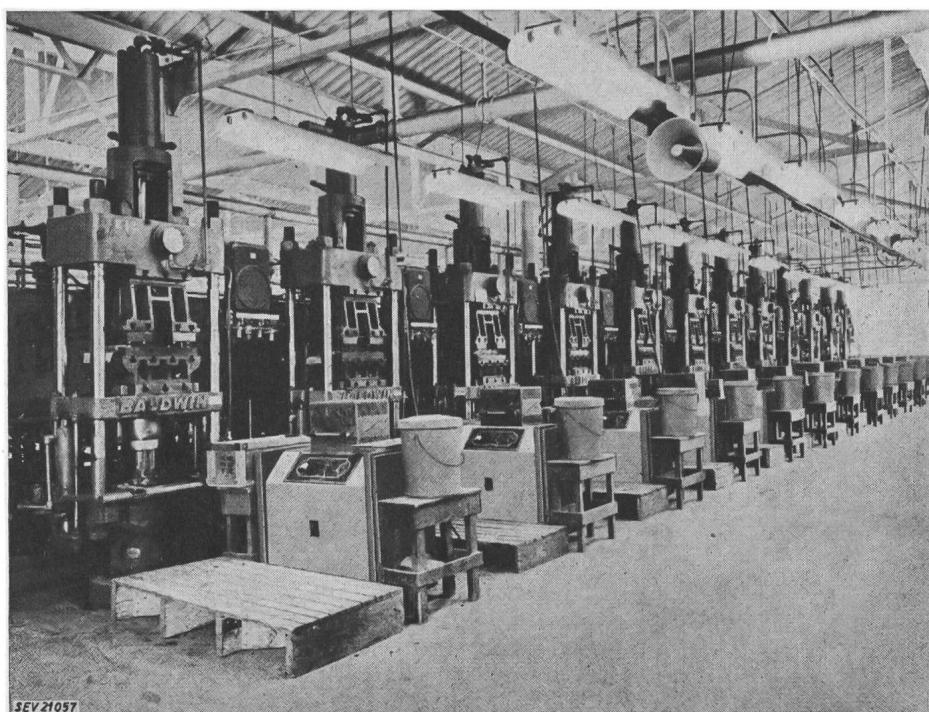
Fig. 6

**25-kW-Röhrengenerator für induktive Heizung**  
Im unteren Teil des Gehäuses ist der Speiseteil, im oberen der hochfrequente Teil untergebracht

toren vielfach ausgesetzt sind, nicht bewährt; neuerdings werden stabile, selbsttragende Heizfaden verwendet (Fig. 4).

Endlich wurde auch das Gitter durch käfigartigen Aufbau unter Verwendung dickerer Drähte mechanisch stabiler gemacht und zudem zwecks gröserer Abstrahlung noch besonders behandelt (Figur 5).

**Fig. 7**  
**Einsatz der HF-Heizung zur Massenherstellung in der Kunststoffindustrie**  
31 Röhrengeneratoren, mit einer Leistung von 2 kW und der Frequenz 40,9 MHz, versiehen die gleiche Anzahl Kunststoffpressen mit der vorgewärmten Pressmasse



Hat auf diese Weise einerseits die Röhrenindustrie durch Entwicklung besonderer Röhrentypen für die Hochfrequenzwärmung wesentlich zur Vervollkommenung der Generatoren beigetragen, so wurde andererseits auch im Bau von

### Generatoren

nach Mitteln und Wegen gesucht, damit dieselben den vorerwähnten strengen Anforderungen von Seiten des Betriebes gerecht werden. Es sei hierbei auf die völlig geschlossene Ausführung der Generatoren hingewiesen, welche gegen Schmutz und Staub geschützt und überdies auch öl- und spritzwassersicher sind. Sie enthalten einen eigenen Wärmeaustauscher, welcher für die notwendige Kühlung des Apparateinners sorgt. Diese Ausführungsart setzt sich mehr und mehr durch und wird in zunehmendem Masse auch im Bau von Mittelfrequenz-Motorgeneratoren verwendet.

HF-Generatoren für induktive Erhitzung werden in den USA für Leistungen von 5 kW aufwärts fast ausnahmslos mit wassergekühlten Röhren bestückt, und es ist die Tendenz vorhanden, diese Röhrentypen auch noch bei Apparaten von 2 und 3 kW zu verwenden. Nicht selten werden sie sogar in Generatoren für dielektrische Erhitzung den forciert luftgekühlten Röhren vorgezogen. Es dürfte dies vor allem auf den niedrigeren Preis zurückgeführt werden. Ausserdem ergeben sich auch weitere Einsparungen an Material, wie das Wegfallen des Ventilators und des Luftfilters, des einfacheren Röhrensockels usw. Da ja sowieso Wasser zur Kühlung des Schwingkreises, des Anpassungstransformators und der Arbeitsspulen benötigt wird, scheint diese Lösung mehr oder weniger bei den induktiven Typen als gegeben. Sie besitzen im Schwingkreis fast durchwegs einen Ölkondensator, der an Stelle des früher üblichen Pressgas- oder Glimmerkondensa-

tors getreten ist. Dieser ist robust, betriebssicher und leicht herzustellen; ferner kann er auf einfache Weise durch Anbringen einer Kühlslange am Kondensatorbehälter, der in der Regel Erdpotential aufweist, zusätzlich wassergekühlt werden. Der



Fig. 8

#### Einlöten von Durchführungsisolatoren in den Deckel grosser Kondensatoren

Hier ist das Prinzip des sog. Zweipositions-Arbeitstisches in Anwendung. Während an einer Arbeitssstelle geheizt wird, wird die andere entladen und die neu zu verlögenden Stücke werden mit den passend geformten Lötringen in die Arbeitsstellung gebracht. Das Umschalten von einer Heizstelle auf die andere erfolgt durch einfaches Drücken eines Knopfes auf der entsprechenden Seite des Werktaisches.

Hauptnachteil eines derartigen Plattenkondensators in Öl ist sein verhältnismässig grosses Volumen. Bis zu einem gewissen Grad kann dies jedoch durch Verwendung von Spezialöl mit höheren Dielektrizitätskonstanten kompensiert werden.



Fig. 9

#### Gegenüberstellung des Hartlöten von Flanschen mittels Flamme (links) und unter Zuhilfenahme der Hochfrequenz (rechts)

Mit der Gasflamme benötigte ein geübter Arbeiter 16,2 min pro Verteilrohr. Der Ausschuss war hoch. Mit Hilfe des abgebildeten 20-kW-Generators kann dieselbe Arbeit von einem angelernten Arbeiter in  $\frac{1}{3}$  min bewältigt werden. Der Ausschuss beträgt weniger als ein halbes Prozent.

In Generatoren für dielektrische Erhitzung wird mehr und mehr im Schwingkreis der Vakuumkondensator verwendet. In Hochleistungsgeneratoren werden mehrere solcher Kondensatoren parallel geschaltet, wobei die Halterungsstücke dann wassergekühlt sind. Dies ist deshalb möglich, da solche Kondensatoren jetzt bei relativ geringen Abmessungen für beträchtliche Kapazitätswerte bei gleichzeitig hohen Spannungen und Strömen gebaut wer-

den können. In der Dimensionierung, besonders bei induktiven Geräten, ist unschwer eine Tendenz zu immer grösserem Verhältnis von Blind- zu Wirkleistung festzustellen. Dies bedeutet andererseits, dass die Schwingkreiselemente, insbesondere die Spule, möglichst verlustarm sein müssen, ansonst die Kupferverluste infolge des hohen Tankstromes unzulässig ansteigen. Die Vorteile eines HF-Generators hoher Blindleistung kommen in all jenen Fällen zur Geltung, wo aus betrieblichen Gründen die immer anzustrebende enge Kopplung zwischen Werkstück und Spule nicht verwirklicht werden kann. In bestimmten Fällen lässt sich diese jedoch durch Verwendung von *Hochfrequenzeisen* im Innern der Induktorspule erhöhen. Dieses wird auch dann angewendet, wenn es sich darum handelt, den magnetischen Fluss auf eine eng begrenzte Stelle des Werkstückes zu konzentrieren. HF-Eisen wird außerdem zur Verbesserung des Kopplungsfaktors in Anpassungstransformatoren verwendet, wobei auf diese Weise Werte von rund 75 % erreicht werden.

#### Hochfrequenztransformatoren

zur Anpassung der Charge an den Generator werden für Leistungen von 5 kW aufwärts mehrheitlich in Öl ausgeführt. Daneben werden auch Transformatoren mit festem Dielektrikum (z. B. Bienenwachs) zwischen Primär- und Sekundärwicklung gebaut). Die zweite Ausführung besitzt den Vorteil,

dass der Transformator in jeder beliebigen Lage verwendet werden kann. Es spielt dies dann eine Rolle, wenn es aus betrieblichen Gründen vorteilhafter ist, das Werkstück beim Wärmevorgang festzuhalten und dafür die Arbeitsspule gegenüber der Charge zu bewegen. Dabei wird entweder der Induktor für sich oder aber zusammen mit dem Anpassungstransformator relativ zum Arbeitsstück bewegt. In beiden Fällen ist ein Verbindungsstück, be-

stehend aus zwei flexiblen, vom Kühlwasser durchflossenen Kupferschläuchen notwendig, um die Hochfrequenzleistung vom feststehenden auf den beweglichen Teil zu übertragen. Dieses flexible Glied wird wenn immer möglich, zwischen Generator und Transformator geschaltet, während die Heizspule dann direkt an die Sekundärklemmen des HF-Transformators angeschlossen ist. Diese Anordnung besitzt nämlich den Vorteil, dass für die Verbindungsleitungen nur eine relativ geringe Blindleistung aufzubringen ist, und dass der grösste Teil derselben auch tatsächlich an der Heizspule zur Verfügung steht. Da die HF-Generatoren für eine bestimmte Blindleistung ausgelegt sind, ist diesem

auf zwei gleiche Spulen unterteilt, und die Mittelpunkte sind herausgeführt. Dadurch besteht nebst geringerer Spulenspannung gleichzeitig die Möglichkeit, dass durch einfaches Umschalten mit voller oder halber Spannung gearbeitet werden kann. Die zweite Betriebsart ist erwünscht beim erstmaligen Einschalten, zum Einbrennen der Röhren, bei Versuchen usw. Nicht selten werden an Stelle des Dreiecks

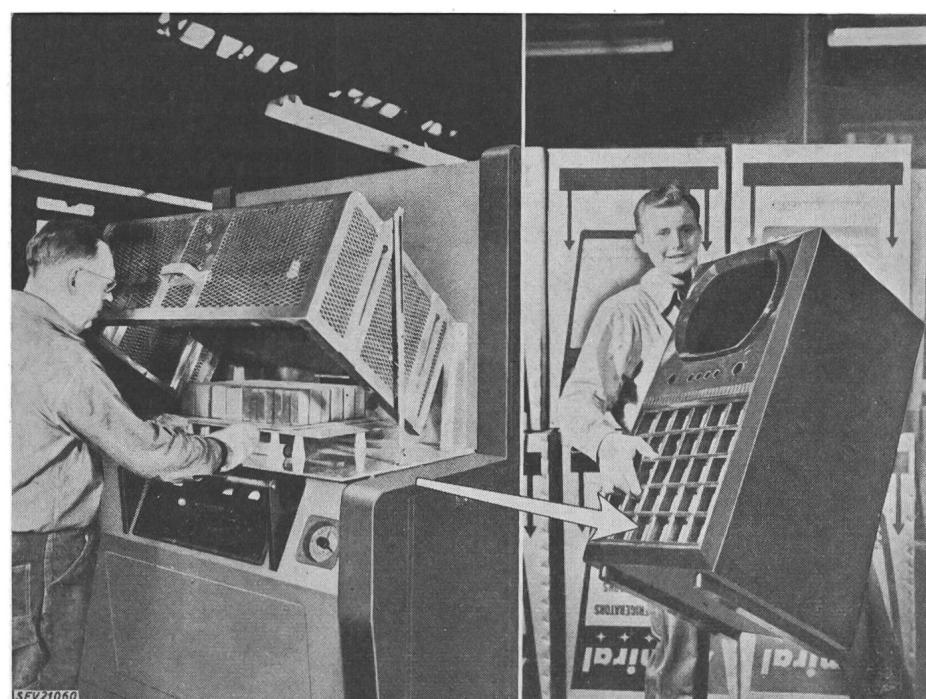


Fig. 10

**Dielektrisches Vorwärmern von Kunststoffmasse vor dem Pressen von Fernsehempfängergehäusen**

Vier 20-kW-Röhrengeneratoren (27,1 MHz) versorgen die Riesenpressen von 2200 t Druck mit der nötigen Menge vorgewärmter Pressmasse. Pro Presse werden alle 6 min zwei Gehäuse im Gewicht von je 26 kg verarbeitet

Punkte besondere Beachtung zu schenken, ansonst nur ein Bruchteil der nominellen Generatorleistung auf das Arbeitsgut übertragen werden kann.

Eine Abweichung amerikanischer Generatoren von den europäischen kann vielfach auch im Speiseteil beobachtet werden. Apparate bis zu 2 kW Ausgangsleistung werden in den USA ausschliesslich einphasig ans Netz angeschlossen. Nicht selten werden aber auch Generatoren von 5 und 10 kW noch

phasentransformatoren drei einzelne Einphasentransformatoren verwendet. Obwohl in der Herstellung etwas teurer, ergeben sich anderseits Vorteile bei Einbau, Kühlung, Ersatz und Reparatur. In letzter Zeit werden auch Transformatoren mit Hypersil verwendet. Dem hohen Einschaltstrom solcher Typen steht als Vorteil gegenüber, dass sie sehr kompakt gebaut werden können.

Um die Transformatoren auf die zwei meist vorkommenden Netzzspannungen von 220 und 440 V umschalten zu können, sind die Primärwicklungen ebenfalls unterteilt und können je nachdem parallel oder in Serie geschaltet werden. Zwecks Abgleichung kleinerer Spannungsabweichungen von den obgenannten Sollwerten sind Anzapfungen an der Primärwicklung vorhanden.

#### Zur

#### Regulierung der Ausgangsleistung

sind verschiedene Schaltungen im Gebrauch. Das stufenweise Umschalten der Netzzspannung auf verschiedene Anzapfungen der Primärwicklung ist wegen der Verteuerung des Leistungstransformators nur wenig gebräuchlich. Auch kann hiebei nicht unter Last geschaltet werden. Für kleinere Geräte wird deshalb vielfach ein Schiebetransformator vorgeschaltet, wobei dieser entweder im Generator eingebaut wird oder als zusätzliches Element ausserhalb des Apparates zur Aufstellung kommt.

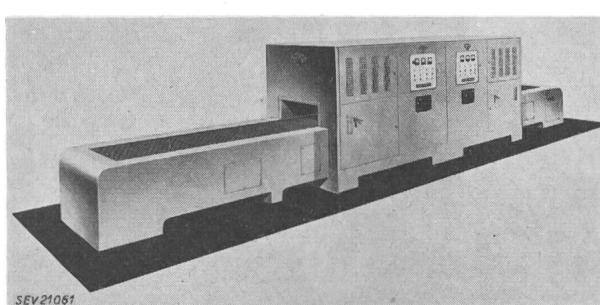


Fig. 11

#### Dielektrische Trocknung von Formsand

Das Förderband hat eine Länge bis zu 10 m. Der hochfrequente Teil der Anlage besteht aus zwei gleichen Generatoren; jeder arbeitet auf ein eigenes Elektrodenpaar. Die Ausgangsleistung der Anlage beträgt 50 kW. Eine ähnliche Ausführung ist für eine Leistung von 100 kW vorgesehen

einphasig betrieben. Hochspannungstransformatoren für den Gleichrichter werden in der Regel auch für die höchsten Leistungen in Luft ausgeführt. Die Hochspannungswicklung ist pro Joch

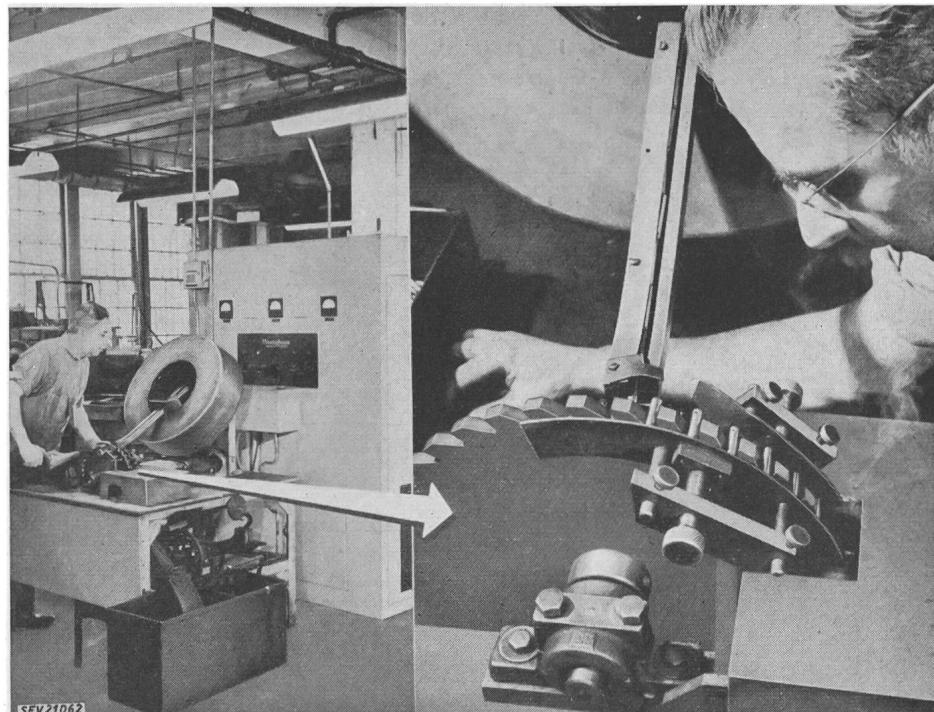
Eine wirtschaftlich günstige Lösung ist das Regulieren der Gittervorspannung, was vielfach mittels variablem hochohmigem Widerstand im Gittergleichstromkreis bewerkstelligt wird. Sie besitzt jedoch den Nachteil, dass sie besonders bei grösseren Leistungen technisch nicht voll befriedigt, da ja ständig mit der höchsten Anodenspannung gearbeitet wird. Aus diesem Grunde ist man denn auch wieder mehr und mehr davon abgekommen.

Weitaus die eleganteste Methode einer kontinuierlichen Leistungsregulierung ist die Gittersteuerung der Gleichrichteröhren. Nebst der stufenlosen Regelung der Gleichspannung kann diese aus-

**Fig. 12**  
Vollautomatische Vorrichtung zum hochfrequenten partiellen Glühen von Bolzen für die Fabrikation von grossen Kettenantrieben

Als Induktor wird pro Bolzenende je eine sog. «Pancake-Spule» verwendet. Es können

Bolzen von verschiedenem Durchmesser und Länge geführt werden. Die Antriebsgeschwindigkeit ist variabel, und gestattet einen Ausstoss bis zu 1450 Stahlbolzen pro Stunde, gegenüber früher 150 Stück



serdem zum Ein- und Ausschalten des Generators benutzt werden. Letzteres geschieht durch Tasten der Gitterwechselspannung, welche der negativen Gleichspannung an den Gittern der Thyratrons überlagert ist, wodurch diese für den Stromdurchgang gesperrt resp. freigegeben werden. Diese Methode umgeht das Schalten mittels Schaltschützen, die bei grossen Leistungen beträchtlicher Abnutzung der Kontakte ausgesetzt sind.

Der Schaltschütz dient in dieser Anordnung in erster Linie als Notvorrichtung für den Fall, dass die Gittersteuerung versagen sollte, was z. B. bei Rückzündungen vorkommen kann. Er ist deshalb trotzdem für die volle Schaltleistung ausgelegt. Mittels einfacher Umschaltung ist es auch möglich, von einer Betriebsart auf die andere überzugehen.

Trotz der genannten Vorteile ist der gittergesteuerte Gleichrichter als Mittel zur Leistungsregelung von Hochfrequenzgeneratoren noch immer umstritten. Die Praxis hat gezeigt, dass die Lebensdauer des Thyratrons unter jener der gewöhnlichen Quecksilberdampfröhre liegt. Ausserdem ist in Betracht zu ziehen, dass ein Generator mit Gittersteuerung komplizierter und somit störanfälliger ist. Ferner sprechen nicht zuletzt auch die erheblich ins Gewicht fallenden Mehrkosten gegen diese Lösung. Die aufgeführten Gründe dürften dazu geführt haben, dass eine führende Firma bereits wieder von dieser Leistungsregelung abgekommen ist und an deren Stelle zu dem einfacheren Mittel

einer regelbaren Induktivität gegriffen hat, die dem Leistungstransformator vorgeschaltet wird.

#### Anwendung der HF-Erwärmung

Die Hochfrequenzwärmung ist überall da am Platze, wo mit ihrer Hilfe eine Einsparung bezüglich Herstellungskosten, eine qualitative Verbesserung

des behandelten Gutes oder eine Steigerung der Produktion erzielt wird. Nicht selten treffen zwei oder sogar alle drei dieser Bedingungen gleichzeitig zu. Endlich gibt es Aufgaben, die überhaupt nur mittels Hochfrequenzwärmung zu lösen sind, wie bestimmte Prozesse der Oberflächenhärtung.

Ihrem Wesen nach, hauptsächlich bedingt durch die sehr kurzen Aufheizzeiten, eignet sie sich speziell auch für die Serienfabrikation der verschiedenartigsten Teile des Maschinen- und Apparatebaus. Da dabei die Hochfrequenzwärmung nur eine Teiloperation darstellt, ergibt sich als logische Folge die Forderung, dass der gesamte Arbeitsprozess möglichst rationell gestaltet wird. Man kann hier verschiedene Stufen der Entwicklung feststellen.

Anfänglich wurde jedes einzelne Arbeitsstück von Hand in die gewünschte Position zur Spule bzw. zu den Elektroden gebracht, dann erhitzt und am Ende der Heizperiode manuell durch das nächstfolgende ersetzt. Wenn auch das Laden und Entladen später durch besondere Vorrichtungen weniger zeitraubend gestaltet wurde, so haftet diesem Verfahren doch der grosse Nachteil an, dass der Generator zeitlich nicht voll ausgenutzt wird. Es wurden deshalb Mittel erdacht, um diese toten Zeiten nach Möglichkeit zu verkürzen.

Eine erste Verbesserung wurde diesbezüglich durch Einführung von zwei oder mehr Heizstellen erzielt, wobei der Generator auf die verschiedenen Arbeitsplätze umgeschaltet werden kann. Während

der Zeit, da die Charge in der ersten Heizstelle erwärmt wird, können an der zweiten die notwendigen Vorbereitungen getroffen werden, um das Gerät für den nachfolgenden Heizzyklus bereit zu halten. Als solche kommen in Frage das Entfernen der vom vorhergehenden Zyklus stammenden und das Einsetzen der neuen Charge, Abwerfen des Werkstücks ins Härtebad, Anbringen von Leim, Lot oder Flussmittel, Reinigen der Elektroden oder Heizspulen usw. Sobald die Heizperiode abgelaufen ist, wird der Generator auf die zweite Arbeitsstelle umgeschaltet, worauf nun die erstere entladen bzw. neu geladen wird.

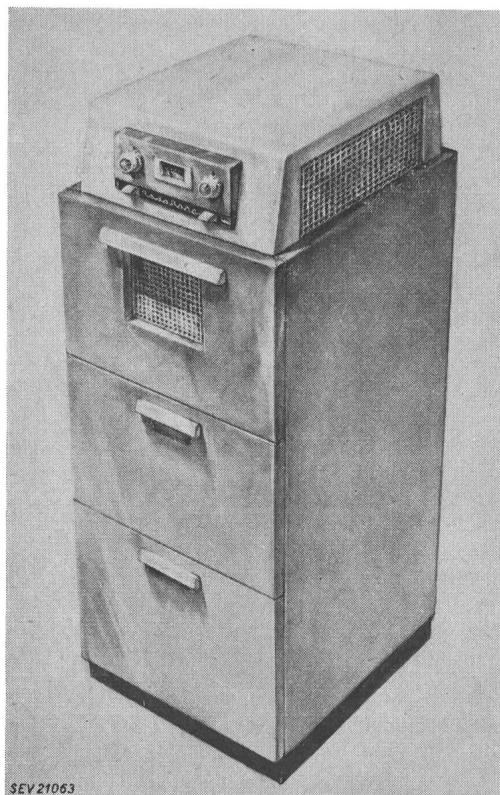


Fig. 13

**Hochfrequenz-Kochherd**

Der Herd arbeitet mit einer Frequenz von 2450 MHz. Der Generator ist mit einer Magnetronröhre bestückt. Mit diesem sog. «Radarange» sind unter anderem die Speisewagen der Pennsylvania Railroad ausgerüstet

Das beschriebene Verfahren mit zwei oder mehreren Heizstellen gestattet eine bessere Ausnützung des Generators, da dieser während längerer Zeit eingeschaltet ist, als wenn nur an einem einzigen Arbeitsplatz gearbeitet wird. Eine weitere Steigerung ist möglich, wenn mehrere identische Stücke oder verschiedene Stellen eines Werkstückes gleichzeitig erhitzt werden, weil dann das Verhältnis von Heizzeit zu Standzeit günstiger wird, bezogen auf das einzelne Stück. Da sich bei diesem Verfahren die Generatorleistung auf eine grössere Masse verteilt, resultiert eine längere Heizzeit. Eine Ausdehnung der Heizzeit ist in manchen Fällen auch aus technologischen Gründen wünschenswert, da vielfach eine minimale Aufheizzeit nicht unterschritten werden darf. Andererseits gestattet dies zudem die Entnahme der vollen Leistung aus dem Generator, der sonst beim Einzelstückverfahren nur mit

einem Teil der verfügbaren Leistung belastet werden könnte.

Das Laden und Entladen der Charge wie auch das Umschalten von einer Heizstelle auf die andere geschieht z. Z. weitgehend automatisch. Die einzelnen Operationen werden dabei durch sog. Timer ausgelöst, wobei die mechanische Übertragung durch Pressluftzylinder, die über Relais gesteuert sind, bewerkstelligt ist.

Das Prinzip, wonach der Generator auf zwei oder mehrere Arbeitsplätze umgeschaltet wird, wo bei die gesamte Lade- und Entladzeit nicht grösser als der Heizzyklus ist, erlaubt eine zeitlich fast hundertprozentige Ausnützung des Generators. Je nach Operation und Arbeitsstück werden nach dieser Methode Produktionsziffern bis zu einigen Hundert Stück pro Stunde erzielt. Eine wesentliche Steigerung dieser Zahl ist durch Vollautomatisierung der Anlage möglich. So können z. B. mittels Härteautomaten Stückzahlen von Tausend und mehr stündlich bewältigt werden. Solche Apparate werden meist als integrierender Bestandteil in die Produktionskette eingefügt.

In diesem Zusammenhang sei auf die in den Fig. 6...12 dargestellten Beispiele aus der Praxis hingewiesen, die einen kleinen Ausschnitt von den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten geben. Eine eingehende Beschreibung derselben erübrigt sich an dieser Stelle, und es sei auf die Angaben zu den betreffenden Bildern verwiesen. Immerhin sei am Schluss noch das sog. Radarange erwähnt (Fig. 13), welches, wie der Name sagt, mit einer Frequenz im Bereich der Radarwellen arbeitet. Dieses Gerät bedient sich wohl der höchsten Frequenzen, welche die Hochfrequenzwärmung gegenwärtig in praktischen Fällen verwendet.

HF-Generator und Arbeitsgerät werden in den USA mehr und mehr als eine untrennbare Einheit angesehen. Es ist deshalb verständlich, dass die Hersteller von Generatoren fast durchwegs auch die notwendigen Arbeitsgeräte bauen. Auf diese Weise ist am ehesten ein einwandfreies Funktionieren der gesamten Anlage gewährleistet.

Die Zulassung von HF-Generatoren ist durch *Vorschriften* der Federal Communications Commission (FCC) geregelt [1], wobei die nachstehenden die wichtigsten sind:

Innerhalb bestimmter Frequenzbänder ist das Betreiben von Hochfrequenzgeneratoren ohne spezielle Konzession zulässig (Tab. I). Ausserhalb derselben wird eine solche nur ausgestellt, wenn die

**Frequenzbänder für HF-Generatoren, die in den USA nicht konzessionspflichtig sind**

Tabelle I

Zugelassenes Frequenzband	Mittlere Frequenz	Maximale Abweichung von der mittleren Frequenz
13 553,22...13 566,78 kHz	13 560 kHz	± 6,78 kHz
26 960,00...27 280,00 kHz	27 120 kHz	± 160,00 kHz
40 660,00...40 700,00 kHz	40 680 kHz	± 20,00 kHz

Unter bestimmten Bedingungen darf noch das Frequenzspektrum von 2400...2500 MHz für industrielle, medizinische und wissenschaftliche Zwecke benutzt werden.

Geräte bestimmten Anforderungen inbezug auf ihre Ausstrahlung entsprechen; und zwar soll die Feldstärke im Umkreis von einer Meile vom Generator an keinem Punkt den Wert von  $10 \mu\text{V/m}$  überschreiten. Dieselbe Vorschrift gilt auch bezüglich der über das Netz übertragenen Ausstrahlung, wobei dann die Feldstärke in 50 Fuss Abstand von der Energieleitung zu messen ist.

Vom American Institute of Electrical Engineers (AIEE) wurden Vorschläge ausgearbeitet, welche Definitionen, Bau-, Betriebs- und Prüfvorschriften verschiedener Typen von Generatoren zum Gegenstand haben [2]. Eine weitere Publikation des AIEE befasst sich mit dem wichtigen Problem der

## Entstörung der Geräte für Hochfrequenzwärmung [3].

### Literatur

- [1] Federal Communications Commission: Part 18 — Rules and Regulations to Industrial, Scientific, and Medical Service. Federal Register, April 14, 1950.
- [2] Proposed Standard, Test Code, and Recommended Practice for Induction and Dielectric Heating Equipment. AIEE No. 54, Oct. 1952. New York: American Institute of Electrical Engineers.
- [3] Recommended Practice for Minimization of Interference from Radio-Frequency Heating Equipment. Report of the Induction and Dielectric Heating Subcommittee of the Committee on Electric Heating AIEE, May 1950.
- [4] Power Sales Manual — Section 18; Induction and Dielectric Heating. Revised and Supplement. Prepared by Industrial Power and Heating Section of the Commercial Division Edison Electric Institute. Philadelphia: EEI. 1949.

### Adresse des Autors:

G. Lang, dipl. El.-Ing., 2020 Witherell Street, Detroit, Michigan (USA).

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Silikonisolierstoffe und ihre Anwendungen

621.315.616.96

[Nach S. Nitzsche, W. Dietz und H. Kallas jun. Silikonisolierstoffe und ihre Anwendungen. ETZ-A, Bd. 74(1953), Nr. 3, S. 71...77]

Silikonstoffe sind in Verbindung mit Harz, Fett, Öl und Gummi im Handel. Diese Produkte gewinnen infolge ihrer ausgezeichneten elektrischen Eigenschaften immer mehr Bedeutung als Isolierstoffe im Elektromaschinen- und Apparatebau. Sie besitzen Eigenschaften, die die üblichen, auf organischer Grundlage aufgebauten Isolierstoffe übertreffen. Isolierstoffe aus Papier, Kunstharsz und Gummi altern bei Temperaturen um  $100^\circ\text{C}$  sehr rasch, während die Silikonprodukte Temperaturen von  $180^\circ\text{C}$  mit Sicherheit jahrelang widerstehen. Silikongummi bleibt z. B. zwischen  $-80\dots +250^\circ\text{C}$  elastisch. Die Ursache für dieses vorteilhafte Verhalten ist das die Silikone aufbauende Si-O-Si-O-Gerüst und dessen Einfluss auf die mit dem Silizium verbundenen Substituenten, wobei praktisch nur Methyl- und Phenylgruppen in Frage kommen. Der Ausgangsstoff für die Silikone ist letzten Endes der Sand, der durch verschiedene Prozesse zu Kunststoffen umgewandelt wird, und zwar entweder im sog. direkten jedoch schweren, oder mit dem leichteren aber umständlicheren, dem sog. Grignardverfahren. Die Art der Verfahren richtet sich nach der Auswahl des betreffenden Silikonproduktes.

**Silikonharze.** Silikonharze sind außerordentlich temperaturbeständig, da die  $\text{SiCH}_3$ - und die Si-Phenylgruppierung gegen Luft sehr oxydationsfest ist. Wichtig neben der Oxydationsbeständigkeit ist die Schrumpffestigkeit des Harzes, sowie sein vorteilhaftes Verhalten gegenüber Feuchtigkeit. Da sie völlig neutral sind, können sie keine leitfähigen Stoffe bilden. Während organische Harze durch Wasser irreversibel gespalten werden können, bilden sich bei den Silikonharzen höchstens SiOH-Gruppen, falls überhaupt eine Spaltung eintreten sollte. Bei Hitzeeinwirkung zersetzt sich ein organisches Harz in koksähnliche stromleitende Massen, die eine Zerstörung der Isolation weiter fördern. Bei Silikonharzen ist infolge ihres hohen Silizium- und geringen Kohlenstoffgehaltes eine Kohlenbrückenbildung unmöglich. Selbst bei Rotglut kann sich höchstens Sand bilden. Es ist daher berechtigt, diese Isolation als die z. Z. beständigste zu bezeichnen. Um jedoch noch andern Anforderungen gerecht zu werden, besteht zum Teil der Wunsch, reine Silikonharze und organische Harze miteinander zu verbinden, so dass speziell die mechanische Festigkeit noch verbessert werden kann, wenn auch bei minimierter Verminderung der thermischen Qualität (Drahtisolation).

**Silikongummi und -fette.** Sehr gute Erfahrungen wurden mit Silikongummi gemacht. Dieser besitzt ebenso gute Eigenschaften wie Silikonharze.

Für Silikonfette bestehen heute, da sie sowohl bei tiefen als auch bei hohen Temperaturen ein gleichmässiges Schmiegen gewährleisten, grosse Absatzmöglichkeiten. Silikonpasten werden speziell bei elektrischen Anschlüssen zum Schutz gegen Feuchtigkeit mit Vorteil verwendet.

Die thermische Beständigkeit und das günstige Verhalten bei Feuchtigkeitseinflüssen der Silikone bedingt, dass sie nur

mit Glasseiden-Asbestgeweben oder Glimmerwerkstoffen zusammen verarbeitet werden dürfen. Nahezu alle Isolierstoffe, die unter Verwendung von organischen Harzen hergestellt werden, sind auch mit Silikonharzen herstellbar.

An dieser Stelle sei auch die Isolation der Dynamobleche erwähnt, bei welchen man eine Lackierung mit stark verdünnten und mit Füllstoffen versehener Silikonharzlösung verwendet, die gegebenenfalls im Tauchverfahren aufgetragen wird. Die Drähte werden mit Glasseite oder mit Asbest umspunnen und mit Silikonharzen lackiert. Wichtig für die Herstellung der Drähte ist eine ausreichende Einbrenntiefe und Einbrenntemperatur, die je nach Drahtstärke bis zu  $400^\circ\text{C}$  betragen muss. Der Silikongummi ist als Isolierstoff von ebenso grosser Bedeutung wie die Silikonharze. Dieser Stoff der wie der gewöhnliche Gummi verformt und um Leiter gespritzt werden kann, besitzt die Eigenschaft, auch bis zu  $-100^\circ\text{C}$  elastisch zu bleiben und eignet sich daher auch als Isolierstoff für Leitungen, die in Räumen mit sehr niedrigen Temperaturen verlegt werden müssen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit dieses Gummis, die doppelt so gross ist wie bei den üblichen Isolierstoffen, hat dazu geführt, diesen Stoff auch unmittelbar als Isolierung zu verwenden. So kann man z. B. Drähte mit Glasdeidenisolation mit Silikongummi umsprühen und zu einer Spule verformen. Beim Vulkanisieren bildet sich dann eine kompakte feste Masse.

Silastic ist ein neuerer Isolierstoff auf Silikongummibasis. Sie ist die einzige Kabelisolation, die dauernd bei  $180^\circ\text{C}$  und kurzzeitig bis  $300^\circ\text{C}$  belastet werden kann, ohne dass die dielektrischen und mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Silikone auf dem Gebiet der elektrischen Isolierstoffe eine grundlegende Wandlung geschaffen haben. Sie ermöglichen in Verbindung mit Glasdeidenzeugnissen, Asbest, Glimmer und ähnlichen hitzebeständigen Werkstoffen eine bedeutende Erhöhung der thermischen Beständigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuchtigkeit. Dementsprechend besteht eine Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten für dieses Material. Ein Motor wird z. B. bei gleicher Belastung betriebssicherer gegenüber Überlast, sowie gegen Einfluss von Feuchtigkeit und Wasser. Es kann also bei gleichen Abmessungen der aktiven Teile einer Maschine, eines Transformators oder eines Apparates mehr Leistung entnommen, oder bei gleicher Leistung der Kupferquerschnitt verringert werden, oder aber ist es möglich, auf kleinere Typen überzugehen. Immerhin muss bei Erhöhung der Betriebstemperatur z. B. von Maschinen auch auf die Lager Rücksicht genommen werden. Noch mehr treten die Vorteile silikonisolierter Motoren bei Gegenstrombremsung in den Vordergrund, indem bei dieser Bremsart die dreifachen Anlaufsverluste auftreten können. Ähnliche Verhältnisse finden wir in Betrieben mit hohen Schalthäufigkeiten.

Grundsätzlich lässt sich die Silikonisation auf allen Gebieten des Elektromaschinen- und Apparatebaues anwenden. Wichtig ist immer die richtige Verarbeitung der Silikone.

O. Oggendorff