Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 23

Artikel: Die induktive Erwärmung von Metallen

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915766

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: 10.07.2025

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

Die induktive Erwärmung von Metallen

Bericht Nr. 16 der Schweizerischen Kommission für Elektrowärme

621.365.5 : 669.04

1. Einleitung

Die induktive Erwärmung hat in der Metallindustrie sowohl für das Schmelzen wie auch für die verschiedensten übrigen Wärmeprozesse in den letzten Jahren immer grössere Bedeutung erlangt. Die Schweizerische Kommission für Elektrowärme (SKEW) hat deshalb versucht, die Bedeutung der induktiven Erwärmung für die schweizerische Industrie zu untersuchen und gleichzeitig die technischen Grundlagen für deren Anwendung zusammenzustellen. Eine im Jahre 1968 eingesetzte Arbeitsgruppe unter dem Vorsitz von *R. Wäspi,* Von Roll, und unter Mitarbeit von *R. Allemann,* Elektrowirtschaft, *R. Betz,* BBC, *A. Büchl,* Metallwerke Dornach, *M. Gabi,* AEK, *M. Grossen,* BKW, *E. Käppeli,* EWZ, *E. Runte,* BBC, und *K. Schaufler,* BBC, konnte in der Folge bereits Ende 1971 die Ergebnisse von deren Studien in zwei Berichten festhalten.

Ein erster Bericht behandelt die marktwirtschaftliche Bedeutung der induktiven Erwärmung in der Schweiz und beinhaltet die Auswertung einer breit angelegten Umfrage. Die Ergebnisse wurden in Form eines Kongressberichtes zuhanden des VII. Internationalen Elektrowärmekongresses 1972 der U.I.E. in Warschau zur Veröffentlichung zusammengestellt. Die wichtigsten Angaben sind aus Tabelle I ersichtlich.

Die Schlussfolgerungen des Kongressberichtes lauten wie folgt:

«In der Metall- und Maschinenindustrie werden, ohne Einbezug der Aluminium-Elektrolyse, z.Zt. 7...8% des Gesamtenergiebedarfs für induktive Erwärmung verwendet. Für die Elektrizitätswerke ist besonders die relativ günstige Benutzungsdauer solcher Anlagen von Bedeutung. Es stehen Anlagen bis zu 4500 kW in Betrieb, und die Tendenz weist auf eine weitere Erhöhung der Anschlussleistungen hin.

In den nächsten Jahren ist mit einer beachtlichen Zunahme solcher Anlagen zu rechnen. Hiefür sprechen vor allem verfahrungstechnische Vorteile sowie die damit verbundenen günstigeren Arbeitsbedingungen. Hervorgehoben wird auch die bessere Wirtschaftlichkeit der induktiven Erwärmung, doch bleibt auch diese abhängig von den Preisverhältnissen auf dem Energiemarkt.»

Der zweite Bericht, der die technischen Grundlagen der induktiven Erwärmung behandelt, ist Gegenstand der nachstehenden Darlegungen. Es werden darin behandelt: Die theoretischen Voraussetzungen, die Erfordernisse für die Frequenzerzeugung, die Eigenschaften und Voraussetzungen für das induktive Schmelzen in Rinnen- und Tiegelöfen sowie die verschiedenen Techniken der induktiven Wärmebehandlung, nämlich der induktiven Erwärmung für die Warmverformung, die Möglichkeiten des induktiven Schweissens, Härtens und Lötens.

Stand der induktiven Erwärmung in der Schweiz im Jahre 1969

Tabelle I

Verwendung	Anzahl installierter Öfen	Installierte Ofenleistung kW	Jahresenergieverbrauch MWh
Schmelzen	166	72 520	149 553
Erwärmen zum Warmverformen	67	25 960	28 625
Härten, Glühen, Schweissen, Löten	ca. 1200	ca. 12 300	ca. 15 500
Total	ca. 1500	ca. 110 000	ca. 195 000

Der Bericht wurde von der Studienkommission der SKEW nach eingehender Stellungnahme zuletzt an der Sitzung vom 5. Januar 1972 zur Veröffentlichung freigegeben. Es soll damit den Sachbearbeitern der Industrie und der Elektrizitätswerke einen für Praktiker bestimmten Überblick über die Möglichkeiten für den vorteilhaften Einsatz der induktiven Erwärmung und die sich dabei stellenden Probleme gegeben werden.

Die SKEW hofft, dass sich daraus eine sinnvolle Anwendung und eine zielgerichtete Förderung der induktiven Erwärmung im Interesse aller Beteiligten ergeben wird.

Schweizerische Kommission für Elektrowärme
Der Präsident:
U. V. Büttikofer

1. Theorie der induktiven Erwärmung

1.1 Das Wesen der Induktionserwärmung und ihre Grundlagen

Die induktive Erwärmung unterscheidet sich dadurch grundsätzlich von den meisten anderen Erwärmungsarten, dass die Wärme im Werkstück selbst entsteht und keine *stoffigen* Übertragungsmittel, auch keine Kontakte, benötigt. Die elektrische Energie wird dem aufzuheizenden Gut durch ein Magnetfeld übertragen (Fig. 1).

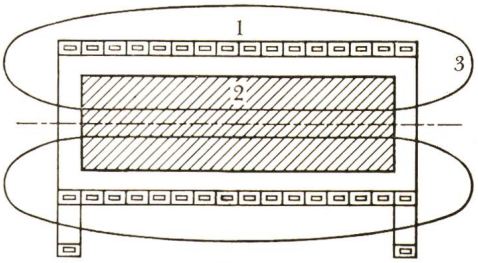


Fig. 1
Magnetisches Wechselfeld bei induktiver Stromübertragung
1 Induktionsspule im Längsschnitt
2 Metallblock
3 magnetisches Wechselfeld

Durch den in der Induktionsspule (Induktor) fliessenden Wechselstrom wird ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, das im zu erwärmenden Metallblock eine Spannung induziert, die je nach dem elektrischen Widerstand des Metalles darin einen bestimmten Strom zur Folge hat. Die über die Induktionsspule zugeführte elektrische Energie wird also vorerst in magnetische Energie und diese alsdann im Werkstück in Wärme umgewandelt.

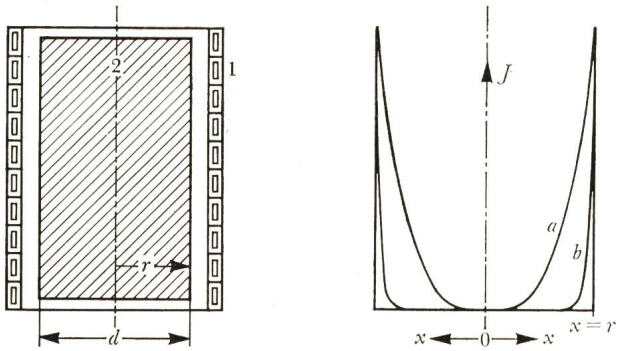


Fig. 2
Stromverteilung über dem Blockdurchmesser

1 Induktionsspule
2 Metallblock
d Blockdurchmesser
x Abstand von der Spulenachse
J Stromdichte über dem Blockdurchmesser
a Stromdichteverlauf bei tiefer Frequenz
b Stromdichteverlauf bei hoher Frequenz

1.2 Eindringtiefe

Infolge Vorhandensein eines Magnetwechselfeldes ist die *Stromverteilung über dem Blockquerschnitt nicht gleichmässig*, wie Fig. 2 schematisch zeigt. Die grösste Stromdichte ist an der Oberfläche des Metallblockes vorhanden und schwächt sich gegen das Zentrum hin stark ab. Als Mass für diese *Stromverdrängung* wird die Eindringtiefe δ verwendet. Als Eindringtiefe bezeichnet man den Abstand von der Blockoberfläche, bei dem die Stromdichte auf 36,7% gegenüber dem Wert an der Oberfläche gefallen ist (Fig. 3). Sie lässt sich ausdrücken durch folgende Beziehung:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{(m)} \qquad (1)$$

wobei ρ = spezifischer, elektrischer Widerstand des Metalles in Ωm bei entsprechender Temperatur

μ relative Permeabilität
f Frequenz in Hz

Zahlenmässige Angaben über praktische Eindringtiefen bei verschiedenen Frequenzen sind in Tabelle II angegeben. Für die Berechnungen wird eine Vereinfachung getroffen, indem angenommen wird, dass der gesamte im Objekt fliessende Strom in einer Zone der Tiefe δ gleichmässig verteilt fliesst. Die durch den induzierten Strom erzeugte Wärme ist zwangsläufig ebenfalls ungleichmässig über den Stückquerschnitt verteilt und zwar in noch stärkerem Masse als der Strom (Fig. 3), d.h. die Erwärmung findet hauptsächlich (zu ca. 90%) in der Zone der Eindringtiefe statt.

1.3 Induzierte Leistung

Die in einem zylindrischen vollen Werkstück induzierte Leistung untersteht folgendem Gesetz:

$$P_i = 5\, r_0\, H_0^2 \sqrt{\mu} \sqrt{\rho} \sqrt{f}\, F \quad \text{(W/m)} \qquad (2)$$

wobei:

P_i induzierte Leistung in Watt pro m Stücklänge
r_0 Werkstückradius in m
μ relative Permeabilität
ρ spezifischer Widerstand in Ωm
H_0 Feldstärke in A/m
F Leistungsübertragungskonstante

Der in Fig. 4 dargestellte Verlauf der Leistungsübertragungskonstante zeigt eindeutig, dass eine wirkungsvolle Erwärmung erst möglich wird, wenn das Verhältnis Stückdurchmesser/Eindringtiefe genügend gross ist. Es besteht also ein kritischer Durchmesser, unter welchem bei gegebener Eindringtiefe die Wärmebildung (und auch der Wirkungsgrad) stark sinkt.

Eindringtiefe verschiedener Metalle bei verschiedenen Frequenzen

Tabelle II

Metall	Eindringtiefe (ca.) mm			
	50 Hz	1000 Hz	10000 Hz	500000 Hz
Kupfer (20 °C)	10	2,2	0,7	0,1
Kupfer (1000 °C)	32	7	2,2	0,32
Stahl, magnetisch [1]) (20...600 °C)	10	2,2	0,7	0,1
Stahl, unmagnetisch (1200 °C)	76	17	5,3	0,75
Austenitischer Stahl (20...1200 °C)	90	20	6,3	0,9
Messing (20...700 °C)	27	6	2	0,27
Aluminium (legiert) (20...500 °C)	22	5	1,6	0,22

[1]) nur annähernd gültig, weil von Feldstärke abhängig.

Umgekehrt besteht bei gegebenen Stückabmessungen eine kritische, von den Metalleigenschaften abhängige Frequenz, unter welcher eine Erwärmung nur schlecht zustande kommt. Da sich die Kurve in Fig. 4 asymptotisch dem Wert 1 nähert, ist die Anwendung einer wesentlich höheren Frequenz als die kritische Frequenz von der Leistungsübertragung aus betrachtet an sich nicht nachteilig.

Gl. (2) enthält noch folgende, für die Praxis sehr wichtige Zusammenhänge:

a) Die Grösse der induzierten Leistung wird in einem hohen Mass durch die magnetische Feldstärke, d.h. durch den fliessenden Induktorstrom bestimmt. Wird z.B. letzterer verdoppelt, so vervierfacht sich die übertragene Leistung. Es ist folglich von Interesse, mit hohen Induktorströmen zu arbeiten, wobei die obere Grenze vorwiegend durch die Kühlung der Spule bestimmt wird.

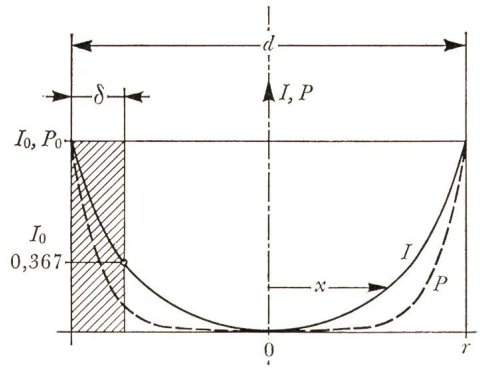


Fig. 3
Strom- und Wärmeverteilung über dem Blockquerschnitt

x Abstand von der Spulenachse
d Durchmesser des Metallblockes
δ Eindringtiefe
I Stromverteilung über dem Blockquerschnitt
P Wärmeverteilung über dem Blockquerschnitt am Anfang der Aufheizperiode unter Vernachlässigung der Wärmeverluste
I_0, P_0 Werte an der Blockoberfläche

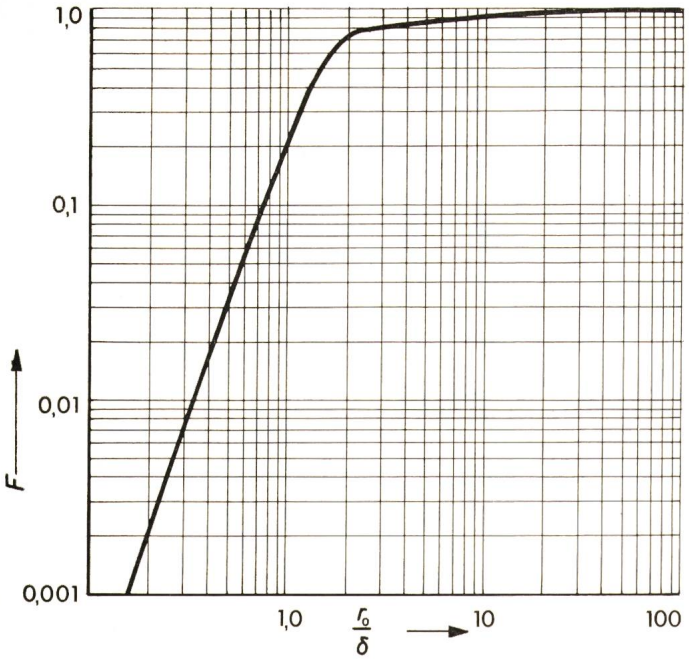


Fig. 4
Leistungsübertragung

F Leistungsübertragungskonstante
r_0 Werkstückradius
δ Eindringtiefe

b) Die Frequenz spielt in der Bestimmung der induzierten Leistung ebenfalls eine wesentliche Rolle. Bei steigender Frequenz steigt die Leistung proportional der Quadratwurzel des Frequenzanstieges.

Prinzipiell wählt man eine möglichst hohe Arbeitsfrequenz, wobei aber in der Praxis Einschränkungen bezüglich Wirtschaftlichkeit und besonderen Erwärmungsfällen gelten.

c) Die physikalischen Eigenschaften des Werkstückes beeinflussen erwartungsgemäss auch die induzierte Leistung. Letztere ist bei gegebener Frequenz und Induktorstrom bei einem magnetischen Material grösser als bei einem unmagnetischen. Ebenfalls ist sie höher, je grösser der spezifische Widerstand des Werkstückes ist. In anderen Worten, wird beispielsweise wesentlich mehr Leistung in einem kalten Stahlblock induziert als in einem Kupferblock ähnlicher Abmessung bei gegebener Frequenz und Ampèrewindungen im Induktor.

1.4 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der induktiven Erwärmung spielt erwartungsgemäss eine wichtige Rolle. Man muss zwischen dem Wirkungsgrad der Erzeugungsquelle und dem Wirkungsgrad der Induktionsspule unterscheiden.

1.4.1 Wirkungsgrad der Energiequelle. Er wird bei der Behandlung der verschiedenen Erzeugungsquellen (Abschn. 2) erklärt.

1.4.2 Elektrischer Wirkungsgrad der Induktionsspule. Die beschriebenen Vorgänge, wie Stromverdrängung und Joulesche Erwärmung, sind naturgemäss nicht nur für das Werkstück gültig, sondern ebenfalls für die Induktorspule. Der Spulenstrom wird in der dem Werkstück zugewandten Zone verdrängt, wodurch eine Erhöhung der spezifischen Stromdichte entsteht, die ihrerseits die Kupferverluste der Spule gegenüber einer solchen mit gleichmässig verteiltem Strom erhöht.

Der Spulenwirkungsgrad η_s ist in erster Näherung folgendem Gesetz unterstellt:

$$\eta_s = \frac{1}{1 + C\sqrt{\frac{\mu_s\,\rho_s}{\mu_w\,\rho_w}}} \qquad (3)$$

C Formkonstante, von der Kopplung zwischen Spule und Werkstück abhängig (im idealen Fall ist $C = 1$)
μ_s, μ_w relative Permeabilität des Spulenmaterials bzw. Werkstückmaterials
ρ_s, ρ_w spezifischer Widerstand des Spulenmaterials bzw. Werkstückmaterials

Der Spulenwirkungsgrad hängt im wesentlichen nur von der geometrischen Anordnung und den Abmessungen der Spule und des Stückes und von deren Materialeigenschaften ab.

Da die Spulen fast ausnahmslos aus wassergekühltem Kupfer bestehen, dessen spezifischer Widerstand konstant bleibt und dessen relative Permeabilität = 1 ist, kann Gl. (3) vereinfacht werden:

$$\eta_s = \frac{1}{1 + C'\sqrt{\frac{1}{\mu_w\,\rho_w}}} \qquad (4)$$

wobei sich die Konstante C' von C in Gl. (3) nach Massgabe der Grösse von ρ_s unterscheidet. Es sei als Beispiel eine wassergekühlte Kupferspule als Induktor und ein Kupferblock als Werkstück angenommen ($\mu_w = \mu_s = 1$).

Bei idealer Kopplung und Vernachlässigung des Streuflusses ist der maximale Spulenwirkungsgrad bei Beginn der Erwärmung 50%. Mit steigender Temperatur steigt der spezifische Widerstand des ungekühlten Kupferblocks (ρ_w), so dass der

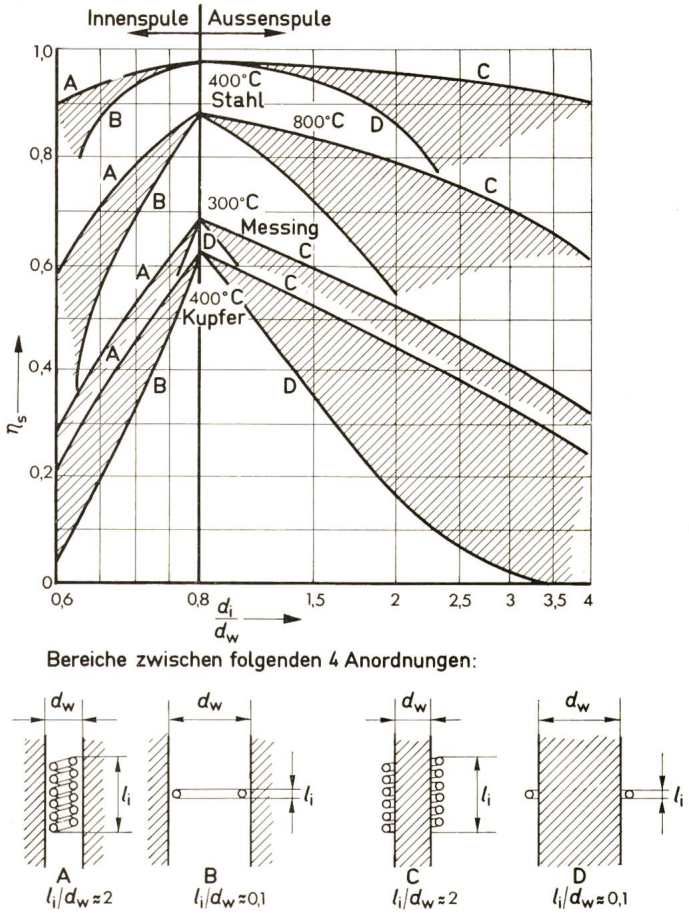


Fig. 5
Spulenwirkungsgrad η_s von Zylinderinduktoren bei verschiedenen Anordnungen $\left(\frac{r_0}{\delta} > 2\right)$

d_i Spulendurchmesser
d_w Innen- oder Aussendurchmesser der Spule
l_i Spulenlänge

Wirkungsgrad mit fortschreitender Erwärmung grösser wird. Diese Erscheinung gilt allgemein bei nichtmagnetischen Metallen. Bei magnetischen Werkstoffen, wie z.B. gewöhnlichem Stahl, sind die Verhältnisse wegen dem Bestehen des Curiepunktes, d.h. die Temperaturgrenze (ca. 680 °C), worüber eine Umwandlung von magnetischem in den unmagnetischen Zustand geschieht, etwas komplizierter. Unterhalb des Curiepunktes ist das Produkt $\mu_w \rho_w$ sehr gross und der Wirkungsgrad entsprechend hoch (über 90%). Oberhalb des Curiepunktes sinkt das Produkt $\mu_w \rho_w$ plötzlich auf den Wert ρ_w, wodurch der Spulenwirkungsgrad merklich sinkt. Mit weiter ansteigender Temperatur nimmt er im allgemeinen wieder leicht zu.

Einige Angaben über Spulenwirkungsgrade für geometrisch einfache Anordnungen sind in Fig. 5 dargestellt.

1.5 Mechanische Kräfte

Als Folge der Wechselwirkung zwischen den in der Induktorspule und im Werkstück fliessenden Strömen entstehen im Stück sowie in der Spule sehr bedeutende Kräfte, die bei der Anwendung unbedingt berücksichtigt werden müssen. Beim Schmelzen sind die Kräfte für die Badbewegung verantwortlich. Im wesentlichen ist die magnetische Kraft direkt proportional der induzierten Leistung und umgekehrt proportional der Quadratwurzel der Frequenz. Die mechanischen Kräfte werden also bei niedrigen Frequenzen bedeutend sein, währenddem sie bei der Hochfrequenz-Erwärmung praktisch vernachlässigbar sind.

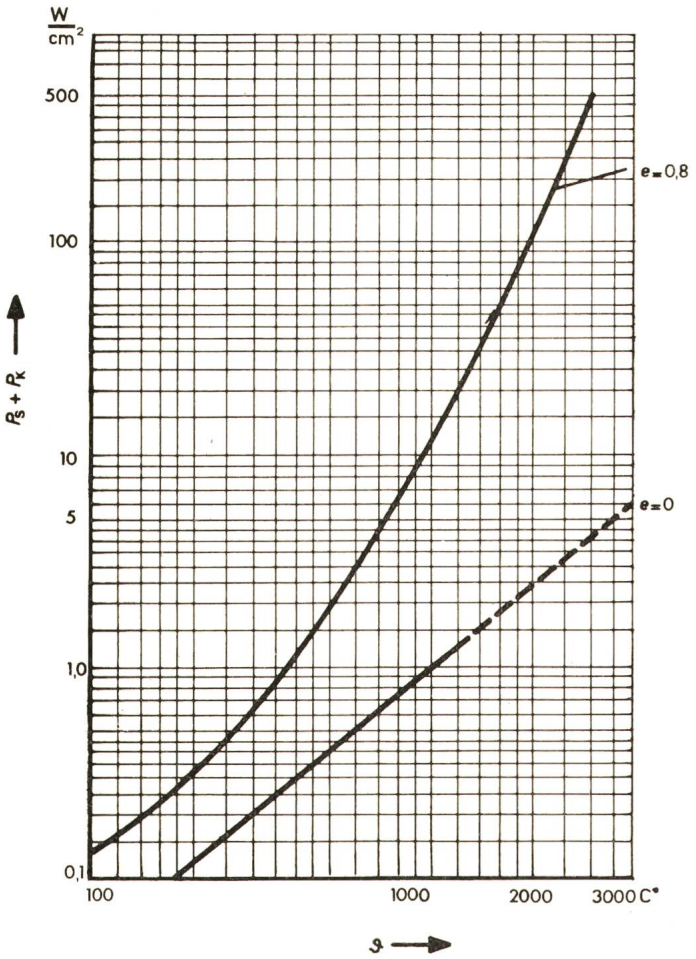


Fig. 6
Wärmeverlust durch Strahlung P_S und Konvektion P_K in Funktion der Oberflächentemperatur ϑ_0
Parameter ist der relative Strahlungskoeffizient e der betreffenden Oberfläche. Für glühende, leicht oxydierte Metallteile ist $e \approx$ 0,7...0,9. Für reine Konvektion ist $e = 0$

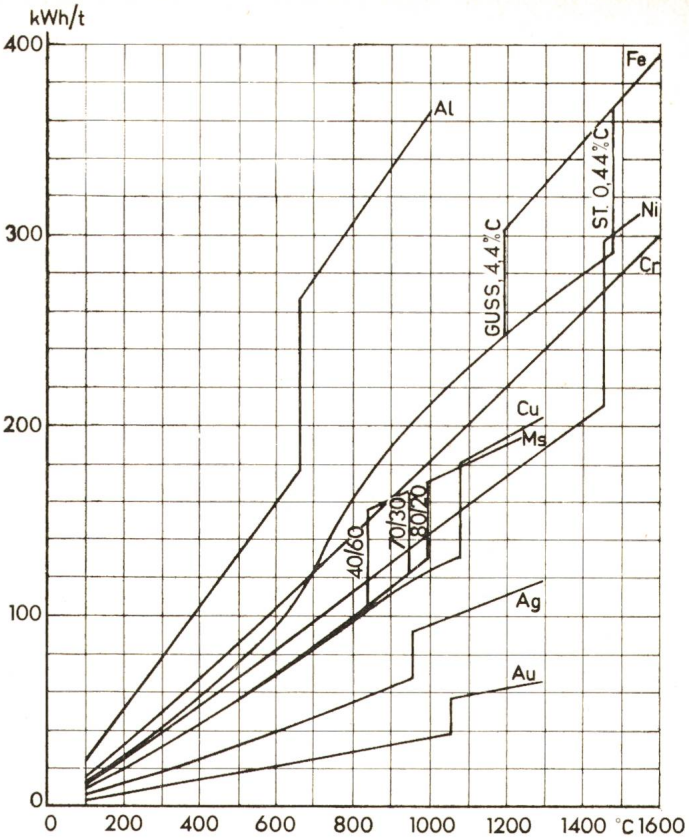


Fig. 7
Nutzenergiebedarf E_t zur Erwärmung verschiedener Metalle

		Spez. Gewichte fest	flüssig		Schmelztemperatur
Fe	=	7,86	6,88	g/cm³	1505 °C
Al	=	2,70	2,38	g/cm³	658 °C
Ag	=	10,50	9,51	g/cm³	960 °C
Au	=	19,29		g/cm³	1063 °C
Cu	=	8,93	8,21	g/cm³	1080 °C
Ni	=	8,80		g/cm³	1460 °C
Cr	=	7,10		g/cm³	1765 °C
MS 70/30	=	8,40...8,70		g/cm³	950 °C

1.6 Blindleistung

Eine unvermeidliche Folge der magnetischen Leistungsübertragung ist das Bestehen eines Streuflusses. Dieser ist in der Regel erheblich und hängt von der spezifischen Anwendung und von den geometrischenVerhältnissen zwischen Spule und Werkstück ab. Folglich erscheint an den Spulenklemmen zusätzlich zu der Wirklastkomponente eine entsprechende Blindlast. Die relative Blindleistung ist um so grösser, je höher der Abstand zwischen Spuleninnendurchmesser und Werkstückaussendurchmesser ist. Als Mass des Verhältnisses Wirkleistung zu Scheinleistung einer belasteten Spule dient die Angabe des cos φ. Üblicherweise schwankt dieser bei der induktiven Erwärmung zwischen den Werten 0,05 und 0,3, je nach Last, Abmessungen und Frequenz. Im allgemeinen steigt die Blindleistung der Spule einer gegebenen Induktor- und Lastkombination mit der Quadratwurzel der Frequenz. Auf jeden Fall muss die Blindleistung durch das Hinzuschalten von geeigneten Kondensatoren vor dem Anschluss an die Erzeugungsquelle kompensiert werden.

1.7 Wärmeverluste

Nicht alle Wärme, die im Werkstück erzeugt worden ist, bleibt als Nutzwärme darin erhalten. Durch Wärmeverluste wird ein Teil wieder an die Umgebung abgegeben. Diese sind hauptsächlich:

Wärmeleitungsverluste
Konvektionsverluste
Strahlungsverluste

Währenddem die Wärmeleitung nur bei Schmelzöfen von Bedeutung ist (Verluste durch das Ofenfutter), spielen die Strahlungsverluste bei der induktiven Erwärmung oberhalb 700 °C eine wichtige Rolle. Spezielle Massnahmen sind erforderlich, um sie auf ein tragbares Mass zu reduzieren. Fig. 6 gibt einen Überblick über die zu erwartenden Konvektions- und Strahlungsverluste bei verschiedenen Temperaturen.

1.8 Wärmebilanz und Energieverbrauch

Unter Berücksichtigung der wichtigsten obenerwähnten Faktoren ist die Aufstellung der globalen Wärmebilanz für die verschiedenen Erwärmungsfälle möglich. Da nicht alle Faktoren rechnerisch genau ermittelbar sind, stützen sich die Werte für den Energieverbrauch weitgehend auf Messergebnisse in der Praxis.

In Fig. 7 ist die theoretisch erforderliche Energie verschiedener Rohstoffe, in kWh/t ausgedrückt, dargestellt. Diese Energie entspricht der Nutzwärme (Fig. 8) nach Abzug aller Verluste.

2. Die Frequenzerzeugung

2.1 Grundsätzliches

Für die induktive Erwärmung kommen vorwiegend Frequenzbereiche gemäss Tabelle III in Frage.

Bei Netzfrequenz kommen sehr oft dreiphasige Systeme zur Anwendung, währenddem Mittelfrequenz und Hochfrequenz fast ausnahmslos einphasig erzeugt werden.

Die zur Anwendung gelangende Energiequelle zur Erzeugung der gewünschten Frequenz kann in einem stationären oder fahrbaren Aggregat untergebracht sein. Darin sind ebenfalls die Geräte zur Steuerung, zum Schutz der Last und der Erzeugung, zur Messung, zur Blindleistungskompensation und bei 50-Hz-Anlagen eventuell zur Lastsymmetrierung eingebaut.

Es ist technisch ohne weiteres möglich, die Anlagesteuerung sowie die Blindleistungskompensation weitgehend zu automatisieren und somit die Anforderungen an das Bedienungspersonal stark herabzusetzen.

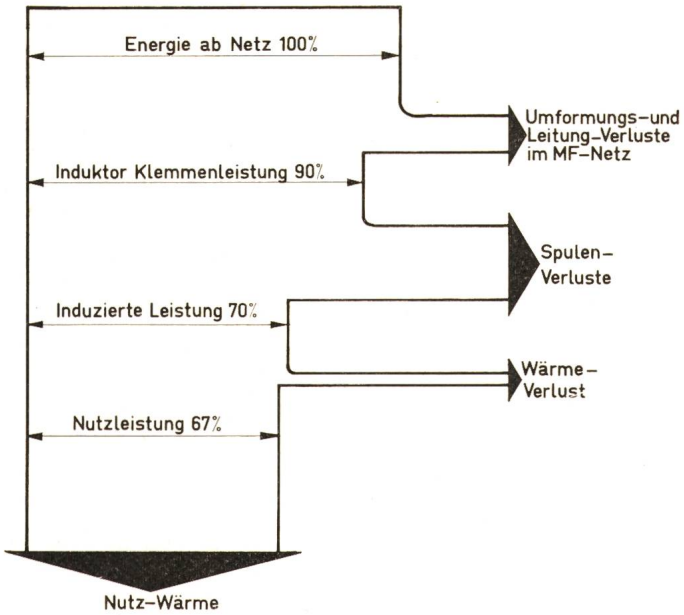


Fig. 8
Energiebilanz einer typischen Mittelfrequenz-Induktions-Schmelz- oder Erwärmungsanlage

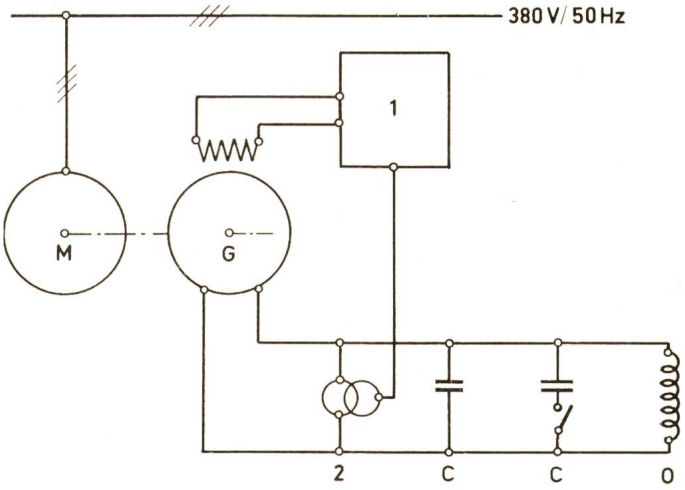


Fig. 9
Prinzipschema einer Mittelfrequenzanlage mit rotierendem Umformer

C Parallelkondensatoren-Batterie
G Mittelfrequenz-Generator
M Antriebsmotor mit Überlastschutz
O Ofenspule/Induktor
1 elektronisches Erregeraggregat
2 Spannungswandler

Die verschiedenen Erzeugungsmöglichkeiten der Frequenzen oberhalb der Netzfrequenz sind nachfolgend erläutert.

2.2 Energiequellen

2.2.1 Rotierende Umformer. Prinzipiell besteht ein rotierender Umformer aus einem Drehstrommotor und einem Einphasen-Generator. Es kommen sowohl getrennte als auch Monobloc-Ausführungen auf den Markt, wobei zu bemerken ist, dass die wassergekühlte vertikale Monobloc-Bauart sich in Europa weitgehend eingeführt hat. Sie ist in Einheiten bis ca. 1000 kW erhältlich.

Zwei Generatorschaltungen werden z. Zt. hauptsächlich verwendet: Die Maschine mit Wechselstrompolen nach *Lorenz-Schmidt* für die Erzeugung der tiefen Frequenz bis ca. 3000 Hz und die Schwingfeldmaschine nach *Guy* für die Erzeugung darüberliegender Frequenzen. Die Antriebsmaschine ist im allgemeinen ein Asynchronmotor mit einer Drehzahl von 3000 Us. min (für grössere Einheiten 1500 U./min). Er hat wegen der grossen mechanischen Trägheit des gesamten Rotorgebildeschwere Anlaufbedingungen zu erfüllen und erfordert bei Niederspannungsanschluss die Verwendung eines Dreieck/Stern-Anlassers. Rotierende Umformer sind einfach zu bedienen und verlangen nur mässige Wartung (Schmierung). Der Gesamtwirkungsgrad liegt zwischen 80 und 90%. Bei Teillast sinkt er

Frequenzbereiche

Tabelle III

Benennung	Frequenzbereich (ca.)	Erzeugung
Netzfrequenz (NF)	50 oder 60 Hz	Versorgungsnetz
Mittelfrequenz (MF)	0,1...10 kHz	Frequenzwandler Rotierende Umformer Frequenz-umrichter
Hochfrequenz (HF)	100 000... 1 000 000 Hz 0,1...1 MHz	Röhren-generatoren

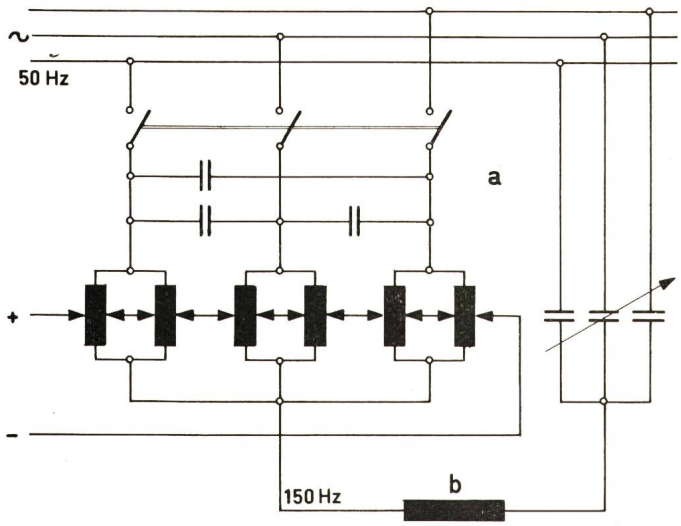


Fig. 10
Elektrisches Prinzipschaltbild eines Frequenzvervielfachers
a statischer Frequenzwandler für $f = 50/150$ Hz
b Ofenspule

rasch ab. Nachteilig kann der relativ hohe Lärmpegel empfunden werden.

Das Prinzipschema einer vollständigen MF-Erzeugungsanlage mit rotierenden Umformern ist in Fig. 9 dargestellt.

2.2.2 Statische Erzeuger. Es sind prinzipiell zwei Arten statischer Frequenzerzeuger zu unterscheiden:

a) Der statische Frequenzwandler, auch Frequenzvervielfacher genannt, der ein Mehrfaches der Netzfrequenz erzeugt;
b) Der statische Frequenzumrichter, der im Prinzip eine beliebige Frequenz erzeugen kann.

2.2.2.1 Frequenzvervielfacher. Das Anwendungsgebiet ist auf die Erzeugung der tieferen Frequenzen, üblicherweise unterhalb 500 Hz, beschränkt, zur Speisung von Schmelzanlagen und von grösseren Schmiedeblock-Erwärmungsanlagen. Bei diesem Frequenzwandler (Fig. 10) werden die Amplituden des dreiphasigen Drehstromnetzes so auf einen Schwingungskreis in Serieresonanz geschaltet, dass hier die dreifache Netzfrequenz entsteht.

Der Höchstwert der Leistung liegt in diesem Kreis vor, wenn er auf Resonanz abgestimmt ist (Fig. 11). Durch Schaltung der Kondensatorbatterie lässt sich eine einfache Leistungsregulierung vornehmen. Der Wirkungsgrad bei der optimalen Anpassung ist relativ hoch (ca. 90...92%). Der Hauptvorteil dieser

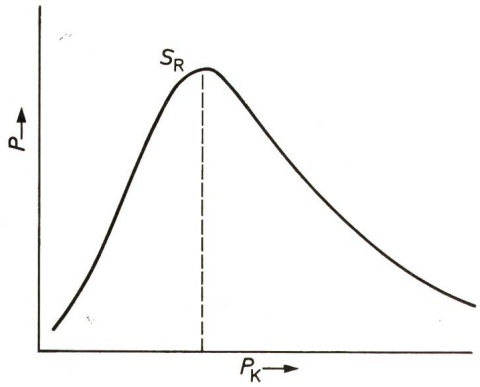


Fig. 11
Leistungsverhalten eines Ofenschwingkreises in Serieschaltung in Abhängigkeit von der Leistung einer Kondensator-Batterie
P Ofenleistung
P_K Kondensator-Batterie-Leistung
S_R Serienresonanz

Lösung ist die relative Einfachheit der Schaltung, solange keine besonderen Massnahmen notwendig werden zum Filtrieren der netzseitigen Harmonischen.

2.2.2.2 Statische Frequenz-Umrichter. Obschon diese Umrichterart längst bekannt und auch kommerziell im Betrieb ist, hat sie erst in den letzten Jahren einen vollen Aufschwung dank der Einführung rasch schaltender Leistungsthyristoren genommen. Es gibt sehr viele mögliche Schaltungen mit serie- oder parallelgeschalteten Kondensatoren. Allgemein wird die dreiphasige Netzspannung in einem gesteuerten oder ungesteuerten Gleichrichter gleichgerichtet und anschliessend in eine einphasige Wechselspannung umgerichtet (Fig. 12). Die Frequenz kann entweder fest gewählt werden (frequenzstarrer Betrieb) oder durch die Eigenfrequenz des als Schwingkreis wirkenden Lastkreises gebildet werden (frequenzelastischer Betrieb). Die letztere Betriebsart wird bevorzugt, weil sie ein Nachstimmen der Kondensatorbatterie bei schwankenden Lastverhältnissen erübrigt, da sich die Frequenz automatisch nachstimmt.

Prinzipiell wäre die Erzeugung jeder beliebigen Frequenz möglich. In Wirklichkeit aber begrenzt die Freiwerdezeit, d.h.

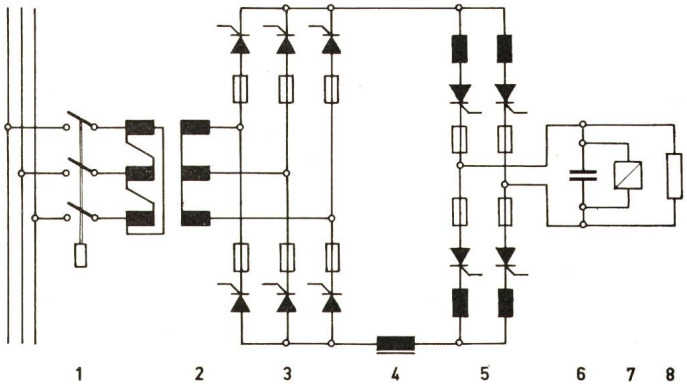


Fig. 12
Prinzipschema eines statischen Frequenzumformers
1 Leistungsschalter
2 Stromrichter-Transformator
3 Gleichrichter
4 Gleichstromzwischenkreis mit Glättungsdrosselspule
5 Wechselrichter
6 Parallelkondensator
7 Starteinrichtung
8 Ofenspule

die Zeit, die für den Abbau der in der Halbleiterschicht erzeugten elektrischen Ladung benötigt ist, die Frequenz nach oben. Technische Fortschritte werden in Richtung kürzerer Freiwerdezeit erwartet, so dass der Frequenzbereich des statischen Umrichters sich nach oben noch erweitern wird. Zur Zeit liegt die praktische obere Grenze bei ca. 10000 Hz.

Der wesentliche Vorteil des statischen Frequenz-Umrichters liegt in dem sehr hohen erzielten Wirkungsgrad, ca. 94%, der auch bei Teillast erhalten bleibt (Fig. 13). Ebenso vorteilhaft ist die Frequenzanpassfähigkeit des statischen Umrichters, die die übliche automatische cos φ-Regelung der Last sehr vereinfacht, in manchen Fällen sogar erübrigt.

Der geringere Lärmpegel anderseits erlaubt eine Aufstellung im Arbeitsraum, vorausgesetzt, dass ein genügender Staubschutz der Anlage gewährleistet ist. Die statischen Frequenz-Umrichter können in jeder Grösse geliefert werden, so dass Anlagen von einigen MW ohne weiteres projektiert werden können. Solche Anlagen sind jetzt schon auf alle Fälle wirtschaftlicher als ähnliche Anlagen mit rotierenden Umformern.

2.2.3 Röhren-Generatoren. Röhrengeneratoren werden zur Erzeugung von HF-Strömen im Bereich über 100000 Hz all-

gemein verwendet. Sie benützen ausnahmslos eine oder mehrere Hochvakuum-Elektronenröhren, deren Anodenspannung durch einen Hochspannungs-Gleichrichter erzeugt wird. Letzterer wird entweder mit Thyratrons oder mit Siliziumdioden bestückt. Die HF-Wechselspannung wird durch Selbsterregung in einem Schwingkreis erzeugt. Durch induktive Kopplung wird die HF-Leistung dem Schwingkreis entnommen und dem Induktor zugeführt (Fig. 14).

Ähnlich wie beim statischen Umrichter ist die erzeugte Frequenz weich, d.h. sie passt sich den Lastverhältnissen automatisch an.

Wegen des verhältnismässig hohen Spannungsabfalls in der Röhre und der notwendigen Heizleistung, die zur Erhaltung der Kathodenemission in der Röhre benötigt wird, ist der globale Wirkungsgrad eines HF-Generators verhältnismässig niedrig, selten höher als 65%, je nach Leistung und Bauart. Deshalb ist die HF-Energie relativ teuer, sie kommt trotzdem zur Anwendung, weil deren Vorteile über die tieferen Frequenzen für besondere Erwärmungsfälle unbestreitbar sind. Hochfrequenz-Industriegeneratoren sind gegenwärtig im Leistungsbereich zwischen 1 und 1000 kW auf dem Markt erhältlich.

3. Das induktive Schmelzen

Induktions-Schmelzöfen haben in den letzten 10–20 Jahren in der Metallindustrie ihren festen Platz errungen. 1969 wurden in der Schweiz ca. 150 Mill. kWh elektrische Energie in Induktionsschmelzöfen verbraucht. Dabei war in dieser Zeit die Konkurrenz durch andere Brennstoffe wie Öl, Gas und Kohle sehr stark. Induktionsöfen treten aber nicht nur anstelle von mit Brennstoff beheizten Öfen, sondern ergänzen auch sinnvoll den Lichtbogenofen und andere Verfahren. Für ein bestimmtes Fabrikationsprogramm können also verschiedenste Schmelzaggregate eingesetzt werden.

Im folgenden werden die Möglichkeiten und Eigenschaften der induktiven Schmelzöfen für die Schmelzung von

- Stahl
- Gusseisen
- Schwermetallen
- Leichtmetallen

erläutert.

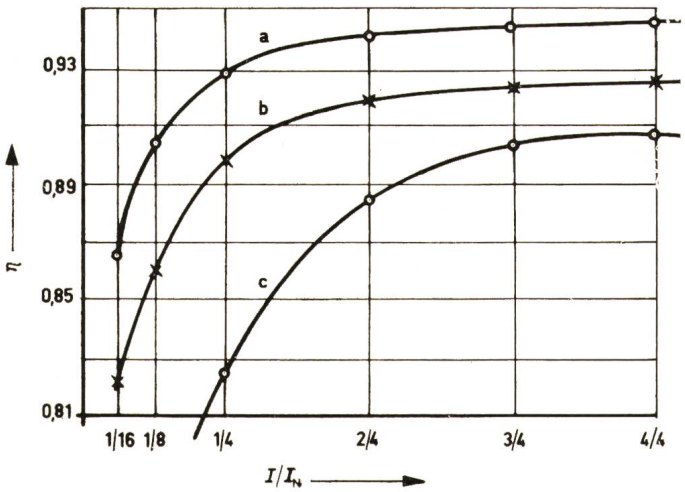


Fig. 13
Wirkungsgrade von MF-Thyristorumrichtern in Abhängigkeit der Last *I*

a Parallel-Schwingkreis-Umrichter (ohne Wechselrichtertransformator)
b Reihen-Schwingkreis-Umrichter (mit Wechselrichtertransformator)
c Wirkungsgrad eines Maschinenumformers zum Vergleich
η Wirkungsgrad;
I/I_N Lastverhältnis

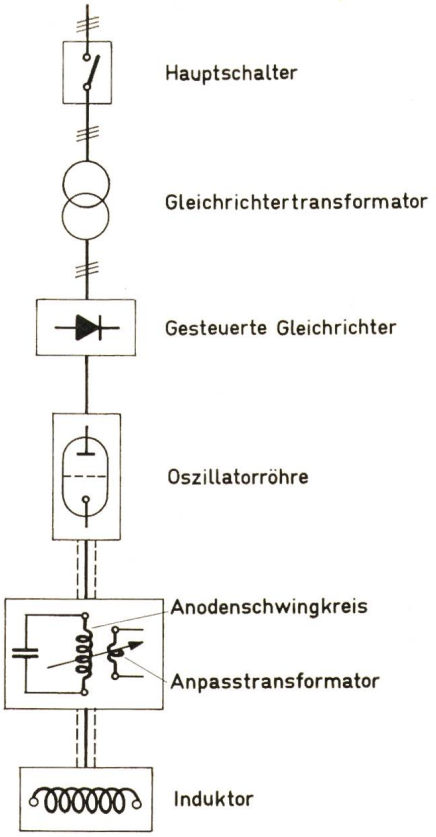


Fig. 14
Prinzipschema eines Hochfrequenz-Industriegenerators

3.1 Metallurgische Betrachtungen bei der Schmelzung von Metallen

3.1.1 Die Stahlerzeugungsverfahren. Der bevorzugte Anwendungsbereich des Induktionsofens bei der Stahlerzeugung soll hier im Lichte der heute möglichen konventionellen Verfahren herauskristallisiert werden. Es sind folgende grossindustrielle Stahlerzeugungsverfahren zu betrachten:

1. Siemens-Martin-Verfahren
2. Linz-Donawitz-(LD)Verfahren
3. Bessemer-Verfahren
4. Thomas-Verfahren
5. Kaldo-Verfahren
6. Rotor-Verfahren
7. Perrin-Verfahren
8. Duplex-Verfahren
9. Elektrostahl-Verfahren

Die anteilmässige Bedeutung dieser Verfahren und die kennzeichnenden Prinzipien sind in Tabelle IV aufgeführt.

In allen diesen Verfahren wird Stahl aus Schrott und Roheisen hergestellt. In unterschiedlicher Weise werden dabei durch die Einführung von Sauerstoff und durch eine speziell zusammengesetzte Schlacke die nötigen chemischen Prozesse ermöglicht. Die Regulierung des Kohlenstoff-, des Schwefel- und des Phosphorgehaltes sind bei dem sog. «Frischen» Hauptzweck bei der Stahlherstellung. Im weiteren können gleichzeitig Nichteisenmetalle legiert werden.

Der Induktionsofen hat seinen festen Platz in den LD-Stahlwerken zum Einschmelzen von Ferrolegierungen (Ferrosilizium und Ferrochrom). Er dient auch in Stahlwerken und Stahlgiessereien ebenfalls zur Herstellung von Stahl, jedoch nicht auf der Roheisen- oder beliebigen Schrottbasis. Eine metallurgische Behandlung mit Hilfe der Schlacke ist nur beschränkt möglich, weil diese kaum erwärmt wird und damit reaktionsträge bleibt. Die Entschwefelung und Entphosphorung nach dem Schlak-

ken-Reaktionsverfahren ist nur sehr beschränkt möglich, auch wenn der Ofen mit basischem Futter zugestellt ist. Ein Frischvorgang zur Verminderung des Kohlenstoff-Gehaltes kann nicht durchgeführt werden.

Als Konsequenz daraus kann also der induktive Schmelzofen zur Stahlerzeugung nur mit einem Einsatz beschickt werden, für den sowohl der Kohlenstoff-Gehalt wie auch der Phosphor- und Schwefel-Gehalt bereits den gewünschten Stahlqualitätsanforderungen entsprechen. Im wesentlichen handelt es sich also um ein Umschmelzaggregat. Das heisst: Alles, was in den Ofen hineinkommt, findet sich im Endprodukt wieder. Die Wirkung der Schlacke beschränkt sich auf den Schutz des Bades gegenüber den oxydierenden Einflüssen der Atmosphäre und die Aufnahme von Oxydationsrückständen. Das Aufkohlen, d.h. Erhöhen des Kohlenstoff-Gehaltes durch Zugabe von Graphit oder anderen Aufkohlungsmaterialien, bereitet jedoch keine Schwierigkeiten. Ist die Schmelze aber zu reich an Kohlenstoff, so kann sie nur durch Zugabe von kohlenstoffarmem Schrott verdünnt werden. Steht für die Herstellung eines Stahls mit niedrigem Kohlenstoffgehalt nicht von vornherein genügend kohlenstoffarmer Einsatz zur Verfügung, so muss das Material zuerst in einem anderen Ofen, vorzugsweise im Lichtbogenofen, aufgefrischt werden.

Beim Chargieren muss darauf geachtet werden, dass feuchte, rostige und ölige Späne zur Oxyd- und Gasaufnahme der Schmelze führen. Achtet man jedoch auf oxydfreien trockenen Einsatz, so ist der Gasgehalt der Schmelze im Induktionsofen niedriger als in irgendeinem anderen Ofen, von Vakuum- und Schutzgasverfahren abgesehen.

Für die Wahl der Ausmauerung gelten besondere Gesichtspunkte. Die Ausmauerung erfolgt vorzugsweise sauer. Dies trifft allgemein für Stahlguss und schwach legierte Stähle zu; für hochlegierte Stähle muss jedoch oft eine basische Ausmauerung verwendet werden. Da das basische Futter zu Rissbildung neigt, sollte es nur für Tiegel mit kleinerem bis mittlerem Fassungsvermögen verwendet werden. Die Lebensdauer der sauren Ausmauerung wird durch die hohe Abstichtemperatur bei der Stahlherstellung jedoch herabgesetzt. Der Einsatz des Induktionsofens ist damit auf dem Stahl- und Stahlguss-Sektor auf kleinere Einheiten beschränkt.

Ausser der Einschränkungen bei der Auswahl des Einsatzmaterials arbeitet der Induktionsofen im Vergleich zum Lichtbogenofen durchaus wirtschaftlich. Einerseits deshalb, weil Lichtbogenöfen mit kleinem Fassungsvermögen teurer sind und anderseits auch der Elektroden-Verbrauch ins Gewicht fällt.

Die bemerkenswertesten Eigenschaften von Induktionsöfen sind:

- Die Schmelze bleibt von oxydierenden Einflüssen weitgehend verschont.
- Erreichung einer grossen Analysegenauigkeit der gewünschten Stahlqualität.
- Gutes Legierungsverhalten.
- Minimaler Gasgehalt der Schmelze.
- Wirtschaftliche Erzeugung von kleinen Chargen.

Der Induktionsofen findet sich hauptsächlich auf dem Gebiet der hochlegierten Spezial- und Edelstähle und des legierten Stahlgusses. Er wird jedoch auf Grund seiner Wirtschaftlichkeit immer stärker auch für die Herstellung schwach legierter Qualitäten eingesetzt.

3.1.2 Gusseisen-Erzeugung. Für die Gusseisen-Erzeugung hat immer noch der traditionelle *Kupol-Ofen* eine grosse Bedeutung.

Tabelle IV

Prinzipien der verschiedenen Stahlerzeugungs-Verfahren und ihre Bedeutung [2])

Verfahren		Siemens-Martin	Bessemer	Thomas	LD inkl. Kaldo + Rotor	Perrin	Duplex	Elektrostahl	EGKS total	Weltproduktion (ohne China)
Verfahrensprinzip		Herdfrischen	Windfrischen (Auskleidung sauer)	Windfrischen (Auskleidung basisch)	Sauerstoff-aufblasung (Einblasen von Sauerstoff unter hohem Druck)	Emulsions-verfahren (Stürzen der Schmelze auf sep. aufgeheizte Schlacke)	Kombination des normalen Frischens im Konverter mit dem Fertig-schmelzen im Elektroofen zur Verbesserung der Qualität	Lichtbogen-ofen und Induktionsofen		
% Anteil an Stahl-erzeugung in der EGKS [1])	1952	36	0,7	55	0	–	–	8,2	42 Mill. t	213 Mill. t
	1960	38	0,2	49	2,2	–	–	10,5	73 Mill. t	330 Mill. t
	1968	25,5	0,1	28	33	– [3])	– [3])	13	90 Mill. t	516 Mill. t

[1]) EGKS = Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (ca. 20 % der Weltstahlerzeugung)
[2]) Aus Jahrbuch 1968 und Zweimonatliche Veröffentlichung Nr. 6/1969 «Eisen und Stahl» vom statistischen Amt der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel
[3]) Neueres Verfahren mit zunehmender Bedeutung

Der Kupol-Ofen ist ein vertikaler Schachtofen, der mit festem Einsatz und Koks beschickt wird. Ausserdem wird Kalk zugegeben, welcher mit den Verunreinigungen des Eisens und der Koksasche eine Schlacke bildet, sowie Flußspat zur Verflüssigung dieser Schlacke. Durch Einblasen von Luft wird die Verbrennung aufrechterhalten. Dadurch, dass die Wärme durch die Verbrennung des Kokses erzeugt wird, erfährt die mit dem glühenden Koks und den Verbrennungsgasen in Berührung kommende Gusseisenschmelze eine teilweise Oxydation von Legierungselementen, Aufnahme von Gasen und Aufschwefelung. Die maximal erreichbare Temperatur liegt bei ca. 1500 °C. Weiterhin zeigt sich, dass bei diesem Verfahren die ereichbaren Kohlenstoffgehalte normalerweise im Bereich von 2,5 und 3,6% liegen. Weil der Kupol-Ofen ein kontinuierlich arbeitender Ofen ist, können Änderungen in der Zusammensetzung nur durch den Anfall eines Zwischeneisens erzielt werden. Ausserdem ist die Ausbringung des Ofens pro Zeiteinheit ziemlich konstant, wodurch sich Schwierigkeiten ergeben, wenn die Giesserei nicht die gesamte Menge des anfallenden flüssigen Eisens aufbrauchen kann. Das Warmhalten der Schmelze ist in diesem Ofen nicht möglich.

Der *Heisswind-Kupol-Ofen* bringt demgegenüber schon wesentliche Verbesserungen. Dafür stellt er aber einen relativ teuren und komplizierten Ofen dar. Als wesentlichen Vorteil erlauben die höheren Ofentemperaturen einen erhöhten Einsatz von Stahlschrott, je nach Analyse des Gusseisens bis 100%. Trotz dieser Verbesserungen, die der Heisswind-Kupol-Ofen bringt, bleibt eine Verunreinigung der Gusseisen-Schmelze durch die Ofengase (Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff) und den Schwefel des Kokses bestehen. Kupol-Öfen werden für Produktionen von etwa 5...25 t/h gebaut.

Seit längerer Zeit werden auch *Lichtbogenöfen* zur Gusseisenerzeugung eingesetzt. Sie bringen bereits wesentliche Vorteile gegenüber dem Kupol-Ofen, vor allem in bezug auf die erreichbare Gussqualität. Nachteilig ist aber die Tatsache der schlechten Aufkohlungsmöglichkeit infolge mangelnder Zirkulation der Schmelze. Der Einsatz von Stahlschrott wird daher vorteilhaft begrenzt und vermehrt Roheisen, Guss-Schrott, Gußspäne und Rücklaufmaterial verwendet, wobei auch rostiger und öliger Schrott verwendet werden kann. Wie bei der Stahlschmelze erfolgt die metallurgische Behandlung über die Schlacke. Ein für die Giesserei idealer Ofen ist aber der Lichtbogenofen allein nicht.

Grundsätzlich werden an eine moderne Gusseisenerzeugung folgende Anforderungen gestellt:

a) Kurze Schmelzzeiten ohne Veränderung der Zusammensetzung;
b) Einfaches Zulegieren beliebiger Legierungselemente;
c) Schmelzen bei beliebigen Kohlenstoff-Gehalten, gutes Aufkohlen;
d) Einfache Temperaturführung;
e) Warmhalten über längere Zeit ohne Verunreinigung durch Gase oder feste Stoffe;
f) Diskontinuierlicher Betrieb, leichtes Umstellen auf andere Legierungen;
g) Unabhängigkeit in der Wahl des Einsatzes, möglichst viel Stahlschrott (synthetisches Gusseisen) und die Möglichkeit, flüssiges Material einzusetzen;
h) Geringe Luftverschmutzung und sauberer, hygienischer Betrieb.

Am besten werden diese Bedingungen mit dem Induktionsofen erfüllt; er hat aus diesen Gründen bereits eine weite Verbreitung vor allem in der Graugiesserei gefunden. In der ersten Phase der Einführung von Induktionsöfen wurden sie in erster Linie in Verbindung mit Kupolöfen eingesetzt (Duplex-Betrieb). Der Induktionsofen übernimmt dabei die Aufgabe des Warmhaltens über längere Zeit, Kontrolle und Abstimmen der Analyse und Überhitzen. Ausserdem ermöglicht er in grösseren Giessereien das Mischen verschiedener Kupol-Chargen, was sich metallurgisch sehr vorteilhaft auswirkt, indem Störungen in den mechanischen Eigenschaften des Endproduktes ausgeglichen werden. Auch das Zwischeneisen, welches bei Änderung der Eisenzusammensetzung im Kupolofen anfällt, kann in der Regel im Induktionsofen auf eine brauchbare Analyse gebracht werden. Auch für den Duplex-Betrieb mit dem Lichtbogenofen hat sich der Induktionsofen besonders bewährt. Kann man den ersteren mit sperrigem und öligem oder rostigem Schrott chargieren, so kann dem Induktionsofen die Aufgabe der Aufkohlung übertragen werden. Im Lichtbogenofen wird das Erschmelzen und die metallurgische Behandlung, im Induktionsofen das Aufkohlen, die Zugabe von Legierungselementen, das Abstimmen der Analyse, das Überhitzen und eventuelle Warmhalten durchgeführt.

In den letzten Jahren wurde in vielen Giessereien die Erfahrung gemacht, dass die Wirtschaftlichkeit bei reinem Induktionsofenbetrieb im Vergleich zum Heisswind-Kupol-Ofen ungefähr gleich, in einigen Fällen sogar besser ist. Daraus folgert, dass der Induktionsofen den Kupolofen nicht nur ergänzen, sondern ganz ersetzen kann.

3.1.3 Schmelzen von Nichteisen-Schwermetallen. Für das Einschmelzen der Nichteisen-Schwermetalle und ihrer Legierungen wird heute vorwiegend der Induktions-Rinnenofen eingesetzt, vor allem wegen seiner niedrigen Anschaffungskosten und seinem sehr guten elektrischen Wirkungsgrad. Durch die mässige Badbewegung bewirkt er eine gute Durchmischung der Charge, woraus eine gute Homogenität der Schmelze resultiert. In einigen Sonderfällen, die beim Rinnenofen zu technischen oder wirtschaftlichen Nachteilen führen, kann jedoch der Einsatz eines Tiegelofens zweckmässiger sein.

Als solche sind zu nennen:

a) Legierungen mit hohen Giesstemperaturen wie Nickel, Kupfer-Nickel, Neusilber und ähnliche. Für höhere Temperaturen ist die Betriebssicherheit und Lebensdauer der Zustellung beim Rinnenofen nicht ausreichend.
b) Legierungen mit hohem Aluminium-Gehalt, z.B. Aluminium-Bronze. In diesem Fall würde die während des Schmelzens entstehende Al_2O_3-reiche Schlacke im Rinnenofen in kurzer Zeit zu einem Zuwachsen der Rinnen führen.
c) Für die Herstellung normaler Bronze- und Messinglegierungen wird der Tiegelofen dann eingesetzt, wenn diskontinuierlicher Betrieb oder häufiger Legierungswechsel vorliegen.

3.1.4 Erzeugung von Leichtmetallen. Auf dem Leichtmetallsektor haben sich der Induktions-Tiegelofen und der Rinnenofen in Giessereien und Umschmelzwerken als ausgesprochene Schmelzöfen gut eingeführt. Auch hier ist die Badbewegung sowohl beim Legieren als auch beim Einschmelzen von kleinstückigem Schrott von Vorteil. Trotz der grösseren Badbewegung der Induktions-Tiegelöfen sind die Abbrandverhältnisse mit denen des Induktions-Rinnenofens vergleichbar und gegenüber brennstoffbeheizten Öfen wesentlich geringer.

Bei der Verwendung grösserer Mengen von Spänen wird zweckmässigerweise eine Aufbereitung der Späne durchgeführt. die im wesentlichen aus einer Trocknung und einer Magnetscheidung besteht. Trotzdem gelangen noch relativ grosse Öl- und Fettmengen in den Schmelzofen, so dass man erfahrungsgemäss bei einem Späneanteil von mehr als 50% in der Gattierung mit einem erhöhten Wasserstoffgehalt des Metalls rechnen

muss. Wegen der dadurch bestehenden Gefahr der Wasserstoff-Porosität der Gußstücke muss der Wasserstoffgehalt auf niedrige Werte vermindert werden. Dies kann durch eine Zwischenerstarrung geschehen oder durch eine Entgasung mit Chlor oder im Vakuum. Da die Vakuumbehandlung entsprechende Einrichtungen und die Zwischenerstarrung zusätzliche Energiekosten bedingen, hat sich in der Praxis als wirtschaftliche Lösung nur das Chloren durchgesetzt. Dabei wird entweder Chlorgas in die Schmelze eingeblasen oder mit chlorabspaltenden Präparaten gearbeitet.

Erhöhte Aufmerksamkeit muss dem Wasserstoffgehalt bei der Herstellung von Aluminium-Sandformguss geschenkt werden, der besonders stark zu H_2-Porosität neigt, weil beim Abgiessen noch zusätzlich grosse Mengen Wasserstoff aus der Form aufgenommen werden. Um mit Sicherheit ausreichend gasarme Schmelzen zu erhalten, verwendet man in den Sandform-Giessereien mindestens 70% Blockmaterial als Einsatz. Darüber hinaus sollte eine möglichst schwache Badbewegung während der Überhitzungsperiode angestrebt werden, d.h. reduzierte Leistung und möglichst voller Tiegel, damit der Metalldruck soweit wie möglich die Badbewegung begrenzt.

Beim Schmelzen von Aluminium und Aluminium-Legierungen fallen je nach Schrottqualität grössere Schlackenmengen an, die sich grösstenteils an den Tiegelwandungen oder bei Rinnenöfen in den Rinnen absetzen. Da die Verschlackung den Wirkungsgrad des Ofens herabsetzt und auch die Metallqualität beeinflusst, müssen die Schlackenansätze entfernt werden. Das geschieht am besten im warmen Zustand kurz vor dem Abgiessen mit geeigneten Werkzeugen aus warmfestem Material. Der Schlackenansatz kann durch eine Verringerung des Porenvolumens eingeschränkt werden.

3.2 Der Rinnenofen

Der erste in grosser Zahl für das Schmelzen von Schwermetallen eingesetzte elektrische Induktionsschmelzofen ist der

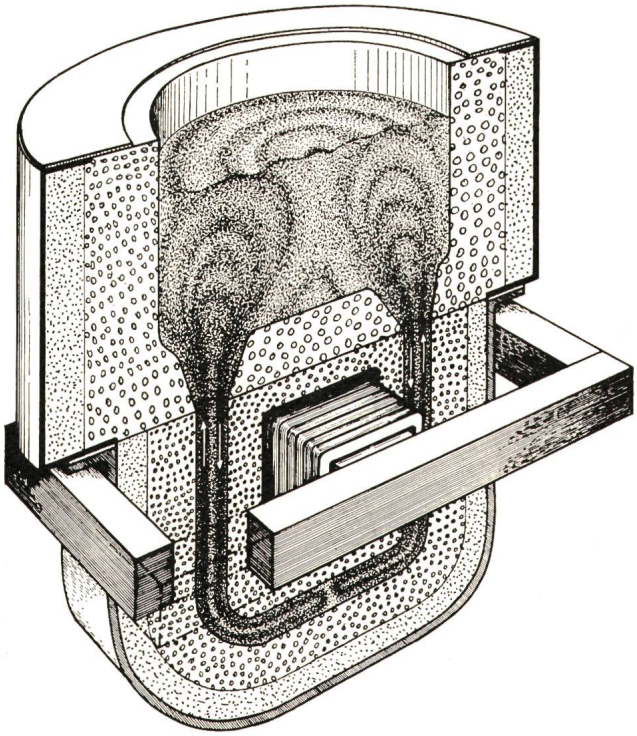


Fig. 15
Schematische Darstellung eines einphasigen Rinnen-Induktionsofens zum Schmelzen von Metallen

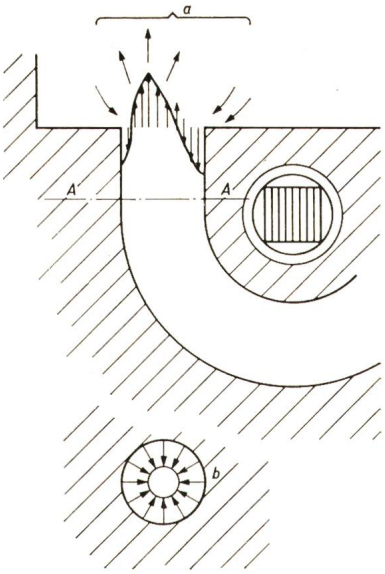


Fig. 16
Metallströmung bei gleichförmiger Rinne
a Metallströmung
b Kraftvektoren

Rinnenofen. Für das Schmelzen von Stahl und Gusseisen wird er erst in neuester Zeit wieder vermehrt eingesetzt, nachdem an diesem Ofen wesentliche konstruktive Verbesserungen vorgenommen und besondere keramische Massen entwickelt wurden, die auch die hohen Temperaturen, die beim Schmelzen von Stahl und Gusseisen entstehen, gut vertragen.

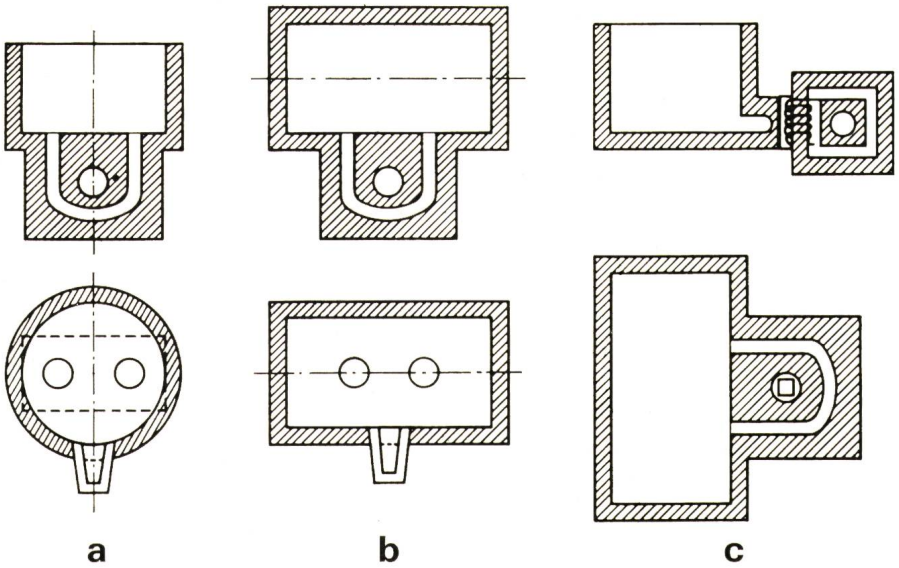
3.2.1 Prinzip und Bauweise des Induktions-Rinnenofens. Der Induktions-Rinnenschmelzofen benützt als einziges induktives Erwärmungsgerät den vollständig geschlossenen Eisenkern zur Führung des Magnetflusses. Fig. 15 zeigt deutlich den Aufbau des Induktions-Rinnenofens. Daraus ist ersichtlich, dass der Rinnenofen auf dem Prinzip eines Transformators aufgebaut ist. Die Rinne bildet dabei die Sekundärwicklung des Transformators, wobei die Primärspule mit der sie umfassenden Rinne auf dem Mittelschenkel angeordnet ist. Die Rinne mündet in den Tiegel, so dass das flüssige Metall im Tiegel den Stromkreis der Rinne schliesst.

Als Wärmeisolation zwischen der Rinne und der Spule dient eine keramische Stampfmasse, die dem zu schmelzenden Metall und den beim Schmelzen erreichten Temperaturen entsprechen muss.

Im flüssigen Metall (Sekundärwicklung) wird eine Spannung induziert. Der grosse Strom, der nun in dem Kreis fliesst, erwärmt das Metall in der Rinne durch den Joulschen Effekt. Die Wärmeübertragung aus der Rinne in den Tiegel erfolgt durch den Austausch des in der Rinne auf höhere Temperatur gebrachten Metalls mit demjenigen im Tiegel. Dabei wird die Metallströmung durch magnetische Kraftwirkung (Pintscheffekt) und durch den Auftrieb des höher erwärmten Metalls erwirkt. Diesem magnetischen Druck in der Rinne muss ein statischer Druck vom Metall im Tiegel entgegenwirken, damit nicht die Metallsäule in der Rinne abreisst und dadurch ein Unterbruch im Stromfluss entsteht, d.h. dass der Sumpf im Tiegel immer eine bestimmte Höhe halten muss.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, muss die Rinne ständig mit flüssigem Metall gefüllt sein. Der Rinnenofen kann daher nur mit flüssigem Metall (Standguss) angefahren werden und lässt sich nur mit besonderen Vorsichtsmassnahmen «einfrieren». Normalerweise wird er daher im Dreischichtbetrieb ge-

Fig. 17
Baumöglichkeiten von Rinnenöfen
a Rinnen-Tiegelofen
b Rinnen-Trommelofen
c Rinnen-Wannenofen, feststehend, keine Gießschnauze



fahren und in Betriebspausen entweder entleert oder auf Unterhaltsstrom gehalten. Fig. 16 zeigt die Metallströmung, hervorgerufen durch den Pintscheffekt.

3.2.2 Bauformen des Rinnenofens. In der Praxis finden sich die verschiedensten Bauformen von Rinnenöfen. Je nach Ausführung des Gefässes unterscheiden sie sich (siehe auch Fig. 17):

a) Rinnen-Tiegelofen (senkrechte Achse)
b) Rinnen-Trommelofen (waagrechte Achse)
c) Rinnen-Wannenofen

Die Rinne kann bei allen diesen Ofentypen senkrecht, waagrecht oder in schräger Lage angeordnet sein. Die Anordnung der Rinne hängt davon ab, ob eine öftere Reinigung der Rinne notwendig wird (senkrechte Rinne) oder nicht. Die senkrechte Rinne, die sich gut von den angesetzten Oxyden reinigen lässt, hat den Nachteil des hohen statischen Druckes auf die Rinne, was den Wärmeaustausch zwischen Rinne und Tiegel behindert. Für den besten Wärmeaustausch sorgt die waagrechte Rinne, während die schräge Rinne einen Kompromiss zwischen diesen beiden Anordnungen darstellt. Fig. 18 zeigt den inneren Aufbau eines Rinnenofens mit senkrecht angeordneter Rinne. Fig. 19 und 20 zeigen den gesamten Aufbau von fertig montierten Rinnenöfen.

Je nach Leistung erfolgt der elektrische Anschluss des Ofens einphasig oder im Drehstrom. Beim Drehstrom-Anschluss wird die Scott-Schaltung benützt, um die Last des Ofens einigermassen gleichmässig auf alle drei Netzphasen verteilen zu können.

3.2.3 Badbewegung. Die Badbewegung im Rinnenofen ist sehr gering, da nur das aus der Rinne aufstossende Material eine Bewegung des Materials im Tiegel bewirkt. Der Rinnenofen ist daher gut geeignet für das Schmelzen von Metallen, die empfindlich sind auf Abbrand. Für das Einschmelzen von Spänen muss aber wegen der kleinen Badbewegung eine besondere Vorrichtung für das Einrühren vorgesehen werden, da sonst die Späne an der Oberfläche bleiben und schnell eine Brücke bilden. Hier eignet sich deshalb meistens der Tiegelofen besser.

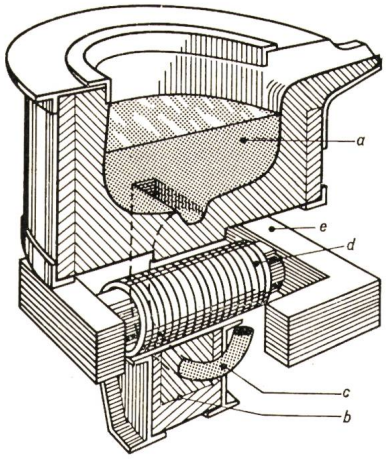


Fig. 18
Schematischer Schnitt eines Induktionsofens mit senkrecht angeordneter Rinne
a Tiegel, enthaltend das flüssige Metall
b Ausstampfung
c Rinne
d Spule
e Eisenkern

3.2.4 Verwendung für das Schmelzen der verschiedenen Metalle. Im Rinnen-Induktionsofen werden vorwiegend Nichteisenmetalle wie Messing, Bronze, Reinkupfer, Zink, Aluminium und Leichtmetalle geschmolzen. Auch für Grauguss hat sich der Rinnenofen schon seit einiger Zeit eingeführt, während Stahl erst seit ein paar Jahren im Rinnenofen geschmolzen oder warmgehalten wird. Weil die Rinne immer mit flüssigem Metall gefüllt sein muss, wird der Rinnenofen meist nur für den kontinuierlichen Betrieb vorgesehen. Wird die Rinne entleert, muss vor dem Nachchargieren die Rinne vorgewärmt werden.

3.2.5 Anwendung des Rinnenofens für die verschiedenen Arbeitsverfahren.

In der Nichteisenmetallindustrie:

als Schmelzofen für Messing, Bronze, Reinkupfer, Zink, Aluminium, Leichtmetallegierungen;
als Warmhalteofen beim Stranggiessen für die gleichen Metalle.

In der Eisen- und Stahlindustrie:

als Schmelzofen für Gusseisen;
als Warmhalteofen (Speicher und Mischer);
zum Überhitzen von Gusseisen und Stahl.

Wie aus Tabelle V ersichtlich ist, richten sich das Fassungsvermögen und die Leistungen des Rinnenofens nach dem Schmelzgut und dem Anwendungszweck. Tabelle V gibt zusätzlich die im praktischen Betrieb ermittelten Werte des

Technische Arten von Rinnenöfen

Tabelle V

Legierung	Giess-temperatur °C	Ofeninhalt t	Anschluss-leistung kW	Verbrauch kWh/t
Cu	1200	0,8	120	370
Ms 63	1050	1	240	220
CuNi 75/25	1450	0,8	120	480
Al	700	0,8	120	440
Grauguss	1470	10	400	550

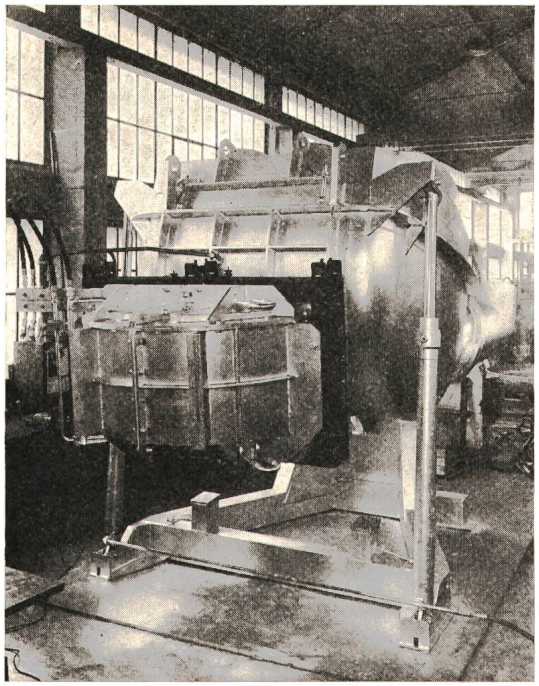


Fig. 19
Induktions-Rinnenofen zum Warmhalten und Vergiessen
Induktor auswechselbar und wassergekühlt

Stromverbrauchs beim Schmelzen verschiedener Metalle im Rinnenofen. Die eigentlichen Verbrauchswerte variieren natürlich stark, je nach Betriebsweise und Auslegung des Ofens.

3.2.6 Der Rinnen-Induktionsofen als Energieverbraucher. Die elektrische Anlage des Rinnen-Induktionsofens ist im allgemeinen sehr einfach, da wegen des geschlossenen Eisenkerns der Rinnenofen mit einem relativ guten Leistungsfaktor arbeitet und daher zur Kompensation eine wesentlich kleinere Kondensatorenbatterie genügt als beim Tiegelofen. Je nach Ofentyp und Legierung des Gusses liegt der Leistungsfaktor cos φ des Rinnenofens bei 0,5...0,8. Auch diese Öfen werden auf mind. cos $\varphi = 0{,}95$ kompensiert. Der Rinnenofen ist vorwiegend im kontinuierlichen Betrieb, da sich beim ihm lange Stillstandszeiten, die einen grossen Energieverbrauch für das Warmhalten bedingen, nicht lohnen.

Rinnenöfen kleiner Leistung werden meist einphasig an das Netz angeschlossen, während die Öfen grösserer Leistung entweder über die Scott-Schaltung, vor allem über eine Symmetrier-Einrichtung, an das Netz angeschlossen werden. Fig. 21 zeigt die verschiedenen Anschlussmöglichkeiten an das Netz.

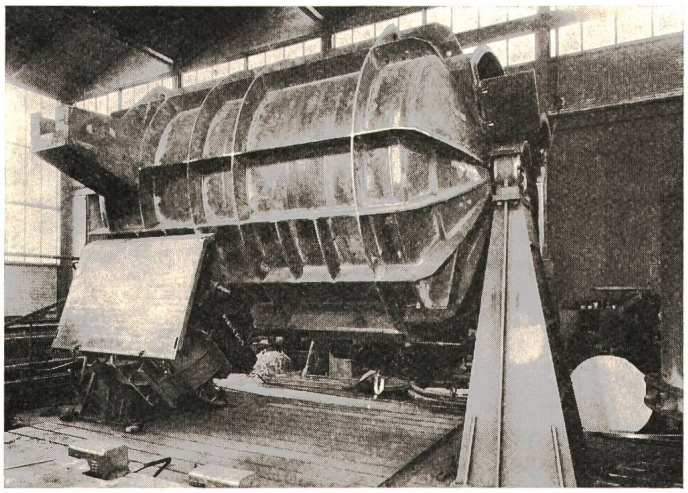


Fig. 20
Induktions-Rinnenofen zum Schmelzen und Warmhalten
Induktor auswechselbar, wassergekühlt

3.3 Tiegelofen

3.3.1 Prinzip und Bauweise. Der Tiegelofen ist in seinem Aufbau sehr einfach. Das zu erwärmende Metall befindet sich im Innern der Induktionsspule. Die Induktionsspule und das Metall sind voneinander durch eine wärmeisolierende Schicht und den Tiegel getrennt (Fig. 22).

Die Erwärmung des im Tiegel befindlichen Metalles erfolgt durch das magnetische Wechselfeld, welches im Metall einen Strom induziert (siehe Abschn. 1.1).

Innerhalb der Spule ist die Führung des Magnetflusses durch das Einsatzgut gegeben. Ausserhalb der Spule wird der Magnetfluss meistens durch Magnetjoche geführt.

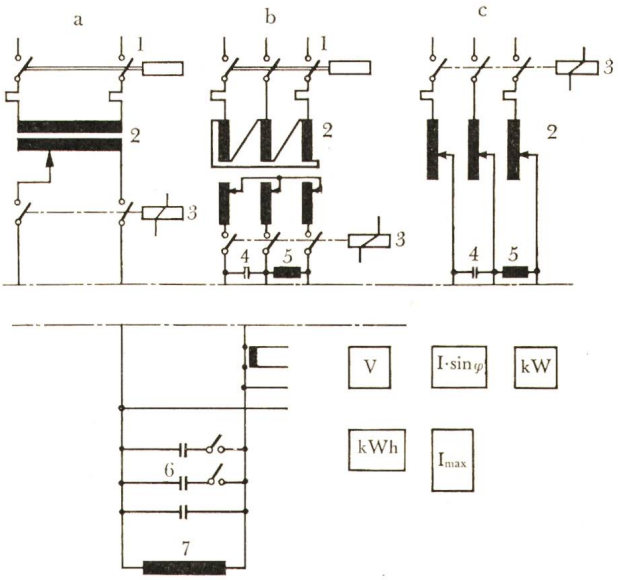


Fig. 21
Anschlussmöglichkeiten an das energieliefernde Netz
a einphasiger Hochspannungsanschluss
b dreiphasiger Hochspannungsanschluss
c dreiphasiger Niederspannungsanschluss

1 Hochspannungsschalter
2 Ofentransformator
3 Ofenschütz
4 Symmetrierbatterie
5 Symmetrierdrosselspule
6 Kondensatorbatterie zur Verbesserung des Leistungsfaktors
7 Induktor
8 Überlastschutz
9 Messung

Ein Eisengestell trägt den ganzen Ofenkessel. Der Ofen lässt sich um die Gießschnauze kippen. Dabei erfolgt bei grösseren Einheiten das Kippen hydraulisch. Die Plattform des Ofens ist direkt mit dem Ofenkessel montiert (Fig. 23). Die Stromzuführung erfolgt von der Rückseite des Ofens durch wassergekühlte Kabel.

Induktionsanlagen benötigen mit ihren notwendigen Hilfsbetrieben wenig Platz. Fig. 24 zeigt die Disposition einer solchen Anlage.

Tiegelöfen werden in dieser Bauart in der Schweiz hauptsächlich in folgenden Grössen verwendet:

NF-Ofen für Gusseisen:	Ofeninhalt bis 40 t
NF-Ofen für Messing	6 t
NF-Ofen für Aluminium	3 t
MF-Ofen für Gusseisen und Stahl:	Ofeninhalt bis 8 t
MF-Ofen für Messing	6 t
MF-Ofen für Aluminium	3 t

3.3.2 Badbewegung. Infolge des magnetischen Wechselfeldes entstehen im flüssigen Einsatz Kräfte, welche eine Bewegung des flüssigen Metalles verursachen. Die Badoberfläche bekommt eine Badkuppe (Fig. 25). Die Höhe der Badkuppe h ist von der Leistungsdichte P_i der Frequenz f, des Widerstandes ρ und des spez. Gewichtes γ wie folgt abhängig:

$$h = c \frac{P_i}{\sqrt{f \rho}} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

Bei Mittelfrequenzöfen kann bei gleicher Badbewegung und Badkuppe ein Vielfaches der Leistungsdichte gegenüber Netzfrequenzöfen erreicht werden. Um die Badkuppe zu verkleinern, werden Öfen mit grosser Leistungsdichte so gebaut, dass bei Nennfassung der Badspiegel über die Oberkante der Spule hinausragt. Die statische Höhe des Metalles über der Spulenoberkante (Badüberhöhung B) wirkt dann dem durch die induktive Beheizung entstehenden Baddruck entgegen. Bei richtiger Überhöhung des Badspiegels über der Spulenoberkante lässt sich eine relativ ruhige Badoberfläche erzielen.

Die Badbewegung ist bei allen metallurgischen Vorgängen von grosser Bedeutung. Legierungsstoffe werden durch die Bewegung des Bades gleichmässig verteilt. Ebenfalls ist die Temperaturverteilung sehr gleichmässig. Umgekehrt werden die Wände des Tiegels bei zu starker Badbewegung stark ausgewaschen.

3.3.3 Schmelzen verschiedener Metalle. In Tiegelöfen können alle Metalle geschmolzen werden. Insbesondere ist der Tiegelofen mit keramischer Ausmauerung geeignet für Stahl, Gusseisen, Schwer- und Leichtmetall. Ausnahmen bilden Metalle mit einem sehr niedrigen Schmelzpunkt wie Blei und Zinn. Zink wird hauptsächlich in Rinnenöfen erwärmt.

In besondern Fällen wird der Stahl- oder Graphittiegelofen verwendet. In diesen Öfen wird je nach Wandstärke des Tiegels ein Teil der Leistung im Tiegel selbst in Wärme umgewandelt. Dadurch erfolgt die Erwärmung des Materials wesentlich langsamer. Die erreichbare Temperatur und die Tiegelgrösse sind aus Festigkeitsgründen beschränkt. Umgekehrt ist in den Öfen dieser Bauart die Badbewegung sehr gering.

Der Stahltiegelofen wird aus diesem Grunde hauptsächlich zum Schmelzen von Metallen mit niedrigem Schmelzpunkt verwendet.

Bei Edelmetallen wie Gold, Silber und Platin sind Vorsichtsmassnahmen notwendig, um möglichst wenig Metall zu verlieren. Sie werden deshalb hauptsächlich in Graphittiegelöfen geschmolzen. Für Platin ist zusätzlich eine Vakuum-Einrichtung notwendig.

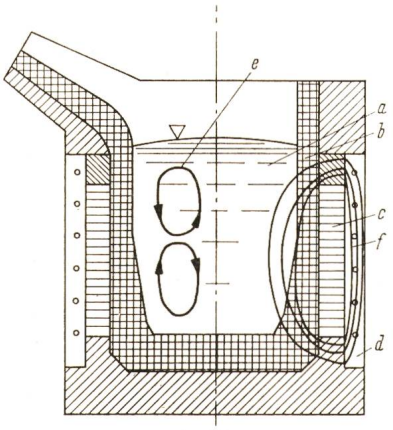


Fig. 22
Schematische Darstellung eines Induktionstiegelofens

a flüssiger Einsatz
b Tiegel
c Induktionsspule
d Eisenjoche
e Badbewegung
f Kraftlinienverlauf

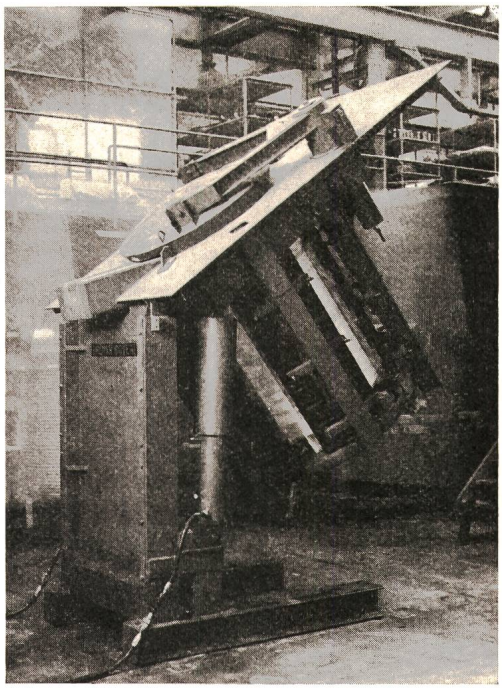


Fig. 23
Netzfrequenz-Tiegelofen beim Kippen

3.3.4 Anwendung für verschiedene Arbeitsverfahren. Der Tiegelofen lässt sich für die verschiedensten Verfahren, welche für die Behandlung des flüssigen Metalles notwendig sind, einsetzen.

Schmelzen

Wechselt von Charge zu Charge die vorgesehene Analyse, so bringt hauptsächlich der MF-Ofen grosse Vorteile. Steht großstückiges Einsatzmaterial zur Verfügung, so ist dafür auch ein Netzfrequenzofen geeignet.

Bestimmte Analysen können bei vorgegebenem Ausgangsmaterial auch rechnerisch voraus bestimmt werden. Damit kann die Produktion wesentlich vereinfacht und beschleunigt werden.

Duplizieren

Das Duplexverfahren, d.h. das Nachschalten eines 2. Ofens wird mit Vorteil dort angewendet, wo das Material aus einem Vorschmelzofen in einem nachgeschalteten 2. Ofen die notwendigen Eigenschaften erhält. Für diese Anwendung ist der Netzfrequenzofen besonders gut geeignet.

Speichern

Für das Speichern von Material wird der Tiegelofen nur in Ausnahmefällen verwendet.

Tabelle VI gibt Richtwerte von Betriebszahlen an. Je nach Ofen und Art des Betriebes sind Abweichungen von diesen Zahlen möglich.

3.3.5 Wahl der Frequenz. Die Frequenz wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Die Tabelle VII gibt einen kurzen Überblick über die vorhandenen Möglichkeiten. Die endgültige Wahl kann erst nach sorgfältiger Abklärung getroffen werden.

Grundsätzlich kann der MF-Tiegelofen für alle Metalle und alle vorkommenden Arbeitsbedingungen eingesetzt werden. Der Netzfrequenzofen hat jedoch wegen seinen kleinen Installa-

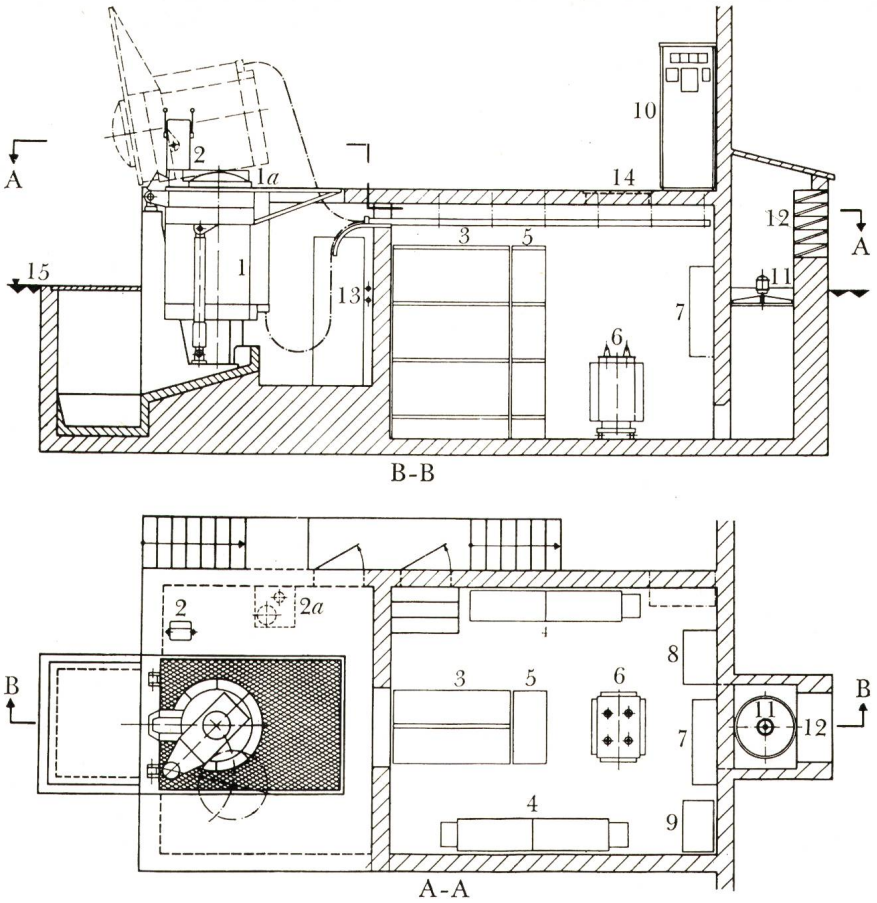


Fig. 24
Disposition einer Netzfrequenz-Induktions-Tiegelofenanlage

1 Netzfrequenz-Induktions-Tiegelofen
1a Ofendeckel
2 Steuerpult
2a Motorpumpe für Drucköl
3 Kondensatorenbatterie (Grundstufe)
4 Kondensatorenbatterie (stufenweise schaltbar)
5 Symmetrierbatterie
6 Symmetriertrosselspule
7 Hauptstrom-Schaltapparatur
8 Anfahrwiderstand
9 Autotransformator für Warmhaltebetrieb
10 Kontrolltafel
11 Kühlluftventilator
12 Luftfilter
13 Kühlwasserleitungen
14 Montageöffnungen
15 Giessereiflur

tionskosten insbesondere in Graugiessereien in besondern Fällen guten Eingang gefunden.

3.3.6 Eigenschaften als Energieverbraucher

NF-Ofen

Abgesehen von Spezialausführungen stellt dieser Ofen eine einphasige Last dar. Für den Lastausgleich auf allen 3 Phasen wird die bekannte Symmetrier-Schaltung aus Drosselspulen und Kondensatoren verwendet (Fig. 26). Die Kompensation erfolgt auf über cos $\varphi = 0{,}95$.

MF-Ofen

Die Anschlussbedingungen des MF-Ofens sind entsprechend dem Frequenz-Erzeuger.

Umformer

Lastverhalten wie Asynchronomotor oder Synchronmaschine.

150 Hz

Statische Erzeugung.

Diese Anlagen werden meist auf cos $\varphi = 1$ kompensiert.

Richtwerte von Betriebszahlen

Tabelle VI

Materialart	Fassungsvermögen t	Nennleistung		Energieverbrauch zum Schmelzen		
		NF kW	MF kW	Temperatur °C	MF statisch kWh/t	NF kWh/t
Ms 58	6,0	1200	3600	1000	245	255
Cu/Ni 75/25	1,0		800	1450	510	
Al	2,1	550	1460	750	510	535
Gusseisen/Stahl	5,3	1450	4360	1500	535	565
Cu	1,0		800		460	

Wo die Netzverhältnisse es verlangen, können zusätzlich Oberwellenfilter eingebaut werden.

Statische Umrichter.

Bei den meist verwendeten Serieschwingkreisen ist der cos φ bei kleinen Leistungen niedrig, erhöht sich bei grossen Leistungen bis auf Werte von 0,95. Oberwellen entstehen entsprechend Schaltung und dem momentanen Aussteuerungsgrad der Anlage.

Belastungsverlauf.

Der Leistungsbedarf eines Induktionsofens wird entsprechend den Forderungen des Betriebes stark schwanken, doch wird die Nennleistung nie wesentlich überschritten. Es ist auch nicht mit Flicker- oder Flimmererscheinungen wie beim Lichtbogenofen zu rechnen. Um bei dem hohen Kapitalbedarf dieser Öfen wirtschaftlich arbeiten zu können, werden sie meist im Zweischichtbetrieb gefahren.

Mögliche Frequenzen

Tabelle VII

Kriterium		Eignung bei		
		Netzfrequenz	150 Hz	Mittelfrequenz
Metalle	Stahl	geeignet	geeignet	gut
	Gusseisen	gut	geeignet	geeignet
	Leichtmetall	geeignet	geeignet	geeignet
Anfahren ohne flüssiges Material	Späne	ungeeignet	ungünstig	gut
	mittlere Grösse	geeignet	geeignet	gut
	Grossteile	gut	geeignet	geeignet
Überhitzen von flüssigem Material	–	gut	gut	gut
Schmelzzeit	lang	gut	geeignet	geeignet
	kurz	ungeeignet	geeignet	gut
Ofeninhalt	über 10 t	gut	gut	geeignet
	100... 1000 kg	ungünstig	geeignet	gut
	unter 100 kg	ungeeignet	ungeeignet	gut

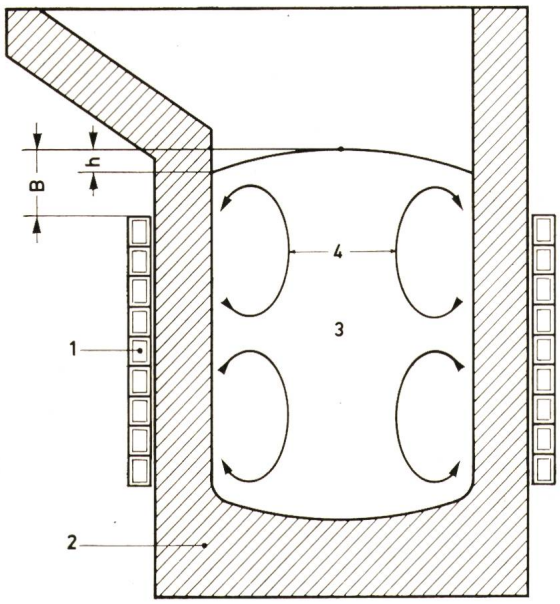


Fig. 25
Badumwälzung des geschmolzenen Metalles im Induktions-Tiegelofen

1 Induktionsspule
2 keramischer Tiegel
3 geschmolzenes Metall
4 Richtung der Badumwälzung
B Badüberhöhung
h Badkuppe

4. Induktive Wärmebehandlung

4.1 Einführung und Überblick über induktive Erwärmungsmöglichkeiten

Die metallverarbeitende Industrie kennt zahlreiche Arbeitsprozesse, welche nur bei bestimmten erhöhten Temperaturen erfolgreich durchgeführt werden können. Alle diese Vorgänge, welche zwischen Raumtemperatur und dem Schmelzpunkt eines Metalls ablaufen, fallen unter den Begriff der Wärmebehandlung.

Die induktive Erwärmung zeichnet sich durch ein schnelles Erwärmen der Werkstücke aus. Dies bringt im Fabrikationsprozess im allgemeinen grosse Vorteile.

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit den nach Anzahl und Energieeinsatz bedeutendsten Anwendungsgebieten der induktiven Wärmebehandlung:

Induktives Erwärmen für die Warmverformung;
Induktives Schweissen, insbesondere Rohr-Längsnahtschweissen;
Induktives Härten, insbesondere Oberflächenhärten;
Induktives Löten; Hart- und Weichlöten.

Weder die Reihenfolge noch die Tatsache einer ausführlichen Behandlung in diesem Zusammenhang bedeuten eine qualitative Bewertung dieser Arbeitsverfahren.

Weitere wichtige Anwendungen sind zum Beispiel das Vorwärmen für Schweissoperationen und das nachträgliche Spannungsfreiglühen von Schweissnähten an grossen Röhren, Kesseln und Wellen sowie die Stahlbandwärmung und das Rekristallisationsglühen. Fig. 27 zeigt eine Übersicht über die möglichen Anwendungen.

Mit fortlaufender Entwicklung konventioneller Verfahren und den immer neu hinzukommenden, an Wärme gebundenen Arbeitstechniken, dürfte sich die induktive Erwärmung im Laufe der Zeit noch zahlreiche andere Anwendungsmöglichkeiten erschliessen.

4.2 Die induktive Erwärmung für die Warmverformung

4.2.1 Einleitung. Die Tendenz zu vermehrter Automatisation von Fertigungsverfahren hat in den letzten Jahren dazu geführt, an Stelle der bisherigen durch Kohle, Öl, Gas oder widerstandselektrisch beheizten Öfen induktive Erwärmungsanlagen anzuwenden. Besonders die Reproduzierbarkeit, die Schnelligkeit des Erwärmungsvorganges, die Möglichkeit eines kontinuierlichen Betriebes und der Wegfall der Wärmebelästigung des Personals, gaben den Anlass zur Einführung dieser Erwärmungsart.

4.2.2 Anwendungsmöglichkeiten in der Warmverformung. Das bevorzugte Anwendungsgebiet der induktiven Vollerwärmung ist die Serienfertigung von Gesenkschmiedeteilen. Es können alle Metalle erwärmt werden. Heute wird die induktive Erwärmung vorwiegend für unlegierte und legierte Stähle, aber auch für Kupfer- und Aluminiumlegierungen angewendet. Dabei sollte der zu erwärmende Teil möglichst eine regelmässige Form aufweisen. Es ist die Erwärmung ab Stange, von Abschnitten oder Teilerwärmung von Werkstücken möglich. Darüber hinaus sind eine grosse Zahl von Anwendungen möglich, welche die Vielfalt der industriellen Fertigungsverfahren widerspiegeln (Tabelle VIII).

Die Erwärmung mit Mittelfrequenz wird heute für sehr grosse Produktionsmengen eingesetzt. Dabei sind der Durchsatz und die installierten Leistungen z. B. für die Vollerwärmung in den letzten Jahren ganz enorm gestiegen, wie Tabelle IX zeigt.

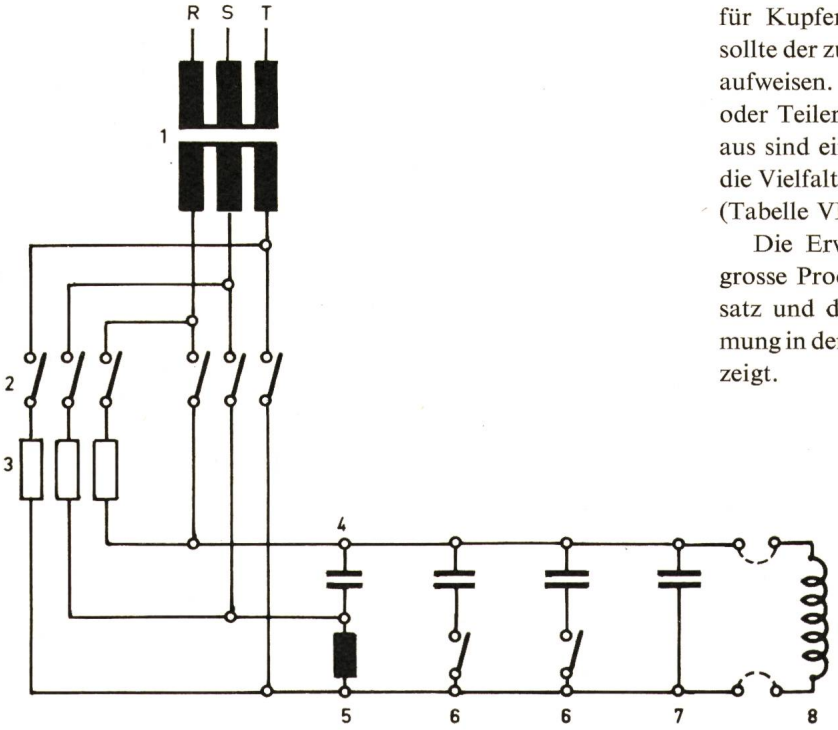


Fig. 26
Einphasiger Anschluss eines NF-Ofens durch Symmetrierschaltung

1 Netztransformator
2 Anfahrschütz
3 Anfahrwiderstand
4 Symmetrierbatterie
5 Symmetrierdrosselspule
6 schaltbare Kondensatorstufen
7 Kondensatorgrundstufe
8 Induktor-Ofenspule

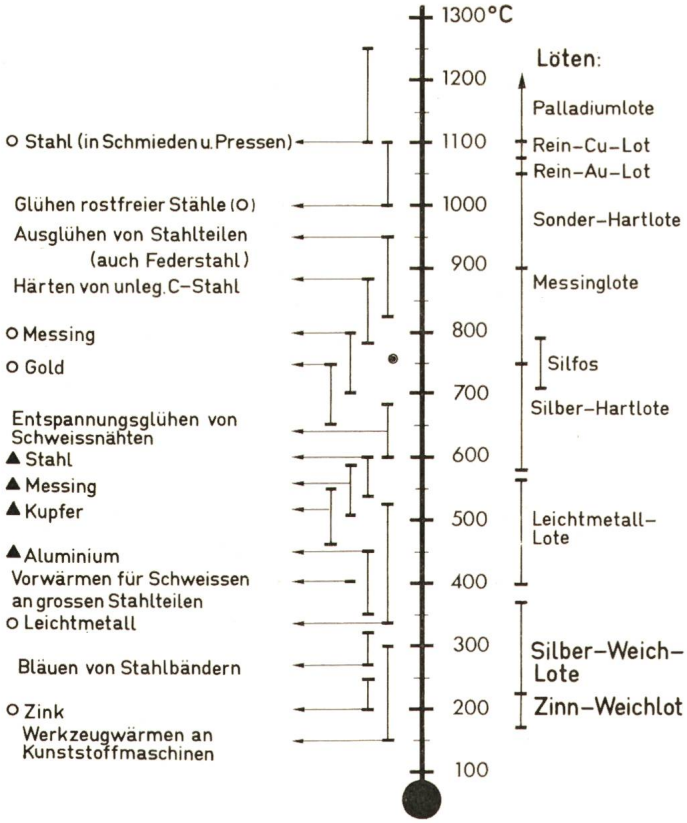


Fig. 27
Temperaturbereiche der verschiedenen induktiven Wärmebehandlungen

○ Vorwärmen für Warmverformung von ...
▲ Weichglühen von ...
● Curiepunkt von Stahl

Anwendungsmöglichkeiten der Warmverformung

Tabelle VIII

Verfahren	Zu erwärmendes Material
Schmieden	Erwärmen von Blöcken oder von ganzen Stangen oder Teilerwärmung
Walzen	Kontinuierliches Erwärmen des Walzgutes
Stangenpressen	Erwärmung der Rohlinge
Ziehen	Vorwärmen des Werkstückes und kontinuierliches Erwärmen der Ziehdüse
Biegen	Erwärmen der Biegestelle
Stauchen	Erwärmen des zu stauchenden Materials
Tiefziehen	Rekristallisationsglühen des Werkstückes
Sintern	Gepresstes Metallpulver

Installierte Leistungen für Vollerwärmung

Tabelle IX

Jahr	Durchsatz (Vollerwärmung) kg/h	Installierte MF-Leistung kW
1950	200	100
1970	7000	2500
geplant	ca. 12 000	4200

4.2.3 Bauweise der Erwärmungsmaschinen. Heute werden die meisten Anlagen mit automatischer Materialzufuhr und -entnahme ausgeführt. Beim Vergleich mit andern Erwärmungsarten müssen die Kosten dieser Anlagen mitberücksichtigt werden.

Im allgemeinen müssen bei allen induktiven Erwärmungsmaschinen beim Übergang auf andere Werkstückdurchmesser die Induktoren ausgetauscht werden. Es ist deshalb ein Lager von Induktoren notwendig. Die Umstellarbeiten sowie die Änderung der Durchsätze sind im allgemeinen leicht möglich.

Sowohl für Voll- wie auch für Teilerwärmungen sind Anlagen mit verschiedenen Transporteinrichtungen für das Werkstück gebräuchlich. Die verschiedenen Grundformen seien im folgenden beschrieben.

4.2.3.1 Vollerwärmungsanlagen.

a) Durchstosserhitzer

Die Blöcke oder Bolzen werden im Schritt oder kontinuierlich durch den Induktor hindurchgeschoben und gleiten auf wassergekühlten und verschleissfesten Schienen. Ein Beispiel eines Durchstosserhitzers zeigt Fig. 28.

Der Durchstosserhitzer zeichnet sich durch seine einfache und robuste Transportvorrichtung aus. Der Platzbedarf für die Transporteinrichtung ist klein. Der Induktor kann sehr eng gekoppelt werden; daher ist der Wirkungsgrad der Anordnung gut. Bei grossen Werkstückgewichten, grossen Durchsätzen und zu hohen Temperaturen besteht die Gefahr des Zusammenklebens der Blöcke. Für solche Anlagen sind deshalb Blockbrecher vorzusehen.

b) Hubbalkenerhitzer

Die Schmiedeblöcke werden durch einen Hubbalken, der eine rechteckige Bewegung ausführt, durch den Induktor hindurchgeführt. Fig. 29 zeigt ein Beispiel einer Hubbalkenanlage.

Dieser Transport ist verschleissfrei, da die Werkstücke gegenüber dem Transportsystem keine Relativbewegung ausführen. Neben dem Hubbalken benötigt der Hub jedoch zusätzlich Platz in der Induktionsspule. Deshalb sind die Kopplung und der Wirkungsgrad schlechter. Der Hubbalkenerhitzer eignet sich aus diesen Gründen nicht für Werkstücke mit einem Durchmesser unter ca. 60 mm. Dagegen besteht praktisch keine Gefahr des Verschweissens der Werkstücke.

c) Durchlauferhitzer

Knüppel, Stangen und Rohre werden als Ganzes durch die Induktoren geführt. Der Antrieb erfolgt durch die ausserhalb der Induktoren liegenden Transportrollen. Fig. 30 zeigt eine Anlage mit Stangenerhitzer.

Der Transport ist äusserst einfach und die Kopplung gut. Die Führung des Materials erfordert Abstützungsvorrichtungen zwischen den Teilspulen.

4.2.3.2 Teilerwärmung von Werkstücken. Der spezifische Leistungsbedarf je Gewichtseinheit ist bei Teilerwärmung grösser als bei der Vollerwärmung wegen der Wärmeableitung im kalten Teil.

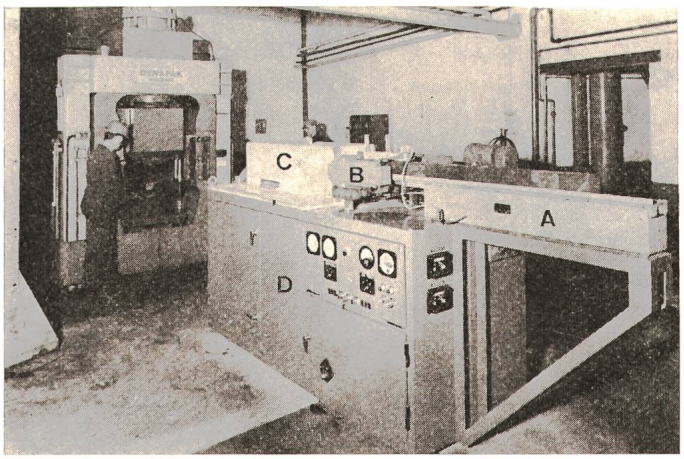


Fig. 28
Durchstosserhitzer für Schmiedeblöckchen

A Vibrator, Beschickung
B Kettenförderer
C Induktionsspule
D Chassis mit eingebauten Steuer- und Überwachungseinrichtungen sowie Kompensationskondensatoren

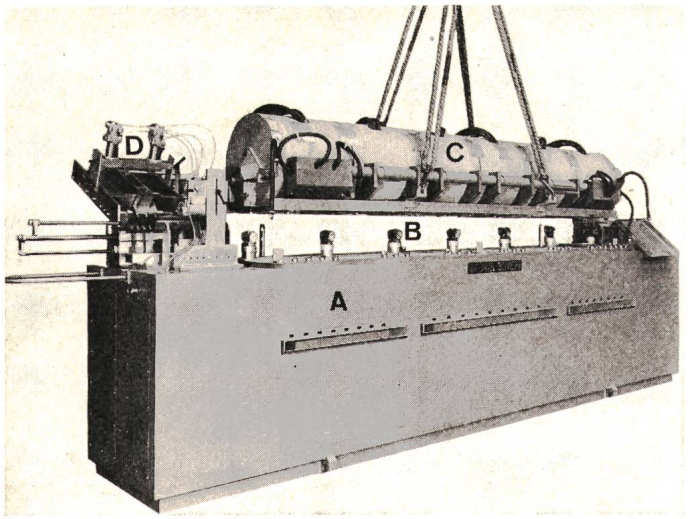


Fig. 29
Schmiedeblockerwärmungsstation mit Hubbalken-Fördersystem

A Chassis mit elektrischer Steuerung sowie Kühlwasser und Hydraulikeinrichtungen
B Stössel zu Hubbalkenförderer
C Induktionsspule
D Beschickungseinrichtung

a) Durchlauf- oder Rotationserhitzer

Die Werkstücke werden von einer ausserhalb des Induktors liegenden Transportvorrichtung durch einen geraden oder kreisförmigen Induktor geführt. Da die Werkstücke einseitig gehalten werden, ist eine minimale Länge des kalten Teiles notwendig. Beide Typen sind für kleine Stückzahlen nicht geeignet. Die Ansicht eines Rotationserhitzers zur Teilerwärmung zeigt Fig. 31.

b) Stationserhitzer

Die Werkstücke können von Hand oder mittels einer Transportvorrichtung in den Induktor eingeführt werden. Ein Beispiel eines Stationserhitzers zeigt Fig. 32.

Die Kopplung ist bei dieser Bauart sehr gut. Der Stationserhitzer ist in der einfachen Ausführung nicht für kurze Taktzeit geeignet.

4.2.4 Frequenz und Leistungsbestimmung. Wie im Abschnitt 1 dargestellt wurde, ist die Eindringtiefe des Stromes abhängig von der Wurzel aus elektrischem Widerstand über relativer Permeabilität und Frequenz. Bei gegebenem Werkstückdurchmesser und gegebenem Material wird die Frequenz durch den erreichbaren Wirkungsgrad, dem benötigten Temperaturverlauf über den Querschnitt und die Aufheizzeit bestimmt.

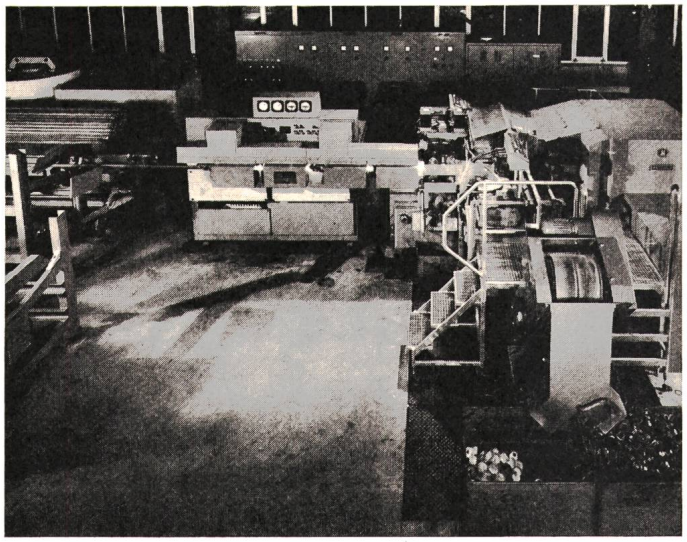


Fig. 30
Induktiver Stangenerhitzer

Bereiche der Querschnittsabmessungen der Werkstücke in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Werkstoffe bei ihrer Warmformtemperatur (nach VDI 3132/1959)

Tabelle X

Frequenz		Stahl 1200 °C mm	Messing 800 °C mm	Al. u. Al-Leg. 500 °C Kupfer 850 °C mm
Netzfrequenz	50 Hz	150–[1])	110–[1])	52–[1])
Mittelfrequenz	500 Hz	60–250	37–440	16–820
	2000 Hz	30–120	18–210	8–410
	5 000 Hz	20– 85	11–130	5–260
	10 000 Hz	14– 60	9–100	3,5–180
Hochfrequenz	450 kHz	2,5– 8	1,0– 15	0,5– 26
	1,0 MHz	1,5– 6	0,8– 12	0,35– 18

[1]) bis zu den praktisch vorkommenden Durchmessern

Tabelle X zeigt einen Überblick über normal gebräuchliche Frequenzen von verschiedenen Werkstoffen.

Die benötigte elektrische Energie für die Erwärmung von 1 kg Material auf Schmiedetemperaturen lässt sich bei mittleren Wirkungsgraden der Induktoren berechnen. Sie ist im Diagramm von Fig. 33 dargestellt.

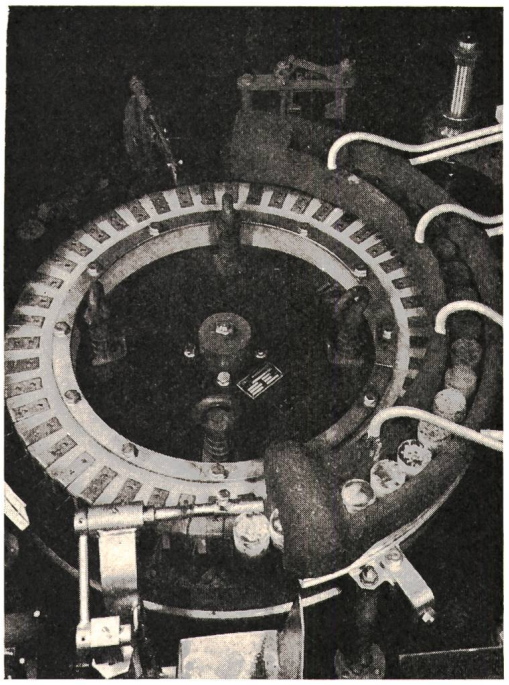


Fig. 31
Rotationserhitzer für die Teilerwärmung von Bolzen

Es können je Stunde 400 Abschnitte à 50 mm resp. 600 Abschnitte à 40 mm Durchmesser auf 1200 °C erwärmt werden. Die Bolzenlänge beträgt ca. 150 mm

4.2.5 Eigenschaften der induktiven Erwärmungseinrichtungen. Die MF-Erwärmungseinrichtungen haben folgende Vorteile:

- sehr kurze Erwärmungszeit, da die Wärme im Material selbst erzeugt wird;
- geringe Verzunderung;
- gute Reproduzierbarkeit der Temperaturen;
- Erwärmung der Werkstücke in gleichmässigem Takt;
- Möglichkeit zur Automatisierung;
- rasche Betriebsbereitschaft der Anlage;
- geringer Platzbedarf der Anlage am Arbeitsplatz;
- geringe Wärmeabstrahlung auf die Umgebung;
- keine Entwicklung von Staub- oder Verbrennungsgasen;
- einfache Bedienung.

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- meist hohe Investitionskosten;
- meist hohe Energiekosten;
- Erfordernis von qualifiziertem Wartungspersonal;
- Spulenwechsel bei Dimensionswechsel.

4.2.6 Wirkung der induktiven Erwärmung auf das Schmieden. Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der induktiven Erwärmung müssen alle Einflüsse und Eigenschaften berücksichtigt werden.

Die kurze Erwärmungszeit ergibt sehr dünne Zunderschichten beim erwärmten Rohling und damit höhere Werkzeugstandzeiten, saubere Werkstücke, weniger Materialzugabe, geringe Randentkohlung. Eine Aufkohlung ist nicht möglich.

Die reproduzierbaren Temperaturen ermöglichen das Arbeiten mit hohen konstanten Schmiedetemperaturen und je nach Arbeitsablauf das Einsparen einer Zwischenerwärmung. Sehr oft kann in diesen Fällen ein Spannungsfreiglühen des Schmiedestückes eingespart werden. Trotz der raschen Erwärmung entstehen im Vergleich zu Strahlungsöfen weniger Risse, damit werden die mechanischen Eigenschaften wie Wechselfestigkeit und Kerbschlagfestigkeit erhöht.

Das taktweise Erwärmen der Schmiedeblöcke ergibt selbst bei der Materialzufuhr von Hand eine merkliche Erhöhung der Produktion.

Ein allgemein gültiger Kostenvergleich von verschiedenen Erwärmungsmethoden ist nicht möglich. In jedem Fall müssen neben den Energie- und Investitionskosten die technologischen und metallurgischen Vorteile der induktiven Erwärmung in die Wirtschaftlichkeitsberechnung miteinbezogen werden.

Überall dort, wo hohe Benützungsdauer der Anlage, günstige Energiekosten, kurze Taktzeiten, wenig Dimensionswechsel und regelmässige Werkstücke vorhanden sind, sollte der Einsatz der Induktionserwärmung geprüft werden.

4.3 Induktives Schweissen

4.3.1 Einleitung. Das induktive Schweissen befasst sich mit der Verbindung zweier metallischer Teile unter gleichzeitiger Einwirkung von Hitze und Druck und in der Regel ohne Materialzusatz. Es ist dem Widerstandsschweissen verwandt mit dem Unterschied jedoch, dass die Erwärmung durch induzierte Ströme erzeugt wird und dass die Druckrollen keinen Strom führen.

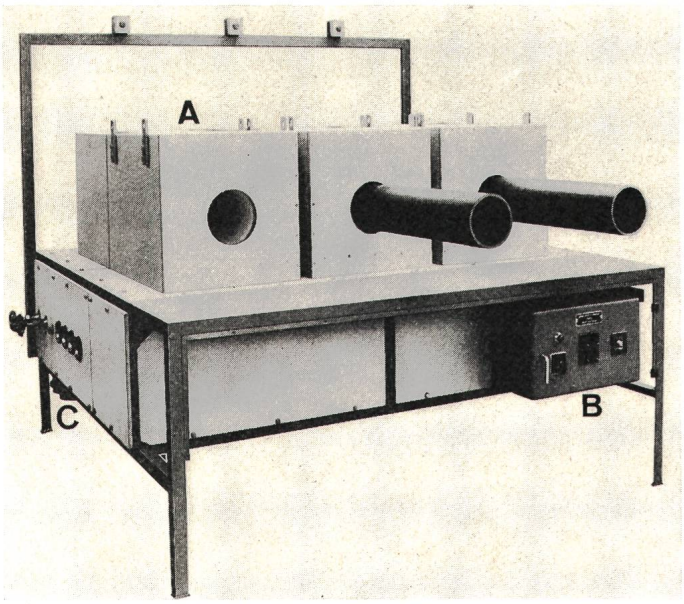


Fig. 32
Einfache Triplexstation für die Teilerwärmung (Rohrenden)
A eine der drei Induktionsspulen
B elektrische Steuerung mit Taktzeitgeber
C Kühlwasserüberwachung

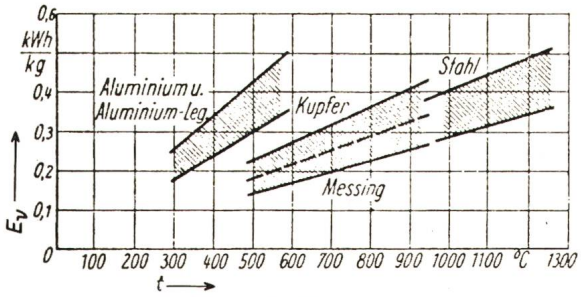


Fig. 33
Energieverbrauch E_V in kWh/kg in Abhängigkeit von der Temperatur t für verschiedene Werkstoffe
(nach VDI 3132/1959)

4.3.2 Anwendung. Das induktive Schweissen beschränkt sich gegenwärtig fast ausschliesslich auf das Schweissen im Durchlauf von Längsnähten an Rohren oder sonstigen geschlossenen Profilen. In Frage kommt die Anwendung von Mittelfrequenz mit einem Linieninduktor, der induzierte Strombahnen parallel zur Naht erzeugt und von Hochfrequenz mit einem umschliessenden Induktor. Wegen der höheren erzielbaren Leistungsdichte und der beschränkten erwärmten Zone hat die Hochfrequenz in dieser Schweissungsart praktisch das Monopol erworben.

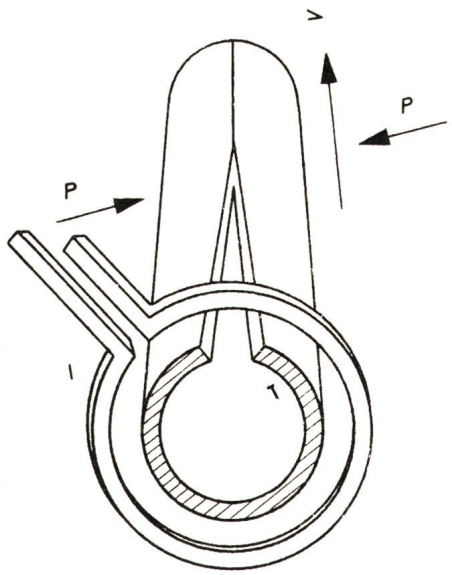


Fig. 34
Schematische Darstellung des Schweissprozesses
Das Schlitzrohr *T* bewegt sich mit der Geschwindigkeit *V* im Induktor *I*. Die auf hohe Temperatur gebrachten Kanten werden mit dem Druck *P* der Pressrollen gegeneinander gedrückt

Die induktive Methode steht in Konkurrenz mit dem Widerstandsschweissen mittels Rolltransformatoren und dem Lichtbogenschweissen unter Pulver oder Schutzgas, insbesondere bei der Herstellung von Spiralnahtrohren.

4.3.3 Prinzip. Drei physikalische Erscheinungen sind beim induktiven Schweissen wesentlich:

a) Induktionseffekt (kontaktlose Leistungsübertragung);
b) Skineffekt (Oberflächenerwärmung);
c) Näherungseffekt (Anziehen zweier parallel verlaufender Strombahnen).

Die Wirkungsweise ist in den Fig. 34 bis 36 erläutert.

Der im Induktor fliessende Hochfrequenzstrom induziert im Schlitzrohr einen Strom, welcher sich entlang dem in Fig. 35 schematisch dargestellten Weg ausbreitet. Für die Schweissung ist allein die Erwärmung der Kanten des Schlitzrohres von Nutzen, die durch das Zusammenspiel des Skineffektes und des Näherungseffektes bewirkt wird. Der am Rohrumfang fliessende Strom erzeugt eine Verlustwärme, die klein gehalten werden muss, um nicht den Wirkungsgrad zu verschlechtern. Dies ist durch Reduktion des Widerstandes am Rohrumfang möglich, und zwar durch eine künstliche Verbreitung der Strombahn (Induktorausführung).

Der in den Schlitzkanten fliessende Strom erwärmt das Material, wobei die Temperatur gegen den Schweisspunkt hin zunimmt. In der Nähe des Zusammenschlusses liegt diese nur wenige Grade unter der Schmelztemperatur des zu verschweissenden Materials. Bei den für diesen Prozess üblichen Frequenzen, von ungefähr 200...500 kHz, bleibt die Dicke der teigigen Schicht beiderseits der Kante unterhalb eines Millimeters. Die Schichtdicke hängt stark von der Schweissgeschwindigkeit ab. Sie wird mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner. Die Schweissqualität wird um so besser, je dünner die erwärmte Schicht ist, d. h. also je höher die Schweissgeschwindigkeit liegt. Unterhalb ca. 10...15 m/min ist eine geeignete induktive Schweissung kaum mehr möglich. Der Übergang von der warmen zur kalten Zone ist steil. Dies hat den Vorteil, dass hohe Pressrollendrücke ohne Gefahr der Deformation des Rohres angewendet werden können. Da nur ein kleiner Schweisswulst entsteht, werden dadurch alle Unreinigkeiten oder Oxydreste der Seitenkanten aus der Schweissnaht herausgepresst.

Ein Teil des induzierten Stromes fliesst der Innenfläche des Rohres entlang anstatt an den Schlitzkanten, wodurch die Rohrkanten kurz geschlossen werden (Fig. 36). Ohne spezielle Vorkehrungen reduziert dieser Strom den Wirkungsgrad der Erwärmung beträchtlich. Durch Einsetzen eines Magnetkernes (Impeder) in das Schlitzrohr zwischen dem Induktor und den Pressrollen unterdrückt man diesen Strom durch Erhöhung der Impedanz der Rohrinnenfläche.

4.3.4 Einrichtungen. Eine Rohr- oder Profilschweißstrasse besteht gewöhnlich aus den folgenden Elementen: Einer Abhaspelvorrichtung für die Bänder, einer Bandstumpfschweissmaschine für den kontinuierlichen Anlauf, einer Bandbesäumeinheit, einer Vorformstrasse, einem Schweisstisch, der Nahwulsthobelvorrichtung, der Kühlstrecke, der Endkalibrierstrecke und einer Trennsäge. Eine solche Rohrstrasse zeigt Fig. 37.

Der Hochfrequenz-Generatorschrank wird in der Regel in der Nähe der Schweißstelle aufgestellt. Die HF-Leistung wird über einen speziell gebauten Anpasstransformator übertragen, der zur Vermeidung von Überschlägen eine möglichst geringe Ausgangsspannung und einen hohen Strom aufweist. Verschiedene Einstellvorrichtungen für die optimale Lage des Induktors, die Schlitzführung und den Schweissrollendruck vervollständigen den Schweisstisch (Fig. 38).

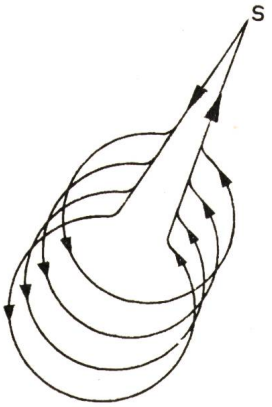


Fig. 35
Weg des induzierten HF-Nutzstromes im Schlitzrohr
Der Strom konzentriert sich längs der Kanten, was deren Erhitzung hervorruft
S Schweisspunkt

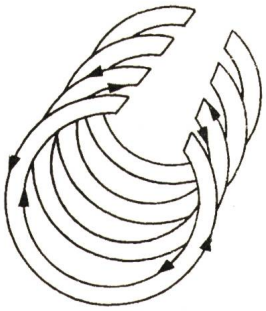


Fig. 36
Weg des Verluststromes
Die Verwendung eines Magnetkernes hebt ihn praktisch auf

4.3.5 Technologie. Der am meisten verwendete Rohstoff ist ein niedrig gekohlter Stahl, dessen Kohlenstoffgehalt unterhalb 0,16% und dessen Siliziumgehalt unter 0,2% liegen. Höhere Anteile verschlechtern die Schweissbarkeit. Sie verlangen spezielle Massnahmen und eine höhere Schweissleistung, wenn man eine Aushärtung der Nachbarzonen der Schweissnaht verhindern will. Bei Verwendung von härterem Stahl ist ein Weichglühen entweder des ganzen Rohres oder nur der Schweisszone unumgänglich, zum Beispiel durch induktive Mittelfrequenzerwärmung. Da die Erwärmung kontaktlos erfolgt, ist die Oberflächenqualität des zu schweissenden Materials unwichtig. Es ist daher möglich, ein warmgewalztes, ungebeiztes Blech zu verschweissen, sofern dies der Verwendungszweck des Rohres zulässt. Für ein Rohr von tadelloser Ausführung und hoher Qualität verwendet man hingegen kaltgewalztes Blech. Für andere Werkstoffe als Stahl sind die in Fig. 39 angegebenen Geschwindigkeiten wie folgt zu korrigieren: Für Aluminium und Messing liegt die Schweissgeschwindigkeit ungefähr 130% höher. Bei rostfreiem Stahl und Kupfer ist nur etwa 60...75% der Geschwindigkeit erreichbar.

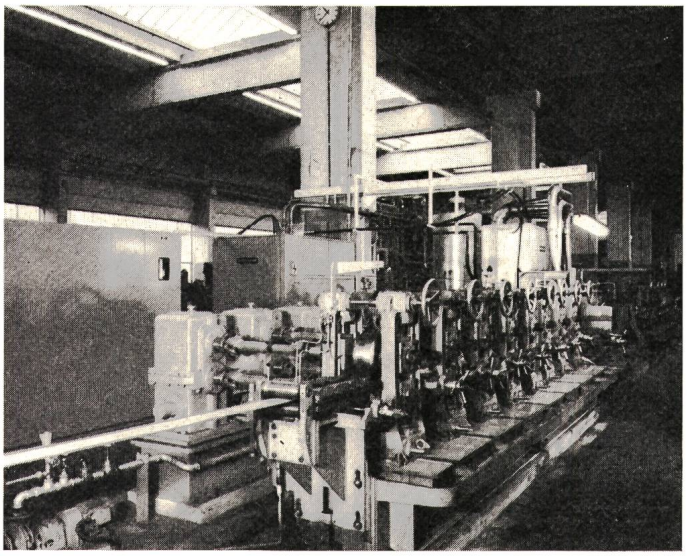


Fig. 37
Ausschnitt aus einer Fertigungsstrasse zum induktiven Längsnahtschweissen von Stahlrohren, ausgerüstet mit einem 220-kW-HF-Generator
Im Vordergrund: Profiliergerüste, Schweisstisch, Absaugung für Nassentstaubung und Vorrichtung für Aussenentgratung. Über dem Schweisstisch den Stelladaptor

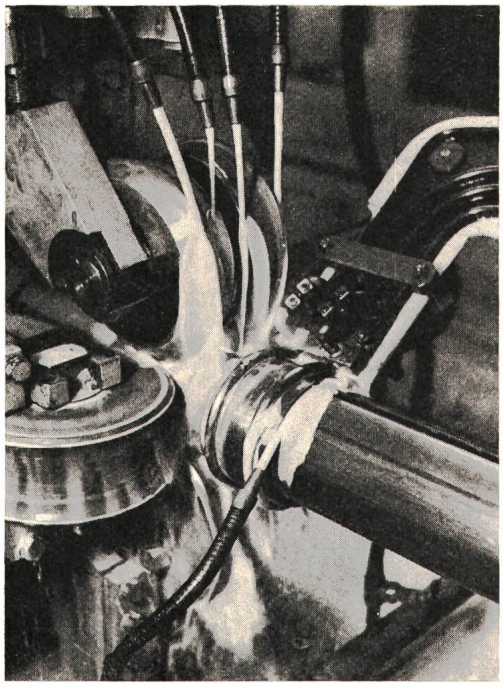


Fig. 38
Teilansicht eines Schweisstisches für 400-kW-HF-Leistung während des Betriebes
Man bemerkt die Schweissrollen, den einwindigen Induktor und rechts das Schlitzrohr. Zwischen dem Induktor und den oberen Rollen kann man die bis zur Weissglut erhitzten Zonen der Kanten erkennen. In diesem Fall ist der Induktor praktisch komplett von Kühlemulsion umgeben

4.3.6 Eigenschaften des induktiven Hochfrequenz-Schweissens.

– Der Hauptvorteil ist die, verglichen mit andern Verfahren, sehr hohe erreichbare Schweissgeschwindigkeit (100 m/min und mehr sind üblich). Die obere Grenze hängt vom geeigneten Antrieb des Bandes in der Formstrecke und besonders von der Rohrtrennvorrichtung ab.
– Die Qualität und die Gleichmässigkeit der Schweissung werden durch die Oberflächenqualität des Bandes nicht beeinflusst.
– Kleiner Energiebedarf gegenüber andern Verfahren.
– Keine nennenswerten Spuren auf dem Rohr, also besseres Aussehen des Endproduktes.
– Gute Verschweissung von dünnen Wandstärken.

Vergleich verschiedener Härtverfahren

Tabelle XI

Verfahren	Härteschicht mm	Härte HRc	Behandlungszeit	Erwärmt wird
Nitrierhärten (thermo-chemisch)	0,05...0,5	60...70	Stunden	ganzes Werkstück[1])
Einsatzhärten (thermo-chemisch)	0,1...2,0	56...62	Stunden	ganzes Werkstück[1])
Flammhärten (rein thermisch)	1,0...4,0	50...62	Minuten	nur Härtezone
Induktionshärten (rein thermisch)	0,2...5,0	50...65	Sekunden	nur Härtezone

[1]) nicht zu härtende Partien müssen abgedeckt werden.

– Möglichkeit der Verarbeitung von ungebeiztem Band ohne Verschlechterung der Schweissnaht.
– Die Netzleistung ist, bei gleicher Schweissgeschwindigkeit, ungefähr halb so gross wie bei der Schweissung mit Kontaktrollen. Die Folge davon ist eine beachtliche Einsparung an Energiekosten.
– Es ist ohne grosse Änderung möglich, eine bestehende Rohrschweissanlage durch Verwendung der induktiven HF-Schweissung zu modernisieren.

4.4 Induktives Oberflächenhärten

4.4.1 Verfahrensvergleich. Das Härten von Stahloberflächen ist in der gesamten metallverarbeitenden Industrie von grösster Bedeutung. Oberflächenhärten kann mit thermo-chemischen Diffusionsverfahren und durch Gefügeumwandlung mittels rein thermischer Verfahren realisiert werden. Markante Vergleichswerte gibt Tabelle XI.

Das induktive Härten unterscheidet sich vom Flammhärten nur durch die Art der Aufheizenergie (el. Energie bzw. Gas) und kann mit den anderen Härteverfahren in keinem Punkte wertmässig vergleichend beurteilt werden. Die Verfahrensauswahl wird sich in erster Linie nach dem Werkstück und den daran gestellten Anforderungen richten, dann aber auch nach betrieblich vorhandenen Möglichkeiten, Einrichtungen und Energiekosten. Die angeführten Härtewerte setzen selbstverständlich jeweils geeignete Stahlsorten voraus und sind in Grenzen durch das Verfahren beeinflussbar. Dies gilt auch für die angegebenen üblichen Härteschicht-Dicken, welche bei allen Verfahren über die Dauer der Behandlung wählbar sind.

Grundsätzlich eignen sich alle thermo-chemischen Verfahren besonders für das Härten der ganzen Werkstückoberfläche, wogegen den thermischen Verfahren bei der Härtung eines Teiles der Oberfläche der Vorzug zu geben ist.

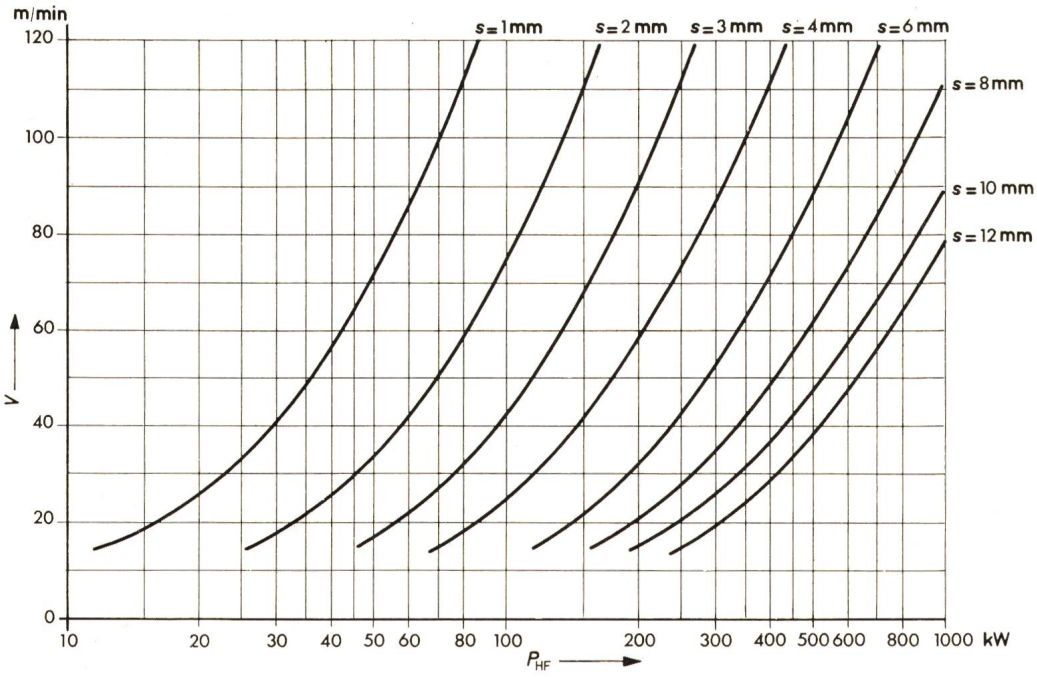


Fig. 39
HF-Induktions-Rohrschweissen
Kurven der optimalen Schweissgeschwindigkeit V in Funktion der HF-Klemmenleistung P_{HF} und der Rohrwandstärke s für Stahl

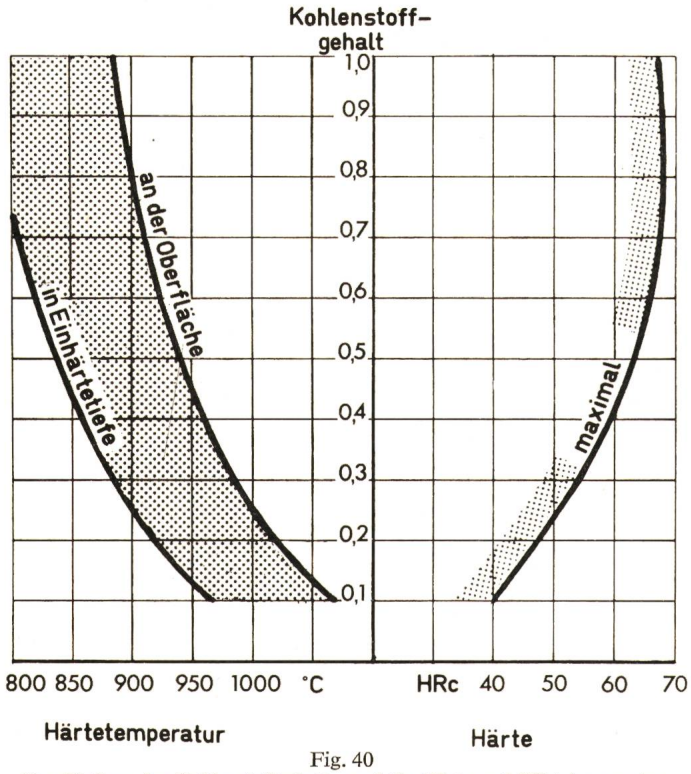


Fig. 40
Der Einfluss des Kohlenstoffgehaltes auf die Härte und Härtetemperatur beim induktiven Oberflächenhärten

Eingetragen sind:

1. Verlauf der erforderlichen Umwandlungstemperatur (in Einhärtetiefe)
2. sich ergebende mittlere Oberflächentemperatur
3. Verlauf der maximal erreichbaren Härte

4.4.2 Merkmale des induktiven Verfahrens. Das induktive Verfahren zählt zu den thermischen Wärmebehandlungen, welche das Ziel verfolgen, eine Gefügeumwandlung an jeder bestimmbaren Stelle eines Werkstückes zu erreichen. Die induktive Erwärmung erlaubt ein rasches und räumlich wie temperaturmässig steuerbares Aufheizen der Stahloberfläche auf Austenitisierungstemperatur. Beim raschen Abschrecken des Stahls aus diesem Temperaturbereich wird die gewünschte harte Martensitschicht gebildet.

Voraussetzung dafür ist das Verwenden von Kohlenstoffstahl mit mindestens 0,35 bis 0,45% C-Gehalt. Kohlenstoff ist im Zusammenhang mit der Härtbarkeit der Stähle das wichtigste Legierungselement des Eisens und bestimmt, wie Fig. 40 zeigt, sowohl die Härtetemperatur als auch die erreichbare Maximalhärte. Auch aufgekohlte Partien sind induktiv härtbar. Dabei soll in einer, der verlangten Schichtdicke entsprechenden Tiefe, noch ein C-Gehalt von 0,4% vorhanden sein, bei einer Kohlenstoffkonzentration von 0,7...0,8% an der Oberfläche.

Kennzeichnende Merkmale des induktiven Härtens sind:

- Schnellstes Verfahren zum Oberflächenhärten;
- Geringste Verzunderung der Härtestellen unterbleibt;
- Ein Verziehen der Teile tritt nur selten auf;
- Nachbehandlungen wie Richten, Abschleifen und Anlassen können entfallen oder bleiben auf ein Minimum beschränkt;
- Reproduzierbarkeit der erzielten Resultate;
- Eignung für den Einsatz in halb- bis vollautomatischen Strassen.

4.4.3 Einfluss der Frequenz und der Leistung. Ein Wechselstrom dringt umso weniger tief in das Material ein, je höher seine Frequenz ist. Folglich wirkt ein hochfrequenter Strom in einer dünnen Oberflächenschicht. Dieser Haut-(Skin-)Effekt bietet sich in hervorragender Weise für das begrenzte Erwärmen von Oberflächenschichten zum Zwecke des Oberflächenhärtens an (Fig. 41).

Die Frequenz beeinflusst die Tiefe, bis zu der eine Gefügeumwandlung erreichbar ist. Diese sogenannte Einhärtetiefe ist abhängig von diesem Frequenzeinfluss. Sie ist jedoch nicht direkt proportional zur Eindringtiefe. Fig. 42 zeigt, welche Einhärtetiefen (Eht.), abhängig von der Frequenz, in der Praxis erwartet werden dürfen.

Zumeist werden dünne Härteschichten verlangt und häufig stellt sich die Frage: Welches ist die dünnste Schicht, die mit einer gegebenen Frequenz noch zuverlässig erreicht werden kann? Diese Frage ist jedoch nicht von der Frequenz alleine aus beantwortbar, sondern muss im Zusammenhang mit der Leistungsdichte betrachtet werden.

Die Leistungsdichte oder spezifische Leistung (P') ist die induzierte Leistung bezogen auf die erfasste Oberfläche (kW/cm²). Bei gleicher Frequenz, aber halber Leistungsdichte, ist die Einwirkzeit ungefähr doppelt so gross. Die entwickelte Wärme wird nach innen geleitet und erhöht damit die Einwärmetiefe. Dieser Zusammenhang ist in der Fig. 42 dargestellt. Die Leistungsdichte hat also den gleich grossen Einfluss auf die Eindringtiefe wie die Frequenz. So kann beispielsweise auch Hochfrequenz eine umgewandelte Schicht von 3 mm erzeugen, wenn die Leistungsdichte mit nur 0,3 kW/cm² gewählt wird. Umgekehrt ist bei 10 kHz mit einer Leistungsdichte von 3 kW/cm² eine sonst für Hochfrequenz typische Einhärtetiefe von s = 1 mm erreichbar.

4.4.4 Verfahrenstechnologie. Aus der Art der Stellung oder Bewegung, die das zu härtende Werkstück gegenüber dem Induktor einnimmt, können vier Härtevarianten abgeleitet werden:

a) Die Standhärtung. Werkstück und Induktor stehen einander fixiert gegenüber. Das Abschreckmedium wird unmittelbar nach beendeter Heizzeit an das Werkstück gespritzt oder das Werkstück wird in das Abschreckmedium fallen gelassen. Hauptanwendungsgebiet: Kleinteile aller Art, Werkzeuge.

b) Die Umlaufhärung. Rotationssymmetrische Teile rotieren während des Aufheizens (200...300 U./min) in einer meist umschliessenden Spule, wodurch ungleichmässige Erwärmungen vermieden werden. Das Abschrecken durch Rundduschen, welche un-

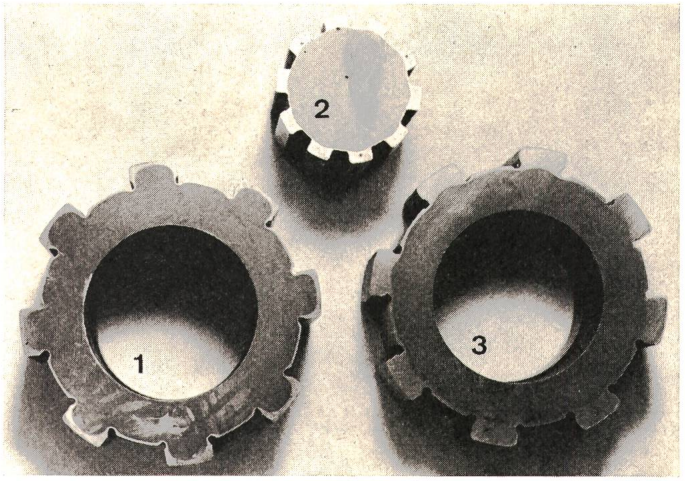


Fig. 41
Schliffbilder von Antriebswellen; mit Hochfrequenz von 100 kW behandelt

Schliff 1: Vorschubhärtung mit konturangepasstem Induktor (Stückdurchmesser 65 mm)

Schliff 2 und 3: Umlauf-Vorschubhärtung (Stückdurchmesser *2* = 32 mm, *3* = 65 mm)

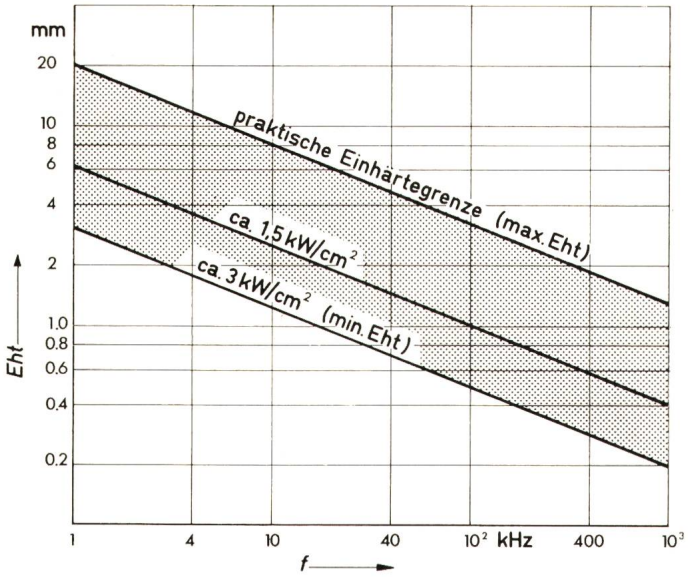


Fig. 42
Die Abhängigkeit der Einhärtetiefe *Eht* von der Frequenz und der Leistungsdichte

mittelbar nach dem Abschalten der Heizenergie aktiviert werden, ergibt rundum gleichmässige Härte-Schichtdicke und das Werkstück bleibt verzugsfrei. Hauptanwendungsgebiet: Kugelköpfe, Lagersitze Hülsen, Räder.

c) Die Vorschubhärtung. Das Werkstück oder der Induktor führt eine horizontale oder vertikale, aber parallele Bewegung aus. Dabei wird jeweils nur die unter dem aktiven Induktorteil liegende Werkstückpartie erwärmt. Die Abschreckbrause folgt dem Induktor unmittelbar und führt das Kühlmedium in einem Winkel an die Werkstückoberfläche, so dass ein Unterspülen des Induktors vermieden wird. Hauptanwendungsgebiet: Drehbankbetten, Sägen, Messer, Laufbahnen.

d) Die Umlauf-Vorschubhärtung ist eine Kombination der beiden letztgenannten Varianten. Zumeist wird dabei das rotierende Werkstück (60...300 U./min) im Vorschub (5...100 mm/s) durch den stillstehenden Induktor geführt. Unmittelbar nach dem Induktor ist die ringförmige Dusche angeordnet und führt das Abschreckmedium an das Werkstück. Hauptanwendungsgebiet: Wellen aller Art.

4.4.5 Härteanlagen. Das induktive Härten verlangt neben der Erwärmungseinrichtung (Hoch- oder Mittelfrequenz-Generator mit angepasster Induktionsspule) auch noch zusätzliche Anlageteile. So muss unbedingt eine Abkühlungsmöglichkeit durch eine Dusche oder ein Bad vorhanden sein und ein Steuerelement, welches die Dusche aktiviert oder das Werkstück in dieses Bad fallen lässt. Wie für die anderen Härteverfahren sind für die induktive Härtung halb- oder vollautomatische Anlagen, je nach Anwendungszweck, notwendig. Fig. 43 zeigt eine halbautomatische Härtemaschine.

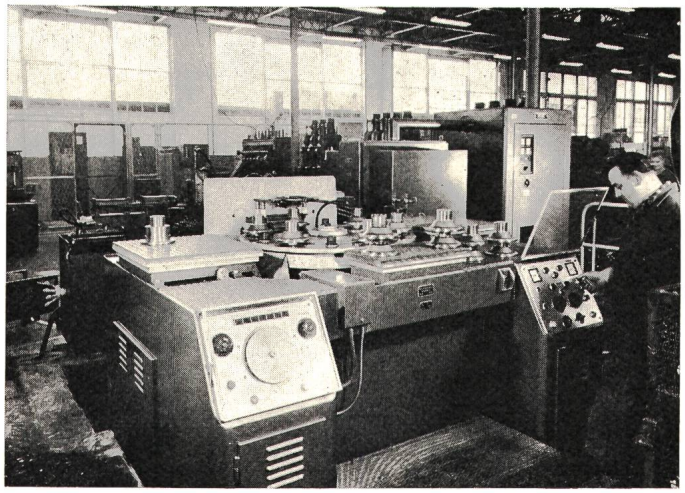


Fig. 43
Halbautomatische 100-kW-Hochfrequenz-Härteanlage für Standhärtung, Umlaufhärtung oder Umlauf-Vorschubhärtung in einer Lastwagenfabrik

Heikle Stahlqualitäten erfordern zur Reproduktion gleicher Härtewerte eine ganz bestimmte Temperatur des Abschreckmediums (z.B. einer Emulsion), so dass auch eine Umwälz-Rückkühlanlage für die Härteflüssigkeit vorgesehen werden muss.

4.5 Induktives Löten

4.5.1 Definition und Zweck. Löten ist ein Verfahren zum Verbinden zweier oder mehrerer Werkstücke mit Hilfe eines zum Schmelzen gebrachten Zusatzwerkstoffes, Lot genannt. Zumindest in der Zone, wo eine Lotverbindung zustande kommen soll, müssen die zu verbindenden Teile bis zur Schmelztemperatur des Lotes erwärmt werden. Geschieht die Erwärmung auf induktivem Wege, dann spricht man von Induktionslöten. Liegt die Löttemperatur unter 450 °C, so spricht man vom Weichlöten, während man Lötvorgänge oberhalb 450 °C als Hartlöten definiert (Fig. 44).

Die Auswahl der zweckmässigsten Arbeitstemperatur (und damit des Lotes) wird nach den beteiligten Werkstoffen getroffen, wobei deren Schmelzpunkt natürlich immer höher liegen muss als derjenige des Lotes.

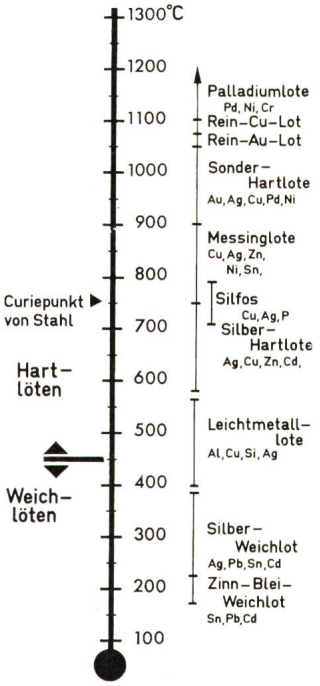


Fig. 44
Temperaturskala für das Löten

Mit dem Löten wird eine mechanisch-feste, gas- und wasserdichte sowie elektrisch leitende und nacharbeitsfreie Verbindung angestrebt. Andere Arbeitsverfahren mit ähnlicher bis gleicher Zielsetzung wären: Verschrauben, Nieten, Kleben, Schweissen.

Keines dieser Verfahren erreicht jedoch so viele erstrebte Verbindungseigenschaften wie das Löten. So ist beispielsweise das Schweissen selten nacharbeitsfrei und nicht an so verschiedenartigen Werkstoffen anwendbar, wie solche durch Löten verbunden werden können. Niet- und Schraubverbindungen sind normalerweise nicht dicht, Klebstellen wiederum nicht elektrisch leitend.

4.5.2 Merkmale des Induktionslötens. Wohl die markanteste Eigenschaft des induktiven Lötens ist die sehr rasche Wärmeentwicklung im Werkstück selbst. Die Wärme muss nicht erst von aussen zugeführt werden! Im Vergleich mit den verbreitetsten konventionellen Wärmequellen Ofen und Flamme, gilt für die Erwärmungsgeschwindigkeit folgende Relation:

Ofen = 1 Flamme = 200 Induktion = 1000

Der Operationsablauf «Löten», wie er in Fig. 45 dargestellt wurde, verkürzt sich deshalb im Bereich *A* erheblich. Für unerwünschte Wärmeableitung in benachbarte Werkstückpartien bleibt fast keine Zeit, eine nennenswerte Verzunderung unter-

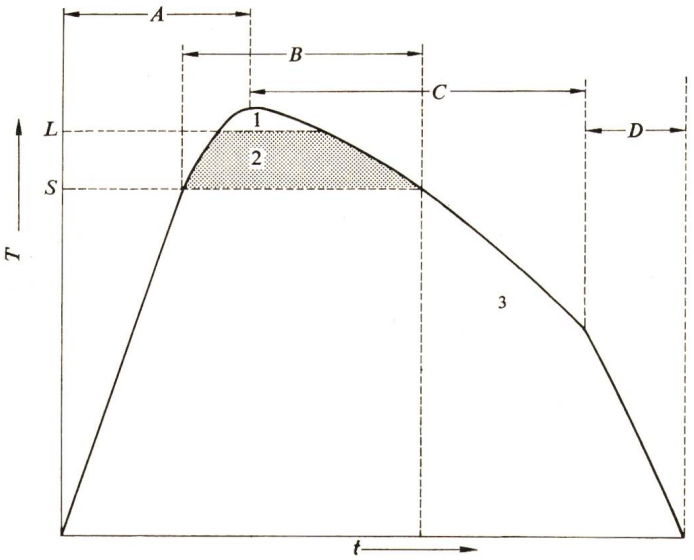


Fig. 45
Der zeitliche Ablauf einer Lötoperation

A Heizzeit	*Temperaturbereich 1:*
B Lötzeit	Lot 100 % flüssig
C Zeit natürlicher Abkühlung	(Teilebewegung möglich)
D Zeit für forcierte Abkühlung	*Temperaturbereich 2:* Eigentliche Lötzone
L Lot-Liquiduspunkt	(Bewegung soll unterbleiben)
S Lot-Soliduspunkt	
T Temperatur des Werkstückes	*Temperaturbereich 3:* Lot voll erstarrt
t Operationszeit	(Teilewegnahme kann beginnen)

bleibt und von der induzierten Energie geht nur sehr wenig nutzlos verloren.

Kennzeichnende Merkmale des Induktionslötens sind ausserdem:

- Sauberkeit;
- Geringe Belästigung des Personals;
- Wirtschaftlichkeit bei grösseren Stückzahlen;
- Rasche Betriebsbereitschaft;
- Geringe Energiekosten während Pausen und Leerlauf;
- Gute Reproduzierbarkeit;
- Gute Regulierfähigkeit der Energiezufuhr an das Werkstück;
- Gleichbleibende Lötqualität;
- Bedienung durch Hilfspersonal.

4.5.3 Frequenz- und Leistungseinfluss. Für das Löten werden sowohl Hochfrequenzgeneratoren mit einem Röhren-Oszillator als auch Mittelfrequenzanlagen mit rotierenden Motor-Generator-Umformern eingesetzt. Erstere arbeiten in einem Frequenzbereich von ca. 0,5...2,5 MHz, wobei für das Löten Ausgangsleistungen bis etwa 30 kW gebräuchlich sind. Wenn höhere Leistungen erforderlich sind, wird Mittelfrequenz (Frequenzbereich 3...10 kHz) eingesetzt. Dabei liegt das Leistungsschwergewicht unter 100 kW.

Auf ein bestimmtes Lötprogramm bezogen, richtet sich die Anlagenwahl nach der Faustregel: Klein und dünnwandig – Hochfrequenz, gross und dickwandig – Mittelfrequenz. Nur einigermassen symmetrische Werkstücke erlauben eine rechnerische Frequenzbestimmung. Im Zweifelsfalle ist immer die höhere Frequenz zu wählen. Eine klare Abgrenzung der Eignung zwischen Hoch- und Mittelfrequenz besteht nicht. Da mit kleinen Leistungsdichten (kW/cm²) gearbeitet wird, ist der Frequenzeinfluss gering.

Die erforderliche Leistung der Anlage lässt sich relativ genau bestimmen. Sie ist abhängig von der gewünschten Heizzeit, vom Gewicht der Lötstellenpartie, vom Wärmeinhalt der jeweiligen Metalle, von den unvermeidlichen Wärmeverlusten und vom Induktorwirkungsgrad.

Die üblichen Heizzeiten liegen bei Hochfrequenz vorwiegend zwischen einer und zwanzig Sekunden, bei Mittelfrequenz zwischen 10 und 200 s.

4.5.4 Verfahrenstechnologie. Die Technologie des Lötens stützt sich auf zahlreiche Erkenntnisse der metallurgischen Forschung. Es sind dies im wesentlichen:

- Bestimmung der über hundert gebräuchlichen Lötlegierungen;
- Haftvermögen auf den unterschiedlichsten Werkstoffen;
- Kapillarwirkungen;
- Geometrische Ausbildung der Lötstellen nach Beanspruchung;
- Versprödungs- und allgemeine Alterungserscheinungen.

In diesem Zusammenhang soll nur auf die mit der induktiven Erwärmung noch hinzukommende Technologie eingegangen werden. So zum Thema Lot:

Der raschen Erwärmung wären Eutektiklote sehr angepasst und solche Legierungen, welche ein rasches Fliessvermögen aufzuweisen haben, wie z. B. Silberlote geeigneter Zusammensetzung. Das Lot soll in genau dosierter Menge in Form von Folien oder Drahtabschnitten noch vor dem Heizen an günstiger Stelle so angebracht werden, dass es nicht schmilzt, bevor die Werkstücke Löttemperatur erreichen. Es soll vielmehr seine letzte Schmelzwärme von der grösseren Masse des Werkstükkes beziehen, dann aber gut in den vorgesehenen Lotspalt einlaufen können. Auch den rasch entstehenden Flussmitteldämpfen muss man eine nicht störende Entweichungsmöglichkeit bieten. Oft muss der günstigste Platz für das Lot empirisch gesucht werden, wie überhaupt das Bestimmen der Induktorform sehr oft Lötversuche voraussetzt. Fig. 46 zeigt eine Auswahl häufig vorkommender Verbindungsstellen mit jeweils einem Induktorvorschlag.

Schutzatmosphären- und Vakuumlötungen sind mit induktiver Erwärmung möglich, jedoch nur bei geforderten hochreinen Lötstellen (z. B. Edelmetalle bei Elektronikbauteilen) wirtschaftlich tragbar.

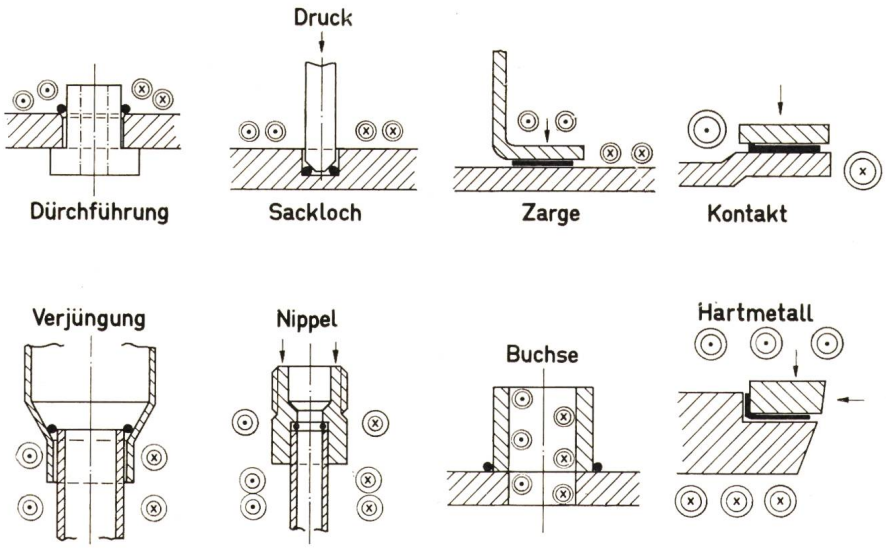


Fig. 46
Gebräuchliche einfache Lötverbindungen und zweckmässige Anordnungen des Induktors

Zum Verlöten müssen die zu verbindenden Teile in einer Lötlehre festgehalten und in eine bestimmte Position zum Induktor gebracht werden. Der Lötvorgang ist auf diese Art auch automatisierbar.

4.5.5 Lötanlagen. Im Falle einer Hochfrequenzanlage erhält der Lötplatz einen sehr einfachen Aufbau. Der Generator beansprucht nur wenig Platz und gestattet den Anbau eines Arbeitstisches. Darauf kann direkt oder mittels aufgebauter mechanisierter Vorrichtungen gelötet werden. Als sehr vielseitig erweisen sich Drehtisch-Lötmaschinen, welche – steuerungsmässig mit dem Generator gekuppelt – ein vollautomatisiertes Löten ermöglichen (Fig. 47). Die Heizzeit wird am Generator vorgewählt, löst nach Ablauf die an der Lötmaschine eingestellte Abkühlzeit aus und diese wiederum wird von der gleichfalls anpassbaren Stückwechselzeit abgelöst. Die Bedienung ist sehr einfach und beschränkt sich auf das Einlegen der vorbereiteten und Entnehmen der fertig gelöteten Teile. Auch fahrbare induktive Lötstationen gehören heute zu den modernsten Ausrüstungen grosser Montageplätze (Fig. 48). Die über ein Kabel versorgte Induktionsspule kann auch an schwer zugängliche Lötstellen herangeführt werden. Ein Steuern der Heizzeit über ein Temperaturkontrollgerät ist möglich, wodurch sich Lötstellenüberhitzungen vermeiden lassen.

Fig. 47
Rundtisch-Lötmaschine mit einem 4-kW-Hochfrequenzgenerator

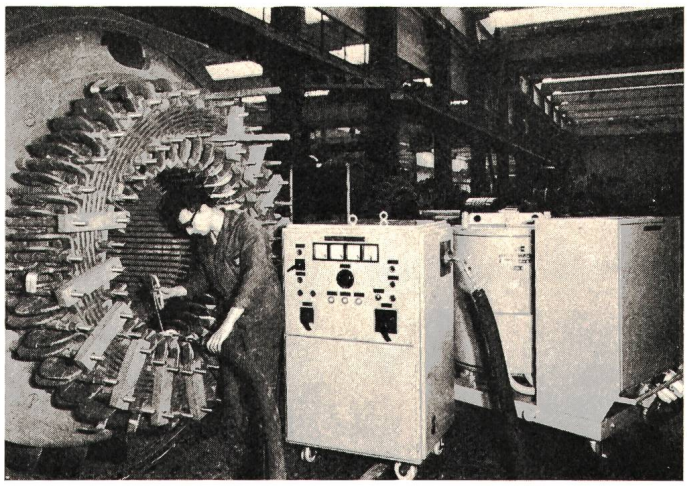


Fig. 48
Fahrbare Mittelfrequenz-Lötanlage
60 kW bei 10 kHz mit flexiblem Induktorkabel und Temperatursteuergerät

Induktive Lötanlagen zeigen ein sehr wirtschaftliches Betriebsverhalten, da sie nur während des gewollten Heizens einen wesentlichen Energieverbrauch haben. Die im Leerlauf aus dem Netz bezogene Leistung ist minim.

Adresse des Autors:
Schweiz. Kommission für Elektrowärme, Sekretariat Elektrowirtschaft, 8023 Zürich