

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 43 (1952)
Heft: 25

Artikel: Die Hochfrequenz-Erwärmung von Metallen
Autor: Wälchli, Rudolf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059209>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

- [2] Alexander, P. und G. A. Meek: Anwendungen des dielektrischen Erhitzens und Trocknens in der Textilindustrie. Melliland Textilber. Bd. 33(1952), Nr. 2, S. 163...166; Nr. 3, S. 279...30.
- [3] Hochfrequenz-erwärmung. Sonderheft der Brown Boveri Mitt. Bd. 38(1951), Nr. 11.
- [4] Hillman, V. E.: Better Cores by Electronic Baking. Iron Age Bd. 166(1950), Nr. 13, S. 67...69.

- [5] Stel, M. und E. C. Witsenburg: Erhitzung durch hochfrequente Felder. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11(1950), Nr. 8, S. 236...244.

Adresse des Autors:

Dr. Alexander Goldstein, dipl. El. Ing. ETH, Trottenstrasse 3, Ennetbaden (AG).

Verfahren und Einrichtung zum Backen mit hochfrequenter und infraroter Energie

Diskussionsbeitrag zu den Ausführungen von A. Goldstein, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel, von N. Felber, Zürich

621.364.143:661.6
621.364.15:661.6

Im Juni des letzten Jahres fand in Lugano eine internationale Bäckereiausstellung, ESPA genannt, statt. Zu diesem Anlass wollte die Bäcker- und Konditorenfachschule in Luzern abklären lassen, was von den Mitteilungen über Backofenanlagen, die hochfrequente oder infrarote (von Hellstrahlern stammende kurzwellige Wärmestrahlen) Energie verwenden, zu halten sei, um eventuell einen Versuchsofen an der ESPA zeigen zu können.

Versuche mit Hochfrequenz- oder Infrarot-Energie allein hätten fehlschlagen müssen, da das eine Verfahren keine Kruste, das andere keine Krume ergeben hätte. Versuche, beide Verfahren nacheinander anzuwenden, hatten scheinbar keinen Erfolg. Ein neuer Weg wies der Gedanke, beide Energiearten gleichzeitig auf das Backgut — Brot, Kleimbrote, Biscuits usw. — einwirken zu lassen.

Die Ergebnisse mit einem ersten Versuchsofen — Backfläche $40 \times 50 \text{ cm}^2$ —, der auch an der ESPA vorgeführt wurde, waren ermutigend. Heute wird in der Fachschule Luzern ein grösserer Typ — Backfläche $65 \times 200 \text{ cm}^2$ — nach allen Regeln geprüft¹⁾. Er arbeitet nach dem Durchlaufprinzip. Verfahren und Einrichtung sind patentrechtlich geschützt.

Die Resultate, die mit diesem HF-IR-Durchlaufofen erzielt werden, bestätigen die in ihn gesetzten Erwartungen. Mit geringfügigen Änderungen bei der Vorbereitung der Teige entstehen die als normal bekannten Gebäcke. Der Gärprozess ist nicht mehr so heikel wie für den normalen Ofen. Selbst bei kürzeren Gärzeiten erhält man normale Volumen. Bei der als normal bezeichneten Gärzeit, aber auch bei Übergare fallen die Volumen grösser aus als bisher.

¹⁾ siehe Fig. 24 des Vortrages von A. Goldstein, Seite 1014 dieses Heftes.

Die Leistungsfähigkeit des Ofens ist in Tabelle I durch ein paar Zahlen festgehalten, die sich stets auf eine Backfläche von $1,3 \text{ m}^2$ beziehen.

Leistungsfähigkeit des HF-IR-Durchlaufofens mit einer Backfläche von $1,3 \text{ m}^2$

Tabelle I

Gebäck	Stundenleistung	Durchlaufzeit
Weggli	ca. 1080 Stück	5,5 min
Gipfel	ca. 1020 Stück	5,0 min
Biscuits	ca. 80 kg	2,0 min

Die Energiekosten liegen bei einem Energiepreis von 5 Rp./kWh unter 1 % des Verkaufspreises — beim normalen Ofen beträgt er im Mittel das Doppelte. Für Biscuits ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von 0,35 kWh/kg Fertigung — im normalen Biscuitofen liegt der entsprechende Wert um 1 kWh/kg herum. Der HF-IR-Biscuitofen ist diesbezüglich also etwa dreimal günstiger. Seine Anschaffungskosten entsprechen etwa den des normalen Ofens, sind aber eher etwas niedriger.

Ein paar Vorteile des HF-IR-Ofens, kurz zusammengefasst: Kurze Backzeiten — die Hälfte, ein Viertel, ja ein Zehntel der bisher üblichen; geringer Platzbedarf bei gleicher Produktion; geringer Stromverbrauch; grössere Volumen des Backgutes.

Adresse des Autors:

Norbert Felber, dipl. El. Ing. ETH, Högelerweg 7, Zürich 55.

Die Hochfrequenz-Erwärmung von Metallen

Vortrag, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel, von R. Wächli, Zürich

621.364.15:621.7

Die nachfolgenden Ausführungen sollen in erster Linie eine Einführung und einen Überblick über die hochfrequente Erwärmung von Metallen geben. Nach der Beschreibung des Skin-Effektes und der Erklärung der Erzeugung der Wärme im Metall folgt eine eingehende Darstellung der Forderungen der Praxis an die Konstruktion des Generators und deren praktische Lösungen. Sodann werden alle Anwendungsgebiete, wie das Löten, das Härten, das Anlassen und Vergüten sowie das Schmelzen behandelt und mit einigen wenigen Anwendungsbeispielen belegt.

1. Einleitung

Die Hochfrequenz-Erwärmung wird seit einer Reihe von Jahren in der Industrie angewendet. Dank dem grossen Nutzen, den sie in mancher Hinsicht zeigt, verbreitet sie sich mehr und mehr. Dieser zeigt sich vor allem in besserer Qualität der Produkte, in grösserer Produktion und in billigeren Produktionskosten.

Seit langem ist bekannt, dass man Metalle durch Wirbelströme, hervorgerufen durch ein magnetisches Wechselfeld, erwärmen kann. Die ersten Pa-

Aperçu des méthodes de chauffage des métaux par haute fréquence. Description de l'effet pelliculaire et de la production de chaleur dans le métal. Exposé détaillé des exigences posées à la construction du générateur et des solutions pratiques. Tous les domaines d'application sont décrits, notamment le soudage, le recuit, le revenu, la trempe et la fusion, avec quelques exemples concrets.

tente datieren aus dem Jahre 1850. Das Schmelzen von Metallen mit Hilfe von rotierenden Generatoren war eine der ersten praktischen Anwendungen der Induktionsheizung. Sie geht auf das Jahr 1900 zurück. Röhrengeneratoren jedoch wurden erst später gebaut. Ihre erste Anwendung bestand im Entgasen von Radioröhren. Dank ihrer Vorzüge fanden sie in den letzten Jahren schnelle Verbreitung. Durch das Ausarbeiten von Produktionseinrichtungen, wie Vorschub- und Halteeinrichtungen, Dreh-tische sowie Maschinen, die die Eingliederung der

Generatoren in den kontinuierlichen Produktionsvorgang ermöglichten, fand die Hochfrequenz-Erwärmung besonders während des letzten Krieges grossen Aufschwung. Die Hochfrequenz-Generatoren, die für die Erwärmung von Metallen gebraucht werden, arbeiten mit Frequenzen zwischen einigen 100 kHz und einigen MHz. Die Erzeugung dieser Frequenzen erfolgt am rationellsten mit Röhrengeneratoren. Die ältere Konstruktion dieser Generatoren lehnte sich stark an diejenige von Radiosendern an, insbesondere da ihr ursprünglicher Verwendungszweck vorwiegend in der Radioindustrie lag. In Zusammenarbeit mit der Industrie wurden nach und nach speziell für geeignete Typen entworfen, die heute in ihrer Ausführung kaum mehr an die ursprünglichen Sendergeneratoren erinnern. Auf Grund der bestechenden Eigenschaften der Hochfrequenz-Energie, wie ihre Lokalisation, ihre sehr grosse Konzentrationsmöglichkeit, ihre sofortige Betriebsbereitschaft und äusserst kurze Einwirkungszeit, wurden seinerzeit Generatoren gebaut, ohne dass praktisch erprobte Anwendungen bekannt waren. Sie mussten zuerst durchgeführt und besonders die dazu benötigten Hilfseinrichtungen mussten geplant werden. Heute ist die Hochfrequenz-Erwärmungstechnik in der Lage, auf eine grosse Anzahl bereits erschlossener Gebiete zurückzublicken. Es stehen jedoch noch viele Anwendungsmöglichkeiten offen, die für fortschrittlich denkende Fachleute ein dankbares Betätigungsfeld bieten.

2. Die Forderungen der Praxis

Bei der Erwärmung von Metallen stellt die Praxis folgende Anforderungen:

1. grosse Konzentration der Wärme,
2. Möglichkeit der Lokalisierung der Wärme auf bestimmte Stellen,
3. genaue Dosierbarkeit der Wärme.

Folgende Wärmeleistungen können heute mit den verschiedenen Methoden übertragen werden:

durch Strahlung	≈ 8 W/cm ²
durch Konvektion	0,5 W/cm ²
durch Berührung	20 W/cm ²
durch die Flamme	1000 W/cm ²
durch Hochfrequenz	10 kW/cm ² und mehr.

Die Lokalisierung der Wärme auf bestimmte Stellen bedingt eine mindest zu übertragende Wärmeleistung. Wird nämlich mit zu kleiner Wärmekonzentration erwärmt, so fliesst die Wärme infolge der guten Wärmeleitfähigkeit der Metalle wieder ab. Weder durch Konvektion noch durch Strahlung oder Berührung kann eine örtlich genügende Erwärmung der Metalle erreicht werden. Erst die Flamme und die Hochfrequenz-Energie ermöglichen es, örtlich zu erhitzen, wobei mit Hochfrequenz-Energie viel grössere Leistungsdichten und somit kürzere Erwärmungszeiten erreichbar sind. Für einige Prozesse ist es äusserst wichtig, nur bestimmte Stellen erwärmen zu können, währenddem das übrige Metall kalt bleiben muss. Denken wir z. B. an das Glühen des Gewindes von gehärteten Achsbolzen. Im Bereiche des Gewindes muss das

Material weich und zäh gemacht werden, während der Bolzen selbst sehr hart bleiben soll.

Von grosser Wichtigkeit ist ferner die genaue Dosierbarkeit der Wärme. Sollen gleiche Produkte dem gleichen Wärmeprozess unterworfen werden, so bedingt dies die Übertragung derselben Anzahl Kalorien pro Zeiteinheit. Die Kontrolle der elektrischen Energie ist nun viel leichter zu erreichen, als z. B. diejenige einer Flamme.

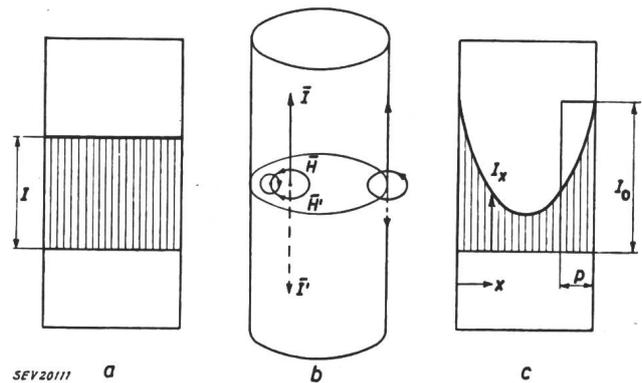
Die 3 Hauptforderungen: Konzentration, Lokalisation und Dosierbarkeit der Wärme, sind daher mit Hochfrequenz-Energie am ehesten erfüllbar. Zwei physikalische Eigenschaften helfen ihr dabei:

1. die hohe Frequenz und
2. der Haut- oder Skineffekt.

Die in das zu erwärmende Metall abgegebene Leistung steigt mit der Quadratwurzel aus der Frequenz. Je höher demnach die Frequenz gewählt wird, desto leichter ist es, die Energie zu übertragen. Allerdings sind der Wahl der Frequenz nach oben durch den zunehmenden schlechteren Wirkungsgrad der Generatoren (Wirkungsgrad der Röhre, Verluste in den Kondensatoren usw.) Grenzen gesetzt. Sie darf aber auch nicht zu niedrig gewählt werden, um noch kleine Metallstücke mit guter Wirtschaftlichkeit erwärmen zu können. Die minimale Grösse dieser Metallstücke sollte nicht kleiner als 5...8mal die Eindringtiefe sein. Die verwendeten Frequenzen liegen daher zwischen 200 kHz und einigen wenigen MHz.

3. Der Skineffekt

Der Skineffekt oder die Stromverdrängung zeigt seine Wirkung in der Vergrösserung des elektrischen Widerstandes eines Leiters bei zunehmender Frequenz. Es handelt sich um eine unliebsame Erscheinung, die durch entsprechende Dimensionie-



SEV 20111 **Fig. 1**
Skineffekt (Stromverdrängung)
 a Stromverteilung bei Gleichstrom
 I Betrag des Stromes
 b Darstellung zur Erläuterung der Stromverdrängung
 I, I' Stromvektoren
 H, H' Vektoren des magnetischen Feldes
 c Stromverteilung bei hochfrequentem Wechselstrom
 I_x Betrag des Stromes im Abstand x von der Oberfläche
 I₀ Oberflächensstrom

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{p}} \quad p \text{ Eindringtiefe} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}$$

für Stahl beträgt die Eindringtiefe:
 20 °C: $p \approx \frac{20}{\sqrt{f}}$ mm 800 °C: $p \approx \frac{500}{\sqrt{f}}$ mm

- ρ spezifischer elektrischer Widerstand in Ωcm
- μ_r relative Permeabilität
- f Frequenz in Hz

zung der Leiter ausgeglichen werden muss. Der elektrische Strom wird bei zunehmender Frequenz mehr und mehr an die Oberfläche des Leiters gedrängt. Es bildet sich dort ein grosser Strombelag, sozusagen eine Haut, in der nahezu der gesamte Strom fliesst. Mit Recht wird daher diese Erscheinung Skin- oder Hauteffekt genannt (siehe Fig. 1). Bei Gleichstrom füllt der Strom den ganzen Leiterquerschnitt gleichmässig aus. Das Magnetfeld um den Leiter ändert seine Richtung nicht. Bei Wechselstrom jedoch wechselt das Magnetfeld seine Richtung und wirkt auf den Leiter zurück. In ihm werden Gegenströme induziert, die dem Magnetfeld im Leiter entgegenwirken. Die Gegenströme schwächen nun den ursprünglichen Strom um so mehr, je weiter wir ins Innere des Leiters vordringen. Da die Gegenströme dem Induktionsgesetz folgen und somit ihrer Grösse nach der Frequenz des ursprünglichen Stromes proportional sind, schwächen sie bei höherer Frequenz den ursprünglichen Strom stärker. Der Abfall der Grösse des Stromes gegen die Leitermitte zu wird also bei höherer Frequenz viel grösser sein als bei niedrigerer Frequenz. Er folgt dem Exponentialgesetz:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{p}}$$

p Eindringtiefe des elektrischen Stromes =

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \text{ cm}$$

ρ Stromdichte in Ωcm

μ_r relative Permeabilität (über Curiepunkt = 1, darunter je nach Stahlorte 10...40)

f Frequenz in Hz

I_0 Oberflächenstrom

I_x Strom im Abstand x der Oberfläche

x Abstand von der Oberfläche

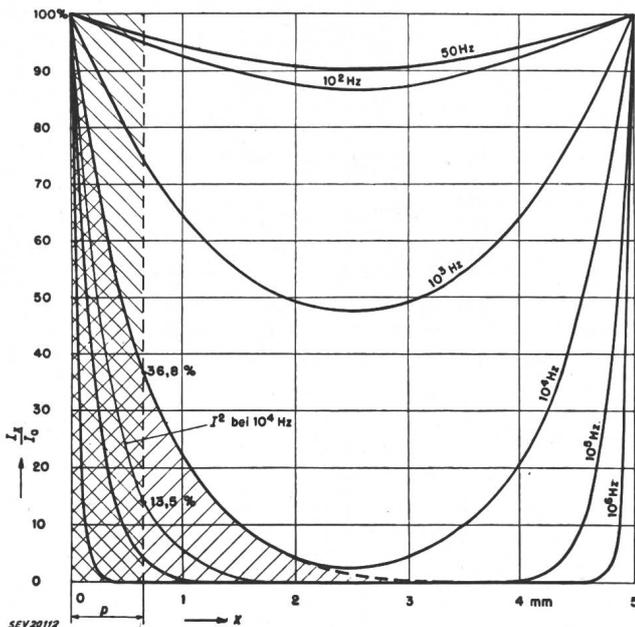


Fig. 2

SEV20112 Stromverteilung in einem Cu-Leiter von 5 mm Durchmesser bei verschiedenen Frequenzen

- I_0 Oberflächenstrom
- I_x Betrag des Stromes im Abstand x von der Oberfläche
- x Abstand des Messpunktes von der Oberfläche in mm
- p Eindringtiefe bei 10^4 Hz

Um sich den Stromverlauf praktisch vorstellen zu können, wurde die Grösse der Eindringtiefe p eingeführt. Sie entspricht jener Tiefe, bei der der Oberflächenstrom auf den e -ten Teil seines Wertes gesunken ist, d. h. auf 36,8 % (siehe Fig. 2). Die Fläche, begrenzt durch die Eindringtiefe und die Exponentialfunktion umfasst 63 % des gesamten Stromes. Da die Wärmeleistung proportional dem Quadrat des Stromes ist, umfasst sie 86,5 % der Gesamtwärmemenge. Ohne einen zu grossen Fehler zu begehen, kann man deshalb annehmen, dass sich der grösste Teil der Wärmeentwicklung in dieser dünnen Aussenschicht befindet. Die Eindringtiefe p ist zudem noch eine bequeme Rechengrösse. Multipliziert man sie nämlich mit dem Oberflächenstrom, so erhält man den Gesamtstrom.

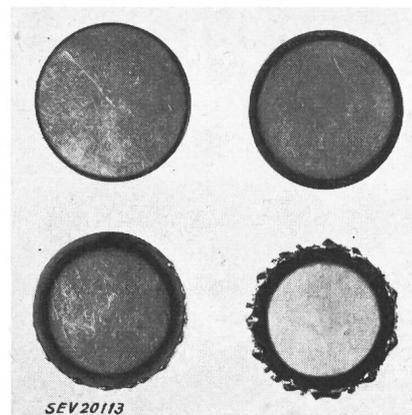


Fig. 3

SEV20113 Wirkung des Skin-Effektes an runden Querschnitten Die Querschnitte zeigen deutlich, wie der Strom an die Oberfläche gedrängt wird, welche sogar zum Schmelzen gebracht werden kann (Querschnitt rechts unten)

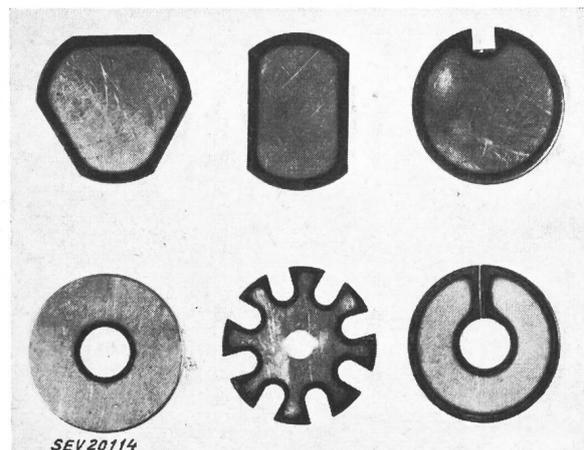


Fig. 4

SEV20114 Wirkung des Skin-Effektes an Querschnitten verschiedener Form Bei Anbringung eines Magnetfeldes im Innern ist eine Stromkonzentration an der Innenseite möglich (Querschnitt unten links)

Die Wirkung des Skineffektes ist besonders schön an Hand der Fig. 3 und 4 ersichtlich. Es handelt sich um verschiedene Querschnitte, die mit Hochfrequenz-Energie erwärmt wurden. Nur die äussersten Schichten werden erhitzt, was durch die schwarze Färbung des Randes deutlich zu erkennen

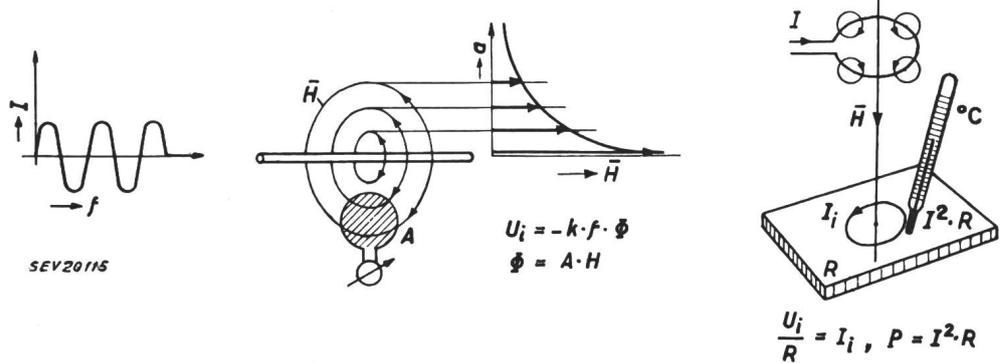
ist, die durch sofortige Abschreckung des Metalles erzielt wurde. Die Stromwege sind auf diese Art deutlich zu sehen. Die Heizzeiten bei Fig. 3 betragen: 0,1; 0,5; 1 und 3 s. Während die Oberfläche selbst bis zum Schmelzen erwärmt werden kann, bleibt das Innere noch vollständig kalt, da die Wärmeleitung im Metall viel langsamer vor sich geht als die Erwärmung.

Fig. 4 zeigt anschaulich, wie der Strom sich unter dem Einfluss des Skin-Effektes seinen Weg sucht. Die aufgeschlitzte Scheibe zeigt besonders eindrucklich, dass die Strombahn geschlossen sein muss.

mit elektrischem Widerstand durchflutet wird, in ihm Ströme. Es sind Ströme mit geschlossenen Kreisbahnen, sogenannte Wirbelströme. Die durch sie auftretenden Jouleschen Verluste erwärmen das Metall.

Bei magnetischen Materialien, wie Fe, Co, hilft noch eine andere Erscheinung bei der Erwärmung mit; es sind dies die Hysterisisverluste (siehe Fig. 6). Durch die Wirkung des äusseren Magnetfeldes richten sich die Elementarmagnetchen entsprechend aus. Wechselt nun das Magnetfeld seine Richtung, so folgen die Elementarmagnetchen. Je höher die

- Fig. 5
Darstellung der Wirbelstromverluste
- I Betrag des Stromes
 - f Frequenz
 - \vec{H} Vektor des magnetischen Feldes
 - U_i induzierte Spannung
 - k Proportionalitätsfaktor
 - ϕ Betrag des magnetischen Flusses (in Luft)
 - I_i induzierter Strom
 - R elektrischer Widerstand des Metalles



4. Die Erzeugung der Wärme im Metall

Der Wechselstrom, der durch den Leiter fliesst, erzeugt um ihn ein Magnetfeld (siehe Fig. 5). Dieses induziert Spannungen und sofern ein Körper

Frequenz des Magnetfeldes gewählt wird, um so schneller ändern sie ihre Richtung. Durch die gegenseitige Reibung wird Wärme erzeugt, deren Betrag um so grösser ist, je höher die Frequenz gewählt wird. Bei tiefen Frequenzen ist die durch Hysterisisverluste erzeugte Wärmemenge vergleichbar mit der durch Wirbelstrom erzeugten. Bei hohen Frequenzen hingegen ist sie klein im Vergleich mit der durch Wirbelstromverluste erzeugten, da diese quadratisch mit der Frequenz ansteigt. Die Hysterisisverluste werden deshalb gewöhnlich nicht in Betracht gezogen; sie fallen nach Überschreiten des Curiepunktes ja ohnehin weg.

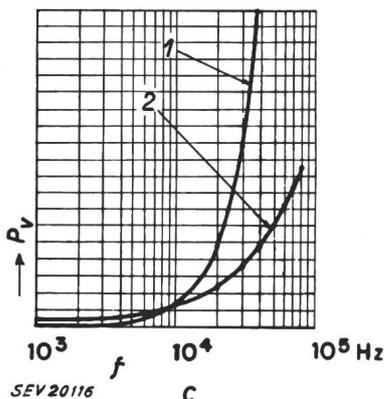
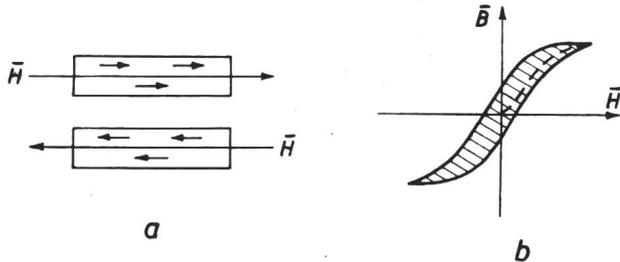


Fig. 6

Erklärung der Hysterisisverluste

- a Die Elementarmagnetchen richten sich im Magnetfeld \vec{H} aus
- b Hysterisischleife
- \vec{B} magnetische Induktion
- \vec{H} magnetische Feldstärke
- Hysterisisarbeit = $\int H \cdot dB$
- c Ansteigen der Hysterisis- und Wirbelstrom-Verluste in Funktion der Frequenz
- 1 Wirbelstromverluste $P_{Fe, Wirbel} = k' \cdot B^2 \cdot f^2$
- 2 Hysterisisverluste $P_{Fe, Hyst.} = k \cdot B^{1,6} \cdot f$
- P_v Verlustleistung pro kg
- f Frequenz in Hz
- k, k' Proportionalitätsfaktoren

5. Der Generator

Elektronischen Geräten wird vielfach der Vorwurf gemacht, dass sie empfindliche Instrumente darstellen. Sofern sie in Laboratorien verwendet werden, wo Spezialisten zur Verfügung stehen, wäre ein eventueller Ausfall schnell behoben. Stehen sie jedoch in einer Schmiede, einer Giesserei oder in einer Härtnerei, dann sind die Ausfälle schwerwiegender. Hochfrequenz-Generatoren sind jedoch für solche Orte bestimmt und müssen unter sehr harten Betriebsbedingungen arbeiten. Sie müssen daher äusserst betriebssicher aufgebaut sein und einfach bedient werden können. Falsche Schaltmanipulationen sollten ausgeschlossen sein. Die eingebauten Röhren dürfen unter keinen Umständen Schaden leiden. Die Praxis stellt daher an die Geräte folgende Anforderungen:

1. Der Generator muss kurzschluss- und leerlauf-sicher sein.
2. Die Anpassung des Arbeitsstückes an die Arbeitsspule soll automatisch erfolgen.
3. Der Generator soll von einem Laien bedient werden können.

Es handelt sich hier um Forderungen, die in der Elektro-Industrie meistens selbstverständlich sind, die jedoch bis heute im Generatorenbau gar nicht oder kaum berücksichtigt wurden.

Ein kürzer oder länger dauernder Kurzschluss darf weder das Gerät noch die Röhren überlasten. Auch bei der Wegnahme der Arbeitsspule, also im Leerlauf, darf die Isolation nicht zu hoch beansprucht und insbesondere das Gitter der Generatorröhre nicht überlastet werden. Auch Anpassprobleme der Arbeitsspule an das Arbeitsstück sollten nicht auftreten. Der den Generator bedienende Arbeiter soll keine besonderen Kenntnisse darüber haben müssen. Als einziges Bedienungsorgan neben dem Ein- und Ausschaltknopf kann z. B. ein Handrad vorgesehen werden, mit dem die gewünschte Leistung eingestellt und an einem Instrument abgelesen werden kann. Die Elektrizitätswerke stellen zudem noch den Wunsch nach möglichst kleinen Einschaltstromstößen.

Diesen Anforderungen der Praxis ist in weitestem Rahmen durch folgende Lösung der Probleme entsprochen worden: Als Oszillator wird meistens eine Colpit- oder eine Hartley-Schaltung verwendet. Es handelt sich um einen Oszillator in C-Betrieb, der mit Gitterstrom arbeitet. Der Betriebszustand ist nicht kritisch und ein Wirkungsgrad von 70 % und mehr kann leicht erreicht werden. Die Arbeitsspule befindet sich meistens im Schwingkreis selbst. Die Generatorröhren sollten möglichst viel Nutzenergie unter sehr verschiedenen Belastungen abgeben und ihre Lebensdauer sollte bei möglichst niedrigen Betriebskosten hoch sein.

a) Automatische Gitterregulierung

Bei den meisten Generatoren wird die Rückkopplungsspannung am Kondensator des Schwingkreises abgegriffen (siehe Fig. 7). Dadurch ist das Verhältnis zwischen Schwingkreis- und Gitterspannung konstant. Es wird so gewählt, dass die Gitterspannung bei Vollast des Generators den richtigen Wert erhält. In der Colpit-Schaltung wird die Mitte des Schwingkreiskondensators an die Erde gelegt. Die Hälfte der Hochfrequenz-Schwingkreisscheitelspannung beträgt ungefähr 75...80 % der Anodengleichspannung. Wird die abgenommene Leistung verringert, so steigt die Hochfrequenz-Scheitelspannung im Schwingkreis bis zum Höchstwert der Anodenspannung. Sie erhöht sich ca. um 25 %. Infolgedessen steigt auch die Gitterwechselspannung um 25 %. Die Folge davon ist, dass der Gittergleichstrom sehr schnell ansteigt, da das Gitter nur Strom aufnimmt, wenn sein Potential über dem Potential der Kathode liegt. Im Leerlauf würde also das Gitter überhitzt und beschädigt. Dies tritt jedoch nur ein, wenn die Generatorröhre bei Vollast annähernd voll ausgenutzt wird. Wenn man die Röhren überdimensioniert wählt, so dass der Gitterstrom im Rahmen des Zulässigen bleibt, kann die Gefahr überwunden werden. Die Röhren sind dann jedoch grösser und teurer und sie wirken sich ungünstig in der Betriebskostenrechnung aus. Führt man jedoch eine *automatische Gitterregulierung* in dem Sinne ein, dass

der Gitterstrom unabhängig von der Belastung des Schwingkreises konstant bleibt, so kann die Röhre ohne Bedenken voll belastet werden. Die Betriebskosten senken sich dadurch. Die automatische Gitterregelung erlaubt ferner eine kontinuierliche Änderung der Leistung des Generators in sehr weiten Grenzen, ohne dass am Generator von aussen etwas nachgeregelt werden muss. Sie besteht aus einem robusten Differential-Kondensatorsystem in Öl, das vom Gitterstrom betätigt wird. Das Verhältnis zwischen Anoden- und Gitterwechselspannung

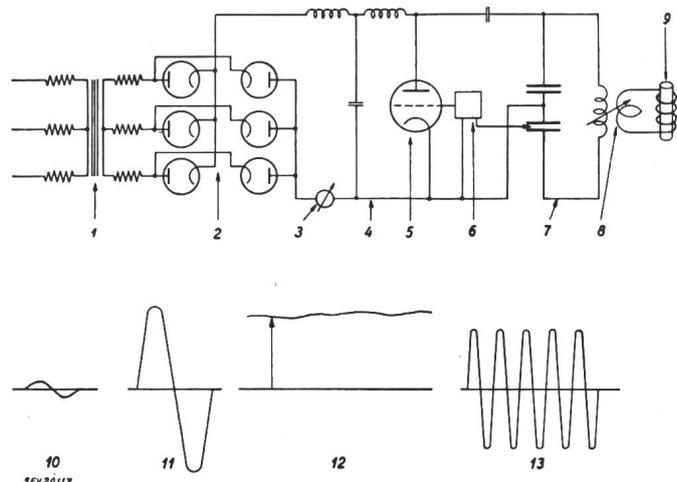


Fig. 7

Prinzipschaltbild eines induktiven Hochfrequenzgenerators (darunter die den verschiedenen Stufen entsprechenden Spannungen)

- 1 Hochspannungstransformator
- 2 Gleichrichter
- 3 Leistungsmesser
- 4 Siebung
- 5 Generatorröhre
- 6 automatisches Gitterregelgerät
- 7 Schwingkreis
- 8 Hochfrequenztransformator mit variabler Kopplung
- 9 Arbeitsstück
- 10 Netzspannung (Frequenz 50 Hz)
- 11 Hochspannung (Frequenz 50 Hz)
- 12 gleichgerichtete und gesiebte Hochspannung
- 13 Hochfrequenzspannung von z. B. 1 MHz

wird derart geändert, dass der Gitterstrom konstant bleibt. Diese Regulierung wirkt sich ferner sehr günstig auf Netzspannungsschwankungen aus. Würde z. B. die Netzspannungsschwankung 5 % betragen, so ändert die Ausgangsleistung bei festem Gitter-Anodenwechselspannungsverhältnis um 12...14 %; mit automatischer Regulierung aber nur um 5 %. Der Einfluss der Netzspannungsschwankungen auf die Ausgangsleistung wird also um den Faktor 2...2,5 vermindert.

b) Kurzschlußsicherheit

Wird der Generator kurzgeschlossen, so arbeitet er praktisch unbelastet, da er nicht angepasst ist. Die Frequenz steigt, und demzufolge nimmt die Hochfrequenz-Scheitelspannung zu. Die Schwingkreiskondensatoren werden deshalb am stärksten belastet und müssen am meisten Blindleistung abgeben. Sind sie für diese Anzahl kVA bemessen, so kann der Generator ruhig kurzgeschlossen werden, während die automatische Gitterregulierung das Gitter der Generatorröhre schützt. Der Fall eines annähernden Kurzschlusses tritt bei Verwendung einer sehr kleinen Arbeitsspule auf, z. B. einer solchen mit einem Lochdurchmesser von 6 mm.

c) Leerlaufsicherheit

Wird der Generator versehentlich ohne Arbeitsstück in der Spule oder überhaupt ohne Arbeitsspule in Betrieb genommen, hat das keine nachteiligen Folgen. In diesem Betriebszustand ist die Anodenwechselspannung am höchsten, jedoch die Frequenz am niedrigsten, so dass die Schwingkreis-kondensatoren unterbelastet sind. Wiederum schützt die automatische Gitterregulierung das Gitter der Generatorröhre.

d) Anpassung und Leistungsregulierung

Die Lösung für die einfache Bedienung wurde durch den Einbau eines Hochfrequenz-Transformators mit veränderlicher Kopplung gefunden. Die Sekundärwicklung besteht aus einer einzigen wassergekühlten Windung. Innerhalb dieser bewegt sich die Primärspule, die ebenfalls wassergekühlt ist. Sie kann mittels des aussen angebrachten Handrades bewegt werden (siehe Fig. 8). Die Schwingkreiskondensatoren sitzen auf der beweglichen Primärspule, so dass die Verbindungen äusserst kurz sind. Der grösste Strom fliesst bekanntlich im Schwingkreis. Die Verbindungen zur Anode der Generatorröhre führen ca. 50mal weniger Strom, so dass sie ohne Bedenken flexibel ausgeführt werden können. Durch diese Konstruktion werden einerseits die Verluste auf einem Minimum gehalten;



Fig. 8

Induktiver 10-kW-Generator

Das Handrad dient zur Leistungsregulierung und Anpassung

andererseits ist eine Leistungsregulierung in weitesten Grenzen möglich! Die automatische Gitterregulierung sorgt wiederum für den richtigen Gitterstrom. Das Wort Anpassung hat dadurch seine Bedeutung verloren. Ohne dass der Arbeiter es bemerkt, arbeitet der Generator voll angepasst bei voller Ausgangsleistung.

e) Leistungsmessung

Die Leistungsmessung kann mit genügender Genauigkeit auf die Messung des Anodenstromes zurückgeführt werden, da die Gitterspannung an der Generatorröhre konstant ist. Ferner ist die Anoden-spannung konstant und die internen Verluste im Schwingkreis und Hochfrequenz-Transformator sind klein gegenüber der abgegebenen Leistung. Sie können vernachlässigt werden. Der Nullpunkt des Leistungsmessers wird durch den Leerlauf bestimmt. Die Genauigkeit beträgt 5...15 %.

f) Automatische Kühlwasserregulierung

Alle Spulen, die hohen Strom im Generator führen, sind wassergekühlt, um die Verluste niedrig zu halten. Liegt die Temperatur dieser Spulen unter dem Taupunkt der Umgebungsluft, so bildet sich Kondenswasser. Dies sammelt sich an und führt zu Überschlügen. Um die Kondenswasserbildung zu vermeiden, werden die Spulen mittels einer Reguliervorrichtung automatisch durch Kühlwasserdrosselung auf einer Temperatur oberhalb des Taupunktes gehalten.

g) Einschalt- und Ausschaltvorgang

Ein Generator wird in einem Fabrikbetrieb pro Tag einige 100 Male ein- und ausgeschaltet. Dabei treten erhebliche Stromstösse auf, besonders bei grossen Einheiten. Um die Einschaltstromstösse zu reduzieren, werden 2 Schalter vorgesehen, die nacheinander innerhalb 0,12 s den Generator auf 60 % und auf volle Leistung schalten. Beim Ausschaltvorgang wird dadurch das Funken vermieden.

h) Spulen und Arbeitsvorrichtungen

Die Generatoren zur Hochfrequenz-Erwärmung von Metallen werden vorwiegend in Fabrikbetrieben und Werkstätten verwendet. Mechanisch geschultes Personal steht zur Verfügung; für elektrische Probleme zeigt es jedoch meistens wenig Verständnis. Die Herstellung der Arbeitsspulen sollte des-

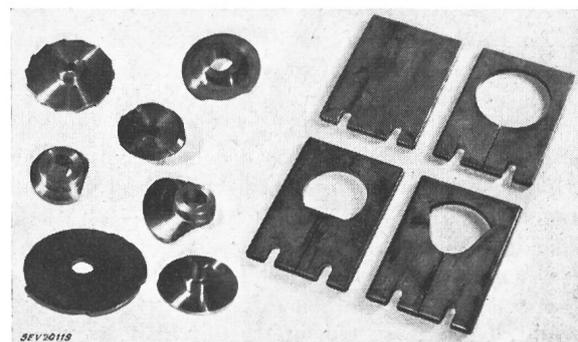


Fig. 9

Arbeitsspulen in Form von Kupferplatten;
daneben behandelte Arbeitsstücke

halb ohne grosses Können auf dem elektrischen Gebiet von einem Mechaniker ausgeführt werden können. Für diese Zwecke eignet sich die vorbereitete Kupferplatte besonders gut (siehe Fig. 9). Sie ist auf einer Drehbank äusserst genau bearbeitbar. Die Klemmvorrichtung zur Aufnahme der Platten ist wassergekühlt, so dass die Platte selbst nur

in seltenen Fällen zusätzlich gekühlt werden muss. Neben verschiedenen Vorschubvorrichtungen, die in den Abbildungen zu den Anwendungen der Hochfrequenz-Erwärmung genauer zu sehen sind, hat sich für die Behandlung einzelner Stücke die halbautomatisch arbeitende Zange zum Festhalten verschiedener Arbeitsstücke sehr gut bewährt. Die Arbeitsspule wird dabei mit einem seitlich angebrachten Hebel über das zu erwärmende Stück gesenkt, wobei die Hochfrequenz-Energie automatisch eingeschaltet wird. Nach Ablauf des Arbeitszyklus gibt ein Magnet das Arbeitsstück automatisch z. B. zum Abschrecken frei.

i) Anwendungen

Im vorhergehenden wurden die Heizwirkung der hochfrequenten Wirbelströme und einige wichtige Forderungen der Praxis besprochen. Die Möglichkeit, beinahe jede beliebige Stelle von Metallen zu erwärmen, in Verbindung mit einer sehr raschen Temperatursteigerung, machen die Hochfrequenz-Energie zu einem idealen Werkzeug des Ingenieurs und des Metallurgen. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass in den letzten Jahren eine grosse Zahl von Generatoren installiert wurden.

Von den total in Europa in Betrieb stehenden Hochfrequenz-Generatoren für induktive Anwendungen werden mehr als die Hälfte aller Installationen für Härtezwecke verwendet. Ungefähr ein Drittel dienen für das Hart- und Weichlöten und der Rest zum Anlassen, Glühen und Schmelzen von Metallen. Interessant ist eine Übersicht über die Gruppierung nach der Ausgangsleistung. Der grösste in Betrieb befindliche Röhrengenerator in Europa hat eine Ausgangsleistung von 200 kW; er dient Härtezwecken. Ebenso sind einige mit Ausgangsleistungen über 100 kW für verschiedene Anwendungen, wie Schmelzen, bereits in Betrieb. Solche mit Leistungen von 50...80 kW sind zahlreicher zu finden; sie dienen hauptsächlich Härtezwecken. Den Hauptanteil bestreiten die Typen mit 20...30 kW, von denen heute in Europa mehrere Hundert in Betrieb stehen; sie werden zum Härten, Schmelzen und Glühen von Metallen verwendet. Für Lötzwecke werden Typen mit Ausgangsleistungen von 2...10 kW vorgezogen. Ihre in Betrieb stehende Zahl ist kleiner als die der grösseren Einheiten.

Während in verschiedenen Ländern Europas die Vorteile der Röhrengeneratoren bereits früh erkannt und ausgenutzt worden sind, sind ihre Anwendungsmöglichkeiten bei uns noch recht wenig bekannt. Die folgenden Beispiele sollen einen Einblick in Verfahren vermitteln, die grosse Wirtschaftlichkeit zeigten. Der zur Verfügung stehende Raum erlaubt leider nur die Beschreibung einiger weniger Anwendungen. Sie sind jedoch so gewählt, dass sie grosse Anwendungsgebiete und Verfahren beleuchten sollen. Es handelt sich um folgende Anwendungen:

1. Das Löten
2. Das Härten
3. Das Anlassen und Vergüten
4. Das Glühen
5. Das Schmelzen

6. Das Löten

Die Wärmebehandlung besteht im Erwärmen der unmittelbaren Umgebung der zu lötenden Stelle. Durch die Erhitzung wird das Lot geschmolzen und durch die Kapillarwirkung solange in die Öffnung zwischen den zu verbindenden Teilen gesogen, bis diese ganz ausgefüllt ist. Die Leistungsdichte ist klein. Üblich sind solche von 0,5...1 kW/cm². Sie darf nicht zu gross sein, weil sonst Lot und Flussmittel zu schnell erhitzt werden, so dass sie wegspritzen. Durch die Gleichmässigkeit der Erhitzung schmilzt das Lot überall zu gleicher Zeit und es wird eine äusserst gleichmässige Verbindung erzielt, die vollständig luftdicht ist. Die Vorteile äussern sich in grosser Produktion, im Einsparen von Lötmaterial und in der Senkung der Behandlungskosten. Es wird zwischen Weich- und Hartlöten unterschieden. Beim Weichlöten werden Temperaturen zwischen 200 und 300 °C angewendet und als Lot wird Weichlot, z. B. eine Zinn-Bleilegierung benutzt. Das Hartlöten verlangt Temperaturen zwischen 500 und 1100 °C, je nachdem als Lot Silber, Messing oder Kupfer verwendet wird. Diese Verbindung ist stärker und dauerhafter als diejenige des Weichlotes. Das Lot wird meist in Form von vorbereiteten Ringen, Plättchen, Stäbchen usw. auf die Lötstelle gelegt und dann mit einem geeigneten Flussmittel bestrichen.

Im allgemeinen ersetzt die genau dosierbare Hochfrequenz-Energie in Verbindung mit der stets gleichbleibenden Menge Lötmaterial die Unregelmässigkeit der Handarbeit. Eine Reinigung der Lötstelle wird in vielen Fällen überflüssig. Mit grossem Erfolg werden z. B. an folgenden Gegenständen Lötarbeiten ausgeführt: Drehstähle oder Fräsen, Fahrradrahmen, Filmspulen, Traggriffe, Büchsen von Kondensatoren, allerlei Behälter, Verbindungen von Rohren usw.

a) Das Weichlöten

Die schnelle und örtliche Erhitzung zeigt viele Vorteile und gestattet die Anwendungsgebiete des Lötens auszudehnen. So ist es z. B. möglich, Federn aufzulöten, ohne sie auszuglühen, Lötarbeiten an Produkten durchzuführen, die Bestandteile aufweisen, die durch die Hitze Schaden leiden, oder Schlüssel auf Sardinenbüchsen aufzulöten, die bereits gefüllt sind, ohne dass der Inhalt verdirbt. In 1,25 s werden z. B. 2 Schlüssel mit 2,5 kW aufgelötet. Das Weichlöten von Konservenbüchsen wird bereits viel angewendet. Fig. 10 zeigt Büchsen mit einer Nahtlänge von ca. 800 mm, welche mit 8 kW Hochfrequenz-Leistung in 4 s gelötet werden. Die Naht ist völlig luftdicht und hält einen Druck von 10 kg/cm² aus.

Auch das Progressivlöten von Kühlerelementen mit Hochfrequenz zeigt grosse Vorteile. Fig. 11 zeigt einen Teil eines Kühlers. Er besteht aus je zwei flachgepressten Kupfer- oder Messingrohren, auf die beidseitig das gefaltete Kupferblech aufgelötet wird. Der Schnitt durch ein solches Kühlerelement ist in Fig. 12 ersichtlich. Auffallend ist die Gleichmässigkeit der Lötung. Der Vorschub beträgt 1 m/min mit einem 2,5-kW-Generator und 4 m/min

mit einem 10-kW-Generator. Früher wurde mit der Flamme gelötet, was die doppelte Zeit in Anspruch nahm bei schlechterer Qualität, obschon die Arbeit durch Fachleute ausgeführt wurde.



Fig. 10
Verlöten von Konservbüchsen
Vier von den in Fig. 9 abgebildeten Kupferplatten werden in Serie als Arbeitsspule verwendet

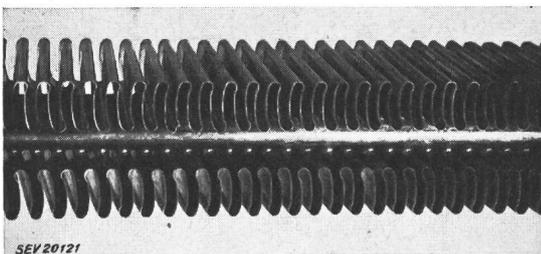


Fig. 11
Gelötetes Kühlerelement

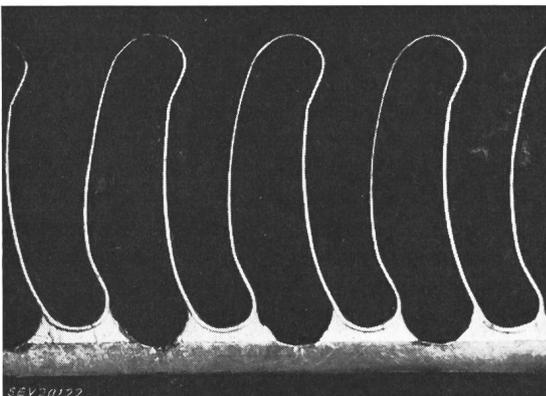


Fig. 12
Schnitt durch das in Fig. 11 dargestellte Kühlerelement

b) Das Hartlöten

Das Auflöten von Hartmetallplättchen auf Drehstähle, Bohrer oder Fräsen wird bereits vielerorts mit Hochfrequenz-Wärme ausgeführt. Die Lötstel-

len werden dabei sehr sauber und benötigen nach dem Sandstrahlen kaum eine weitere Behandlung. Fig. 13 zeigt eine Lötarbeit an Messinghülsen. Man erkennt im Vordergrund links eine Hülse und rechts davon den aufzulötenden Ring. Dahinter stehen 4 verlötete Hülsen und der 4fach-Induktor. Die 4 Teilinduktoren sind in Serie geschaltet und die eingesägten Schlitzte sorgen für die gewünschte Strombahn. Die Lötzeit beträgt 20 s mit einem 2-kW-Generator.

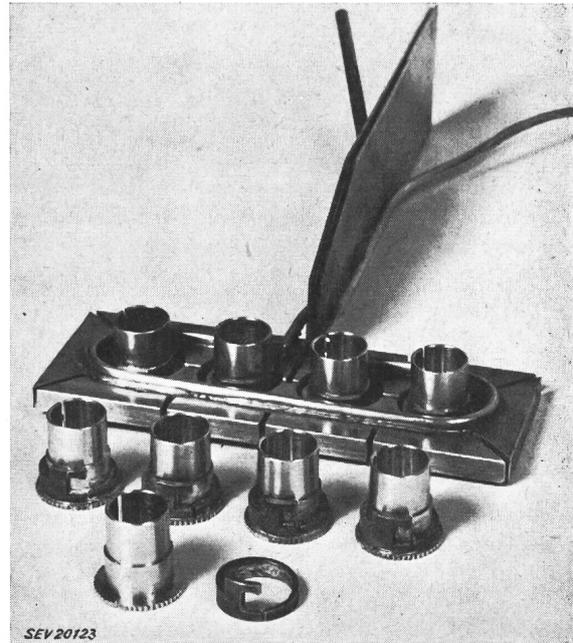


Fig. 13
Lötarbeit an Messinghülsen

7. Das Härten

a) Der Härtevorgang

Zur allgemeinen Verständlichkeit des Härtevorganges soll zuerst etwas näher auf sein Wesen eingetreten werden. Über der γ -Linie löst sich der im Stahl enthaltene Kohlenstoff, sei er bereits chemisch gebunden oder in freier Form als Graphit vorhanden, vollständig im Eisen auf (siehe Fig. 14). Beim normalen langsamen Abkühlen bleibt er nicht in Lösung, er scheidet aus. Das γ -Eisen, das unmagnetisch ist, verwandelt sich in magnetisches β - und α -Eisen. Bringt man durch ein künstliches Mittel den Stahl gewaltsam sehr schnell auf niedrige Temperatur, so findet der Kohlenstoff keine Zeit zum Ausscheiden, er bleibt in Lösung. Diesen Vorgang nennt man Abschrecken. Das so erhaltene Gefüge, das Martensit genannt wird, ist äusserst hart. Besteht es aus grossen Kristallen, so ist es zudem spröde. Feines Korngefüge ergibt den erwünschten zähen, harten Stahl. Die grossen Kristalle bilden sich auf Kosten der kleinern bei Erwärmung während längerer Zeit auf mässig hoher Temperatur. Eine kurze Behandlungszeit beeinträchtigt die Bildung grosser Kristalle, was sehr erwünscht ist. Die Hochfrequenz-Erwärmung ist nun dank der sehr kurzen Erwärmungszeiten für die Härtung äusserst geeignet. Mit ihr ist es möglich,

eine sehr feine Kornstruktur und zugleich eine grössere Härte als mit den üblichen Methoden zu erhalten.

Liegt bei einem Stahl sein Kohlenstoffgehalt über 0,3 %, so ist er härtbar. Wünscht man ihn nur an der Oberfläche zu härten, um einen elastischen, zähen Kern zur Aufnahme mechanischer Beanspruchungen zur Verfügung zu haben, so können zwei Methoden zum Ziele führen. Entweder heizt man am härtbaren Stahl nur die Oberfläche auf und schreckt dann ab, oder man verwendet einen nicht

üblichen Verfahren auf Minuten und Sekunden zu reduzieren. Zudem verziehen sich die Stücke praktisch nicht, da sie nicht während langer Zeit vollständig durcherwärmt werden müssen. Der Kern des Materials bleibt kalt und verändert sich nicht. Der Ausschuss wird demzufolge kleiner und die Härtung kann an bearbeiteten oder halbbearbeiteten Artikeln im Produktionsprozess durchgeführt werden. Ferner tritt keine Entkohlung an der Oberfläche auf, wodurch die erzielbare Härte auch erreicht wird. Aber nicht nur das Oberflächenhärten, sondern auch das Härten bestimmter Stellen ist mit Hochfrequenz-Energie sehr leicht durchzuführen. Mit den üblichen Methoden ist es viel schwieriger ausführbar.

Die traditionelle Erwärmung erfordert grosse Heizanlagen. Die Wärmeverluste sind deshalb auch entsprechend gross. Bei der Hochfrequenz-Erwärmung wird die Wärme im zu behandelnden Stück erzeugt. Obschon der gesamte Wirkungsgrad nur ca. 50 % beträgt, ist er meistens besser als derjenige der Härteöfen. Überhaupt ist mit Hochfrequenz-Energie sehr bequem zu arbeiten. Es herrschen sehr saubere Arbeitsverhältnisse und keine hohen Raumtemperaturen. Die Möglichkeit, die Behandlung mit Hochfrequenz-Energie örtlich oder oberflächlich durchzuführen, lässt im Verhältnis zu den bisherigen Verfahren viel Energie sparen. Die Behandlungskosten werden dadurch gesenkt. Durch das schnelle Erhitzen erhalten wir praktisch keine Zunderbildung. Die Nachbehandlung wird sehr einfach. Sollen Teile vollständig blank bleiben, ist eine

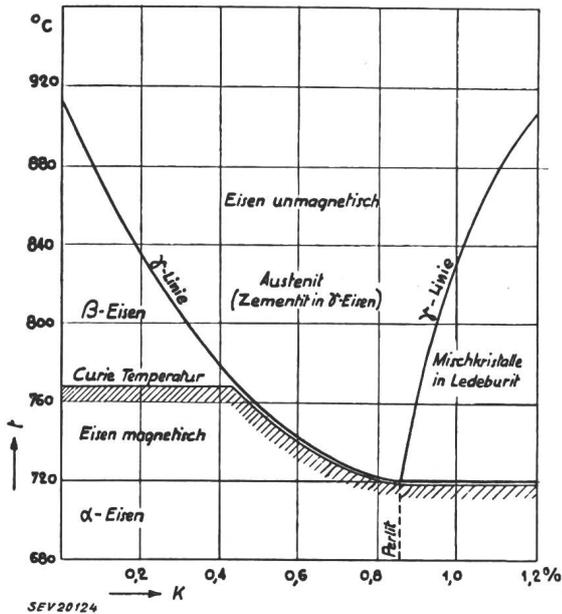


Fig. 14
Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
 t Temperatur in $^{\circ}\text{C}$
 K Kohlenstoffgehalt in %

härtbaren Stahl mit wenig Kohlenstoffgehalt, den sogenannten Einsatzstahl. An den Stellen, wo eine Härtung verlangt wird, bringt man dann durch geeignete Mittel genügend Kohlenstoff in den Stahl. Sodann wird das ganze Stück erwärmt und abgeschreckt. Die erste Methode ist nur mit grosser Energie-Konzentration bei kurzer Behandlungszeit möglich. Erwärmt man nicht genügend rasch, so leitet der Stahl die Wärme sofort ab. Dank des Skineffektes ist die Hochfrequenz-Energie wie ausersien für diesen Prozess. Leistungskonzentrationen von 1,5...3 kW/cm^2 Oberfläche sind üblich. Bei der zweiten Methode, dem normalen Härteverfahren, bringt man den Stahl in ein kohlenstoffreiches Präparat. Der Kohlenstoff diffundiert dann bei hoher Temperatur langsam in den Stahl und man erhält eine an Kohlenstoff reiche Aussenschicht, die leicht gehärtet werden kann. Die Härtetiefe hängt von der Behandlungsdauer ab. Stellen, die nicht gehärtet werden sollen, müssen durch Verkupfern oder durch Zugabe an Material, das vor dem Abschrecken abgedreht wird, geschützt werden. Die Behandlungszeit schwankt zwischen 3...30 h und mehr. Durch Härtebäder kann sie etwas verkürzt werden, doch sind ihre Dämpfe sehr giftig. Mit der Hochfrequenz-Erwärmung ist es möglich, die Behandlungszeit von Tagen und Stunden bei

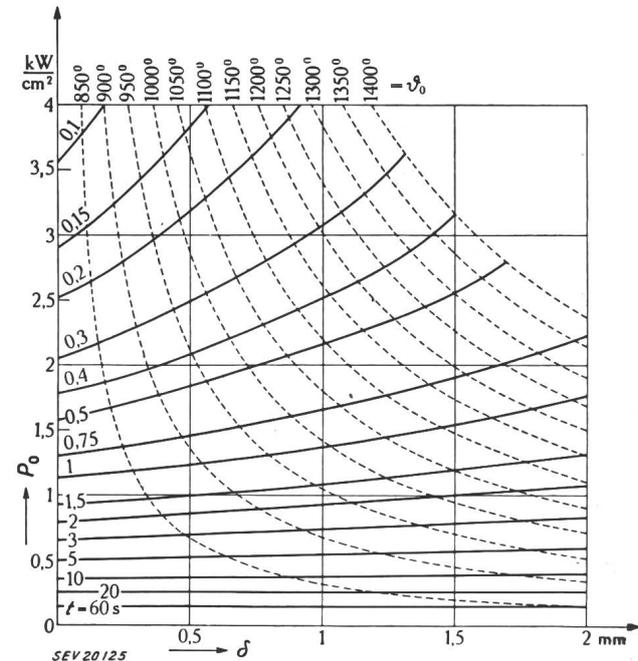


Fig. 15
Härtetiefe δ in Funktion der Oberflächenleistung P_0
 δ Härtetiefe in mm
 P_0 Oberflächenleistung in kW/cm^2
Parameter: t Zeit in s; ϑ_0 Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

Erwärmung in reduzierender oder neutraler Atmosphäre ohne weiteres möglich. Auf diese Weise wird die Härtung von Zahnarztbohrern ermöglicht. Bei Verwendung von Methylalkohol als Abschreckmittel bildet sich im abgeschlossenen Arbeitsraum

um die Arbeitsspule Methylalkohol-Dampf, der ein Oxydieren der Bohrer vollständig verhindert. Innenflächen von Pleuelstangen und Rädern aller Art, die sonst sehr umständlich zu härten sind, können mit Hochfrequenz durch das Einführen entsprechender Spulen äusserst schnell und zuverlässig gehärtet werden.

Sehr bequem zur Bestimmung der Härtetiefe bei Oberflächenhärtung ist Fig. 15¹⁾. Sie stellt die Abhängigkeit der Härtetiefe δ von der Leistungskonzentration P_0 an der Oberfläche für verschiedene Erwärmungszeiten dar. Punktiert eingetragen sind die entsprechenden Oberflächentemperaturen ϑ_0 ; die Kurven gelten für Stahl mit einer Härte-temperatur von 800°C.

Wir unterscheiden Einzelhärtung und Progressivhärtung. Es handelt sich bei Progressivhärtung um eine kontinuierliche Erwärmung auf Härtetemperatur und anschliessendes kontinuierliches Abschrecken bei einem bestimmten Vorschub des Arbeitsstückes. Progressivhärtung wird bei beschränkt zur Verfügung stehender Energie angewendet oder wenn grosse Gleichmässigkeit verlangt wird.

b) Anwendungsbeispiele

Als Beispiel der Einzelhärtung sei das Härten von Nocken von Ventilhebeln angeführt. Bei einem Hebel, der aus Stahl mit 0,55 % Kohlenstoffgehalt besteht, wird mit einem 5-kW-Generator eine Härte von 65°R_c²⁾ erreicht. Mittels eines Drehtisches werden die Hebel automatisch zuerst unter die Heizspule, dann unter die Abschreckbrause gebracht und dann ausgeworfen. Die Produktion beträgt 900 Stück pro Stunde. Früher musste die zu härtende Stelle in ein kohlenstoffreiches Präparat gelegt und dann der ganze Hebel auf Härtetemperatur gebracht werden. Die Vorteile äussern sich in grösserer Wirtschaftlichkeit, besserer Qualität, kleinerem Raumbedarf; die Härteeinrichtung kann in den Produktionsprozess eingeschaltet werden und die Zahl der Arbeitsgänge wird verringert. Die heutigen Produktionskosten betragen nur $\frac{1}{3}$ der früheren Kosten.

Bei der Härtung des Ringes eines Flansches mit einem 6-kW-Generator betragen die Härtezeit 0,6 s und die Härtetiefe 1,5 mm. Die Härte beträgt 62°R_c. Die Bedingungen sind, dass der Ring hart und der Flansch zäh bleiben muss, da der Ring grosser Abnutzung durch das periodische Aufschlagen einer Feder unterworfen ist. Mit keiner andern Methode ist es möglich, so schnell und so wirtschaftlich zu härten.

Vielfach müssen alle Arten von Wellen gehärtet werden und zwar nur an den Stellen, wo sie gelagert sind, um die Abnutzung klein zu halten. Die Welle an sich und besonders der Kern müssen zäh und elastisch bleiben, um alle Arten von mechanischen Beanspruchungen ohne Schaden aufnehmen zu können. Als Beispiel sei das Progressivhärten von Frontachsen von Traktoren angeführt. Fig. 16 zeigt die Achsen von links nach rechts: ungehärtet; ge-

härtet; geätzt; Schnitt. Die Achsen werden zwischen Spitzen eingespannt und automatisch an den gewünschten Stellen gehärtet. Die Länge der Achsen beträgt 32 cm und der Durchmesser 30 mm. Der Vorschub ist ca. 1 m/min und die erreichte Härte-

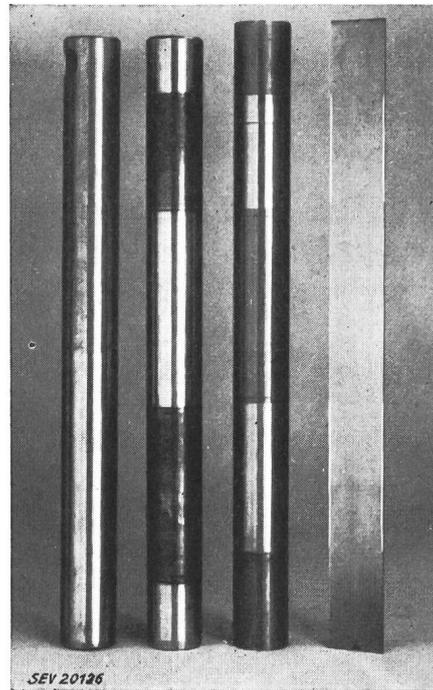


Fig. 16
Härtung von Frontachsen von Traktoren
links: ungehärtet
halblinks: gehärtet
halbrechts: geätzt und geschliffen
rechts: Schnitt

tiefe ist 1 mm bei einer Härte von 61°R_c. Gearbeitet wird an zwei Arbeitsplätzen, so dass eine Produktion von ca. 60 Achsenbolzen pro Stunde erreicht wird (siehe Fig. 17). Um den Verzug äusserst klein zu halten, werden die Achsen in Rotation versetzt.

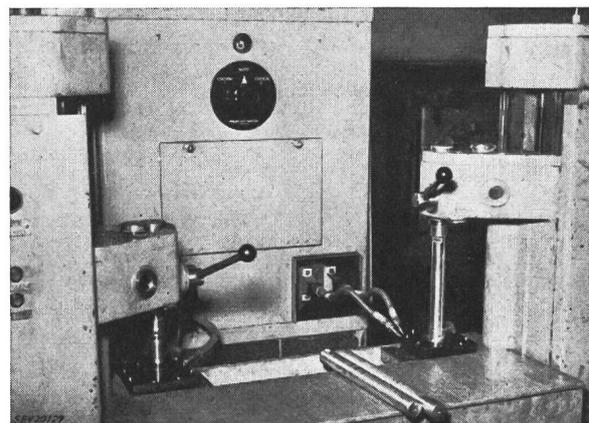


Fig. 17
Härtung von Frontachsen von Traktoren
Arbeitsplätze

Er bleibt selbst bei dünneren Wellen von 6 mm Durchmesser kleiner als $\frac{1}{100}$ mm.

Das Härten von Zahnrädern kann mit Hochfrequenz-Energie sehr leicht und schnell durchgeführt

¹⁾ aus: Wärmeleitungsprobleme bei Hochfrequenz-Oberflächenhärtung. Brown-Boveri-Mitteilungen Bd. 38 (1951), Nr. 11, S. 364.

²⁾ 1°R_c = 1 Grad Rockwell.

werden. Je nach ihrer Grösse wird Einzelhärtung oder Progressivhärtung bevorzugt. Fig. 18 zeigt einen Zahnkranz und ein Schwungrad. In einer Doppeloperation wird einmal der Zahnkranz auf das Schwungrad aufgeschraubt und dann der Zahnkranz gehärtet. Das Schwungrad wird über die

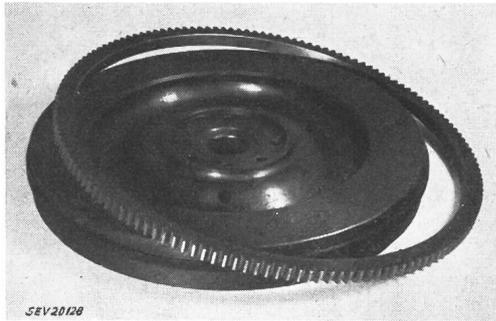


Fig. 18
Zahnkranz mit Schwungrad

Achse im Arbeitstisch gestülpt und der Zahnkranz daraufgelegt (siehe Fig. 19). Beim Auslösen der Operation durch einen Druckknopf werden beide in Rotation versetzt. Nach kurzer Zeit dehnt sich der Kranz aus und fällt in die richtige Lage. Als dann wird automatisch mit grösserer Energiedichte der Zahnkranz geheizt, bis die Härtetemperatur erreicht ist, und anschliessend das Ganze in das Abschreckbad gesenkt. Zur Ausnützung des 25-kW-Generators wird an zwei Plätzen gearbeitet. Während an einem Arbeitstisch abgeschreckt wird, wird am zweiten erwärmt. Die Heizzeit variiert zwischen



Fig. 19
Arbeitstisch für Aufschrupfen und Härten des Zahnkranzes

60 und 85 s, je nach Grösse der Schwunräder. Die Produktion ist beträchtlich höher als mit üblichen Methoden und beträgt 60 Anlasser-Schwunräder pro Stunde. Die Qualität der gehärteten Zahnkränze ist bedeutend besser als bei der früher angewandten Flammenhärtung. Eine grosse Einsparung wird durch den Versand der Ersatzräder erzielt. Heute werden die Zahnkränze so genau hergestellt, dass nur noch die Kränze und nicht das ganze Schwungrad verschickt werden muss. Der Zahnkranz kann durch blosses Erhitzen in heissem Wasser ohne Beeinträchtigung der Härte aufgeschrupft werden!

Die Möglichkeit der sehr grossen Energiekonzentration mit Hochfrequenz wird bei Arbeitsstücken mit kleinem Durchmesser oft für die Oberflächenhärtung angewendet. Fig. 20 zeigt ein Ventil mit hohlem Schaft, in den als Kühlmittel Natrium eingeschlossen wird. Nur der Schaft wird oberflächen-

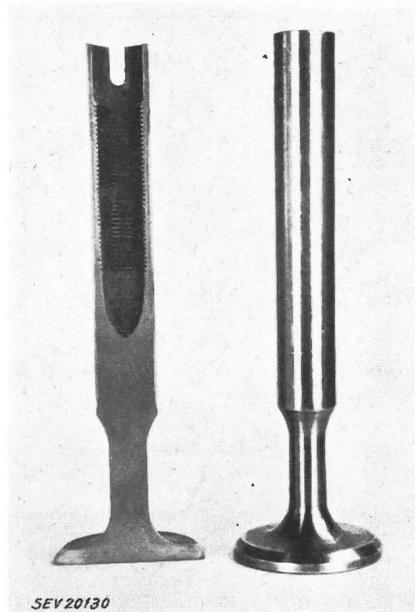


Fig. 20
Gehärtetes, mit flüssigem Natrium gekühltes Ventil

gehärtet und zwar bevor das Loch gebohrt worden ist, um die Verkrümmung auf einem Minimum zu halten. Die totale Heizzeit beträgt 1,6 s. Das Ventil wird zwischen Spitzen gelagert und mit einem Vor-schub von 3 m/min durch den Induktor und die Abschreckbrause geführt. Mit einem 20-kW-Generator wird eine Härtetiefe von 0,6 mm erreicht. Das Ventil besteht aus hochhitzebeständigem Chrom-Nickelstahl. Mit einer andern Härtemethode ist es unmöglich, dieses Produkt herzustellen.

8. Das Anlassen, Vergüten, Spannungsfreimachen

Die lokale Erwärmung des Stahles für das Vergüten oder Anlassen ist ebenso nützlich wie das lokale Härten des Stahles. Beim Zieh- oder Pressvorgang werden die Metallmoleküle verlängert. Es entsteht ein innerer Spannungszustand, der sich in sehr grosser Härte des Materials äussert. Das Weiterbearbeiten wird dann schwierig und kostspielig. Deshalb wird das Material durch Ausglühen wieder weich gemacht. Sofern der Hochfrequenz-Generator in den Fabrikationsprozess eingeschaltet werden kann (z. B. Fliessbandarbeit), ist die lokale Erwärmung sehr wirtschaftlich. Auch dort, wo grosser Wert auf minimale Verzunderung gelegt wird, ist die Hochfrequenz-Energie sehr willkommen. Auch hier kann selbstverständlich wieder unter Schutzgas gearbeitet werden, um vollständig blanke Produkte zu erhalten. Eine grosse Zahl von Anwendungsbeispielen findet man überall in der Maschinenindustrie. Typische Anwendungen sind: das Spannungsfreimachen von Halbfabrikaten nach dem Ziehprozess, das Ausglühen von Elektrodensyste-

men von Elektronenröhren zur Austreibung des Gases, das Vergüten und Anlassen von Serienartikeln, z. B. von Löffeln, Geschosskörpern usw., das Glühen von Stangen zur Pressung von Kugeln für Kugellager, das Erhitzen von Schmiedestücken usw.

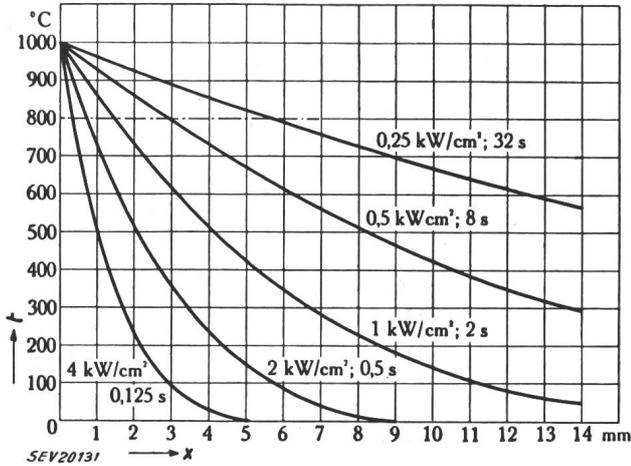


Fig. 21

Verlauf der Temperatur t in Stahl in Funktion des Abstandes x von der Oberfläche
 Parameter: Leistungskonzentration und Behandlungszeit

Durch die Variation der Energiedichte an der Oberfläche kann bei etwas längerer Heizzeit ohne weiteres Durchheizen erfolgen. Fig. 21³⁾ zeigt die Temperaturverteilung im Innern eines Stahles mit einer Oberflächentemperatur von 1000°C bei verschiedenen Energiedichten und Heizzeiten.

Als Beispiel sei das Anlassen von gehärteten Traktorbolzen angeführt. Sie sind durchgehärtet und werden partiell mit Hochfrequenz-Energie erwärmt, um die Sprödigkeit bei Nuten, Löchern,

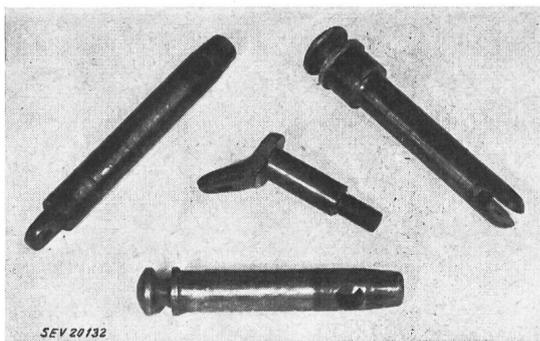


Fig. 22
 Anlassen von Traktorbolzen

Schlitzten und Gewinden zu eliminieren (siehe Fig. 22). Das Anlassen geschieht auf einem Förderband, auf dem entsprechende Vorrichtungen zur Aufnahme der Bolzen vorhanden sind. Separate Spulen zur Behandlung der verschiedenen Stücke sind vorgesehen, die durch Druckknopfbetätigung eingeschaltet werden können. Die Stücke werden von Hand auf das Förderband gelegt und fallen auf der andern Seite in einen Sammelbehälter. Die Anlage wird von einem 20-kW-Generator gespeist und liefert 720 Bolzen in der Stunde. Ein weiteres Bei-

³⁾ aus: Das elektrische Härten und Löten mittels Hochfrequenzwärme. Ind. Organisation, Bd. 20(1951), Nr. 10, S. 305...309.

spiel ist das Anlassen von Differentialgetrieberädern von Traktoren (siehe Fig. 23). Die Getrieberäder sind ofengehärtet. Die genutete Seite mit dem Gewinde muss angelassen werden, um ein Brechen während des Betriebes zu verhindern. Dieser Pro-

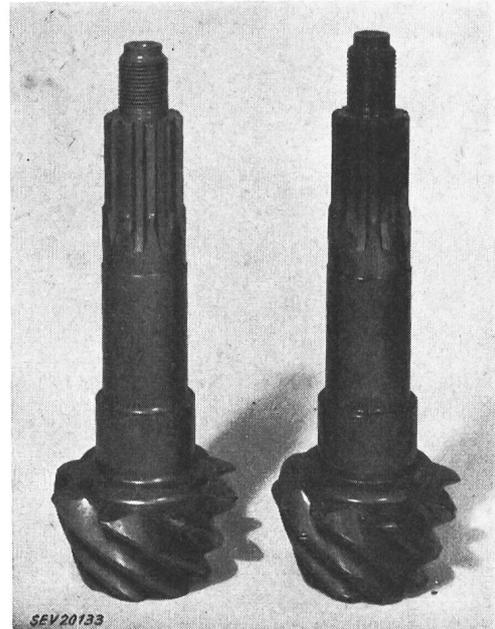


Fig. 23
 Anlassen von Differentialgetrieberädern
 Der genutete Teil mit dem Gewinde des Stückes rechts ist angelassen

zess wird in einem Gestell, das 6 Stück enthält, in 30 s mit einem 20-kW-Generator durchgeführt. Die Produktion beträgt ungefähr 500 Stück pro Stunde.

9. Das Glühen

Die Hochfrequenz-Energie wird bereits mit Erfolg für das Durcherhitzen von Werkstücken und Rohren für Schmiedezwecke, zum Biegen, Stauchen, Pressen und ähnlichen Operationen angewendet.

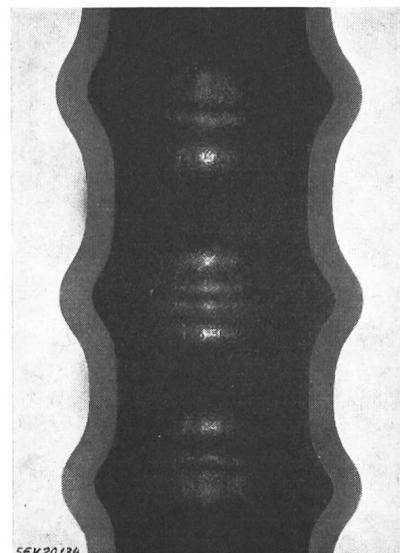


Fig. 24
 Rohr, das an den mit hochfrequenter Energie erwärmten Stellen gestaucht wurde

Dank der schnellen Erhitzung tritt fast kein Materialverlust durch Verzunderung auf und der Generator kann wiederum in die Produktionslinie auf-

Generator ist sofort betriebsbereit, er braucht also keine lange Anwärzeit. Das Arbeiten ist äusserst sauber und unter angenehmen Temperaturverhältnissen. Erzeugt werden hochwertige Spezialstähle, wie Magnetstähle, Chromeisenstähle usw., zum Teil aus Schrott, also einem sehr billigen Ausgangsmaterial.

Als Beispiel sei die zur Zeit grösste in Betrieb stehende Hochfrequenz-Schmelzanlage, die in den Philips-Werken in Holland aufgestellt ist, erwähnt (Fig. 25). Es handelt sich um eine 130-kW-Anlage mit einer Schmelzkapazität von 200 kg Spezialstahl pro Stunde, bei einer Schmelztemperatur von 1600 °C. Der Schmelztiegel kann aus seinen Kontakten ausgefahren und zugleich als Giesspfanne verwendet werden. Eine Charge von 50 kg wird in 10...15 min geschmolzen. Dank der Anwendung einer hohen Frequenz kann das Ausgangsmaterial aus sehr kleinen Stücken Schrott oder Alteisen bestehen. Die für das Schmelzen mit Hochfrequenz je eines kg der folgenden Metalle primär benötigte Energiemenge beträgt ungefähr:

0,7 kWh für Kupfer
1,0 kWh für Nickel
1,0...1,2 kWh für Spezialstahl
0,9 kWh für Aluminium

Die Schmelzzeiten betragen durchschnittlich 10...20 min je nach der Grösse des Generators und der Charge. Für Präzisionsguss, der das Schmelzen von

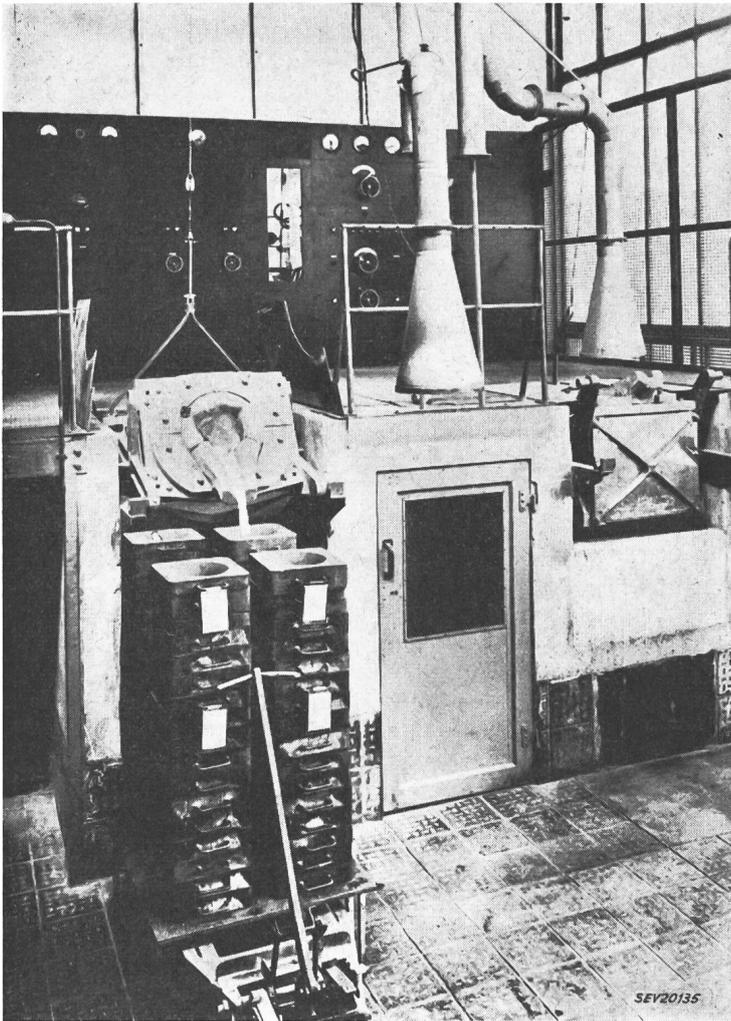


Fig. 25
130-kW-Hochfrequenz-Schmelzanlage

genommen werden. Natürlich könnten die Stücke auch in einem gewöhnlichen Ofen vorgewärmt werden. Die lange Erhitzungszeit würde jedoch die gleichzeitige Erwärmung einer ganzen Menge Stücke erfordern. Durch den sich schnell bildenden Zunder wird aber das Endprodukt qualitativ schlechter. Fig. 24 zeigt den Schnitt durch ein an den erwärmten Stellen gestauchtes Rohr mit einem Durchmesser von 6 cm und einer Wandstärke von 6 mm. Ein 25-kW-Generator liefert genügend Energie, um das Rohr in 35 s zu erwärmen.

10. Das Schmelzen

Im allgemeinen können Chargen mit Motorgeneratoren billiger geschmolzen werden. Wenn jedoch eine Schmelze mit genau definiertem Gehalt an einzelnen Legierungsbestandteilen hergestellt werden soll, ist die Anwendung der Hochfrequenz-Energie wirtschaftlich. Der Vorteil liegt im raschen Ablauf des Schmelzvorganges. Ferner tritt keine Beeinflussung oder Verunreinigung der Schmelze durch andere Elemente auf. Insbesondere erfolgt keine Aufkohlung. Sofern ein extrem reines Produkt erstrebt wird, kann unter Vakuum geschmolzen werden. Der

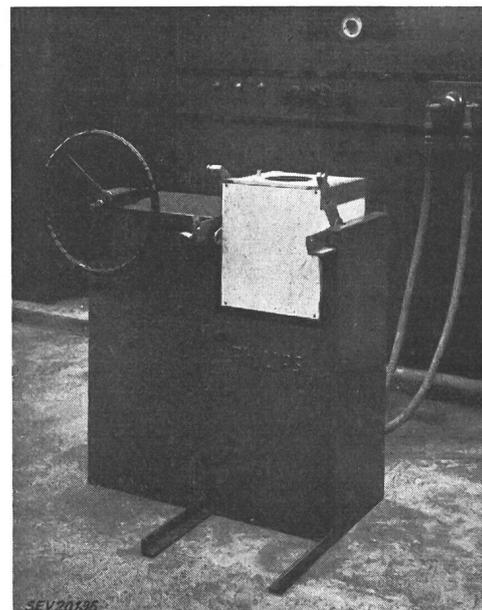


Fig. 26
Schmelztiegel für 25-kW-Generator
Die Energiezuführungsleitungen (rechts im Bilde sichtbar) sind flexibel, so dass der Tiegel bequem gekippt werden kann

relativ kleinen Chargen unter extrem strengen Bedingungen verlangt, werden häufig Hochfrequenz-Schmelzanlagen verwendet. Fig. 26 zeigt einen Schmelztiegel mit einer Kapazität von 15 kg Stahl. Die Charge kann in ungefähr 30 min mit einem 25-kW-Generator geschmolzen werden. Mit einem 50-kW-Generator lauten die Daten: 25 kg in 35 min.

11. Schlussbetrachtung

Diese wenigen Beispiele sollten einen Einblick in die grossen Anwendungsmöglichkeiten, die die Hochfrequenz-Erwärmung von Metallen der Industrie bietet, gegeben haben. Die Anwendung der Hochfrequenz-Erwärmung ist aber nicht überall wirtschaftlich; sie soll ja auch nicht das Allerheilmittel für ein bisher ungelöstes Problem darstellen. In ihrer Anwendung sind sehr schöne Erfolge erzielt worden, die jedoch sehr oft erst durch Um-

konstruktionen des Arbeitsstückes, durch die Verwendung anderen Materials oder durch die Änderung des Produktionsverlaufes erreicht wurden. Die Wirtschaftlichkeit wird oft durch sekundäre Vorteile bestimmt, die sich erst in der Produktion offenbaren. Denken wir z. B. an die bessere Qualität, an den geringeren Raumbedarf, an die bessern und sauberern Arbeitsverhältnisse, an die Verwendung von weniger qualifizierten Arbeitskräften. Arbeitsgänge können vereinfacht und eventuell zusammengelegt werden, der Ausschuss des Endproduktes wird geringer, eine Nachbearbeitung wird überflüssig und billigeres Ausgangsmaterial kann verwendet werden. Dies sind alles Faktoren, die unter Umständen sehr erhebliches Gewicht aufweisen können und die Anschaffung eines Generators rechtfertigen.

Adresse des Autors:

Rudolf Wälchli, Dipl. Ing., Scheideggstrasse 86, Zürich 38.

Kurze Orientierung über die Fernschanlage der Radio-Genossenschaft Basel

Auszug aus dem Vortrag, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel,
von O. Stettler, Zürich

621.397.7(494.232)

Im Hinblick auf die für den Nachmittag der 16. Hochfrequenztagung vorgesehene Besichtigung der Fernschanlage der Radio-Genossenschaft Basel gibt der Autor einen kurzen Überblick über die bisherigen schweizerischen Fernsehversuche und über die Organisation und die Anlagen des Basler Versuchsbetriebes. Die Autoren der anschliessenden Kurzreferate treten näher auf die verschiedenen Anlagen ein.

A propos de la visite de l'installation de télévision de Radio Bâle, prévue durant l'après-midi de la 16^e Journée de la haute fréquence, l'auteur donne un bref aperçu des essais entrepris jusqu'ici en Suisse dans le domaine de la télévision, ainsi que de l'organisation et des installations de l'exploitation d'essai de Bâle. Les auteurs des brèves conférences qui suivent donnent de plus amples renseignements sur les diverses installations.

Die etwas brüske Umleitung vom Thema «Hochfrequenzwärme» zum Thema «Fernsehen» ist durch den auf den Nachmittag vorgesehenen Besuch der Fernschanlage der Radio-Genossenschaft Basel begründet. Dieser Besuch ist dadurch motiviert, dass diese auf schweizerischem Boden bisher umfangreichste Versuchsanlage, die den praktischen Bedürfnissen weitgehend angepasst ist, demnächst in Betrieb genommen wird.

Dieselbe Anlage hat übrigens an der Schweizerischen Mustermesse bereits einen kurzen, dafür aber um so intensiveren Probetrieb bestanden.

Es ist angebracht darauf hinzuweisen, dass schon früher in der Schweiz zeitlich und örtlich begrenzte experimentelle Fernsehsendungen durchgeführt wurden. Erinnert sei an die Demonstrationen an der Schweizerischen Landesausstellung im Jahre 1939, ferner an die Fernsehübertragungen vom Hotel Sonnenberg in Zürich nach dem Kongresshaus im Herbst 1948 anlässlich der schweizerischen Radioausstellung. Dann sind zu erwähnen die Demonstration in geschlossenem Verfahren (also ohne drahtlose Übermittlung) am Comptoir in Lausanne und schliesslich der experimentelle Fernsehbetrieb in Lausanne im abgelaufenen Jahr. Dieser knappe chronologische Bericht über schweizerische Fernsehaktivität wäre unvollständig ohne einen Hinweis auf das sehr bedeutsame Werk schweizerischer Entwicklungsarbeit: das vom verstorbenen Professor Fritz Fischer entwickelte Grossprojektionsverfahren. Eine erste Anlage dieser Art ist bekanntlich vor kur-

zem zur praktischen Erprobung nach den Vereinigten Staaten zum Versand gebracht worden.

Im Hinblick auf die kurze zur Verfügung stehende Zeit kann und darf heute darauf verzichtet werden, allgemein technische, wirtschaftliche, organisatorische oder gar kulturelle Probleme des Fernsehens aufzurollen; dies um so eher als bekanntlich die Absicht besteht, eine der kommenden Hochfrequenztagungen des SEV dem Fernsehen zu widmen.

Wir alle können feststellen, dass gerade in der gegenwärtigen Zeit die Meinungsbildung der schweizerischen Bevölkerung durch Zeitungsartikel und Kundgebungen über den Nutzen und die Gefahren des Fernsehens stark beeinflusst wird. Es ist daher ein glücklicher Umstand, dass nun in Basel sich die Gelegenheit bietet, die verschiedenen Seiten dieses neuen Übermittlungs- und Informationsmittels im praktischen Betrieb studieren zu können.

Unter der Führung und der allgemeinen Verantwortung der Radiogenossenschaft Basel und mit Bewilligung der Generaldirektion der PTT ist durch lokale Initiative ein auf ca. 6 Monate befristeter Fernsehversuchsbetrieb für das Gebiet Basel zustande gekommen. Er dient im wesentlichen dem Studium und der Abklärung aller mit dem Televisionsbetrieb zusammenhängenden Probleme, ferner zur praktischen Ausbildung von Fachleuten, einerseits der Fernsehstudio- und Sendertechnik und andererseits der Empfängertechnik. Die Heranbildung eines Kadres von Fachleuten für die Mon-