

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 42 (1951)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Wirtschaftlichkeit und Anwendungen der Hochfrequenzheizung  
**Autor:** Lang, G.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060992>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 08.01.2026

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

## Wirtschaftlichkeit und Anwendungen der Hochfrequenzheizung\*)

Von G. Lang, Olten

621.364.15

An Hand von Zahlenangaben und von graphischen Darstellungen werden die verschiedenen Kostenanteile für die gebräuchlichsten HF-Generortypen aufgeführt, und deren Einfluss auf die Gestehungskosten wird an einem Beispiel erläutert. Nachher werden die wichtigsten Anwendungen sowohl der induktiven als auch der dielektrischen Hochfrequenzheizung behandelt. Einige Neuentwicklungen nebst einem Hinweis auf sich abzeichnende zukünftige Entwicklungstendenzen bilden den Abschluss des Aufsatzes.

A l'aide d'indications numériques et de graphiques, le coût du chauffage à haute fréquence est indiqué pour les types de générateurs de haute fréquence les plus usuels. Son influence sur les frais de production est démontrée par un exemple. Exposé des principales applications du chauffage à haute fréquence inductif et diélectrique, de même que de quelques récents perfectionnements et de l'évolution probable de la technique dans ce domaine.

### Gestehungskosten und Wirtschaftlichkeit

Wie überall, entscheidet die Rentabilität, ob und in welchem Ausmass es sich lohnt, neue Produktionsmittel einzusetzen. Im Falle der Hochfrequenzheizung hängt die Rentabilität von einer Mehrzahl von Faktoren ab, wie im folgenden gezeigt werden soll. Im allgemeinen lässt sich hierüber ohne genaue Kenntnis der spezifischen Verhältnisse nichts Bestimmtes voraussagen, da selten ein Fall so wie der andere gelagert ist. Zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsrechnung ist die Kenntnis der folgenden Angaben erforderlich:

1. Das zu behandelnde Material; stündliches Durchsatzgewicht und in Frage kommende Temperaturen des Arbeitsgutes.
2. Beabsichtigte Wärmeoperation nebst Angaben über Gestalt, Abmessungen und Gewicht der Charge, deren Anfall und Weiterverarbeitung.
3. Mindestanforderungen, die bezüglich Qualität (Aussehen, Masshaltigkeit, Festigkeit, Härte, Homogenität, Gleichmässigkeit usw.) an das fertige Stück gestellt werden.
4. Die bisherigen Gestehungskosten.

Ziff. 1 bestimmt die Leistung des Generators, während die Kenntnis der Ziff. 2 und 3 einen Hinweis gibt auf das in Anwendung zu bringende Verfahren, um die gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Da meist mehrere Wege zum Ziel führen, ist es Aufgabe eingehender Studien und Versuche, die bestmögliche Lösung herauszufinden. Dabei ist von Anfang an eine enge Zusammenarbeit zwischen Hersteller und Benützer anzustreben, da nur auf diese Weise die technischen Möglichkeiten, die dem Konstrukteur beim Entwurf einer derartigen Anlage zur Verfügung stehen, mit den Wünschen des Auftraggebers voll in Einklang zu bringen sind. Diesem Punkt ist ganz besondere Aufmerksamkeit zu schenken, hängt doch oft die Frage, ob das HF-Verfahren wirtschaftlich ist oder nicht, einzig und allein hievon ab. Dabei ist neben der richtigen Wahl des Generators seine zweckmässige Ausnützung von ausschlaggebender Bedeutung. Oft sind dazu vielfach halb- oder vollautomatische Vorrichtungen nötig, welche zur Beschickung und Entlastung des Generators mit der Charge dienen. Ausserdem werden häufig Vorschubapparate, Abschreckvorrichtungen, Zuführungsautomaten usw. benötigt. Diese zusätzlichen Aggregate können in einzelnen Fällen recht umfangreich und kompliziert werden, wobei dann die Anschaffungskosten nicht selten diejenigen des Generators erreichen oder sogar übersteigen.

Bei der Ermittlung der Gestehungskosten nach Ziff. 4 ist zu beachten, dass ausser den üblichen Kostenelementen, wie Material, Löhne für Arbeitsvorbereitung, Herstellung und Kontrolle, Regiezuschläge für Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen usw., auch Kostenanteile, die durch Nacharbeiten und Ausschuss entstehen, mitberücksichtigt werden müssen. Den bisherigen Gestehungskosten sind die neuen, unter Einbezug des HF-Verfahrens entstehenden Herstellungskosten gegenüberzustellen.

Die Betriebskosten einer Hochfrequenzanlage setzen sich aus den folgenden Kostenelementen zusammen:

- a) Anschaffungskosten zuzüglich Amortisation für die Apparate (Generator, Zusatzeinrichtungen, Automaten usw.).
- b) Unterhalts- und Ersatzkosten dieser Apparate.
- c) Energiekosten für den Generator und für allfällige Hilfsaggregate.

Über die Anschaffungskosten der verschiedenen Generortypen mögen die folgenden approximativen Angaben einen Anhaltspunkt geben: Eine Mittelfrequenzanlage mit Umformergroupe kostet bei

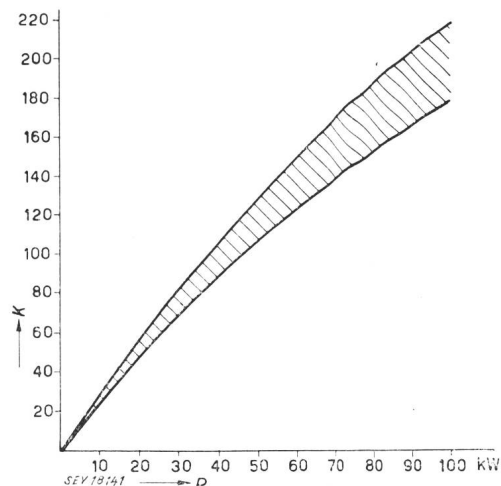


Fig. 1  
Anschaffungskosten des Röhrengenerators in Abhängigkeit der Generatorleistung  
P HF-Leistung des Generators in kW  
K Anlagekosten in tausend Franken

einer Leistung von 50 kW ca. Fr. 50 000.— und bei 500 kW etwa Fr. 250 000.—. Nicht stark verschieden hievon sind die Anschaffungskosten einer gleich grossen Anlage mit Quecksilberdampfumformer. Für einen Funkenstreckengenerator von 3 kW Eingangsleistung gilt als Richtwert der Preis von Fran-

\*) Im Bulletin SEV 1951, Nr. 9 erschien auf S. 289 ein Aufsatz über die Grundlagen der Hochfrequenzheizung.

ken 3500.—, bzw. Fr. 30 000.— für einen grösseren Typ von 30 kW. Anschaffungsmässig ist der Röhrengenerator der teuerste Generatortyp. Die entsprechenden Preise sind aus Fig. 1 ersichtlich.

Die *Unterhalts- und Ersatzkosten* erstrecken sich beim Motorgenerator auf das gelegentliche Überdrehen des Kollektors, das Auswechseln der Kollektorbürsten und das Schmieren der Lagerstellen. Beim elektronischen Umformer sind nach einer gewissen Betriebsdauer die Ventilröhren zu ersetzen bzw. ist beim Eingefäss-Umformer die Vakuumanlage von Zeit zu Zeit zu überholen. Beim Funkenstreckengenerator ergeben sich Unterhaltskosten durch das Einstellen von Funkenstrecken nach einer gewissen Betriebsstundenzahl sowie durch Ersetzen derselben nach einigen tausend Stunden. Einer natürlichen Abnutzung sind auch die Gleichrichter- und Leistungsröhren des Röhrengenerators unterworfen. Die diesbezüglichen Kosten für Röhrenersatz gehen aus Fig. 2 hervor. Bezogen auf die gesamten Betriebskosten, fällt der Kostenanteil, der durch Ersatz und Unterhalt bedingt ist, einzig bei den elektronischen Anlagen, d. h. dem Quecksilberdampfumformer und dem Röhrengenerator, ins Gewicht.

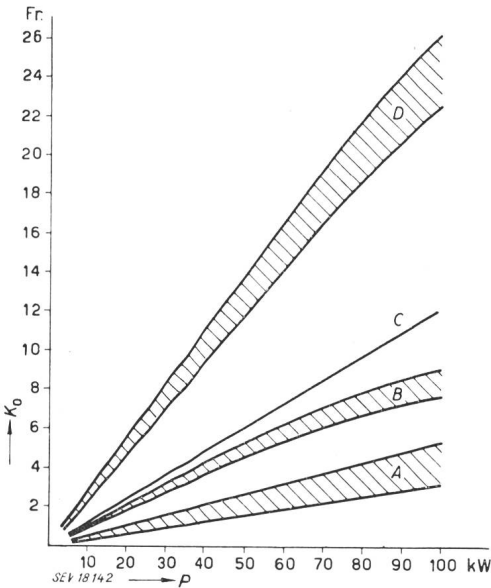


Fig. 2  
Zusammensetzung der Betriebskosten beim Röhrengenerator  
P HF-Leistung des Generators in kW  
K<sub>0</sub> Kosten pro Betriebsstunde  
A Röhrenersatzkosten bei einer Lebensdauer der Röhren von 5000 h  
B Kosten des Generators bei einer Amortisation in 5 Jahren  
C Energiekosten bei einem Preis von 6 Rp./kWh  
D totale Betriebskosten pro h

Die *Energiekosten* sind abhängig vom geltenden Energietarif, von der Benützungsdauer, vom jeweiligen Abnutzungsgrad und vom Gesamtwirkungsgrad der Anlage. Der letztere beträgt bei Vollast beim Motorengenerator im Mittel etwa 60 %, beim Quecksilberdampfumformer 90 %, beim Funkenstreckengenerator 50...60 % und beim Röhrengenerator 40...50 %. Die Energiekosten können für elektrothermische Zwecke im Mittel zu 5 Rp./kWh angenommen werden.

Durch Umrechnung der drei erwähnten Kostenanteile auf die Betriebsstunde erhält man den stündlichen Anteil für Anlage-, Ersatz- und Energiekosten. Deren Summe ergibt die Betriebskosten pro Stunde. Dies sei an Hand eines Beispiels kurz erläutert.

In einem Presswerk wird beabsichtigt, das Vorwärmen der Pressmasse, das bis jetzt in einem Muffelofen vorgenommen wurde, in der Zukunft mit dem HF-Verfahren durchzuführen. Der vorgesehene 2-kW-HF-Röhrengenerator koste Fr. 9000.— und soll innerhalb 8 Jahren abgeschrieben werden (das Jahr zu 300 Arbeitstagen gerechnet). Die tägliche Betriebsdauer betrage 5 h. Für Röhrenersatz werden 10 % des Anschaffungspreises, bei einer Lebensdauer von 3000 h, eingesetzt. Die Energiekosten betragen 5 Rp./kWh. Endlich soll ein Wirkungsgrad des Generators von 40 % angenommen werden.

Um den Hochfrequenzgenerator möglichst günstig ausnützen zu können, empfiehlt es sich, die Pressmasse vorher zu tablettieren. Hierzu ist eine Tablettiermaschine notwendig, deren Anschaffungspreis zu Fr. 7000.— veranschlagt wird. Welche Kosten entfallen nach Einführung der HF-Vorwärmung auf das Kilogramm der Pressmasse?

Anschaffungspreis des Generators	Fr. 9 000.—
Anschaffungspreis der Tablettiermaschine	Fr. 7 000.—
Amortisation	Fr. 2 000.—
Anlagekosten total	Fr. 18 000.—
Anlagekosten pro h	$\frac{18\,000}{8 \cdot 300 \cdot 5} = \text{Fr. } 1.50$
Röhrenersatz pro h	$\frac{900}{3\,000} = \text{Fr. } .30$
Energiekosten pro h	$\frac{2}{0.4} \cdot 0.05 = \text{Fr. } .25$
Totale Betriebskosten pro h	<u>Fr. 2.05</u>

Mit einem 2-kW-Generator können pro Minute 500 g tablettierte Pressmasse auf ca. 150 °C vorgewärmt werden, was einer Produktion von 30 kg pro h entspricht. Damit ergeben sich die auf das Kilogramm der Pressmasse bezogenen Kosten der HF-Vorwärmung zu  $2.05/30 = 0.07$  Franken. Diesen Kosten gegenüber sind diejenigen, welche sich bei der Ofenvorwärmung ergeben, zweifellos bedeutend geringer. Dem Nachteil stehen aber die Vorteile der beträchtlich höheren Produktion als auch der bessern Qualität und des geringeren Ausschusses gegenüber. Einen weiteren Gewinn bringt das neue Verfahren dadurch, dass der Pressdruck um 30...50 % herabgesetzt werden kann, was eine entsprechend längere Lebensdauer der teuren Presswerkzeuge zur Folge hat.

Die sich durch Einführung der Hochfrequenzheizung ergebenden Vorteile sind bei der Kalkulation der gesamten Gestehungskosten selbstredend in die Rechnung mit einzubeziehen. Eine Gegenüberstellung der Herstellungskosten für die beiden Verfahren gibt endlich Aufschluss darüber, welches von ihnen wirtschaftlicher ist.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Hochfrequenzwärme, welche physikalisch bedingt eine kostbare Energieform darstellt, in der Regel nur dort rationell ist, wo es mit ihrer Hilfe gelingt, entweder die Produktion zu steigern, die Qualität des Produktes zu verbessern, oder wo beides gleichzeitig zutrifft. In einzelnen Fällen können aber noch andere Faktoren ausschlaggebend sein, z. B. die Verwendung eines preislich günstigeren Ausgangsmaterials, eine Vereinfachung oder das vollständige Wegfallen bestimmter Arbeitsoperationen, die Einführung des Fließbandes usw.

Die Hochfrequenzheizung ist naturgemäss an gewisse Voraussetzungen gebunden. Damit das HF-Verfahren möglichst rationell zum Einsatz kommt, sind dessen Besonderheiten im Rahmen der gesamten Planung von Anfang an entsprechend zu berücksichtigen. Vielfach lohnt es sich deshalb, bisherige Konstruktionen dem neuen Verfahren anzupassen. Unter Umständen ist es auch angezeigt, die Fabrikation umzustellen und den besondern Bedürfnissen der Hochfrequenzheizung anzupassen.

Zusammenfassend geht aus dem Gesagten hervor, dass vor der Einführung der Hochfrequenzheizung in einem bestimmten Herstellungsprozess sämtliche in Betracht fallenden Faktoren gründlich abgeklärt werden müssen, bevor ihr Einsatz mit gutem Gewissen empfohlen werden kann.

### Anwendungen der induktiven HF-Heizung

Auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften eignen sich die Metalle besonders gut zur induktiven Erwärmung. Dies ist der Grund, weshalb die Induktionsheizung in über 90 % der in der Praxis vorkommenden Fälle zur *Wärmebehandlung von Metallen* verwendet wird. Darunter fallen fast alle Operationen, die auch mit den üblichen Erwärmungsmethoden bewerkstelligt werden, wie Schmelzen, Härten, Anlassen, Glühen, Löten, Sintern, Schweissen usw.

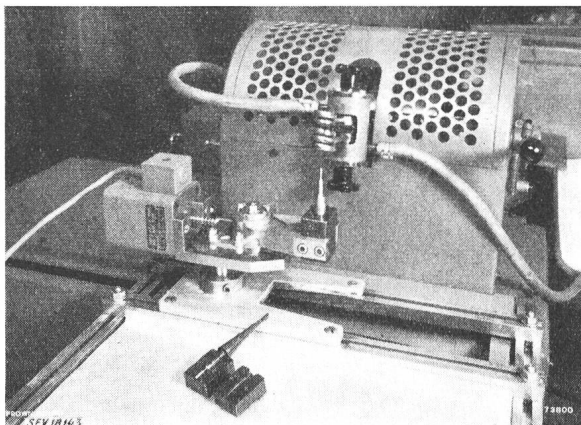


Fig. 3

Einfaches Arbeitsgerät zur partiellen Härtung kleiner Teile  
Unter dem Werkstück befindet sich das Abschreckbad

Auf der Möglichkeit, mit Hilfe der Hochfrequenz sehr hohe Energiekonzentrationen hervorzurufen, beruht die Verwendung der Induktionsheizung zur

*partiellen HF-Härtung*. Der zu härtende Teil des betreffenden Stückes wird in einer Induktorspule erhitzt und abgeschreckt. Die Heizspule muss dabei so ausgebildet sein, dass sie das Werkstück an der zu erwärmenden Stelle möglichst eng umschliesst. Auf diese Weise wird die Wärme nur in einer ganz bestimmten, örtlich streng begrenzten Zone ent-

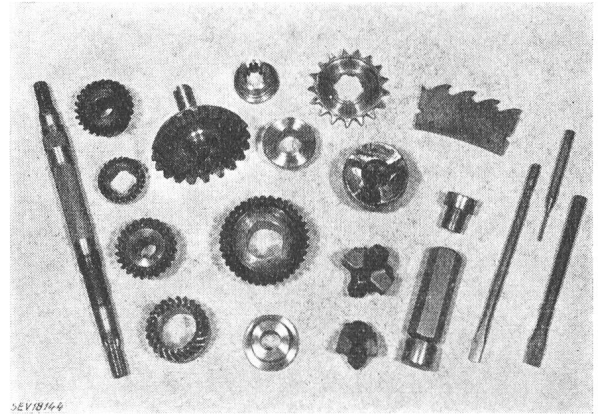


Fig. 4

Partiiell gehärtete Werkzeuge und Maschinenteile

wickelt. Damit keine Wärme in die angrenzende Umgebung abfließt, muss sich der Aufheiz- und Abschreckprozess in sehr kurzer Zeit, die sich zwischen Bruchteilen einer Sekunde und einigen Sekunden bewegt, abspielen. Heute werden die verschiedenartigsten Teile des Maschinen- und Apparatebaus partiell hochfrequenzgehärtet, so Anschläge von Klinken, Nocken, Lager- und Laufstellen usw. Fig. 3 und 4 zeigen einige Anwendungsbeispiele der partiellen Härtung.

Eng verwandt mit der partiellen Härtung ist die hochfrequente *Oberflächenhärtung*, bei der es sich darum handelt, nur die Oberfläche eines Gegenstandes auf eine meist sehr geringe Härteschicht zu härten. Zur Erreichung einer möglichst dünnen Härteschicht werden spezifische Leistungen von 2...3 kW/cm<sup>2</sup> Oberfläche benötigt. Für eine etwas tiefere Einhärtung genügen etwas kleinere Werte; doch wird in der Praxis eine untere Grenze von etwa 0,5 kW/cm<sup>2</sup> selten unterschritten. Als Abschreckmittel dienen, je nach Stahlsorte, Luft, Öl, Wasser und besondere Härteflüssigkeiten. Massige Stücke können jedoch auch ohne künstliche Kühlung gehärtet werden, indem das noch kalte Innere für einen genügend raschen Wärmeentzug aus der erhitzten Oberfläche sorgt, um eine Härtung eintreten zu lassen. Diese als Eigenkühlung bezeichnete Härtung (sog. Selfquenching) erfordert eine besonders hohe spezifische Leistung von 10...15 kW/cm<sup>2</sup>.

Um zu verhindern, dass die Wärme infolge Wärmeleitung nach der Tiefe abwandert, verlangt auch die Oberflächenhärtung, analog der partiellen Härtung, sehr kurze Erwärmungszeiten. Durch Verwendung eines sog. Timers, d. h. eines Zeitschalters, der den Generator nach einer zum voraus beliebig eingestellten Zeit automatisch abschaltet, kann der Arbeitsprozess von persönlichen Einflüssen des Be-



dienungspersonals weitgehend unabhängig gemacht werden. Dies ist einer der grössten Vorteile der Hochfrequenzheizung, ist dadurch doch Gewähr geboten für eine absolute Reproduzierbarkeit des Vorganges.

Wie aus der Formel für die Eindringtiefe des induzierten Stromes hervorgeht <sup>1)</sup>, ist zur Erzielung einer möglichst geringen Einhärtetiefe, nebst hoher spezifischer Leistung und kurzer Erwärmungszeit, zudem auch eine möglichst hohe Frequenz erforderlich. Aus praktischen Erwägungen ist man jedoch in der Wahl der Frequenz nicht völlig frei. So fallen z. B. sowohl der Motorgenerator als auch der Quecksilberdampfumformer als Generatortypen zum vornherein aus, da sie bekanntlich nur für Frequenzen bis zu etwa 10 000 Hz bzw. 1500 Hz gebaut werden können. Mit Funkenstrecken-, vor allem aber mit Röhrengeneratoren lassen sich dagegen bedeutend höhere Frequenzen erzeugen, weshalb diese Typen allein in Frage kommen, wenn es gilt, sehr kleine Härtetiefen zu erreichen.

Auf der andern Seite kann die Frequenz auch nicht beliebig erhöht werden. Dies würde sonst dazu führen, dass die proportional mit der Frequenz wachsende Spannung an der Arbeitsspule bald unzulässig hohe Werte annehmen würde, was zu Überschlügen zwischen Spule und Werkstück oder zwischen einzelnen Windungen führen müsste. Diese Gefahr ist um so grösser, je grösser die verwendete Leistung einerseits und die Spuleninduktivität (Abmessungen und Windungszahl der Spule) andererseits sind. In der Praxis haben sich aus diesem Grunde Frequenzen zwischen einigen hundert Kilohertz und einigen Megahertz am besten bewährt. Einzig bei der Härtung von Werkstücken mit sehr geringen Durchmessern bzw. Wandstärken, wie Nadeln, Schneiden usw., ist man genötigt, mit der Frequenz höher zu gehen. Da es sich dabei um sehr kleine Heizspulen und zudem um Leistungen von nur einigen hundert Watt handelt, ist es ohne grosse Schwierigkeiten möglich, Frequenzen bis etwa 200 MHz anzuwenden.

Die praktische Einhärtetiefe ist stets grösser als die theoretisch errechnete Eindringtiefe, da für die letztere die unvermeidliche Wärmeleitung zu berücksichtigen ist. Es ist klar, dass der Unterschied mit zunehmender Erwärmungszeit immer grösser wird.

Wie wir gesehen haben, spielen die Grösse der spezifischen Leistung, der Zeit und der Frequenz bei der Induktionsheizung eine ausschlaggebende Rolle. Durch Variation derselben hat man es somit in der Hand, den Härtevorgang in sehr weiten Grenzen zu beeinflussen. Durch die genaue Dosierung der Leistung, in Verbindung mit exakt festgelegten Erwärmungs- und Abkühlungszeiten, verfügt die HF-Heizung über Vorteile, die mit keinem andern Verfahren in dieser Genauigkeit erreicht werden.

Aus den erwähnten Angaben über die in der Praxis verwendeten spezifischen Leistungen geht hervor, dass für Härtzwecke ganz beträchtliche Leistungen notwendig sind. Es können deshalb bei einer gegebenen Generatorleistung nur relativ kleine Flächen auf einmal gehärtet werden. Im Gegensatz zu diesem sog. *Stillstandsverfahren* hat sich ein anderes Vorgehen bei der Behandlung grosser Werkstücke als vorteilhafter erwiesen. Das zu härtende Stück passiert der Länge nach die Heizspule, wobei diese so ausgebildet ist, dass sie nur eine relativ kleine Zone des Werkstückes auf einmal erwärmt. Direkt hinter der Induktorspule erfolgt die Abkühlung in einer Abschreckbrause. Auf diese Weise passiert Zone um Zone des Werkstückes die Arbeitsspule und die Abschreckvorrichtung, bis die ganze Charge gehärtet ist. Sinngemäss wird deshalb dieses Vorgehen als *Vorschubverfahren* bezeichnet. Es eignet sich vorzugsweise für rotationssymmetrische Stücke, wie Wellen, Achsen, Kolben, Ringe, Zapfen, Spindeln, Lagerstellen usw. Zur Vermeidung ungleichmässiger Erwärmung lässt man das

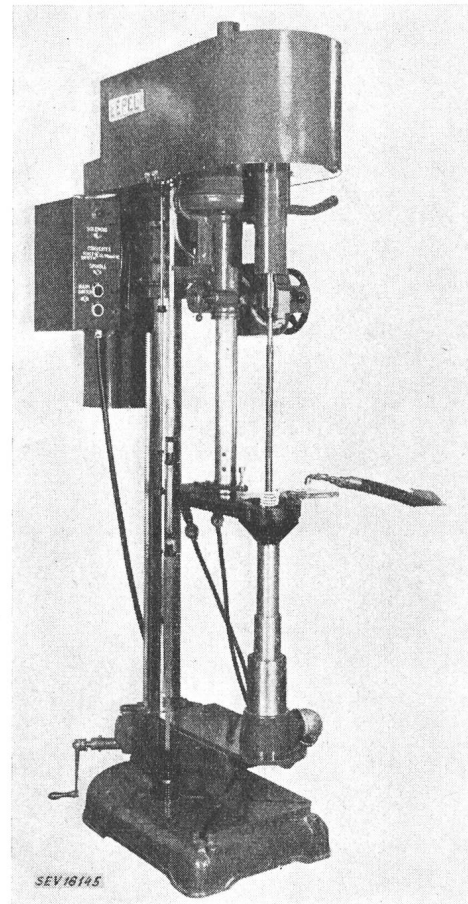


Fig. 5  
Härten einer Gewindestange im Vorschubverfahren

Werkstück während des Härtevorganges langsam um die eigene Achse rotieren. Die Vorschubgeschwindigkeit richtet sich nach den Abmessungen und Materialeigenschaften des zu härtenden Gegenstandes und sollte eine untere Grenze von 3 mm/s nicht unterschreiten. Umgekehrt können für bestimmte

<sup>1)</sup>  $p = 5033 \sqrt{\frac{Q}{\mu_r f}} \text{ cm}$

Werkstücke, z. B. Metallsägeblätter, Schneiden, Blättchen usw., auch bedeutend höhere Vorschubgeschwindigkeiten in Frage kommen. Fig. 5 zeigt eine Vorrichtung für Vorschubhärtung.

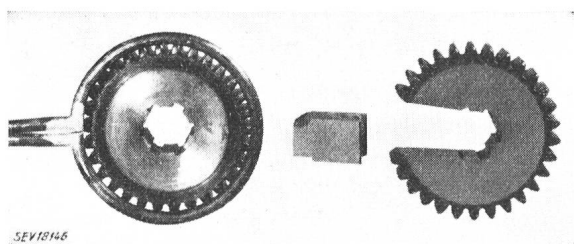


Fig. 6  
Oberflächenhärtung eines Schaltrades aus einem Automobilgetriebe

links: das Werkstück mit Induktor in Arbeitsstellung  
rechts: das Schaltrad aufgeschnitten, geschliffen und geätzt  
Man erkennt deutlich, dass nur die auf Verschleiss beanspruchte Stelle gehärtet ist. Der Durchmesser des Werkstückes ist 80 mm. Die Härtezeit betrug 3 s mit einem Generator von 60 kW HF-Leistung

Das Härten von Zahnrädern stellt einen Spezialfall dar, weshalb hier etwas näher darauf eingegangen werden soll. Kleinere Räder lassen sich ohne weiteres auf einmal, im sog. *Allzahnverfahren*, härten, wobei man die Zahnräder während des Aufheiz- und Abschreckprozesses um ihre Achse rotieren

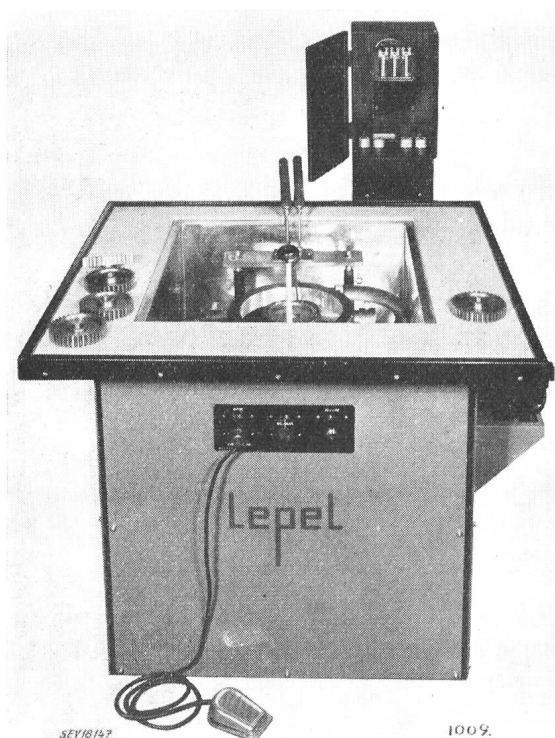


Fig. 7  
Arbeitstisch zum Härten kleiner Zahnräder  
Der Anschluss an den nicht sichtbaren HF-Generator erfolgt über zwei wassergekühlte, flexible Zuführungsleitungen

lässt, um eventuelle Ungenauigkeiten bei der Erwärmung auszugleichen. Bei grösseren Rädern fällt diese Methode weg, da infolge der entsprechend grösseren Oberfläche auch die zurzeit grössten Generatoren leistungsmässig nicht ausreichen würden,

um die pro Flächeninhalt benötigten 2...3 kW HF-Leistung aufzubringen. Das übliche Vorschubverfahren hat sich im Falle der Zahnräderhärtung in der Praxis ebenfalls nicht bewährt, weshalb man nach andern Lösungen suchte. Die Allzahnhärtung von kleinen Zahnrädern ist aus den Fig. 6, 7 und 8 ersichtlich.

Bei der sog. *Einzelzahnhärtung* wird Zahn um Zahn nacheinander gehärtet, gegebenenfalls im Vorschub. Die Induktorspule ist dabei der Zahnform genau angepasst und besteht meist aus einer einzigen Schlaufe. Die Abschreckung erfolgt durch direkte Bespritzung mit Wasser oder Öl. Wenn ein Zahn gehärtet ist, wird das Rad mit Hilfe einer Teilvorrichtung um eine Zahnteilung weitergedreht, der nächste Zahn gehärtet usw. Dieses Verfahren

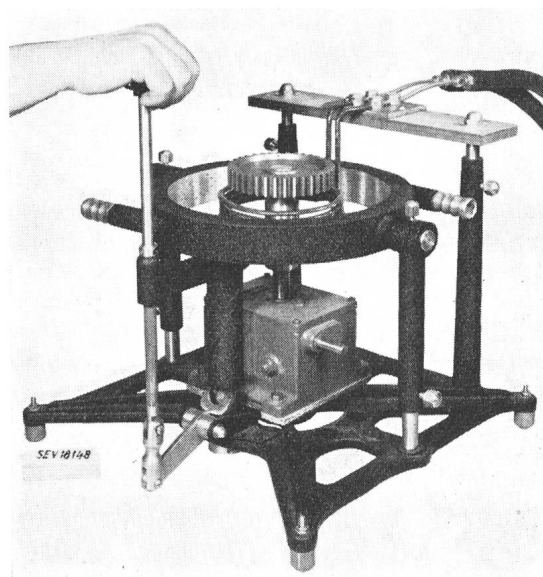


Fig. 8  
Detailansicht der Einspann- und Abschreckvorrichtung von Fig. 7

weist den Nachteil auf, dass dabei nur der Zahnkopf und die beiden Zahnflanken gehärtet werden, während der Zahngrund nicht miterfasst wird, da sich in ihm Induktionsströme nicht ausbilden können. Dieser wird somit nur durch Wärmeleitung erhitzt und bleibt deshalb in der Härte zurück. Zudem besteht beim Einzelzahn härten die Gefahr der Überhitzung des Zahnkopfes.

Beide Mängel werden bei der *Zahnlückenhärtung* vermieden. Bei dieser befindet sich die Arbeitsspule in der Zahnücke und ist so ausgebildet, dass der induzierte Strom den beiden Zahnflanken und dem Zahnfuß entlang fließen kann. Dabei muss allerdings die Zahnteilung so gross sein, dass auf dem Zahngrund mindestens zwei Heizleiter nebeneinander Platz haben. Gehärtet wird durch sog. Rückenkühlung, indem während der Erwärmung die Rückseiten der beiden Zahnhälften gekühlt werden, wodurch eine gleichmässige Härtung erzielt wird.

Wenn sowohl die Einzelzahn- als auch die Zahnlückenhärtung heute weitgehend angewendet werden, so ist doch eine solche Härtung bei grösseren

Serien umständlich und zeitraubend. Ausserdem wird für jedes Zahnprofil eine besondere Induktorspule benötigt, deren Herstellung bis zur endgültigen Form oft langwierige Versuche voraussetzt. Dazu bedarf es, wie bereits erwähnt, für diese Härtingsart eines besondern Teilapparates, der jeweils das Vorschieben um eine Zahnteilung besorgt.

Die den bisherigen Methoden anhaftenden Nachteile beim HF-Härten grosser Zahnräder konnten durch eine völlig neuartige Lösung des Problems überwunden werden. Bei dem durch Westinghouse entwickelten Verfahren [1]<sup>2)</sup> werden die Zahnräder zuerst mit Mittelfrequenz von 10 000 Hz auf ca. 600 °C vorgewärmt und hierauf, nach Einschalten einer Pause von 10...20 s, in einer zweiten Spule mit Hochfrequenz von ca. 200 kHz auf Härtetemperatur erhitzt und anschliessend abgeschreckt. Das Vorwärmen erfolgt mit relativ kleiner spezifischer Leistung von etwa 0,5 kW/cm<sup>2</sup>, jedoch bei entsprechend langer Zeit (10...20 s). Während der nachfolgenden Verweilzeit kann sich die Wärme gleichmässig über den ganzen Zahnquerschnitt und einen Teil des Zahnkranzes verteilen, wodurch das Rad vollkommen spannungsfrei wird. Die Behandlung mit Hochfrequenz besteht in einem kurzen Impuls von 0,5...1 s Dauer bei gleichzeitig grosser Konzentration (2...3 kW/cm<sup>2</sup>). Während der Vorwärmung und auch beim anschliessenden Härtevorgang lässt man das Rad langsam rotieren, wodurch eine gleichmässige Erwärmung und Abschreckung erzielt wird. Die nach diesem Verfahren gehärteten Räder weisen eine gleichmässige Härteschicht über die ganze Oberfläche auf. Der Härteverlauf zeigt einen allmählichen Übergang zwischen der gehärteten Oberfläche und dem in seiner Struktur unveränderten Zahnkern. Die Erwärmung in 2 Stufen hat ausserdem den Vorteil, dass dadurch praktisch kein Verzug eintritt. Als Hinweis bezüglich der Qualität eines nach dieser Methode gehärteten Zahnrades sei erwähnt, dass dieses nach einer Dauerprüfung von 11 Millionen Umdrehungen bei 150 % Last keine nennenswerte Abnützung aufwies. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zeigt überdies, dass nach diesem Verfahren hergestellte Räder, je nach Grösse derselben, 2...3mal billiger zu stehen kommen, als wenn sie im Einsatz gehärtet würden.

Die HF-Oberflächenhärtung wird heute ausser bei Zahnrädern unter anderem bei der Herstellung von Kurbel- und Nockenwellen verwendet. Als deren wesentlichste Vorteile sind zu nennen:

- geringer Verzug,
- keine Verzunderung,
- Reproduzierbarkeit des Vorgangs,
- Verwendung von ungelerntem Bedienungspersonal,
- Produktions- und Qualitätssteigerung bei gleichzeitiger Senkung der Herstellungskosten.

Gegenüber der Oberflächenhärtung spielt die gewöhnliche *Durchhärtung* eher eine untergeordnete Rolle. Sie wird erreicht durch Anwendung von tieferen Frequenzen unter Zuhilfenahme eines Mittelfrequenzgenerators, wodurch die Eindring-

tiefe des induzierten Stromes erhöht wird. Auf diese Weise werden Walzen, Stangen und andere Stücke mit Durchmessern von etwa 20 mm aufwärts durchgehärtet. Auch andere Werkstücke mit unregelmässiger Form lassen sich mit Mittelfrequenz härten, sofern ihre Wandstärke ein bestimmtes Mass übersteigt. Dabei ist die Frequenz um so niedriger zu wählen, je voluminöser das Werkstück ist.

Ausser mit Mittelfrequenz können kleinere Stücke ebensogut auch mit Hochfrequenz durchgehärtet werden. Dazu ist notwendig, dass mit geringer spezifischer Leistung (weniger als 0,5 kW/cm<sup>2</sup>) und genügend langer Heizzeit gearbeitet wird. Der Temperatenausgleich tritt dann infolge Wärmeleitung ein, wodurch die Voraussetzung für eine gleichmässige Härteverteilung über den gesamten Querschnitt erfüllt ist. Als Beispiel sei erwähnt, dass es ohne Schwierigkeit möglich ist, bei einer Frequenz von 450 kHz Spindeln und Wellen bis zu einem Durchmesser von etwa 15 mm vollständig gleichmässig durchzuhärten.

Neben der HF-Härtung gewinnt auch das *Glühen* mittels Hoch- und Mittelfrequenz immer mehr an Bedeutung. Erwähnt sei hier nur das induktive Glühen von Stangenmaterial vor dem Einzug beim Warmpressen, zur Herstellung von gepressten Muttern und ähnlichen Artikeln. Aber auch beim Vergüten spielt heute die Hochfrequenz eine wichtige Rolle, indem z. B. kaltgepresste Schrauben durch nachheriges Glühen und Abschrecken in Öl spannungs- und zunderfrei gemacht werden. Diese beiden nach dem Vorschubverfahren arbeitenden Operationen dürften in Zukunft noch eine bedeutende Verbreitung finden. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass auch das Blankglühen vorteilhaft mit Hochfrequenz durchgeführt werden kann, da es ein leichtes ist, die Erwärmung der Charge direkt im Ölbad vorzunehmen.

Schon seit längerer Zeit hat das *Löten* mit Hochfrequenz Eingang in die verschiedensten Industriezweige gefunden. So werden heute Kondensatoren, Büchsen und Dosen der verschiedensten Art weichgelötet. Dabei kommt bei der Serienherstellung das Fließbandsystem zur Anwendung. Der HF-Generator ist dauernd eingeschaltet, und die zu verlötenden Gegenstände passieren die Heizspule, nachdem das Weichlot vorher, meist in Form eines gestanzten Rähmchens, an richtiger Stelle des Stückes aufgebracht wurde.

Neben dem Weichlöten gewinnt auch das hochfrequente *Hartlöten* ständig an Bedeutung, dessen hauptsächlichste Anwendung in der Herstellung der verschiedensten Flanschverbindungen aus Eisen- und Nichteisenmetallen besteht. Es werden oft mehrere gleiche Stücke nebeneinander zur gleichen Zeit gelötet. Damit wird zweierlei erreicht. Einmal darf beim Hartlöten die Erwärmung nicht zu schnell erfolgen, um dem Lot Zeit zu lassen, sich gleichmässig zu verteilen und sauber zu fliessen. Dies geschieht durch Arbeiten mit kleiner spezifischer Leistung bei entsprechend langer Aufheizzeit. Um nun aber trotzdem eine gewisse Produktion zu erzielen, wird das System der Erwärmung in Vielfach-

<sup>2)</sup> siehe Literatur am Schluss.



spulen angewendet, indem eine Anzahl gleicher Stücke gleichzeitig in einer einzigen, entsprechend ausgebildeten Spule erwärmt wird. Dieses Prinzip ist aus der Fig. 9 ersichtlich. Fig. 10 zeigt einige mittels Hochfrequenz gelötete Teile.

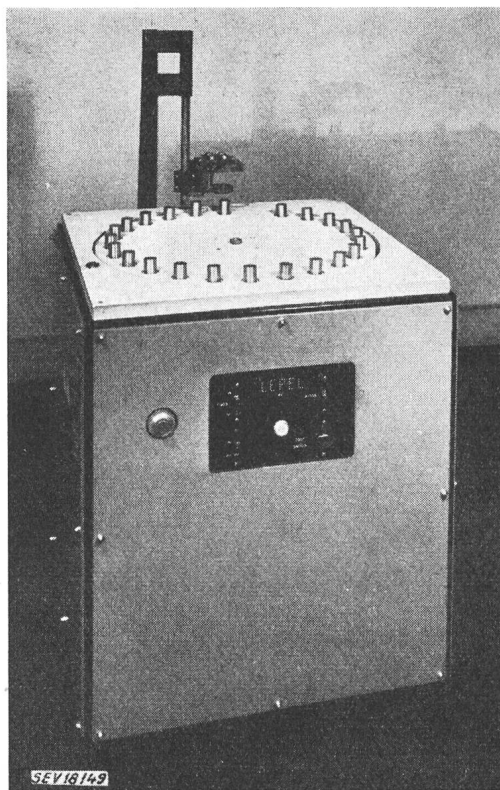


Fig. 9  
HF-Generator mit Zweifachspule zur gleichzeitigen  
Erwärmung zweier gleicher Werkstücke  
Die Arbeitsstelle ist als Drehtisch ausgebildet

Eine weitere Zeitersparnis und damit Erhöhung der Produktion wird dadurch ermöglicht, dass gleichzeitig an zwei nebeneinander liegenden Arbeitsstellen gelötet wird, wobei dann der HF-Generator wahlweise auf den einen oder anderen der beiden Arbeitsplätze umgeschaltet wird. Während an der einen Heizstelle gerade gelötet wird, kann der Arbeiter die bereits verlöteten Stücke aus der

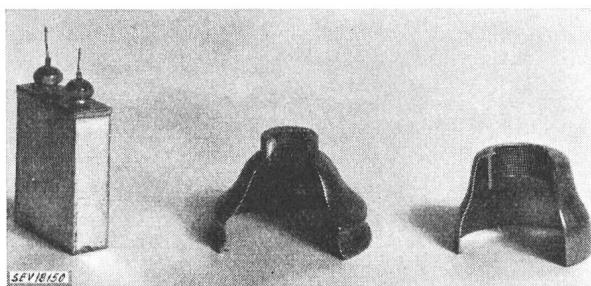


Fig. 10  
Anwendung des hochfrequenten Hartlötens  
links: Einlöten des Deckels an Kondensatorbecher aus Weissblech. Rechteckinduktor; 1-kW-Generator; 2,5 s  
Mitte: Teil einer Handbrause aus Messing. Gewindenippel mit Zinn eingelötet. Ringinduktor; 2-kW-Generator; 5 s  
rechts: Armaturenteil aus Messing. Gewinding hart eingelötet. Inneninduktor; 2-kW-Generator; 40 s

zweiten Induktorspule entfernen und wieder neue einsetzen. Der Generator ist auf diese Weise maximal ausgenützt (Fig. 11). Das Hartlöten von Hartmetallplättchen auf Drehstähle ist in Fig. 12 dargestellt, während auf Fig. 13 verschiedene Stähle mit den dazugehörigen Arbeitsspulen sichtbar sind.

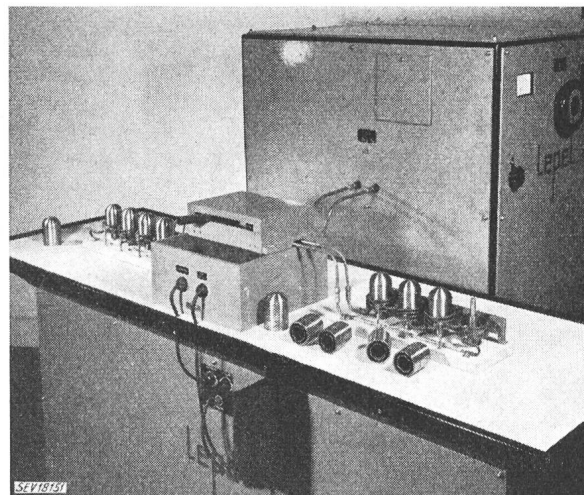


Fig. 11  
HF-Generator mit Arbeitstisch  
Der Arbeitstisch besitzt zwei umschaltbare Mehrfachspulen zur gleichzeitigen Wärmebehandlung mehrerer gleicher Stücke

Eine der ältesten Anwendungen der HF-Heizung bildet das *Schmelzen* im Induktionsofen, wobei der Mittelfrequenzofen in der Praxis vorherrschend ist. Seine grössten Vorteile sind der Wegfall jeglicher Elektroden sowie der sog. Stirling-Effekt, eine durch das magnetische Feld hervorgerufene Badbewegung,

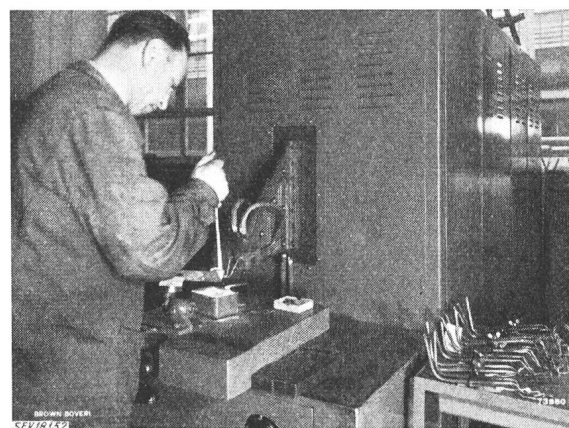


Fig. 12  
Auflöten von Hartmetallplättchen auf Drehstähle  
Rechts sind verschiedene Werkspulen sichtbar

wodurch eine erwünschte, gleichmässige Durchmischung des geschmolzenen Metalls ohne äusseres Zutun zustande kommt. Dieser Ofentyp eignet sich deshalb vorzüglich für das Umschmelzen von Schrott zu hochwertigem Stahl. Daneben findet der Mittelfrequenzgenerator auch immer mehr und mehr Verwendung in der Edelmetallverarbeitung beim Schmelzen von Gold und Silber, das in keramischen

Tiegel aus hochhitzebeständigem Material (Aluminiumoxyd, Zirkonoxyd usw.) vor sich geht. Graphittiegel finden wegen der dabei eintretenden chemischen Reaktion seltener Verwendung, obwohl gerade Kohle und Graphit sich ausgezeichnet induktiv erwärmen lassen. Fig. 14 zeigt einen HF-

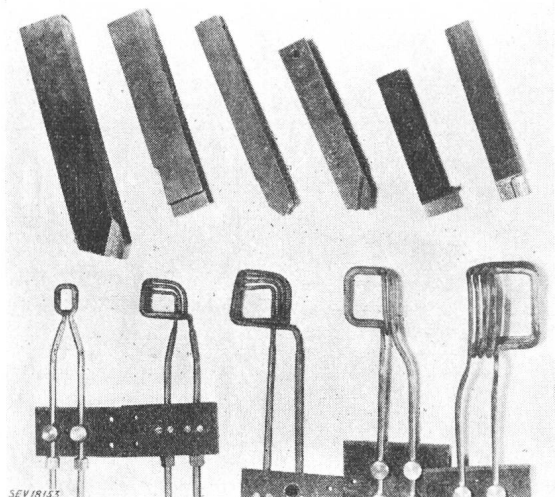


Fig. 13

Drehstähle mit dazugehörigen Induktorspulen

Schmelztiegel mit Anpassungstransformator. Für das Schmelzen mit Hochfrequenz gilt als Regel, dass die Frequenz zur Erreichung eines guten Wirkungsgrades um so höher sein soll, je kleiner die Abmessungen des Einsatzmaterials sind. Praktische Werte für das Verhältnis von kleinster Abmessung zur Eindringtiefe des Stromes (gerechnet für die Schmelztemperatur) sollten zwischen 5 und 10 liegen.

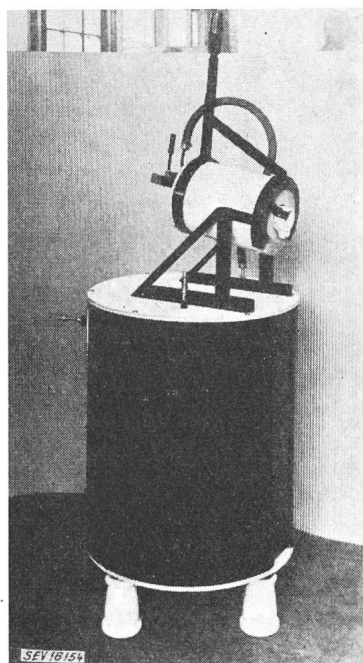


Fig. 14

HF-Schmelztiegel mit darunter befindlichem HF-Transformator

Sowohl Schmelztiegel als auch Transformator besitzen wassergekühlte Wicklungen. Die Frequenz beträgt ca. 450 kHz

Wenn auch das *Schweissen* mit Hochfrequenz noch keine grosse praktische Bedeutung erlangt hat, sei immerhin darauf hingewiesen, dass schon diesbezügliche Versuche zur Schweissung von Ketten, zum Stumpfschweissen von Stahlrohren usw. durchgeführt wurden. Es liegt auf der Hand, dass ein solches Verfahren nur in Verbindung mit entsprechenden Vorrichtungen und nur für Massenerstellung in Frage kommen kann. Gegenüber den üblichen Schweissmethoden ist das HF-Verfahren weitgehend von der Geschicklichkeit des Arbeiters unabhängig, indem einwandfreie Schweissverbindungen gewährleistet sind, sobald einmal die richtigen Einstellungen von Generator und Applicator empirisch ermittelt worden sind.

Dass *Anlassen* und *Vorwärmen* ideale Operationen darstellen, um mit Hochfrequenz durchgeführt zu werden, dürfte aus dem bisher Gesagten klar hervorgehen. Es gibt kaum eine andere Methode, die sich hierfür so gut eignet, kann doch durch Variation von Leistung und Erwärmungszeit jeder be-

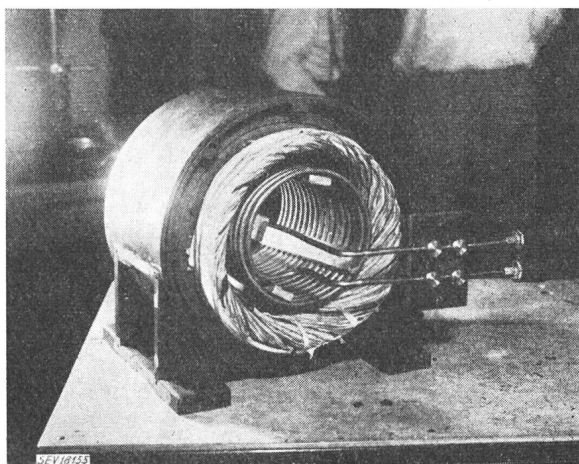


Fig. 15

Trocknen der Statorwicklung eines Elektromotors mittels Hochfrequenzenergie

liebige Effekt erzielt werden. Als Beispiel aus der Praxis sei das Aufziehen von Ringen auf Spindeln und Wellen erwähnt, das vielfach auf andere Weise als durch induktive Erwärmung überhaupt nicht möglich ist. Daneben sei auch auf die mannigfaltigen Möglichkeiten hingewiesen, wo bestimmte Stücke aus legiertem Stahl partiell vergütet werden müssen. Neben der Möglichkeit, die Aufheizzone örtlich genau abzugrenzen, spricht ausserdem die ungehinderte Beobachtung während des Prozesses für das Verfahren. Fig. 15 zeigt die induktive Erwärmung eines gewickelten Stators, wie sie vorteilhaft zum raschen Trocknen der compoundierten Wicklung angewendet wird.

Die aufgeführten Anwendungsbeispiele zeigen, dass auf dem Gebiete der Wärmebehandlung von Metallen schon sehr viel getan wurde. Die Möglichkeiten sind aber längst nicht erschöpft. Erwähnt sei z. B. nur, dass die Metallurgie durch die HF-Heizung gewaltige Anregungen erhalten hat, indem ihr völlig neue Wege erschlossen wurden. Es ist zu er-



warten, dass auch umgekehrt von dieser Seite ständig neue Probleme aufgeworfen werden, die der Induktionsheizung in Zukunft neue Aspekte eröffnen.

Nachstehend sei noch kurz auf die Schwierigkeiten der Temperaturmessung hingewiesen, welche bei der Induktionshärtung eine bedeutende Rolle spielt. Bisher wurde in den meisten Fällen das Problem so gelöst, dass man zur Erlangung einer bestimmten Härte die nötige Erwärmungszeit durch Versuche ermittelte und auf die Messung der Temperatur verzichtete. Diese einmal festgestellte Zeit kann an einem Timer eingestellt werden, wodurch die Heizperiode für alle nachfolgenden Härtungen zwangsweise immer dieselbe bleibt, was eine gleichmässige, reproduzierbare Stückhärtung ermöglicht.

Wenn auch dieser empirische Weg zur Erreichung einer bestimmten Härte für die Serienanfertigung keine weiteren Nachteile mit sich bringt, so ist es offensichtlich, dass diesem Verfahren im Falle der Härtung grosser, komplizierter Stücke aus hochwertigem Stahl, bei denen es auf eine möglichst genaue Einhaltung der Härtetemperatur ankommt, gewisse Mängel anhaften.

Ein kürzlich entwickeltes, neuartiges Temperaturmessgerät [2] erlaubt nun eine zuverlässige Temperaturmessung auch bei dem ausserordentlich raschen Verlauf des Temperaturanstieges. Dieses Gerät hat eine Anzeigegenauigkeit von  $\pm 10^\circ\text{C}$  und eine Anzeigegeschwindigkeit von  $1000^\circ\text{C/s}$ . Da es ausserdem mit zwei Steuerkontakten versehen ist, welche beim Über- resp. Unterschreiten der Maximal- bzw. Minimaltemperatur betätigt werden, kann es direkt zur Steuerung der Ausgangsleistung eines Generators, insbesondere eines Röhrengenerators, benützt werden.

### Anwendungen der dielektrischen HF-Heizung

Die kapazitive HF-Heizung besitzt im Gegensatz zur Induktionsheizung, deren Einsatz naturgegeben auf die Wärmebehandlung von Metallen und einiger anderer elektrisch leitender Materialien begrenzt ist, ein viel mannigfaltigeres Anwendungsgebiet, ist doch die Zahl der Nichtleiter bedeutend grösser als jene der Leiter.

Als eine der ersten Anwendungen hat zweifellos die *HF-Vorwärmung von Pressmasse* Eingang in die Industrie gefunden. Ihre Verbreitung kann daran abgeschätzt werden, dass letztes Jahr allein in Frankreich für diesen Zweck rund 200 HF-Generatoren in Betrieb standen.

Da der Preßstoff ein schlechter Wärmeleiter ist, benötigt man mit der üblichen Methode der Ofenheizung sehr lange Erwärmungszeiten. Ausserdem darf hierbei eine obere Temperatur von etwa  $80^\circ\text{C}$  nicht überschritten werden, wenn man nicht riskieren will, dass die Pressmasse vorzeitig aushärtet. Dieser Prozess, auch Polymerisation genannt, tritt in sehr kurzer Zeit ein, sobald nämlich eine bestimmte Temperatur, die je nach der Zusammensetzung der Masse zwischen etwa  $140$  und  $160^\circ\text{C}$  liegt, erreicht ist. Die HF-Heizung bildet nun ein ideales Mittel zur Überwindung dieser Schwierig-

keiten. Die Erwärmung des Preßstoffes, welcher zunächst in einer Tablettiermaschine zu Presslingen verarbeitet wird, erfolgt im HF-Ofen durch und durch gleichmässig und zudem bedeutend rascher als in einem Muffelofen oder auf der Wärmeplatte. Es ist deshalb möglich, die Pressmasse viel höher vorzuwärmen, indem man mit der Temperatur bis an die Grenze der Polymerisation geht. Die Press-tabletten sind in diesem Zustand äusserst plastisch und bewirken beim nachfolgenden Pressvorgang ein leichtes Fließen auch bei dickwandigen und komplizierten Teilen. Die Praxis hat denn auch einwandfrei eine Qualitätsverbesserung der mit Hochfrequenz vorgewärmten Stücke erkennen lassen. Damit verbunden ist gleichzeitig eine Produktionssteigerung um das 2...3fache, hervorgerufen durch eine wesentliche Verkürzung der Vorwärmezeiten. Endlich ist, bedingt durch die grössere Plastizität der Pressmasse, eine Verminderung des Pressdruckes um 30...50 % möglich, was gleichbedeutend ist mit einer längeren Lebensdauer der kostspieligen Presswerkzeuge. Andererseits kann die gleiche Presse nach Einführung der HF-Vorwärmung für entsprechend grössere Stücke verwendet werden.

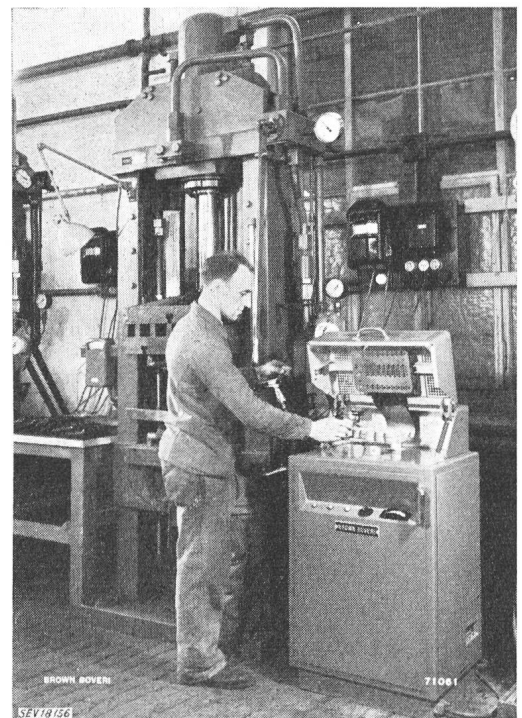


Fig. 16

**Vorwärmen von Preßstoffen mittels Hochfrequenzenergie**  
Die Tabletten werden auf die untere Elektrode gelegt und die Schutzhaube geschlossen, wodurch gleichzeitig die Hochfrequenzenergie eingeschaltet wird. Nach Ablauf der voreingestellten Erwärmungszeit schaltet sich die Hochfrequenzenergie wieder ab und die Haube öffnet sich automatisch.

HF-Generatoren für Preßstoffvorwärmung arbeiten mit Frequenzen von 15...30 MHz und Leistungen zwischen 1...5 kW. Sie sind fast durchwegs mit einem Zeitschalter (Timer) ausgerüstet, der den Generator automatisch abschaltet, wenn die eingestellte Erwärmungszeit abgelaufen ist. Diese Vorwärmezeiten liegen in den meisten Fällen zwischen 20 s

und 2 min, je nach der Menge des auf einmal zu erwärmenden Pressmaterials und der zur Verfügung stehenden Generatorleistung. Mit einem 1-kW-Generator ist es möglich, pro Minute ca. 250 g tablettierte Material auf 150 °C zu erwärmen. Fig. 16 zeigt einen 1-kW-Vorwärmegenerator in Betrieb.

Neben der HF-Vorwärmung von Pressmasse hat das *Schweissen von Thermoplasten* mittels Hochfrequenz wohl die weiteste Verbreitung gefunden. Darunter fallen das Verschweissen von allerlei Verpackungsmaterial aus Plastic (Tabakbeutel, Taschen, Überzüge), das Saumschweissen von Regemänteln und andern Bekleidungsstücken usw. Der Schweissvorgang erfolgt mittels zweier, entsprechend der zu erzeugenden Schweißstelle geformter fester Elektroden, zwischen welche der Kunststoff gepresst und an die hierauf die Hochfrequenzspannung kurzzeitig angelegt wird. Für das Nahtschweissen werden an Stelle der festen Elektroden Rollen verwendet, zwischen welchen der Kunststoff hindurchgeführt wird. Auf diese Weise entstand der «seam welder», ein der Nähmaschine ähnlicher Apparat, bei welchem sowohl der Druck als auch die Vorschubgeschwindigkeit eingestellt werden können (Fig. 17). Bei richtiger Handhabung besitzen



Fig. 17

HF-Nahtschweissmaschine für das Verschweissen von Plastic  
Der Röhrengenerator befindet sich im Schrankteil rechts

die entstehenden Schweißstellen die gleiche Festigkeit, wie sie der ursprüngliche Stoff aufweist. Sowohl die mit festen, auswechselbaren Elektroden ausgerüsteten Apparate als auch die Rollenschweissmaschinen arbeiten wegen der meist sehr dünnen Materialien und der dadurch bedingten Gefahr eines elektrischen Durchschlages mit sehr hohen Frequenzen von 100...200 MHz. Die Leistung der «HF-Nähmaschine» übersteigt selten 200 W, während Generatoren mit festen Elektroden, entsprechend der grössern auf einmal zu verschweisenden Fläche, Leistungen bis zu einigen Kilowatt aufweisen können. Der Schweissvorgang dauert dabei in der Regel nur 1...2 s.

Einen grossen Fortschritt für die Holzverarbeitende Industrie bedeutete die Verwendung der Hochfrequenz bei der *Sperrholzverleimung*. Das Sperrholz besteht aus mehreren, kreuz und quer übereinandergeschichteten Furniertafeln und dazwischen befindlichen Leimschichten. Die übliche

Dampfheizung erfordert wegen der schlechten Wärmeleitung des Holzes, besonders bei der Herstellung dickwandiger Bretter, sehr lange Verleimungszeiten. Auch hier überwindet die HF-Heizung diesen Nachteil, indem die Wärme direkt im Holz erzeugt wird, was die gewünschte gleichmässige Erwärmung aller Schichten zur Folge hat. Zur HF-Verleimung von Sperrholz sind spezielle Pressen entwickelt worden, die diesem Verfahren sinngemäss angepasst sind. Das Verfahren gestattet, die Verleimungszeit von einigen Stunden auf wenige Minuten herabzusetzen.

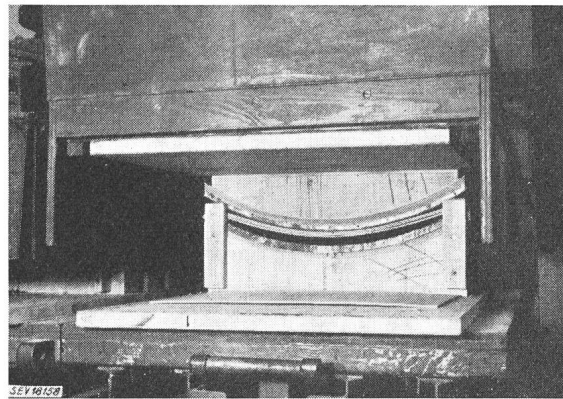


Fig. 18

Fabrikation von Stuhllehnen mittels Hochfrequenzenergie  
Die Elektroden bestehen aus entsprechend geformten Holzschablonen, die mit dünnen Metallfolien belegt sind

Neben der Fabrikation von Sperrholzplatten gewinnt die Herstellung von gebogenen Teilen durch Verleimen mehrerer aufeinandergeschichteter Furniere in entsprechenden Pressvorrichtungen mehr und mehr an Bedeutung. Auf diese Weise werden z. B. Sitz und Lehne von Stühlen oder Radiogehäuse hergestellt, wie aus den Fig. 18 und 19 hervorgeht. Die Elektroden sind dabei einfache dünne Metallfolien, die in die Vorrichtungen eingelegt werden.

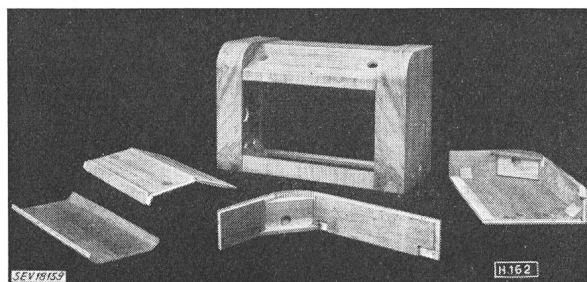


Fig. 19

Mit Hochfrequenzenergie verleimte Bestandteile eines Radiogehäuses

Für die HF-Verleimung ganzer Bretter eignen sich speziell leistungsfähige Generatoren von 10 bis 100 kW und mehr, während man bei dem «*edge bonding*», wie das Verleimen kleinerer gebogener Teile auch genannt wird, mit Leistungen von 2...5 kW auskommt. Je nach Grösse der Elektroden kommen Frequenzen von etwa 3...10 MHz zur Anwendung.

Im Gegensatz zur Verleimung spielt die *Holz-trocknung* mit Hochfrequenz vorläufig eine untergeordnete Rolle. Wohl mag es für bestimmte Zwecke angezeigt sein, dieses Verfahren auch für die Trocknung des Holzes anzuwenden, in weitaus den meisten Fällen, besonders bei grossem Feuchtigkeitsgehalt, kann jedoch der gleiche Effekt auf einfachere und bedeutend billigere Art erreicht werden.

Die *Vulkanisation von Gummi*, hauptsächlich bei der Herstellung von Autopneus, ist ein wichtiges Anwendungsgebiet der kapazitiven HF-Heizung, welches während der letzten Jahre zu grosser wirtschaftlicher Bedeutung gelangt ist. Wie im Falle der Kunststoffherstellung bringt das HF-Verfahren sowohl eine Qualitätsverbesserung als auch gleichzeitig eine beträchtliche Produktionssteigerung mit sich.

Das *HF-Trocknen von Textilien* bildet ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet. Die im Schleuderverfahren vorgetrockneten Garnspulen passieren auf einem laufenden Band die Elektroden eines HF-Generators. Die noch verbliebene Feuchtigkeit wird dadurch ausgetrieben und mit Hilfe von Warmluft abgeleitet. Die Trocknungszeiten können durch dieses Verfahren bedeutend abgekürzt werden.

In ganz ähnlichen Verfahren werden heute eine ganze Reihe weiterer Stoffe getrocknet, wie Tabak, Papier, Getreide, Pflanzenfasern, Kork, Linoleum u. a. m.

Als zukunftsreiches Verfahren hat sich das *HF-Trocknen von Formsand-Kernen* in Giessereien bereits seit einiger Zeit in der Praxis bewährt. Die fertig geformten Kerne werden auf ein Band gelegt, das sie langsam an den Elektroden des HF-Ofens vorbeiführt. Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, gleichzeitig ganz verschieden gestaltete und verschieden grosse Stücke auf dem Band gleichmässig zu trocknen. Der grosse Vorteil des Verfahrens ist daraus ersichtlich, dass die Trocknungszeit von mehreren Stunden auf 10...20 min herabgesetzt werden kann.

Auf dem Gebiet der *Glasverarbeitung* ist man in Frankreich schon vor längerer Zeit zur Einführung der HF-Heizung geschritten; die neue Methode wird dort in einigen Industrien in grossem Massstab angewendet. Das zu schmelzende Rohmaterial (Gaspulver) wird in einen hitzebeständigen Tiegel gebracht, welcher sich seinerseits zwecks Wärmeisolation in einem zylindrischen Quarzrohr befindet, das mit einem Deckel aus dem gleichen Material abgeschlossen ist. Zwei entsprechend geformte, rotierende Metallplatten dienen als Elektroden, an welche die im HF-Generator erzeugte hohe Spannung, deren Frequenz 10...20 MHz beträgt, angelegt ist. Die relative Bewegung zwischen Charge und Elektroden ist notwendig, um örtliche Überhitzungen, die bei unhomogenem Material sonst leicht auftreten könnten, zu vermeiden. Als Vorteil des HF-Glasschmelzens sind zu nennen: der Wegfall der direkten Berührung von Elektroden mit dem flüssigen Glas, eine gleichmässige Wärmeverteilung inner-

halb des letztern und direktes Schmelzen von kaltem Einsatz ohne Zuhilfenahme eines Sumpfes bereits geschmolzenen Glases. Dazu kommt noch der Vorteil, dass sich der Schmelzprozess in einer leicht zu kontrollierenden Atmosphäre abspielt, da der Tiegel nach aussen luftdicht abgeschlossen ist. Das Einhalten der richtigen Temperatur ist durch einfache Regulierung der Generatorausgangsleistung ebenfalls leicht durchzuführen.

Neben dem eigentlichen Schmelzprozess findet die Hochfrequenzheizung Verwendung beim Abschmelzen von rotationssymmetrischen Stücken aus Glas, wie Stangen, Röhren, Behältern usw. Diese werden an der Trennstelle zuerst mittels Widerstandsheizung auf ca. 500 °C vorgewärmt, wonach diese Zone für den nachfolgenden Abtrennprozess zwischen zwei entsprechend ausgebildete Elektroden gelangt. Während man den Glaskörper rotieren lässt, wird gleichzeitig die HF-Spannung eingeschaltet, wonach innert weniger Sekunden das Abschmelzen erfolgt. Um mit einer möglichst grossen Energiekonzentration und unter Vermeidung von Überschlügen arbeiten zu können, muss bei diesem Prozess eine möglichst hohe Frequenz angewendet werden, die in der Praxis in der Grössenordnung von 100 MHz liegt. Einen solchen Apparat zeigt Fig. 20.

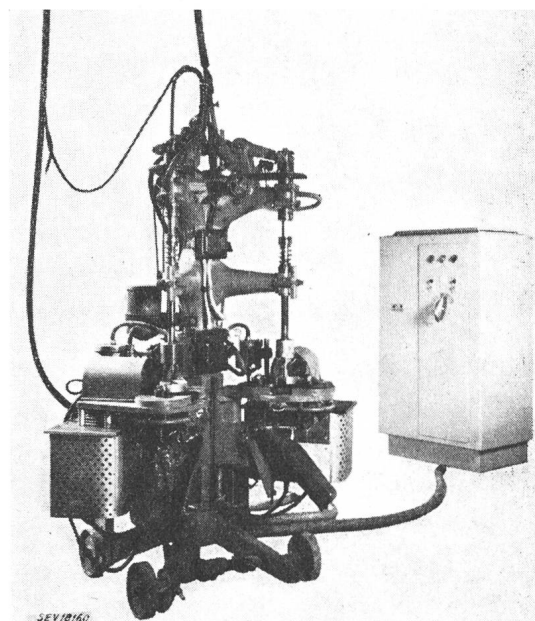


Fig. 20

Maschine zum Abtrennen von rotationssymmetrischen Gläsern (sog. Gobelets) mittels Hochfrequenzenergie  
Stündliche Produktion 400...500 Stück. Rechts der Generator

Ausser festen Stoffen können auch Flüssigkeiten durch Hochfrequenz erhitzt werden. Von dieser Möglichkeit wird bei der *Destillation* bestimmter Lösungen für pharmazeutische Zwecke Gebrauch gemacht. Ausser dem Vorteil einer raschen und gleichmässigen Erwärmung erlaubt dieses Verfahren, dass der Prozess ohne Schwierigkeit auch im Vakuum oder in einer beliebigen Atmosphäre durchgeführt werden kann.



Die HF-Heizung hat auch für die *Penicillin*-Herstellung eine grosse Bedeutung erlangt. Das bisherige Verfahren wurde dadurch stark vereinfacht und die Produktion konnte deshalb ganz wesentlich gesteigert werden. So können z. B. mit einem 2-kW-Generator stündlich rund 2000 Fläschchen Penicillin getrocknet werden. Das von der Radio Corporation of America (RCA) zusammen mit der einschlägigen Industrie entwickelte Verfahren [3] arbeitet weitgehend automatisch, und heute wird der Grossteil des Penicillins danach hergestellt.

Mehr und mehr wird in Zukunft die HF-Heizung in der Küche eine Rolle spielen [4]. Schon jetzt sind Apparate im Gebrauch, die zum Auftauen von Gefrierkonserven dienen. Daneben arbeitet man in den USA schon lange daran, Speisen und Nahrungsmittel mit Hochfrequenz zu kochen, und es sind auch schon entsprechende Geräte gebaut worden. Diese Generatoren arbeiten mit sehr hohen Frequenzen, sog. Mikrowellen, wie sie von der Radartechnik her bekannt sind. Derartige Apparate stellen ausser einem erheblichen technischen Aufwand auch beträchtliche Anforderungen an die Fabrikation, besitzen doch solche Mikrowellengeneratoren verschiedene Einzelteile, die äusserst präzise hergestellt werden müssen. Wenn es auch möglich ist, mit derartigen Geräten Speisen in unwahrscheinlich kurzer Zeit gar zu kochen, so ist das Verfahren aus den dargelegten Gründen in den weitaus meisten Fällen vorläufig noch unwirtschaftlich. Obwohl es für bestimmte Zwecke (z. B. Grossrestaurants, Flugzeuge usw.) am Platze sein mag, wird es für die Allgemeinheit noch für längere Zeit als Luxus gelten müssen, den sich zurzeit nur wenige leisten können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die HF-Heizung hat in relativ kurzer Zeit Eingang in die verschiedenartigsten Zweige der Industrie gefunden. Die offensichtlichsten Vorteile, die sie z. B. auf dem Gebiete der Oberflächenhärtung und der Preßstoff-Vorwärmung besitzt, sind unbestritten. Aber auch für die übrige Wärmebehandlung von Eisen- und Nichtisenmetallen sowie zur Erwärmung von Nichtleitern ist ihre Bedeutung in stetem Zunehmen begriffen. Trotz dieser raschen Entwicklung bleibt für die Zukunft noch viel zu tun, sowohl auf dem Gebiete der Grundlagenforschung wie auch der Vervollkommenung und Weiterentwicklung der Geräte im Hinblick auf die Erschliessung neuer Anwendungsgebiete. So fehlt heute noch immer eine metallurgisch einwandfreie Erklärung, weshalb bei der Induktionshärtung im Gegensatz zu andern Härteverfahren für sehr viele Stähle höhere Härten erzielt werden.

Für die Zukunft interessante Aspekte eröffnen die Neuentwicklungen, die kürzlich in Frankreich erprobt wurden [5]. Hier sei in erster Linie auf einen neuartigen Röhrengenerator hingewiesen, der, bei einer Dauerausgangsleistung von 12 kW, im intermittierenden Betrieb ein Mehrfaches dieser Leistung abgeben kann, wobei während 20 s eine Spitzenleistung von 120 kW erreicht wird. Ein an-

derer Generator, mit 50 kW Nennleistung, konnte im Versuchsbetrieb während 30 s 500 kW abgeben. Diesen Generator zeigen die Fig. 21 und 22. Die grossen Vorteile, die der Einsatz solcher Generatoren aufweist, speziell für den Fall der Oberflächenhärtung, wo die HF-Leistung nur während sehr kurzer Zeit zur Verfügung stehen muss, sind augenfällig.

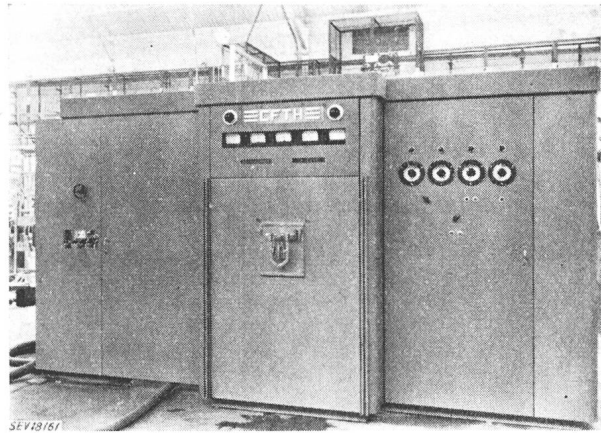


Fig. 21  
HF-Röhrengenerator

mit einer Dauerleistung von 50 kW und einer Spitzenleistung von rund 500 kW während 25...30 s. Der Anschluss erfolgt primärseitig direkt an das Hochspannungsverteilnetz

Des weitern ist man in Frankreich in letzter Zeit dazu übergegangen, Röhrengeneratoren grosser Leistung direkt an das Verteilnetz von 5000, 10 000 oder 15 000 V anzuschliessen. Damit werden die Anoden der Röhren direkt mit hochgespanntem Wechselstrom gespeisen, was eine wesentliche Vereinfachung und Verringerung solcher Anlagen bedeutet.

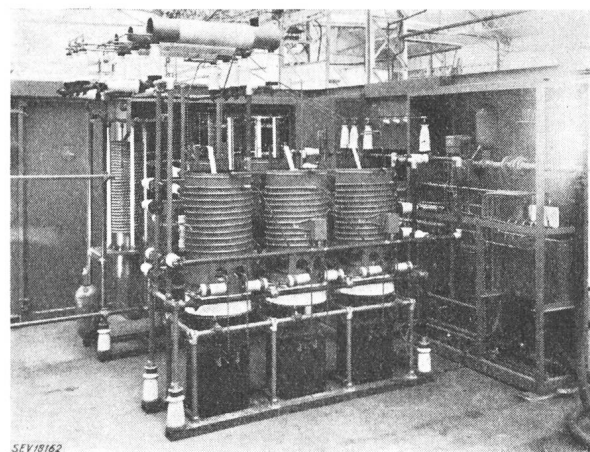


Fig. 22  
Innenansicht des 50-kW-Generators der Fig. 21

Endlich sei auf die Tendenz hingewiesen, die dahin zielt, nicht nur zur drahtlosen Uebermittlung, sondern auch zum Zwecke der Erwärmung mehr und mehr in das Gebiet höchster Frequenzen vorzustossen. Diesbezügliche Versuche haben die Überlegenheit der *Mikrowellen* gegenüber langwelliger

Energie, wie bereits erwähnt, für Kochzwecke bewiesen [4]. Daneben werden sie jedoch auch mit Vorteil in der *Medizin* angewendet, wenn es sich darum handelt, in einer ganz bestimmten Tiefe lokale Erwärmungen hervorzurufen [6].

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass das Gebiet der Hochfrequenzheizung äusserst vielseitig ist. Dies geht schon daraus hervor, dass in den USA die totale installierte Leistung der HF-Röhrengeneratoren bereits wesentlich grösser ist als z. B. diejenige der Rundfunksender.

#### Literatur

- [1] Redmond, J. A.: How to Heat-Treat Spur Gears by Induction Heating. Amer. Machinist Bd. 93(1949), 28. Juli, S. 83...94.
- [2] Hunsinger, W. und H. W. Grönegress: Trägheitslose Temperaturmessung an schnellbewegten Gegenständen, insbesondere beim Brennhärten. Z. VDI Bd. 92(1950), Nr. 12, S. 285...290.
- [3] Brown, G. H., R. A. Bierwirth und C. N. Hoyler: Radio-Frequency Deshydration of Penicillin Solution. Proc. Instn. Radio Engr., Waves and Electrons Bd. 19(1946), Febr., S. 58...65.
- [4] Lang, G.: Die Hochfrequenzheizung in der Küche. Bull. SEV Bd. 42(1951), Nr. 2, S. 67, 70.
- [5] Descorsin, M.: Evolution récente de certains problèmes d'électrothermie dans l'industrie française. Electr.-Verwert. Bd. 25(1950/51), Nr. 1/2, S. 55...61.
- [6] Reusse, W.: Die elektromedizinische Bedeutung der Dezimeter- und Zentimeterwellen. Elektrotechnik, Berlin Bd. 3 (1949), Nr. 1, S. 3...10.

#### Weitere Literatur

##### Bücher

- Curtis, Frank W.: High Frequency Induction Heating. 2nd rev. ed., 389 S. New York: McGraw-Hill 1950.
- Hartshorn, Leslie: Radio-Frequency Heating. 237 S. London: Allen & Unwin 1949.
- Kloeffler, Royce Gerald: Industrial Electronics and Control, S. 297...327. New York: Wiley. London: Chapman & Hall 1949.
- Knowlton, A. E.: Standard Handbook for Electrical Engineers. New York: McGraw-Hill 1949.
- May, E.: Industrial High Frequency Electric Power. London: Chapman & Hall 1949.
- Stansel, Nummen R.: Induction Heating. 212 S. New York: McGraw-Hill 1949.
- Bézy, G. H.: Chauffage HF. Paris: Dunod 1948.
- Langton, L. L.: Radio Frequency Heating Equipment. 196 S. London: Pitman 1948.
- Markus, John und Vin Zeluff: Handbook of Industrial Electronic Circuits. New York: McGraw-Hill 1948.
- Paschakis, V.: Industrial Electric Furnaces and Appliances. Bd. 2. 320 S. New York: Interscience Publishers 1948.
- Industrial Electronics Reference Book. Ed. by Electronics Engineers of Westinghouse. New York: Wiley 1948.
- Bendz, Waldemar I. und C. A. Scarlott: Electronics for Industry. New York: Wiley 1947.
- Brown, George H., Cyril N. Hoyler und Rudolph A. Bierwirth: Theory and Application of Radio-Frequency Heating. New York: van Nostrand 1947.
- «Heat-Treater»: Fundamental Principles and Applications of Induction Heating. London: Chapman & Hall 1947.
- Transactions of the Second International Congress on Electroheat and Electrochemistry. Den Haag, 3./4. Sept. 1947. Arnheim: Van der Wiel 1947.
- Induction Heating, by H. B. Osborn, P. H. Brace, W. G. Johnson u. a. Cleveland (Ohio): Amer. Soc. for Metals 1946.
- Markus, John und Vin Zeluff: Electronics for Engineers. New York, London: McGraw-Hill 1945, S. 110 ff.
- Batcher, Ralf R. und William Moulic: The Electronic Engineering Handbook, S. 335...382. New York: Electronic Development Associates 1944.
- Jouguet, Marc: Courants de Foucault et Fours à Induction. 163 S. Paris: Librairie du Bureau des Longitudes de l'Ecole Polytechnique 1944.
- Minssieux, J.: Les Fours Electriques à Induction. Ed. par la soc. pour le développement des applications de l'électricité. Presse Universitaire de France 1943.
- Burch, C. R. und N. R. Davies: An Introduction to the Theory of Eddy Current Heating. London: Benn 1928.

##### Zeitschriften

- Baker, R. M.: Transverse Flux Induction Heating. Electr. Engng. Bd. 69(1950), Nr. 10, S. 922...924.
- Barfield, R. H.: Industrial High-Frequency Heating. J. Instn. Prod. Engr., Bd. 29(1950), Nr. 4, S. 165...185.
- Beurheret, C. H.: Générateurs HF à grande puissance pour industrielles. Rev. techn. Thomson-Houston Bd. —(1950), Nr. 13, S. 5...13.
- Bunst, Walter: Die induktive Wärmebehandlung in der Feinwerktechnik. Feinwerktechnik Bd. 54(1950), Nr. 4.
- Diopère, M.: High Frequency Generators: Application in the Wood Industry. Rev. Belge Electronique Bd. 1(1950), Febr., S. 22...28.

- Felber, N.: Möglichkeiten der dielektrischen Hochfrequenzheizung. Electr.-Verwert. Bd. 25(1950/51), Nr. 1/2, S. 82...85.
- Girardeau, Jean: De la conception des générateurs HF à usage industriel et du développement de leur utilisation en France. Ann. Radioélectr. Bd. 5(1950), Nr. 21, S. 259...275.
- Krüger, Manfred: Zur Auskopplung von Röhrengeneratoren für industrielle Erwärmungszwecke. Arch. Elektrotechn. Bd. 39(1950), Nr. 9, S. 619...632.
- Leemann, A.: Hochfrequenzheizung bei der Fabrikation kleiner Präzisionsmaschinen und Apparate. Microtechnic Bd. 4 (1950), Nr. 1, S. 14...16.
- Libsch, F. und A. E. Powers: Rapid Tempering by Induction Heating. Met. Progr. Bd. 58(1950), Aug., S. 176...180.
- Martini, H. J.: Dielektrische Trocknung feuchter keramischer Massen. Elektrotechnik, Berlin Bd. 4(1950), Nr. 9, S. 314...320.
- Müller, Harald: Einige Bemerkungen zur Erwärmung von Werkstoffen im hochfrequenten Kondensatorfeld. Elektrotechn. Z. Bd. 71(1950), Nr. 22, S. 605...609.
- Neuweiler, N. G.: Grundlagen und Anwendungen der Hochfrequenzheizung. Schweiz. techn. Z. Bd. 47(1950), Nr. 12/13, S. 165...170; 181...188.
- Reinartz, J. L.: Industrial Brazing by Pulse Techniques. Electronics Bd. 23(1950), Nr. 1, S. 78...80.
- Roth, A.: Pertes par courants de Foucault dans l'appareillage électrique. Rev. gén. Electr. Bd. 59(1950), Nr. 6, S. 268...278.
- Seulen, G. W.: Das Induktions-Lötverfahren. Z. VDI Bd. 92 (1950), Nr. 14, S. 337...340.
- Trébuechon, G. und J. Kieffer: L'aspect physique de la soudabilité verre-métal dans l'industrie des tubes électroniques. Ann. Radioélectr. Bd. 5(1950), Nr. 20, S. 125...149; Nr. 21, S. 243...258; Nr. 22, S. 407...418.
- Van Lancker und M. Marc: Essai d'une théorie générale sur les fours à moyenne fréquence et leurs méthodes de calcul. Bull. Soc. Franç. Electr., 6<sup>e</sup> série, Bd. 10(1950), Nr. 108, S. 439...455.
- Wintergerst, S.: Temperaturverteilung und Leistungsbedarf bei der Schweißung von Kunststoff-Folien mit Hochfrequenz. Elektrotechn. Z. Bd. 71(1950), Nr. 4, S. 79...81.
- Wittenberg, H. H.: Phototube Controls R. F. Welding. Electronics Bd. 23(1950), Nr. 1, S. 91...93.
- Zehnel, G. P.: Auftauen gefrorenen Bodens mit Hochfrequenz. Funk und Ton Bd. 4(1950), S. 311.
- Red.: HF Heating Speeds Steel Forging. Electr. Times Bd. 117(1950), Nr. 3044, S. 355...362.
- Baffrey, A. R.: Le point de vue économique et social de l'emploi du chauffage par induction dans les forges et boulonneries. Bull. sci. Ass. Ing. Montefiore Bd. 62(1949), Nr. 2, S. 99...112.
- Bird, F. und J. Pounds: Core Drying. Metal Ind., Lond. Bd. 74(1949), Nr. 5, S. 83...85.
- Broekhuizen, S. und A. Schuilenburg: Hochfrequentes Backen von Brot. Electro-Techniek Bd. 27(1949), Nr. 25, S. 482.
- Curtis, F. W.: Hows and Whys of Induction Soldering. Amer. Machinist Bd. 93(1949), Nr. 12, S. 77...81.
- Curtis, F. W.: Induction Does Some Odd Jobs. Amer. Machinist Bd. 93(1949), 6. Aug., S. 529...531.
- Douma, T.: A New Method for Converting d—c—Energy into High-Frequency a—c—Energy with a High Efficiency, Specially Intended for High-Frequency Induction Heating. Commun. News Bd. 10(1949), Nr. 2, S. 52...68; Nr. 3, S. 69...82.
- Douma, T. und H. P. J. Brekoo: Die Heizung der Ventilkathoden in einem Kaskadengenerator mittels Hochfrequenzstrom. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11(1949), Nr. 4, S. 123...129.
- Evans, J. A.: Production Economies realized by Proper Use of Induction Heating. Mater. a. Methods Bd. 30(1949), Nov., S. 57...60.
- Gengenbach, O.: Grundlagen und Anwendungen der induktiven Erwärmung. Werkst. u. Betr. Bd. 82(1949), Nr. 12, S. 430...434.
- Griffith, Jr. H.: Electronics in the Foundry. Allis Chalmers elect. Rev. Bd. —(1949), Fourth Quarter, S. 13...17.
- Guzzetti, A. J.: Variables in R. F. Preheating. Brit. Plast. Bd. 21(1949), Nr. 240, S. 273...279.
- Heath, J. C.: Welding of Plastics. Machinist, London Bd. 93 (1949), 25. Juni, S. 303...308; 2. Juli, S. 335...337.
- Hillmann, V. E.: Core Baking. Iron Age Bd. 163(1949), Nr. 5, S. 116...121.
- Howard, J. C.: Some Applications of the High-Frequency Induction Heating Process. Metallurgia Bd. 40(1949), Nr. 235, S. 37...43.
- Johnson, P. D.: Induction Furnace for High Temperature Ceramic Research. J. Amer. Ceram. Soc. Bd. 32(1949), Nr. 10, S. 316...319.
- Kaiser, E.: Die Erwärmung des Holzes durch Hochfrequenzenergie. Elektro-Post Bd. 2(1949), Nr. 36, S. 25...26.
- Kegel, K.: Aus der Praxis der Induktionshärtung. Radio Mentor Bd. 15(1949), Nr. 6/7, S. 260...261; 279; 315...321.
- Kegel, K.: Hochfrequenz-erwärmung. Z. VDI Bd. 91(1949), Nr. 2, S. 25...32.
- Keitley, R.: Some Possibilities of Heating by Centimetric Power. J. Brit. IRE Bd. 9(1949), März, S. 97...121.
- Lawson, D. I.: Longitudinal or Transverse Heating? Electron. Engng. Bd. 21(1949), Aug., S. 646...647.
- Leemann, A.: Die Erwärmung von Metallen mittels Hochfrequenz. Z. Schweisstechn. Bd. 39(1949), Nr. 2, S. 31...37.
- Lower, J. W.: Industrial Oscillator Frequency Control. Electronics Bd. 22(1949), Nr. 12, S. 84...86.
- Mathy, M.: Possibilités d'utilisation du chauffage par haute fréquence à l'estampage. Bull. sci. Ass. Ing. Montefiore Bd. 62 (1949), Nr. 2, S. 83...89.
- Mautz, W. L.: Induction Heat for Forging. Iron Age Bd. 164 (1949), Nr. 20, S. 81...85.



- Meyer, E.: Dielektrische Heizung. Elektro-Post Bd. 2(1949), Nr. 36, S. 19...21.
- Nentwig, K.: Hochfrequenzwärme in der Industrie. Elektrotechnik Bd. 1(1949), Nr. 2, S. 37...43.
- Pfefferl, A. W.: Generatoren für die dielektrische Erhitzung mittels Hochfrequenz. Kunststoffe Bd. 39(1949), Nr. 4, S. 86...89.
- Pietermaat, F. P.: On Circuits with Electromagnetic Coupling and their Application in H. F. Induction-Heating Equipment. HF Electricité Bd. — (1949), Nr. 2, S. 35...44.
- Pound, J.: Dielectric Heating: Applications in the Foundry. Metal Ind., Lond. Bd. 75(1949), 21. Okt., S. 351...353, 379...381; 4. Nov., S. 399...400.
- Seguin, L.: Les propriétés biologiques des micro-ondes. Ann. Radioélectr. Bd. 4(1949), Nr. 18, S. 331...343.
- Shaw, T. M. und J. A. Galvin: High-Frequency-Heating Characteristics of Vegetable Tissues. Determined from Electrical-Conductivity. Proc. Inst. Radio Engrs. Bd. 37(1949), 1. Januar, S. 83...86.
- Temin, J. T.: Designing for High-Frequency Induction Heating. Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Bd. — (1949), Febr., S. 135...146.
- Ulrich, M. und H. Glaubitz: Stand der Induktionshärtung von Zahnrädern. Festigkeits- und Verschleissverhalten. Z. VDI Bd. 91(1949), Nr. 22, S. 577...583.
- Walter, F.: Die physikalischen Grundlagen der dielektrischen Erhitzung elektrisch nicht leitender Stoffe. Frequenz Bd. 3(1949), Nr. 10, S. 299...306.
- Whiteman, R. A.: Coupling Circuits for H. F. Heating. Radio and Telev. News, Radio-Electronic Eng. Supplement Bd. 13(1949), Okt., S. 8...11, 27.
- Wick, Charles H.: Automatic Induction Hardening Speeds Dodge Output. Machinery, N. Y. Bd. 56(1949), Nov., S. 194...198.
- Witsenburg, E. C.: Erhitzung durch hochfrequente Felder. I. Induktionsheizung. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11(1949), Nr. 6, S. 165...175.
- Stel, M. und E. Witsenburg: Erhitzung durch hochfrequente Felder. II. Kapazitive Heizung. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11(1950), Nr. 8, S. 236...244.
- Red.: High-Frequency Induction Heating. The New Forge at John Garington & Sons Ltd. Metallurgia Bd. 40(1949), Okt., S. 322...334.
- Red.: Multi-Purpose Induction Hardening Units. Machinery, Lond. Bd. 75(1949), 22. Sept., S. 413...415.
- Red.: Some Recent Heat Treatment Furnace Installations. Metallurgia Bd. 40(1949), Nr. 235, S. 44...53.
- Baumgartner, H.: Industrielle Anwendung der Hochfrequenz in verschiedenen Fabrikationsprozessen. Brown Boveri Mitt. Bd. 35(1948), Nr. 3/4, S. 95...98.
- Bunte, H.: Brazing and other Applications of High-Frequency Heating. Weld. J. Bd. 27(1948), Nr. 6, S. 441...444.
- Curtis, F. W.: Designing for Silver Brazing by Induction Heating. Machinist Bd. 92(1948), Nr. 21, S. 683...686.
- Curtis, F. W.: Multiple-Position Coil Speeds Induction Heating. Amer. Machinist Bd. 92(1948), 7. Febr., S. 1390...1393.
- Danzin, A. und P. Meunier: Appareil pour l'étude des échauffements et la mesure des puissances dissipées dans le corps vitreux soumis à des champs électriques de haute fréquence. Ann. Radioélectr. Bd. 3(1948), Nr. 11, S. 40...48.
- Debruyne, H. P.: Le chauffage à haute fréquence. Bull. Soc. belge Electr. Bd. 64(1948), Nr. 1, S. 1...18.
- Descarsin, M.: La trempe superficielle à haute fréquence des métaux et les applications récentes du chauffage par hystérésis diélectrique. Electricité Bd. 32(1948), Nr. 144, S. 177...183.
- Duryee, L. M.: Some Economic Aspects of Radio-Frequency Heating. Trans. AIEE Bd. 67(1948), Part I, S. 105...112.
- Ettenreich, R.: Hochfrequenzheizung im Dienste der Industrie. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 65(1948), Nr. 6, S. 86...92.
- Fränzl, K.: Dielektrische Erwärmung. Elektrotechnik, Berlin Bd. 2(1948), Nr. 10, S. 281...284.
- Gams, T. C.: Dielectric Heating of Thin Films. Electronics Bd. 21(1948), Nr. 9, S. 83...85.
- Griffith, B. H. und R. Skiba: How to Design Coils for Induction Heating. Amer. Machinist Bd. 92(1948), Nd. 17, S. 99...110.
- Gröninger, K.: Möglichkeiten der Hochfrequenzerhitzung. Pro-Metal Bd. 1(1948), Nr. 6, S. 271...279.
- Guyer, E. M.: Electric Welding of Glass. Electr. Engng. Bd. 67(1948), Mai, S. 446...447.
- Hartshorn, L.: Radio-Frequency Heating. Not. Proc. Roy. Inst. Bd. 33(1948), Nr. 153, S. 541...553.
- Hillmann, V. E.: Pictures Facilitate Induction and Flame Hardening. Iron Age Bd. 161(1948), Nr. 26, S. 90...94.
- Kegel, K.: Die Oberflächenbehandlung von Stahl mittels induktiver Hochfrequenzerwärmung. Elektrotechnik, Berlin Bd. 2(1948), Nr. 10, S. 285...291.
- Kinn, T. P.: The Practical Economics of Radio Frequency Heating. Iron Age Bd. 161(1948), Nr. 24, S. 72...79.
- Macaluso, F. L.: Radio Frequency Heating in the Wood-working Industry. Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Bd. 70(1948), Nr. 4, S. 385...391.
- Rector, B. E.: Suggested Applications of Dielectric Heating. Amer. Machinist Bd. 91(1948), Nr. 44, S. 1465...1468.
- Renouard, M.: Le chauffage par induction à haute fréquence. Application à la théorie des fours de fusion. Rev. gén. Electr. Bd. 57(1948), Nr. 8, S. 322...337.
- Stansel, N. R.: Induction Heating Applications. Gen. Electr. Rev. Bd. 51(1948), Nr. 2, S. 44...50.
- Stansel, N. R.: Melting Metals by Induction Heating. Gen. Electr. Rev. Bd. 51(1948), Nr. 3, S. 35...42.
- Thourel, L.: Electronic Heating of Dielectrics. Télév. Franç., Supplément Electronique, März 1948, S. 4...9.
- Veillon, E. A.: Über die Anwendung der Hochfrequenz-Vorwärmung beim Verarbeiten von Pressmassen. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 14(1948), Nr. 1, S. 19...22.
- Viat, F.: Le chauffage industriel par pertes diélectriques. Bull. sci. Ass. Ing. Montefiore Bd. 61(1948), Nr. 3, S. 117...128.
- Widmer, G.: Über das Schweißen von Kunststoffen. Z. Schweisstechn. Bd. 38(1948), Nr. 3, S. 43...53.
- Winemiller, H. R. und H. Bunte: Experience with High-Frequency Heating. Electr. Engng. Bd. 67(1948), Oktober, S. 981...984.
- Red.: Microwaves in Heating Foods. Electronic Ind. Bd. — (1948), S. 6...9.
- Red.: Radar Cooking Demonstrated at Philadelphia Section Meeting. Electr. Engng. Bd. 67(1948), Febr., S. 193...194.
- Red.: Radio Frequency Heating. Iron Age Bd. 161(1948), 10. Juni, S. 37...39.
- Angst, W.: Oerlikon-Mittelfrequenz-Hartlötlanlage. Bull. Oerlikon Bd. — (1947), Nr. 265, S. 1767...1768.
- Baker, R. M. und C. J. Madsen: High-Frequency Heating of Conductors and Nonconductors. Electr. Engng. Bd. 66(1947), Febr., S. 50...56.
- Ballard, R. J. und J. L. Boyer: Ignitron Converters for Induction Heating. Electr. Wld. Bd. 127(1947), Nr. 11, S. 114...115.
- Baumgartner, H.: Industrielle Anwendung der Hochfrequenz in verschiedenen Fabrikationsprozessen. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 221...232.
- Brunner, G. und A. Tschalär: Der dynamische Wirbelstromerhitzer, ein neues Mittel für das induktive Aufheizen von Metallen zur Warmverformung. Brown Boveri Mitt. Bd. 34(1947), Nr. 4/5, S. 81...85.
- Capper, J. F.: High-Frequency Heating. Electr. Times Bd. 111(1947), April, S. 417...421.
- Cooper, G. R.: An Electronic Development of Growing Importance: Dielectric Heating and its Many Practical Applications. Overseas Eng. Bd. 20(1947), Juli, S. 370...372.
- Descarsin, M.: Contribution française aux applications industrielles de haute fréquence. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 234...245; 258.
- Descarsin, M.: Les Applications Industrielles de la Haute Fréquence. Onde élect. Bd. 27(1947), Nr. 241, S. 121...137.
- Dunlap, M. E. und E. R. Bell: Temperature Distribution in White-Oak. Laminated Timbers heated in a High-Frequency Electric Field. Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Bd. 69(1947), Nr. 5.
- Durand, S. R.: Electronic Frequency Converters for Induction Melting. Iron Age Bd. 160(1947), Nr. 13, S. 64...67, 134.
- Egidi, C.: Surface Hardening of Metals Using H. F. Currents. Reprint. Ingegneria Bd. 21(1947), Sept., S. 627...630.
- Egri, G. H.: Verzinnen von Weissblechen mit HF-Heizung und einige Gedanken zur HF-Energieerzeugung. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 250...251.
- Freeman, J. und H. P. Zade: Special Problems of High-Frequency Welding of Very Thin Plastic Sheets. Plastics Bd. 11(1947), Nr. 124, S. 472...478, 505.
- Gémin, G.: Chauffage par Induction dans la Construction mécanique. Mach. et Mét. Bd. 31(1947), Nr. 342, S. 46...52; Nr. 347, S. 219...222; Nr. 349, S. 320...323.
- Gourod, G.: Brasage par Induction. Mach. mod. Bd. 41(1947), Nr. 457, S. 8...16.
- Gourod, G.: Chauffage par pertes diélectriques. Techn. mod. Bd. 39(1947), Nr. 3/4, S. 45...49; Nr. 7/8, S. 113...119.
- Gregoretti, Giulio: Riscaldamento per perdite dielettriche in un campo ad alta frequenza. Elettrotecnica Bd. 34(1947), Nr. 3, S. 80...85.
- Griffith, B. H. und R. Skiba: Design of Work Coils. Part I of two Parts. Allis Chalmers elect. Rev., Fourth Quarter 1947.
- Gullick, O. F.: Induction Heating by High-Frequency Methods. Machinist Bd. 91(1947), Nr. 24, S. 831...837; Nr. 25, S. 867...872.
- Hofer, H. M.: Einige Beispiele der praktischen Anwendung von Hochfrequenzheizung in verschiedenen Gebieten industrieller Produktion. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 246...250.
- Jolly, F. J.: The High-Frequency Heating of Nonconducting Materials. Trans. Amer. Soc. mech. Engrs. Bd. 69(1947), Febr., S. 155...162.
- Jouguet, M.: Chauffage électrique à haute fréquence. Résultats essentiels de théories récentes et directives pour le calcul des éléments d'un four. Mém. Soc. Ing. civ. Bd. 100(1947), Nr. 5/6, S. 283...307.
- Jouguet, M.: Théorie du chauffage des corps ferromagnétiques par courants de Foucault et par hystérésis. Onde élect. Bd. 27(1947), Nr. 241, S. 138...151.
- Lauderdale, R. H.: Basic Requirements of Materials for Induction Hardening. Machinist Bd. 91(1947), Nr. 35, S. 181...183.
- Mc. Elgin, J.: Baking Cores Dielectrically. Metallurgia Bd. 35(1947), Febr., S. 223...224.
- Marcum, J. und T. P. Kinn: Heating with Microwaves. Electronics Bd. 20(1947), Nr. 3, S. 82...85.
- May, E.: High-Frequency Induction Heating. Machinery, Lond. Bd. 70(1947), 9. Jan., S. 45...49; S. 109...110.
- Morse, P. W. und H. E. Revercomb: UHF Heating of Frozen Foods. Electronics Bd. 20(1947), Nr. 10, S. 85...89.
- Nelson, R. B.: A Magnetron Oscillator for Dielectric Heating. J. appl. Phys. Bd. 18(1947), Nr. 4, S. 356...361.
- Peronne, G.: Le durcissement superficielle de l'acier au moyen du chauffage par induction à haute fréquence. Rev. gén. Electr. Bd. 56(1947), Nr. 10, S. 412...420.
- Ribaud, M. G.: Le chauffage de substances peu conductrices par courants induits de haute fréquence. J. Phys. Radium, série 8, Bd. 8(1947), Nr. 4, S. 97...101.
- Rudd, W. C.: High-Frequency Heating in the Radio Spectrum. Electr. Engng. Bd. 66(1947), Juni, S. 570...576.

- Scherer, S. W.: High-Frequency Heating. Commun. News Bd. 9(1947), Nr. 2, S. 45...55.  
 Schmitt, P.: Der kernlose Mittelfrequenzofen. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 252...257.  
 Stuiters, A. van: Grundlagen der Hochfrequenzheizung. Elektr.-Verwert. Bd. 21(1947), Nr. 11/12, S. 209...219.  
 Stäger, H.: Härtung von Kunststoffen im Hochfrequenzfeld. Brown Boveri Mittl. Bd. 34(1947), Nr. 6/7, S. 129...138.  
 Turney, A.: Radio Interference from Industrial R. F. Heating Equipment. Electron. Engng. Bd. —(1947), Aug.  
 Whitehead, J. B.: Dielectric Heating. The Measurement of Loss under Rising Temperature. Trans. AIEE Bd. 66(1947), S. 947...949.  
 Whitehead, J. B.: Dielectric Losses with High Frequencies. Electr. Engng. Bd. 66(1947), Sept., S. 907...910.

- Willcox, T. N.: Cost Analysis of Dielectric Preheating. Mod. Plast. Bd. 24(1947), Nr. 7, S. 131...135.  
 Red.: High-Frequency Heating. Gen. Electr. Rev. Bd. 50(1947), Jan., S. 25...26.  
 Red.: Interference Problems Arising from Industrial Electronic and Electromedical Apparatus. J. Instr. Electr. Engrg., Part III, Bd. 94(1947), Nr. 27, S. 57...58.  
 Red.: Multiple-Position Coils Speeds Induction Heating. Amer. Machinist Bd. 91(1947), Nr. 22, S. 90...93.  
 Weitere Literaturzusammenstellungen siehe auch: Elektrizitätsverwertung Bd. 21(1946/47), Nr. 11/12, S. 259...260; Electronic Engineering Bd. —(1945), Aug., S. 629...630.

Adresse des Autors:

G. Lang, Dipl. Ing., Hauptgasse 33, Olten (SO).

## Über die Festigkeit von Elektroporzellan

Von F. Neubauer, Laufen

621.315.612.2

Ausgehend von der Entwicklung der Hochspannungsfreileitungsisolatoren in den letzten Jahrzehnten werden die Eigenschaften des Porzellans in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung besprochen. In einer Tabelle werden die wichtigsten Eigenschaften des Porzellans angegeben und die wichtigsten Prüfkörper beschrieben. Es wird der Einfluss der Glasur und der «Brennhaut» sowie der Oberflächenbehandlung auf die mechanische Festigkeit erörtert und das Altern des Porzellans besprochen. Abschliessend wird die Abhängigkeit der Zug- und Biegefestigkeit vom Querschnitt gezeigt.

Après avoir rappelé l'évolution des isolateurs pour lignes aériennes à haute tension durant ces dernières décennies, l'auteur s'occupe des propriétés physiques de la porcelaine, qui diffèrent selon la composition de cette matière, et décrit les pièces à vérifier les plus importantes. La glaçure et la pellicule de cuisson, ainsi que le traitement de la surface, exercent une certaine influence sur la résistance mécanique. L'auteur discute également du vieillissement de la porcelaine, puis il montre que la résistance à la traction et à la flexion dépend de la section.

Die zeitweise stürmische Entwicklung der Elektrotechnik in den letzten 60 Jahren hat auch auf das Elektroporzellan, das heute der wichtigste Isolierstoff im Freileitungsbau ist, einen grossen Einfluss ausgeübt. Durch Zusammenarbeit von Keramikern und Elektrotechnikern gelang es, das für Hochspannungszwecke benötigte Hartporzellan so zu verbessern, dass heute die Isolierung der Freileitungen von z. B. 110 oder 220 kV keine Schwierigkeiten mehr macht, während um die Jahrhundertwende die Isolation von Spannungen über 20 kV schon ein heikles Problem bildete. Zweifelsohne ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften des Hart- oder Hochbrandporzellans, das auf dem europäischen Kontinent fast ausschliesslich verwendet wird, für den Konstrukteur elektrischer Anlagen sehr wichtig.

Von einem guten Hochspannungsporzellan verlangt man eine genügende elektrische Festigkeit, die einen vollkommen dichten, nicht hygroskopischen Scherben voraussetzt und eine hinreichende mechanische und thermische Festigkeit. Die mechanische Festigkeit tritt gerade durch die Entwicklung der für Hoch- und Höchstspannungen verwendeten Freileitungsisolatoren in den Vordergrund, die seinerzeit von den Stützisolatoren für mittelhohe Spannungen (Delta-, Weitschirm- und Beznautyp) ihren Ausgang nahm und vor etwa 40 Jahren durch die weitere Erhöhung der Spannung zu den Hängeisolatoren mit Unterteilung der Isolation auf mehrere Glieder führte.

In den USA wurde zu Beginn des Jahrhunderts als erster Hängeisolator ein Schlingenisolator konstruiert, der nach seinem Erfinder Hewlett-Isolator genannt wurde und auch bei uns Eingang fand. Die zweite Etappe der Hängeisolatoren in Europa brachten dann die sog. Kappenklöppelisolatoren, bei denen das Porzellan hauptsächlich auf Scherung und Druck beansprucht wird. Die verschiedenen Ty-

pen unterscheiden sich lediglich durch die Art der Klöppelbefestigung, und sind als Kugelkopf-, Kegelkopf-, Federringisolator und Ohio-Brass-Typ bekannt geworden. Bei der dritten Gattung der Hängeisolatoren, den Vollkern-, nach der Motor Columbus A.-G., Baden, auch Motorisolatoren genannt, wird ebenso wie bei deren Weiterentwicklung, den seit 10 Jahren in Betrieb befindlichen Langstabisolatoren das Porzellan auf Zug beansprucht (Fig. 1). Die systematische Entwicklung des Por-

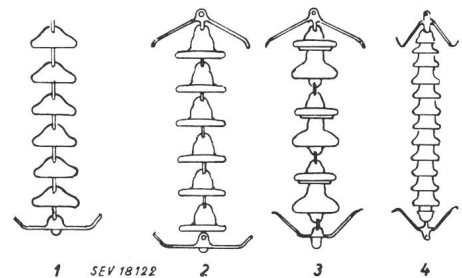


Fig. 1

Entwicklung der Freileitungs-Hängeisolatoren

- 1 Hewlett-Isolator; 2 Kappenisolator; 3 Vollkernisolator;  
 4 Motor-Langstabisolator

Der Metallanteil verglichen mit dem Totalgewicht des Isolators ist bei Kappenisolatoren 49 %, bei Motorisolatoren 35,5 %, bei Stabisolatoren 28 %

zellans hat zu Zerreisswerten geführt, die früher als unmöglich galten. So beträgt die mittlere Bruchfestigkeit z. B. von Motorisolatoren des Typs VK-4 bei einem Strunkdurchmesser von 75 mm rund 10 000 kg.

Die Eigenschaften des Porzellans hängen, wie das bekannte in Fig. 2 dargestellte Diagramm zeigt, von seiner Zusammensetzung ab. Durch Änderung der Zusammensetzung können entweder mittlere elektrische und mechanische Eigenschaften erreicht oder aber eine besonders gewünschte Eigenschaft auf Kosten der anderen entwickelt werden.