WERKSTATTBÜCHER
FÜR BETRIEBSBEAMTE, KONSTRUKTEURE UND FACHARBEITER. HERAUSGEBER DR.-ING. H. HAAKE VDI
HEFT 69

# Elektrowärme in der Eisen- und Metallindustrie

Von

Dipl.-Ing. O. Wundram VDI, VDE

Mit 94 Abbildungen im Text

Berlin
Verlag von Julius Springer
1939

ISBN-13: 978-3-642-89027-7 e-ISBN-13: 978-3-642-90883-5
DOI: 10.1007.978-3-642-90883-5

# Inhaltsverzeichnis.

Seite

Vorwort . . . . . 3

I. Theoretische Grundlagen der Elektrowärmeerzeugung . . . . . 3

A. Wärme . . . . . 3

1. Grundbegriffe S. 3. — 2. Wärmeleitfähigkeit S. 3. — 3. Wärmeaufnahmefähigkeit S. 4.

B. Elektrizität . . . . . 4

4. Grundbegriffe und Formelzeichen S. 4. — 5. Elektrische Grundgesetze S. 6. — 6. Widerstandsgröße S. 6.

C. Erzeugung und Verteilung des Stromes . . . . . 7

7. Elektromagnetische Induktion S. 7. — 8. Elektrische Maschinen S. 8. — 9. Gleichstrom und Wechselstrom S. 8. — 10. Selbstinduktion, Kapazität, Phasenverschiebung S. 9. — 11. Leistungsfaktor S. 10. — 12. Wirbelströme S. 10. — 13. Drehstrom S. 10. — 14. Umspanner (Transformatoren) S. 11.

D. Wärmeerzeugung durch Elektrizität . . . . . 11

15. Widerstandsheizung S. 11. — 16. Lichtbogenheizung S. 12. — 17. Wirbelstromheizung, Induktionsöfen S. 13.

II. Grundsätzliches über die Arten und Baustoffe der Elektrowärmegeräte 14

A. Einteilung und Grundformen der Geräte . . . . . 14

18. Bauart S. 14. — 19. Verwendungszweck S. 16. — 20. Betriebsweise S. 16.

B. Baustoffe der Elektrowärmegeräte . . . . . 17

21. Widerstandsheizleiter S. 17. — 22. Lichtbogenelektroden S. 21. — 23. Dämmstoffe für Wärme und Elektrizität S. 22.

III. Ausführungsformen der Elektrowärmeanlagen . . . . . 24

A. Schmelzöfen . . . . . 24

24. Allgemeines S. 24. — 25. Lichtbogenöfen, Allgemeines S. 25. — 26. Kleinere Lichtbogenöfen S. 26. — 27. Mittlere und größere Lichtbogenöfen S. 27. — 28. Beispiele S. 30. — 29. Induktionsöfen, Allgemeines S. 32. — 30. Niederfrequenzöfen S. 33. — 31. Hochfrequenzöfen S. 35. — 32. Widerstandsschmelzöfen S. 38.

B. Glühöfen . . . . . 40

33. Allgemeines S. 40. — 34. Glühöfen für stehenden Einsatz S. 41. — 35. Glühöfen für durchlaufenden Einsatz S. 45. — 36. Schmelzbäder zum Glühen S. 49.

C. Sonstige Elektrowärmeverwertung . . . . . 50

37. Elektrische Schweißverfahren S. 50. — 38. Trockenschränke S. 55. — 39. Verschiedenes S. 56.

IV. Messen und Regeln der Elektrowärme . . . . . 56

A. Messen . . . . . 56

40. Meßverfahren S. 56. — 41. Meßgeräte S. 57.

B. Regeln . . . . . 58

42. Spannungsregelung S. 59. — 43. Widerstandschaltung S. 59. — 44. Selbsttätige Regelung S. 60.

V. Wirtschaftlichkeit der Elektrowärme . . . . . 61

45. Allgemeines S. 61. — 46. Vorteile der Elektrowärmegeräte S. 62. — 47. Wirkungsgrad der Elektrowärme S. 63.

Anmerkung: Bei vielen Abbildungen sind die Herstellerfirmen mit folgenden Abkürzungen wiedergegeben: *AEG.* = Allgem. Elektrizitätsgesellschaft, Berlin; *BBC.* = Brown, Boveri & Co., Mannheim; *Junker* = O. Junker, Lammersdorf über Aachen; *SSW.* = Siemens-Schuckert-Werke, Berlin.

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

# Vorwort.

Die Verwertung elektrisch erzeugter Wärme hat erst nach dem Kriege und besonders im letzten Jahrzehnt eine rasche Zunahme erfahren, zuerst in der Industrie, sodann in Haushalt und Gewerbe. Eine gesunde Strompreispolitik, eine Verbesserung und Verbilligung der Elektrowärmegeräte und vor allem die verbreitete Erkenntnis der Vorteile in der Elektrowärmeverwertung mußten erst zahlreiche Vorurteile ausräumen, ehe die Edelwärme des elektrischen Stromes siegreich Anerkennung fand, die sich darin ausdrückt, daß im Jahre 1937 bereits rund 8 Milliarden Kilowattstunden an Wärmestrom in Deutschland verbraucht wurden. Zeitschriften und Forschungsinstitute befassen sich dauernd mit den Neuerungen auf dem Gebiet der Elektrowärme, Ausstellungen und Bücher geben von Zeit zu Zeit Kunde von den Errungenschaften, trotzdem scheint die Behandlung eines bestimmten Elektrowärmegebietes in den Werkstattbüchern nicht unnötig zu sein, um den Werkstattmann mit der Bau- und Betriebsweise und dem Verwendungszweck der Geräte für die elektrische Warmbehandlung von Eisen und Metallen bekannt zu machen.

# I. Theoretische Grundlagen der Elektrowärmeerzeugung.

## A. Wärme.

**1. Grundbegriffe.** Wärme ist eine Energieform, die wie das Licht den menschlichen Sinnen unmittelbar wahrnehmbar ist. Mit ihrer Hilfe können die meisten der den Menschen nützlichen Leistungen und Güter gewonnen werden. Wärme ist nichtstofflicher Art, wir stellen sie uns als eine Schwingung der kleinsten Teile, der Moleküle, vor. Man hat bei der Wärme die beiden Hauptmaße Wärmegrad, meist Temperatur genannt, und Wärmemenge zu unterscheiden. Technisch-wissenschaftlich wird die Temperatur in Zentigraden nach *Celsius*, einem schwedischen Forscher, gemessen, welcher den Wärmeunterschied zwischen schmelzendem Eis und siedendem Wasser in 100 gleiche Teile zerlegte. Wärmemenge ist derjenige Betrag an Wärmeenergie, der einem Körper zugefügt oder entnommen werden muß, um ihn auf eine bestimmte Temperatur zu bringen. Die Wärmemenge wird praktisch in Kilogrammkalorien (kcal), seltener Wärmeeinheit (WE) genannt, gemessen; 1 kcal ist die Wärmemenge, die einem Liter Wasser zugeführt werden muß, um es von 15 auf 16° C zu erwärmen. Jeder Körper bedarf einer anderen Wärmemenge, um seine Temperatur um 1° C zu erhöhen. Diese Menge heißt spezifische Wärme, sie wird durch die Zahl der kcal ausgedrückt, die nötig sind, um ein Kilogramm des betreffenden Körpers um 1° C zu erwärmen. Sie ist beim Wasser gleich 1; die meisten Körper, besonders die Metalle, haben eine viel geringere spezifische Wärme. Für die Wärmeverwertung ist die Art und Weise wichtig, in der die Wärme von einem Körper auf einen anderen oder von einem Teil auf einen anderen Teil desselben Körpers übertragen wird. Die Übertragung geschieht entweder durch Strahlung (z. B. der Sonnenwärme auf die Erde), durch Leitung (Holz leitet Wärme weniger gut als Metall) oder durch Wärmeaustausch (sog. Konvektion) von Gasen und Flüssigkeiten.

**2. Die Wärmeleitfähigkeit** der Körper ist sehr verschieden; es gibt Körper, die Wärme so wenig gut fortleiten, daß sie geradezu als Schutz gegen das Abströmen der Wärme benutzt werden (z. B. Glaswolle, Kieselgur). Man unterscheidet eine

innere und eine äußere Wärmeleitfähigkeit. Die innere wird gemessen durch die Anzahl Kalorien, welche in der Zeiteinheit (1 s) durch 1 cm² einer 1 cm dicken Platte des zu messenden Körpers hindurchgehen, wenn zwischen beiden Plattenseiten ein Temperaturunterschied von 1° C herrscht, die äußere durch die Anzahl WE, welche in der Zeiteinheit von 1 cm² Oberfläche bei 1° C Temperaturüberschuß abgestrahlt oder abgeleitet werden.

**3. Wärmeaufnahmefähigkeit** eines Körpers (auch Wärmekapazität genannt) ist diejenige Menge an Kalorien, welche er aufnimmt, um eine bestimmte Temperatur zu erreichen; sie ist der Masse und der spezifischen Wärme des Körpers verhältnisgleich. Durch die besondere Gestaltung dieser beiden Größen wird von diesem Verhalten bei der Wärmespeicherung Gebrauch gemacht. Oft ist die Wärmespeicherung aber auch ein unerwünschter Zustand, z. B. bei den Elektrowärmegeräten zum Schmelzen und Glühen.

Da die Wärme eine der Energieformen ist, wie sie auch in der mechanischen Arbeit und der Elektrizität erblickt werden müssen, so liegt es auf der Hand, daß zwischen ihnen zahlenmäßige Beziehungen vorhanden sind. Man unterscheidet im Zusammenhang der Beziehungen zwischen Wärme einerseits und mechanischer oder elektrischer Energie andererseits das mechanische oder elektrische Wärmeäquivalent, dessen zahlenmäßige Größen wir im nächsten Hauptabschnitt kennenlernen werden. Zum Schluß unseres kurzen Rückblicks auf die Wärmelehre erinnern wir noch daran, daß die Wärme jeden Körper, ob fest, flüssig oder gasförmig, in verschiedenem Maße ausdehnt; einige Beiwerte für die Wärmeausdehnung wie für andere wichtige in diesem Büchlein behandelte Größen sind in Tabelle 1 genannt.

Tabelle 1.
Zusammenstellung von spezifischem (Raum-) Gewicht in g/cm³, spezifischer Wärme in kcal/° C und Ausdehnungsbeiwert in mm für 1 m Länge und 100° C Temperaturerhöhung.

| Stoff | Raumgewicht | spezif. Wärme | Ausdehnung[1] |
|---|---|---|---|
| Stahl | 7,9 | 0,12 | 1,2 |
| Chromnickel | 8,7 | 0,12 | 1,1 |
| Aluminium | 2,6 | 0,22 | 2,3 |
| Kohle | 2,1 | 0,23 | 2,5 |
| Schamotte | 2,0 | 0,2 | 0,9 |
| Isolierpulver | 0,2 | — | — |

Wärmeleitzahlen, auf Meter und Stunde bezogen, sind aus der Abb. 34 zu entnehmen.

## B. Elektrizität.

**4. Grundbegriffe und Formelzeichen.** Der elektrische Strom ist ähnlich wie die Wärme eine der Formen, in der wir die Energie kennen und ausnutzen. Er läßt sich leicht in andere Energieformen, wie Licht, Magnetismus, chemische und mechanische Kraft, besonders leicht aber in Wärme umsetzen. Diese Umsetzung geht uns an dieser Stelle hauptsächlich an, denn sie ist die Grundlage der Elektrowärmeerzeugung. Um die zwischen Strom und Wärme bestehenden rechnerischen Beziehungen kennenzulernen, müssen wir uns mit den wichtigsten Größen aus der Elektrizitätslehre und ihren Zusammenhängen bekannt machen. Wir stellen uns den elektrischen Strom als eine fließende Menge kleinster Elektrizitätsteilchen, der sog. Elektronen, vor. Gleichwie eine Wassermenge nur durch einen Druck- oder Höhenunterschied zum Fließen kommt, fließt ein elektrischer Strom in einer Leitung nur dann, wenn zwischen zwei Punkten dieser Leitung ein Unterschied

[1] Der Ausdehnungsbeiwert wächst mit zunehmender Temperatur.

in der elektrischen Spannung herrscht. Diese wird mit einem Maß gemessen, das man *Volt* nennt, während das Maß für die Stromstärke *Ampere* heißt. Wie bei der Ausnützung des strömenden Wassers in Turbinen oder Wasserrädern für die zu erzielende Leistung die Wassermenge und ihr Druck (Gefälle) maßgebend sind, so ergibt sich auch die elektrische Leistung aus Stromstärke und Spannung. Das Maß für die Leistung ist das Produkt Volt mal Ampere, Voltampere oder häufiger noch *Watt* genannt. Die über eine gewisse Zeit abgegebene Leistung stellt die Arbeit dar, elektrisch gemessen in Wattsekunden oder, weil dieses kleine Maß praktisch zu große Zahlen ergeben würde, in Kilowattstunden (kWh). Die für unsere Betrachtung wichtigste elektrische Größe ist die des Widerstandes. Der Widerstand ist überall da, wo er auftritt in elektrischen Stromkreisen, gewollt oder ungewollt der Grund zur Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme. Er ist in dieser Hinsicht vergleichbar mit der Reibung in der Mechanik, die auch eine Quelle der Wärmeerzeugung bildet. Der elektrische Widerstand ist in seiner Größe abhängig von der Art, der Länge und dem Querschnitt des von ihm durchströmten Leiters, er wird mit einem Maß gemessen, das dem deutschen Physiker *Ohm* zu Ehren so genannt wird.

Alle bislang erwähnten elektrischen Größen, wie Spannung, Stromstärke, Leistung, Arbeit, Widerstand und die noch später zu behandelnden der Frequenz, Selbstinduktion und Kapazität, deren Maßeinheiten sämtlich nach den Namen berühmter Physiker und Forscher benannt sind, werden abgeleitet von den in der Physik und Technik festgesetzten Maßen der Grundbegriffe Raum, Masse und Zeit. Sie beruhen nach Übereinkunft auf dem sog. Zentimeter-Gramm-Sekunden-System. Ihre Ableitung daraus würde den Rahmen dieses Büchleins sprengen. Immerhin wollen wir zum wenigsten die rechnerischen Beziehungen zwischen elektrischer und mechanischer Arbeit und Wärme, die sog. Äquivalente (vom Lateinischen aequus gleich, valere gelten), klarlegen. Zu diesem Behufe müssen wir die einfachsten Gesetze der Elektrizitätslehre ins Gedächtnis zurückrufen. Die in den Formeln verwendeten Größen sind durch Formelzeichen wiedergegeben, die nebst den dazugehörigen Maßeinheiten in der Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Tabelle 2. Zusammenstellung der Formelzeichen und Maßeinheiten.

| Größe | Formelzeichen | Maßeinheit und Abkürzung |
|---|---|---|
| Spannung | $U$ | Volt (V) |
| Stromstärke | $J$ | Ampere (A) |
| Widerstand | $R$ | Ohm ($\Omega$) |
| Spezifischer Widerstand | $\varrho$ | Ohm je m/mm² ($\Omega$) |
| Selbstinduktion | $L$ | Henry (H) |
| Kapazität | $C$ | Farad (F) |
| Leistung | $N$ | Watt (W), Kilowatt (kW) |
| Leistungsfaktor | $\cos \varphi$ | unbenannte Zahl |
| Zeit | $t$ | Sekunde (s), Stunde (h) |
| Arbeit | $A$ | Wattsekunde oder Joule (Ws), Kilowattstunde (kWh) |
| Wärmegrad | $t$ | Celsiusgrad (° C) |
| Wärmemenge | $Q$ | Kilogrammkalorie (kcal) (WE) |
| Wärmeleitzahl | $\gamma$ | unbenannte Zahl (vgl. Abschn. 2) |
| Spezifische Wärme | $c$ | Kilogrammkalorie/kg °C (kcal/kg °C) |
| Querschnitt | $q$ | Quadratmillimeter (mm²) |
| Länge | $l$ | Meter (m) |
| Masse | m | technisch durch Gewichtseinheiten wiedergegeben, wie Gramm (g), Kilogramm (kg), Tonne (t) |
| Wirkungsgrad | $\eta$ | Hundertstel (v. H. oder %) |

**5. Elektrische Grundgesetze.** a) Spannung ($U$), Widerstand ($R$), Strom ($J$).

$$J = U/R \text{ in Ampere oder } U = JR \text{ in Volt } (\textit{Ohm}\text{sches Gesetz}) \tag{1}$$

besagt, daß die Stromstärke in einem Leiter mit der ihm aufgedrückten Spannung steigt und mit seinem Widerstand sinkt.

b) Leistung ($N$), Arbeit ($A$), Wärme ($Q$) haben folgende Beziehungen zueinander. Zunächst ist $N = UJ$ in Watt und $A = Nt = UJt$ in Wattstunden, worin $t$ die Zeit in Stunden bedeutet. Folglich, da $U = JR$,

$$A = JRJt = J^2Rt \text{ in Wattstunden.} \tag{2}$$

Dieser Ausdruck für die elektrische Arbeit steht in einem festen Verhältnis zur mechanischen Arbeit und Wärme. *Rob. Mayer* hatte 1842 festgestellt, daß die mechanische Arbeit einer ganz bestimmten Wärmemenge entsprach. (Mechanisches Wärmeäquivalent.) Das Maß dieser Beziehung wurde später genauer ermittelt: 1 kcal ist gleichzusetzen 427 mkg. Das praktische Einheitsmaß der mechanischen Leistung 1 PS entspricht 75 mkg/s und damit das Maß der Pferdekraftstunde 270000 mkg (nämlich 75 mkg/s · 3600 s). Elektrisch gemessen ist eine Pferdestärke = 736 Watt und eine Pferdekraftstunde (736 Wattstunden) = 0,736 kWh, also eine Kilowattstunde = 1,36 PSh. Damit ist der Zusammenhang von elektrischer und mechanischer Arbeit mit der Wärme wie folgt gegeben:

1 kWh = 1,36 PSh, 1 PSh = 270000 mkg
1 kWh = 367200 mkg, 1 kcal = 427 mkg
**1 kWh = 367200/427 = 860 kcal.**

Somit ist das für die Verwertung der Elektrowärme so wichtige elektrische Wärmeäquivalent gefunden. Die elektrische Arbeit ist also verhältnisgleich der Wärme, wobei das Zahlenmäßige dieses Verhältnisses mit einem Beiwert $c = 860$ ausgedrückt wird:

$$Q = cA/1000 = 0{,}86\ J^2Rt \text{ in kcal } (\textit{Joule}\text{sches Gesetz}). \tag{3}$$

Sind in einem elektrischen Wärmeerzeuger die Maße für die Größen $J$ (Stromstärke in Ampere) und $R$ (Widerstand des Heizleiters in Ohm) bekannt, so kann daraus die zu erwartende Wärmemenge $Q$ in kcal errechnet werden. Hat z. B. in einem elektrischen Glühofen der Chromnickelheizdraht bei einem Widerstand von 19 Ohm eine Belastung von 20 Ampere, so liefert der Ofen in einstündigem Betrieb 6536 kcal. Das ist die theoretische Leistung unter der Voraussetzung, daß keine Wärmeverluste auftreten; in der Wirklichkeit ist natürlich die Nutzwärme nie gleich dem theoretisch errechneten Betrage, sondern nur einem mehr oder minder großen Bruchteil davon. Das Verhältnis des in der elektrischen Ofenleistung aufgewendeten Wärmebetrages zu dem nutzbar verwendbaren wird mit dem Begriff Wirkungsgrad ($\eta$) bezeichnet. Die Wirkungsgrade der Elektrowärmeverwertung liegen etwa zwischen 50 und 90 %.

**6. Die Widerstandsgröße** eines bestimmten, vom Strom durchflossenen Leiters berechnet man nach der Formel

$$R = \varrho\, l/q, \tag{4}$$

wobei $\varrho$ den spezifischen Widerstand des Leiterstoffes darstellt, d. h. den Widerstand, der sich bei einer Länge $l = 1$ m und einem Querschnitt $q = 1$ mm² ergibt. Dieser kennzeichnende spezifische Widerstand ist bei allen Stoffen sehr verschieden; vgl. hierzu die Tabelle 3 (S. 20). Der z. B. obenerwähnte Heizdraht aus einer Chromnickellegierung hat etwa einen spezifischen Widerstand von 1,1 Ohm; sein Gesamtwiderstand muß nach der verlangten Ofenleistung 19 Ohm sein, man kann dann nach der Formel (4) Länge oder Querschnitt bestimmen. In der Wahl des Querschnittes ist man nicht ganz frei, da bei Unterschreitung eines gewissen

Mindestquerschnittes die Strombelastung des Leiters zu hoch wird und er abschmilzt bzw. verdampft. Es muß also bei der einmal vorhandenen äußeren Wärmeleitfähigkeit des Leiterstoffes die Strombelastung so begrenzt sein, daß bei gleichmäßiger Wärmeaufnahme und Abgabe die Temperatur des Leiters nicht höher steigt, als er ohne Schaden dauernd ertragen kann. Man wird ihm bei 20 Ampere Dauerbelastung einen Querschnitt von etwa 1,5 mm² geben müssen. Dann wird nach Formel (4)

$$l = qR/\varrho = 1{,}5 \cdot 19/1{,}1 = 25{,}8 \text{ m}.$$

Der Draht muß also rund 26 m lang werden, um die aufgenommene elektrische Energie unter praktischen Verhältnissen in die gewünschte Wärmemenge umzusetzen. Nicht immer sind die Widerstandsberechnungen so einfach wie bei metallischen Drahtleitern, da auch nichtmetallische und flüssige Heizleiter mit ungleichmäßigen Widerständen in der Technik vorkommen. Ebenfalls ist die rechnungsmäßige Erfassung der Wärmeabgabe bei den Elektrowärmegeräten nicht ganz leicht.

Der elektrische Leitwiderstand ist schlechthin keine unveränderliche Größe, er ist stark abhängig von der Temperatur der Stoffe. Bei den meisten Metallen nimmt der Widerstand mit ihrer Temperatur zu, bei Kohle und einigen Metallsalzen dagegen mit steigender Temperatur stark ab. Die Zahl, die die Widerstandserhöhung oder -erniedrigung je Grad Celsius kennzeichnet, wird positiver oder negativer Temperaturbeiwert (-koeffizient) genannt. Durch Legierung gewisser Metalle kann man allerdings die Temperaturempfindlichkeit ihres Widerstandes stark herabsetzen.

## C. Erzeugung und Verteilung des Stromes.

**7. Elektromagnetische Induktion.** Die zur Elektrowärmeerzeugung benötigten starken Ströme werden in den Dynamomaschinen oder Generatoren erzeugt. Die physikalische Grundlage dazu ist die magnetelektrische Induktion, die ganz kurz erläutert sein möge. Läßt man durch isolierte Drahtwindungen, die einen Kern aus weichem Eisen umgeben (Abb. 1), einen Strom fließen, so entsteht in dem Eisen ein Magnetismus, es wird zu einem sog. Elektromagneten. Die Polrichtung dieses Magneten ist abhängig von der Richtung des Stromes und dem Wickelungssinn der von ihm durchflossenen Windungen. Der Magnet strahlt an seinen beiden Polen magnetische Kräfte aus, deren Äußerungen man durch Kraftlinien versinnbildlicht, sowohl der Richtung wie auch der Stärke nach. Den von den Kraftlinien durchsetzten Luftraum nennt man magnetisches Feld, dessen Stärke durch die Anzahl der es durchflutenden Kraftlinien gemessen wird. Die Feldstärke ist abhängig von der Drahtwindungszahl des Elektromagneten und der sie durchfließenden Stromstärke (Amperewindungszahl). Bewegt man durch das magnetische Feld einen metallischen Leiter hindurch, so entsteht in ihm eine elektrische Spannung, desgl. wenn man bei ruhendem Leiter das Feld verschwinden oder entstehen, schwächer oder stärker werden läßt. Die erzeugte Spannung ist um so größer, je schneller man den Leiter und je mehr hintereinandergeschaltete

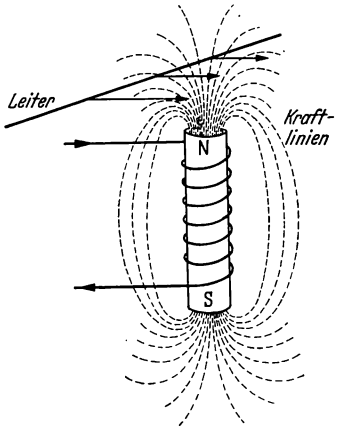

Abb. 1. Spannungserzeugung durch Kraftlinienschnitt.

Leiter man durch das Feld hindurchbewegt, desgl. je größer die Feldstärkeänderungen in der Zeiteinheit sind; mit anderen Worten: die auf elektromagnetischem Wege induzierte Spannung ist verhältnisgleich der Anzahl der in der Zeiteinheit vom Leiter geschnittenen Kraftlinien. Die Richtung der Spannung wird vom Änderungssinn der Kraftlinien (Annähern, Entstehen, Stärkerwerden bzw. ihrem Gegenteil) bestimmt. Ruhende Kraftlinien erzeugen in ruhenden Leitern keine Spannungen. Die physikalische Tatsache der elektromagnetischen Induktion wird praktisch zur Stromerzeugung ausgewertet, indem man starke Elektromagneten und Drahtleitungen, die an geeigneten Tragkonstruktionen befestigt sind, aneinander vorbeibewegt. Auf diese Weise wird die mechanische Energie der Bewegung in elektrische Energie des Stromes verwandelt, wobei, wie schon erwähnt, eine Pferdestärke (PS) theoretisch einer elektrischen Leistung von 736 Watt entspricht.

**8. Elektrische Maschinen.** Die technische Grundanordnung der Dynamomaschinen und Generatoren ist entweder so, daß innerhalb eines Systems von ruhenden Elektromagneten (Magnetgehäuse) der Tragkörper der zu induzierenden Leitungen (Anker) in drehende Bewegung versetzt wird oder so, daß die letzteren im Gehäuse der Maschine feststehen und das Magnetsystem mit dem Magnetfeld herumgedreht wird. Die das Magnetsystem erregenden Drahtwindungen werden entweder von der Dynamomaschine selbst oder von einer fremden Stromquelle gespeist. Alle auf der elektromagnetischen Induktion beruhenden Dynamomaschinen sind in ihrer Verwendung umkehrbar, sie wirken als Stromerzeuger, wenn sie mechanisch angetrieben werden, und umgekehrt können sie mechanische Kraft abgeben (Elektromotoren), wenn man Strom in sie hineinschickt. Wegen unvermeidbarer Verluste läßt sich natürlich das elektromechanische Äquivalent nie ganz erreichen; der Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen liegt zwischen 75···95 %.

**9. Gleichstrom und Wechselstrom.** Die Form des in einer elektromagnetischen Maschine erzeugten Stromes ist die eines Wechselstromes, weil ja der Vorgang des in bezug auf den Magnetpol sich nähernden oder entfernenden Leiters einen Wechsel in Richtung und Größe der Spannung ergibt. Man unterscheidet in der technischen Verwendung Gleichstrom vom Wechselstrom, deren Eigenheiten am besten in einer Schaulinie klar werden (Abb. 2). Auf der waagerechten Achse (Abszissenachse) sind die Zeiteinheiten, in welcher der Spannungsvorgang verläuft, eingetragen, auf der senkrechten Achse (Ordinatenachse) die Einheiten der Spannung oder auch der Stromstärke. Die Werte oberhalb der Abszissenachse, die für die elektrischen Größen als Null-Linie gilt, sind positiv und unterhalb als negativ zu betrachten. Somit kann für jeden Augenblick Stärke und Richtung für Spannung bzw. Strom in diese Schaulinie eingetragen werden. Beim regelrechten Wechselstrom durchläuft nun die Beziehung zwischen Stärke, Richtung und Zeit die Fläche in einer regelmäßigen Bogenlinie (sog. Sinuskurve) zu beiden Seiten der Null-Linie. Den Zeitunterschied, den Strom oder Spannung benötigen, um im gleichen Richtungssinn wieder die Null-Linie zu durchqueren, nennt man eine Periode; die Halbwelle heißt auch Puls. Die Häufigkeit der in gleichem Sinne (von + nach — bzw. von — nach +) erfolgenden Nulldurchgänge wird als Frequenz bezeichnet und in Perioden je Sekunde (*Hertz*, abgekürzt Hz) gemessen. Der meistverwendete Wechselstrom hat eine Frequenz von 50 Hz, doch kommen in der Elektrowärme-

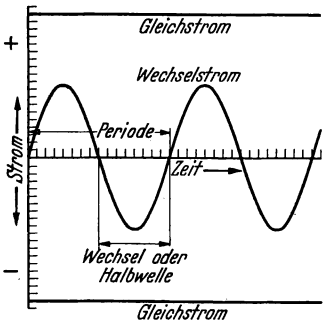

Abb. 2. Schaulinien für Gleich- und Wechselstrom.

erzeugung teilweise viel höhere Frequenzen zur Anwendung. Der Gleichstrom, der Richtung und Größe beibehält, stellt sich in der Schaulinie (Abb. 2) als eine gerade Linie dar, und zwar für den positiven Pol oberhalb und für den negativen unterhalb der Null-Linie. Da die elektromagnetischen Maschinen in ihrem Innern nur Wechselstrom erzeugen, so muß an der Maschine, um Gleichstrom zu bekommen, eine entsprechende Gleichrichtung durch den sog. Kollektor vorgenommen werden. Erzeugung, Fortleitung und Umformung des Gleichstroms haben gewisse wirtschaftliche Nachteile gegenüber dem Wechselstrom, so daß er in den letzten Jahren immer mehr aus den Stromversorgungsanlagen verschwindet; insbesondere in der Elektrowärmeerzeugung ist er mit Ausnahme der Lichtbogenschweißmaschinen fast bedeutungslos geworden.

**10. Selbstinduktion, Kapazität und Phasenverschiebung** sind Begriffe, mit denen wir uns zur Erklärung gewisser Wechselstromerscheinungen an Geräten der Elektrowärmeerzeugung (z. B. bei den Induktionsöfen) bekannt machen müssen. Durchfließt der von einem Generator $g$ mit der Spannung $U_1$ (Abb. 3) erzeugte Wechselstrom $J$ eine um einen Eisenkern gelegte Drahtspule $s$, so erzeugt er in ihr zunächst ein mit seiner Frequenz pulsierendes Magnetfeld. Da dessen Kraftlinien die Windungen der eigenen Spule schneiden, so entsteht hier die sog. Selbstinduktion, d. h. eine zusätzliche Spannung $U_2$. Sie ist zeitlich, d. h. in ihrer Phase, gegen den Strom $J$, der sie hervorruft, um ein Viertel der ganzen Periode verschoben (Abb. 4), weil der Strom und mit ihm der Magnetismus und seine Kraftlinien beim Höchstwert die geringste Veränderung und beim Durchgang durch die Null-Linie die stärkste Veränderung durchmachen. Da die Kraftlinienveränderung maßgebend für die induzierte Spannung ist, so ist beim Stromhöchstwert die Spannung $U_2 = 0$ und beim Nullwert des Stromes am größten. Man teilt die Periode im Gedanken an die volle Umdrehung einer Maschine zeitlich in 360 Grade ein, so daß eine Phasenverschiebung zwischen Strom $J$ und Selbstinduktionsspannung $U_2$ um eine Viertelperiode gleich 90° ist (Abb. 4). Nun setzen sich die Klemmenspannung $U_1$ des Generators und die Selbstinduktionsspannung $U_2$ an der Spule (Drosselspule), indem man die gleichzeitigen Werte addiert, zu einer resultierenden Spannung $U_3$ zusammen, die um einen bestimmten Periodenteil, ausgedrückt durch den Winkel $\varphi$ (phi), dem Strom $J$ nacheilt. Wir erkennen daraus, daß Selbstinduktion in einem Wechselstromkreise eine nacheilende Spannung ergibt. Umgekehrt ist das Verhalten eines sog. Kondensators ($k$ in Abb. 3) im Wechselstromkreis. Ein Kondensator besteht aus großen Metallflächen, die wechselweise durch nichtleitende Schichten voneinander isoliert sind und nun abhängig von der Größe und dem Abstand der Flächen und von der Höhe der

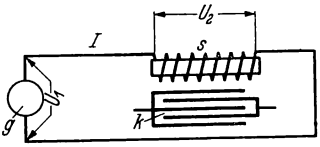


Abb. 3. Selbstinduktion und Kapazität: Schaltbild. $g$ = Stromerzeuger; $s$ = Selbstinduktion; $k$ = Kapazität.

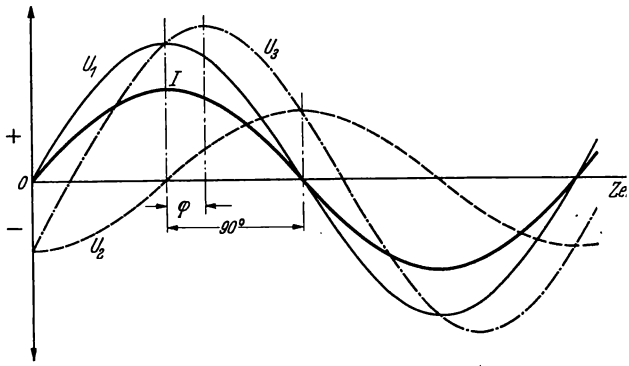


Abb. 4. Schaulinien der Phasenverschiebung.

aufgedrückten Spannung Strommengen aufspeichern können. Wird an die Klemmen eines Kondensators eine Wechselspannung angelegt, so eilt die Spannung dem aufladenden Strom voraus, weil dieser zum Aufladen des Kondensators Zeit braucht. Die Größe der Speicherfähigkeit (Kapazität) des Kondensators wird durch ein Maß bestimmt, das man Farad (nach *Faraday*, englischer Physiker) nennt, während das der Selbstinduktion *Henry* (ebenfalls englischer Physiker) heißt.

**11. Leistungsfaktor.** Die Wirkungen der Selbstinduktion und Kapazität, die an und für sich einander entgegengesetzt sind, haben im Wechselstromkreis immer die schädliche Wirkung der Leistungsverkleinerung. Da die Leistung (Volt × Ampere) nur das Produkt der zeitlich zusammenfallenden Werte ist, so kann man die beiden nicht zusammenfallenden Höchstwerte von $J$ und $U_3$ auch nicht zu einem Höchstprodukt mit einander malnehmen. Aus weiteren, hier nicht gebrachten Ableitungen folgt, daß von der phasenverschobenen Spannung $U_3$ nur der zeitlich mit $J$ zusammenfallende Teil zur Wirkung kommt. Dieser Spannungsbetrag steht in einem festen Verhältnis zum Winkel $\varphi$, das man mit dem Ausdruck Kosinus phi ($\cos\varphi$) bezeichnet; die wirksame Spannung ist gleich $U_3 \cos\varphi$. Damit ist die Wechselstromleistung nicht das Produkt aus Volt mal Ampere schlechthin, sofern eine Selbstinduktion oder Kapazität als Belastung vorkommt, sondern dies Produkt mal dem Faktor $\cos\varphi$, in Formelzeichen ausgedrückt $\text{kW} = \text{kVA} \cos\varphi$. Dieser Faktor $\cos\varphi$ ist nie größer, meist aber kleiner als eins und heißt Leistungsfaktor. Es muß das Bestreben des wirtschaftlich denkenden Elektrotechnikers sein, den Leistungsfaktor mit Hilfe der ausgleichenden Wirkung von Selbstinduktion (Drosselspulen) und Kapazität (Kondensatoren) möglichst auf 1 zu bringen.

**12. Wirbelströme.** Die Selbstinduktion in den Wechselstromkreisen wirkt sich nicht nur in den regelrechten Leitungen der Maschinen und Geräte aus, sondern auch in den sonstigen Metallmassen, soweit sie von den pulsierenden Kraftlinien durchdrungen werden. Hier treten die Selbstinduktionsspannungen und die mit ihnen verbundenen Ströme nicht in geordneten Bahnen, sondern in Wirbeln auf. Diese sog. Wirbelströme setzen sich wieder in Wärme um, die meist als unvermeidbarer Verlust gebucht wird, bei einigen Elektrowärmegeräten aber als Enderfolg angestrebt wird.

**13. Drehstrom.** Die üblichen Gebrauchsspannungen sind beim Gleichstrom 110, 220, 440 und 550 Volt, beim Wechselstrom 110, 190, 220, 380 und 500 Volt. Meist wird aber der Wechselstrom nicht in der Form der in zwei Leitungen fließenden Energie verwendet, sondern als Drehstrom, d. h. in einer Verkettung von drei einphasigen, je um 120° versetzten Wechselströmen, die 3 oder 4 Leitungen zu ihrer Fortleitung benötigen. Drehstrom ist die in der ganzen Welt am meisten verbreitete Stromart. In Abb. 5 sehen wir, daß die 3 Schaulinien der um 120° versetzten Wechselströme $R$, $S$ und $T$ jeweils den zeitlichen Summenwert von Null ergeben, was theoretisch zulassen würde, daß man nur drei Zuleitungen und keine Ableitungen benötigt. Praktisch führt man jedoch in Drehstromnetzen eine gemeinsame Rückleitung durch, die zwar Null-Leiter genannt wird, aber bei immerhin vorkommenden ungleichen Belastungen der 3 Wechselströme einen gewissen Ausgleichstrom führen muß. Dieser Null-Leiter liegt gewöhnlich an Erde, was bedeutet, daß Wechselstromleitungen auch Spannung gegen Erde aufweisen. Das ist zur Unfallverhütung wohl zu

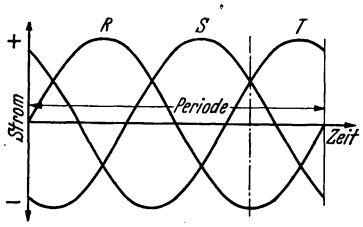

Abb. 5. Schaulinien des Drehstromes.

beachten. Abb. 6 und 7 zeigen die technisch meistbenutzten Drehstromschaltungen für Leitungen und Verbrauchsgeräte mit der Verteilung der üblichen Spannungen. Zur Verbrauchsregelung wird die Umschaltung von Stern auf Dreieck (sog. Stern-Dreieckschaltung) gern benützt, auch bei Elektrowärmegeräten. Bei gleichbleibender Spannungszufuhr nimmt dann die Dreiecksschaltung einen um den Faktor $\sqrt{3}$ höheren gleich 1,73fachen Strom gegenüber der Sternschaltung auf.

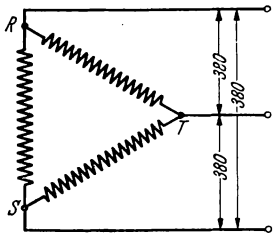

Abb. 6. Dreieckschaltung.

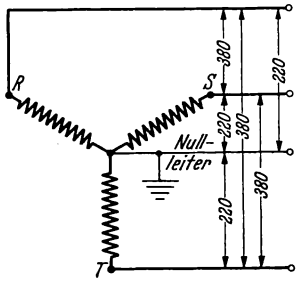

Abb. 7. Sternschaltung.

**14. Umspanner (Transformatoren).** Bei dem riesigen Stromverbrauch, den heute Verkehr, Industrie und Haushalt aufweisen, ist es undenkbar, die nötige Energie mit den vorerwähnten Gebrauchsspannungen auf längere Strecken zu verteilen. Dazu werden Hochspannungen (bis 220000 Volt gegen Erde) benützt, die auf technisch einwandfreie Weise aus den durch Maschinen erzeugten Wechselströmen mittlerer Spannung von 5 ··· 10000Volt umgespannt werden. Daß für den Gleichstrom die technisch zuverlässige Hochspannungserzeugung noch nicht gelöst ist, ist der Hauptgrund für seine Zurückdrängung. Das verhältnismäßig einfache Gerät der Spannungswandlung beim Wechselstrom ist der Umspanner (oder Transformator). Er beruht auf dem gleichen Grundsatz der elektromagnetischen Induktion wie die elektrischen Maschinen. Eine vom Wechselstrom durchflossene Wickelung, die einen geschlossenen Eisenkern umgibt (Abb. 8), erzeugt ein wechselndes Kraftlinienfeld, das in einer zweiten Wickelung des Eisenkernes eine Spannung hervorruft. Die Spannungen in den beiden getrennten Wickelungen verhalten sich wie ihre Windungszahlen. Hat die erste mit 220 Volt Spannung beschickte Wickelung 100 Windungen, so würde die zweite Wickelung mit 10000 Windungen eine Spannung von 22000 Volt abgeben können. Die Stromstärken verhalten sich umgekehrt wie die Spannungen; die abgegebene Leistung ist wegen unvermeidlicher Verluste stets etwas kleiner als die in den Umspanner hineingeschickte. Da in der Elektrowärmeerzeugung manche Schmelz- und Glühöfen besondere Strom- und Spannungsverhältnisse bedingen, so werden hier mit Vorteil Sondertransformatoren benützt.

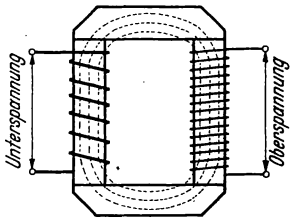

Abb. 8.
Wirkungsweise des Umspanners.

## D. Wärmeerzeugung durch Elektrizität.

**15. Widerstandsheizung.** Obwohl alle elektrisch erzeugte Wärme auf das Wirken des Widerstandes zurückzuführen ist, werden doch im allgemeinen drei Gruppen der elektrischen Wärmeerzeugung unterschieden, von denen nur die eine, die auf dem Leitwiderstand regelrecht begrenzter Heizleiter beruht, Widerstandsheizung genannt wird. Die Heizleiter können metallischer oder nichtmetallischer Art sein, in festem oder flüssigem Zustand Anwendung finden und ihre Nutzwärme auf mittelbarem oder unmittelbarem Wege abgeben. Zu regeln ist die Wärmeerzeugung, da die Größe des einzelnen Widerstandselementes im Betriebe nicht geändert werden kann, nur durch geeignete Schaltung der einzelnen Elemente:

Ab- und Zuschalten, Parallel- und Hintereinanderschalten, Sterndreieckschaltung. Will man vollkommen stufenlos regeln, so muß man die aufgedrückte Spannung ohne Stufen nach oben oder unten verändern können, etwa mit Hilfe eines Regulier-transformators. Da die auf der Widerstandsheizung beruhenden Elektrowärmegeräte in der Industrie bis zu 1000 kW und mehr Energie aufnehmen, so sind ihre elektrischen Regeleinrichtungen schon bedeutend. Die Widerstandsheizung ist in der gesamten Elektrowärmeerzeugung das bei weitem am meisten angewendete Mittel.

**16. Die Lichtbogenheizung** dient als zweite große Gruppe zur industriellen Elektrowärmeerzeugung; hier geht die Energieaufnahme bis auf viele tausend kW. Gerade die Möglichkeit, dem Lichtbogen hohe Energiebeträge zuführen und sie dort in Wärme umsetzen zu können, gibt der Lichtbogenheizung den Anspruch auf Höchstleistung. Im Lichtbogen werden die höchsten Temperaturen gemessen, die man technisch auf Erden erreichen kann, sie liegen etwa zwischen 3500 und 4000° C. Ein elektrischer Lichtbogen bildet sich dann, wenn in einem geschlossenen Stromkreis die Leitung an einer Stelle unter Innehaltung eines beschränkten Abstandes so unterbrochen wird, daß der Strom bei genügender Spannung und Stärke den Luftspalt unter hellster Licht- und Wärmeentfaltung überbrückt. Die Enden der Leitung, zwischen denen der Lichtbogen entsteht, werden Elektroden genannt, sie geraten ebenso wie die als Strombahn dienende Luftsäule auf die höchste Temperatur. Da die hoch erhitzte Luftsäule, besonders bei waagerechten Elektroden, nach oben strebt, nimmt die Strombahn die Form eines Flammen- oder Lichtbogens an (Abb. 9). Metallische Leitungsenden würden bei der Lichtbogenbildung alsbald abschmelzen, deshalb werden die Elektroden für die industrielle Lichtbogenheizung aus dem unschmelzbaren Kohlenstoff hergestellt. Der elektrische Lichtbogen ist zuerst etwa 1810 von dem englischen Physiker *Davy* vorgeführt worden, aber erst in den letzten Jahrzehnten ist es gelungen, das Wesen und den Mechanismus des Stromüberganges im Lichtbogen befriedigend zu klären. Es kann an dieser Stelle nur ganz kurz und in vereinfachter Weise auf die neuerdings als Bogenentladung bezeichneten Stromvorgänge eingegangen werden.

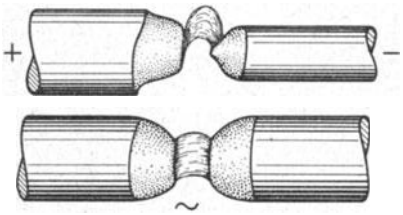

Abb. 9. Kohlelichtbogen bei Gleich- und Wechselstrom.

a) Wir betrachten dabei zuerst den Gleichstromlichtbogen (Abb. 9 oben). Zur Bildung des Lichtbogens müssen die Elektroden sich zunächst berühren, weil die kalte Luftstrecke zwischen ihnen sonst nur unter Verwendung gewaltig hoher Spannungen vom Strom überbrückt würde. Bei der Berührung erhitzen sich infolge des hohen Widerstandes der geringen Berührungsfläche die stromführenden Elektroden an dieser Stelle zur Glut. Erst jetzt gelingt es den Elektrizitätsteilchen, den Elektronen, vom negativen Elektrodenpol aus, nachdem dieser vom positiven wieder etwas entfernt ist, die Luftsäule zu durcheilen. Elektronen bewegen sich stets vom negativen zum positiven Pol, wobei eine der Möglichkeiten zu ihrer Aussendung der Glühzustand der Kathode ist (negative Elektrode = Kathode, positive Elektrode = Anode). Die Geschwindigkeit der ausgesendeten Elektronen hängt von der elektrischen Spannung zwischen den Elektroden ab; diese Geschwindigkeit ist ungeheuer groß, so daß die von den Elektronen getroffenen Moleküle der Luftsäule und der Anode in helle Weißglut geraten. Dabei wird auch die Luft durch die Wirkung der auftreffenden Elektronen elektrisch leitend (ionisiert), so daß sie sich mit an der Strombeförderung beteiligt. Am heftigsten ist der Auf-

prall der Elektronen auf der gegenüberliegenden Anode, die infolgedessen die höchste Temperatur (4000° C) und Lichtstärke aufweist. Beim Freimachen der Elektronen aus der Kathode, beim Durcheilen des Lichtbogens, beim Aufprall auf die Anode wird die elektrische Spannung als Antriebsmittel in verschiedenen Teilbeträgen benötigt. In der Lichtbogenheizung mit Kohlenelektroden ist der Spannungsabfall an der Kathode, der sog. Kathodenfall, etwa 10 Volt und der Anodenfall mindestens etwa 4 Volt. Der Spannungsverbrauch im Lichtbogen selbst ist abhängig von seiner Leistung, im praktischen Betriebe liegt er zwischen 20 und 180 Volt.

b) Beim Wechselstromlichtbogen sind die Unterschiede zwischen den Erscheinungen an Anode und Kathode verwischt, weil sie ja mit der Frequenz des Wechselstromes dauernd und schnell ihre Polarität vertauschen und somit auch die Elektronenrichtung, die Spannungsabfälle und Temperaturunterschiede; es stellt sich also ein in der äußeren Erscheinung mittlerer Beharrungszustand ein (Abb. 9 unten). Der kritische Punkt, in dem der Wechselstrom durch Null hindurchgeht (vgl. Abb. 2), würde zum Erlöschen des Lichtbogens führen, wenn nicht die Kohlenelektroden auf Grund ihres Wärmeinhaltes an der Spitze so heiß bleiben, daß die Anode in dem Augenblick, wenn sie zur Kathode wird, ohne weiteres die Elektronenaussendung in der entgegengesetzten Richtung aufnehmen kann.

Die bisher geschilderten Verhältnisse gelten für den reinen Kohlenlichtbogen, der zwischen zwei Kohlenelektroden betrieben wird. Er gibt seine Wärme ohne Berührung des Schmelzgutes nur durch Strahlung ab. In der größeren Gruppe der mit Lichtbogenheizung betriebenen Industrieöfen geht der Lichtbogen von der Kohlenelektrode auf das Schmelzgut — meist handelt es sich um zu schmelzendes oder flüssiges Eisen — über. Hier ist also die eine Elektrode, das Schmelzbad, metallisch; Metallichtbögen verhalten sich etwas anders als Kohlenlichtbögen, sie verbrauchen im allgemeinen geringere Spannungen, vor allem ist die Wärmeentwicklung an der Anode nicht so überragend wie bei der Kohlenanode. Bei Wechsel- oder Drehstrombetrieb stellt sich auch hier natürlich ein mittlerer Beharrungszustand ein, nachdem die Energieschwankungen beim Anfahren der Öfen aus dem kalten Zustand sich beruhigt haben. Die Lichtbogenheizung verlangt Gleichmäßigkeit in Stromstärke und Bogenlänge; auch hierzu bedarf es sinnreicher Regelvorrichtungen.

**17. Wirbelstromheizung, Induktionsöfen.** Die dritte Gruppe der Wärmeerzeuger bedient sich der Wirbelströme, die im Schmelzgut selbst hervorgerufen werden. Man könnte sie eigentlich mit unter die Gruppe der reinen Widerstandsheizung rechnen, da Wirbelströme, auch wenn sie in ungeordneten Bahnen verlaufen, nur infolge des ihnen entgegengesetzten Leitungswiderstandes in Wärme umgewandelt werden können. Immerhin ist die Erzeugung und Einwirkung der so erzeugten Wärme so eigenartig, daß man sie wohl in eine besondere Gruppe einordnen kann. Man nennt die damit betriebenen Erhitzer Induktionsöfen. Der Vorgang in diesen Wärmegeräten spielt sich so ab, daß eine vom Wechselstrom höherer oder niederer Frequenz durchpulste Spule ohne oder mit Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, dessen Kraftlinien das metallische Schmelzgut durchsetzen und so in ihnen Spannungen, Ströme und Wärme erzeugen. Wann man Öfen mit und wann man sie ohne Eisenkern verwendet, bestimmen Verwendungszweck und Erfahrung; hier sei nur von elektrischer Seite darauf aufmerksam gemacht, daß Eisenkerne eine höhere Anzahl von Kraftlinien zu erzeugen gestatten, als wenn man auf sie verzichtet. Weil nun aber die Kraftlinienschnittzahl in der Zeiteinheit maßgebend für die induzierte Spannung und damit für die Wirbelströme ist, so muß bei eisenlosen Induktionsöfen die geringere Sättigung mit Kraftlinien durch

eine höhere Frequenz des Wechselstromes ausgeglichen werden. Hochfrequente Wechselströme für Induktionsöfen — es handelt sich hier praktisch um 500 bis 20000 Hz — müssen in besonderen Umformern hergestellt werden. Da Induktionsöfen naturgemäß eine hohe Selbstinduktion und damit einen schlechten Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) aufweisen, sind zur besseren Wirtschaftlichkeit ihres Betriebes Einrichtungen zur Verbesserung des Leistungsfaktors nötig, z. B. Kondensatoren.

Es sind in diesem Kapitel die allgemein für die Elektrowärmeerzeugung gültigen physikalischen und elektrotechnischen Grundlagen behandelt. Erscheinungen, die für dieses oder jenes Gerät, für diesen oder jenen Vorgang eine besondere Bedeutung haben, können besser an der betreffenden Stelle erklärt werden. Für die Errichtung und den Betrieb elektrischer Anlagen bestehen in Deutschland seit langem wissenschaftlich und behördlich anerkannte Sicherheitsvorschriften[1], die der *Verband Deutscher Elektrotechniker* herausgibt; sie sind selbstverständlich auch für den Bau und Betrieb elektrischer Wärmeerzeugungs- und Verwertungsanlagen verbindlich.

# II. Grundsätzliches über die Arten und Baustoffe der Elektrowärmegeräte.

## A. Einteilung und Grundformen der Geräte.

Die Verwendung der Elektrowärme ist auf allen menschlichen Gebieten (Haushalt, Landwirtschaft, Gewerbe, Industrie, Verkehr, Wissenschaft) so mannigfaltig, daß eine wohlgeordnete Einteilung der Geräte und ihrer Verwertung sehr schwer fällt. Das gilt auch noch für das eine hier zu behandelnde Gebiet der industriellen Elektrowärme, denn es hat gegenüber den anderen den größten Umfang. Die zwei Hauptgesichtspunkte zur Ordnung der Begriffe sind 1. die Erzeugung und 2. die Verwertung der Elektrowärme. Der erste Gesichtspunkt umfaßt die Wirkungs- und Bauweise der Geräte, der zweite den Verwendungszweck und die Betriebsweise.

**18. Bauart.** Nach der Wirkungs- und Bauweise unterscheidet man bei den Geräten einmal die Art der Wärmeerzeugung als mittelbare oder unmittelbare

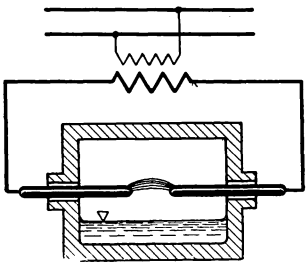

Abb. 10. Mittelbare Lichtbogenheizung.

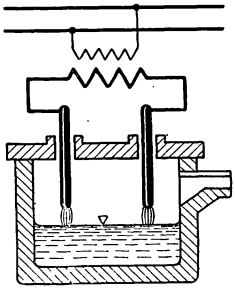

Abb. 11. Unmittelbare Lichtbogenheizung.

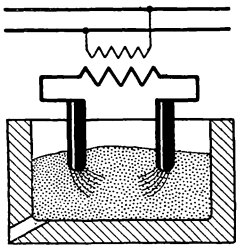

Abb. 12. Bedeckter Lichtbogen.

Widerstands-, Lichtbogen- oder Induktionsbeheizung. Abb. 10···12 zeigen beispielhafte Skizzen für Lichtbogenöfen, Abb. 13···16 für Widerstandsbeheizung und Abb. 17···18 für Induktionsöfen. Ferner dient die Bauart als Unterscheidungsmittel; Geräte, die in geschlossenen Räumen ihre Wärme an das zu behandelnde

[1] Erhältlich durch jede Buchhandlung.

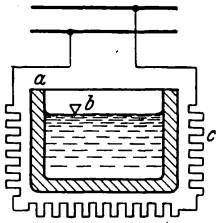


Abb. 13. Mittelbare Widerstandsheizung für Schmelzgut.
$a$ = Tiegel; $b$ = zu schmelzendes Gut; $c$ = Heizleiter.

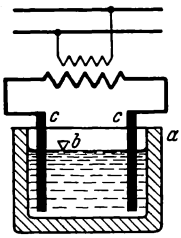


Abb. 14. Unmittelbare Widerstandsheizung für Schmelzgut.
$a$ = Tiegel; $b$ = Schmelzbad; $c$ = Elektroden.

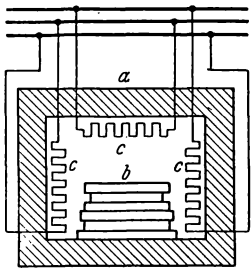


Abb. 15. Mittelbare Widerstandsheizung für Glühgut.
$a$ = Ofen; $b$ = Glühgut; $c$ = Heizleiter.

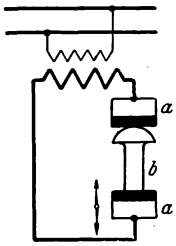


Abb. 16. Unmittelbare Widerstandsheizung für Glühgut.
$a$ = Einspannelektroden; $b$ = zu erhitzendes Werkstück, z. B. Niete.

Gut abgeben, nennt man Öfen, in einigen Fällen auch Schränke. Daneben gibt es eine Reihe von Bauarten, die an das nicht eingeschlossene Werkstück die Wärme heranbringen, man nennt sie Erhitzer oder auch einfach Heizgeräte. Eine Sonderform davon sind die weitverbreiteten, in diesem Büchlein nur beiläufig behandelten elektrischen Schweißgeräte. Die Öfen sind ihrer räum-

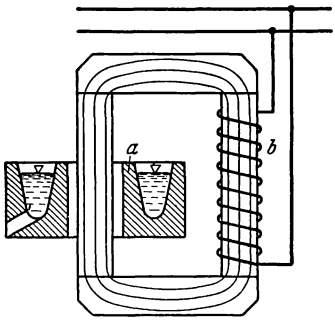


Abb. 17. Niederfrequenzheizung.
$a$ = Schmelzrinne als Sekundärwickelung; $b$ = Primärwickelung am Netz.

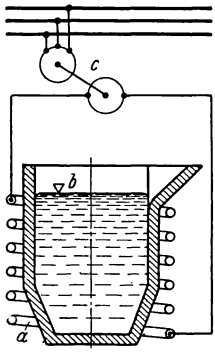


Abb. 18. Hochfrequenzheizung.
$a$ = wassergekühlte Induktionsspule; $b$ = induziertes Schmelzbad; $c$ = umlaufender Frequenzumformer.

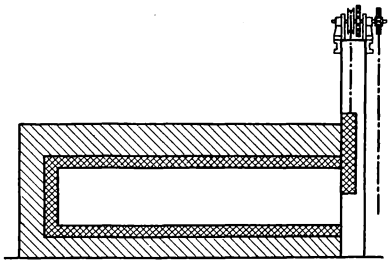

Abb. 19. Kammerofen.

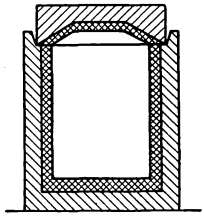

Abb. 20. Schachtofen.

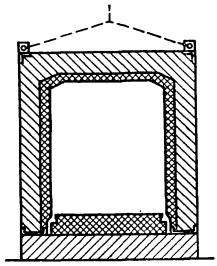

Abb. 21. Haubenofen.

lichen Bauweise nach wohl am besten gekennzeichnet als Kammeröfen (Muffel-, Tunnelöfen u. ä.), Schachtöfen (Muldenöfen), Ringöfen, Haubenöfen (Glockenöfen), Herd-, Wannen- und Tiegelöfen. Die Abb. 19···22 lassen in grundsätzlichen Skizzen die bauliche Anordnung dieser Ofenarten erkennen. Zu den kennzeichnenden Unterschieden der Bauweise muß auch noch die Temperaturgrenze gerechnet werden, bis zu welcher diese Öfen gebraucht werden können als Nieder-, Mittel- oder Hochtemperaturöfen (etwa bis 500, 1000, 1500° C

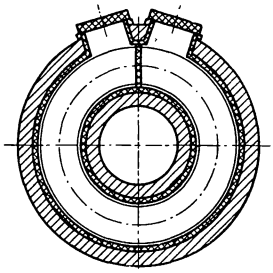

Abb. 22. Ringherdofen.

und darüber). Auch die Art der im Ofen eingeschlossenen Atmosphäre ist unterschiedlich. Die meisten Öfen arbeiten unter Einschluß der gewöhnlichen Luft; soll aber der in der Hitze besonders für Metalle schädliche Sauerstoff ferngehalten werden, so müssen die Ofenräume sehr gut abgedichtet sein, oder es muß ein sog. Schutzgas (es kann auch Dampf sein) den Ofenraum erfüllen. Die Ofenatmosphäre kann entweder stehend sein oder sie wird zum besseren Ausgleich der Wärme mechanisch umgewälzt (Umluft), nach Art der Abb. 23.

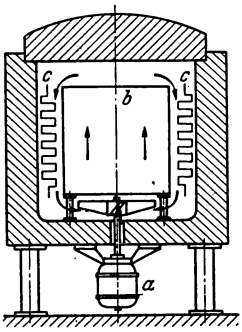

Abb. 23. Schachtofen mit Luftumwälzung. *a* = Lüftermotor; *b* = Glühraum; *c* = Heizleiter.

**19. Verwendungszweck.** Bei weitem am gebräuchlichsten ist die Einteilung der industriellen Elektrowärmegeräte nach ihrem Verwendungszweck. Da unterscheidet man Schmelzöfen zum Erschmelzen, Ein- und Umschmelzen, Legieren und Raffinieren von Metallen, zur Erzielung von chemischen Vorgängen an Metallen und Nichtmetallen, zur Herstellung von Metallüberzügen u. ä. Ferner Glühöfen, eine besonders vielseitig verwendete Gruppe zum Härten, Anlassen, Weich- und Blankglühen, Anwärmen von Metallen, zum Einbrennen von Email, Glasuren, Farben, Lacken u. ä. Sodann Trockenöfen für die verschiedenen Industrien. Auch die Schweißgeräte dienen einem in seiner Bedeutung gar nicht zu überschätzenden Verwendungszweck der Elektrowärme. Elektrodampfkessel, Warmwasserbereiter und eine ganze Anzahl von Geräten für Sonderzwecke, die hier einzeln aufzuführen der Platz fehlt, vervollständigen die Einteilung nach der Zweckbestimmung.

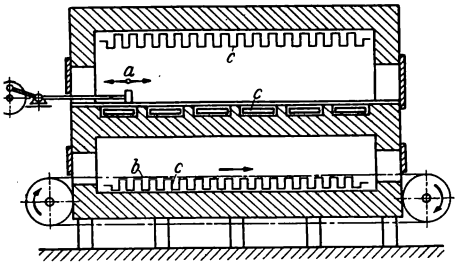

Abb. 24. Doppelkammerdurchlaufofen. *a* = Durchstoßvorrichtung; *b* = Förderkette; *c* = Heizleiter.

**20. Betriebsweise.** Auch nach der Betriebsweise kann man, jedenfalls in der großen Gruppe der Öfen, eine gewisse Ordnung vornehmen. Man unterscheidet Öfen mit ruhendem Gut oder stehendem Einsatz, der nach Einbringen in den Ofenraum ruhend der Wärme ausgesetzt und nach Behandlung geglüht oder geschmolzen wieder aus ihm herausgenommen wird; der Betrieb des Ofens ist daher absatzweise unterbrochen. Bei der anderen Ofengruppe wandert das zu behandelnde Gut im stetigen, langsamen Strom durch den Ofenraum hindurch; diesem durchlaufenden Gut entspricht ein ununterbrochener oder Fließbetrieb. Hinsichtlich der Beschickungsweise unterscheidet man Hand- oder maschinelle Beschickung durch obere, untere oder seitliche Öffnungen. In der mechanischen Beschickung der Glühöfen kann man z. B. weiter unterteilen in Durchstoß- und Durchziehöfen, Rollöfen, Wagenöfen u. ä. In den Abb. 24···26 sind einige Beispiele für die Beschickung der Öfen und die Bewegung des Gutes in ihnen skizzenhaft dargestellt.

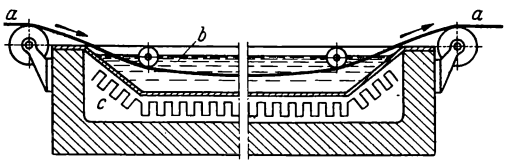

Abb. 25. Schmelzbaddurchziehofen. *a* = Durchzugsgut; *b* = Schmelzbad; *c* = Heizleiter.

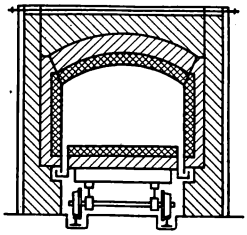
Abb. 26. Herdwagenofen.

Der hier gemachte Versuch einer Einteilung der Elektrowärmegeräte erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit, dazu sind die Grenzen der einzelnen Arten nicht bestimmt genug zu ziehen, was ja bei Geräten, die Erzeugung und Verwendung einer Energie in sich vereinigen, ohnehin nicht leicht ist. Immerhin soll das Aufzeichnen von Begriffen und ihren Benennungen dem Leser bei der späteren Beschreibung der Geräte (Kap. III A···C) die Übersicht erleichtern.

## B. Baustoffe der Elektrowärmegeräte.

Unter Baustoffen werden hier nicht nur die Mittel zur äußeren Gestaltung der Öfen und Wärmegeräte, wie Eisen, Stein u. ä., verstanden, sondern auch alle die Teile, die zum Leiten und Umwandeln der Elektrizität in Wärme und zum Zusammenhalten dieser benötigt werden, wie metallische und nichtmetallische, feste und flüssige Heizleiter, Elektroden, elektrische Isolierstoffe und Wärmeschutzmittel, Tiegelbaustoffe u. dgl. m.

**21. Widerstandsheizleiter.** Wir betrachten zuerst die Gruppe der Widerstandsöfen. Hat man Art und Größe des Ofens nach seinem Zweck und den Abmessungen des Einsatzgutes bestimmt, so wird die erforderliche Heizleistung in kcal berechnet, wobei Menge und verlangte Temperatur des Einsatzes, seine spezifische Wärme und Wärmeleitfähigkeit maßgebend sind. An Strom muß dann dem Ofen das entsprechende Äquivalent (je 860 kcal eine kWh), vermehrt um die zu erwartenden Verluste, zugeführt werden. Die Verluste entstehen durch Abstrahlung der Wärme aus der Ofenoberfläche und durch Entweichen beim Beschicken und Entleeren der Öfen (sog. Türverluste). Auch die Wärmemenge, die dazu nötig ist, den Ofen aus dem kalten Zustande auf Betriebstemperatur zu bringen, die sog. Speicherwärme, ist zum größten Teil als Verlust zu werten, da sie beim Abschalten des Ofens praktisch doch nicht wieder verwertet werden kann. Diese Speicherwärme ist bei jedem Wärmegerät vorhanden und abhängig von seiner Masse, der mittleren spezifischen Wärme seiner Einzelteile und seiner Betriebstemperatur. Den Energiebetrag, der nötig ist, um den Ofen oder das Gerät bis zu seiner Betriebstemperatur aufzuheizen, nennt man den Speicherwert, die Zeit, die dazu nötig, die Anheizzeit. Der für die Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur im leeren Ofen nötige Energiebetrag heißt Leerwert. Um die Ofenverluste bei einer langen Anheizzeit zu verkleinern, müßte man mit hohen Energien schnell aufheizen, die dann wieder im Betrieb nicht ausgenutzt werden könnten. Kommt das Anheizen (bei Dauerbetrieb) selten vor, so spielt der Speicherwert eine weniger wichtige Rolle. Man muß also den Anschlußwert eines Ofens (Leistung in kW) unter geschickter Abwägung der Anheiz- und Betriebsverluste ermitteln. Nach Errechnung der Anschlußleistung sind Art und Bemessung der wärmeerzeugenden Widerstände, der sog. Heizleiter, zu bestimmen. Die Berechnungsweise der Widerstandsöfen, insbesondere der Durchlauföfen, ist heute wissenschaftlich sehr vervollkommnet worden.

a) Die Auswahl der Heizleiter muß den verschiedensten Anforderungen gerecht werden: Sie sollen die Wärme möglichst gleichmäßig abstrahlen oder ableiten, sie sollen mit der Temperatur ihre Abmessungen und ihren Widerstandsbetrag nicht wesentlich verändern. Sie sollen gut verarbeitbar sein, d. h. möglichst kalt verformbar und auch gut zu verschweißen. Vor allen Dingen aber müssen sie warmfest sein, d. h. sich bei der ihnen zugemuteten Temperatur und Ofenatmosphäre weder mechanisch noch chemisch verändern, sie dürfen also nicht schmelzen, verdampfen, brüchig werden, verschlacken, verzundern oder sonst Form oder Zustand verlieren. Schließlich sollen die Heizleiterstoffe wirtschaftlich erschwingbar sein und möglichst im Inlande erzeugt werden. Leider widersprechen

sich oft die Anforderungen in ihrer Erfüllungsmöglichkeit. Heizleiter mit dem erwünscht hohen Widerstandsbetrag leiten Wärme schlecht und sind teilweise wenig warmfest; als warmfest bewährte Heizleiterstoffe können teilweise nur devisenbelastet vom Ausland bezogen werden usw. Bei weitem die meisten Heizleiter sind metallischer Art, ihre Auswahl ist von der Höhe der Betriebstemperatur abhängig. Die Tabelle 3 (S. 20) gibt eine Zusammenstellung der wichtigsten Heizleiter mit ihren Eigenschaften. Die Angaben der Temperaturen, bis zu welchen diese Stoffe benutzt werden können, beruhen auf der Verwendung in Luft unter der Annahme einer mittleren Benutzungsdauer ohne Überlastung. Metallische Heizleiter im Schutzgas und bei geringer Betriebsdauer können höher beansprucht werden. Die Industrieöfen benutzen am meisten Legierungen von Eisen (Fe), Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Chrom (Cr) und Aluminium (Al); Chromnickel, am besten in der Mischung 80 Ni + 20 Cr, gibt den bevorzugtesten Heizleiterstoff ab, leider ist er sehr devisenbeschwert. Die Chromeisengruppe unter Ausschluß von Nickel, durch Zusatz von Aluminium (etwa 65 Fe + 30 Cr + 5 Al) zu verbessern, führt zwar zu hoher Temperaturleistung, läßt aber die Heizleiter sehr bald recht spröde werden. Die Lebensdauer metallischer Heizleiter ist von sehr verschiedenen Bedingungen stark abhängig; die haltbaren Chromnickellegierungen können mehrere tausend Betriebsstunden erreichen.

b) Die Bemessung der Heizleiter muß von zwei Gesichtspunkten ausgehen: einmal sollen möglichst viele Heizleiter gleichmäßig im Ofen oder am Heizgerät untergebracht werden, sodann soll mit dem geringsten Stoffaufwand die größte Heizleistung hervorgebracht werden. Ein Heizleiter kann frei im Raum die Wärme am besten abstrahlen, nutzt aber den Raum sehr schlecht aus. Bedeckt man alle Raumwandungen mit Heizleitern, so ist die Raumausnützung zwar ein Höchstmaß, aber die Heizleiter können nur von einer Seite Wärme ausstrahlen, während ihre andere Seite unter Umständen durch Wärmestauung Schaden leidet. Man wird also bei der Berechnung, auf die hier einzugehen zu weit führen würde, den goldenen Mittelweg suchen müssen, wo freie Strahlung und Rückstrahlung durch die Ofenwandungen bei Schonung des Materials den besten Wert ergeben.

Die metallischen Heizleiter werden in Form von Band oder Draht, dieser zu Wendeln gewickelt, verarbeitet. Querschnitt und Länge ergibt sich aus dem verlangten Widerstand unter Beachtung der zulässigen Strombelastbarkeit; diese wird ausgedrückt durch die Anzahl Watt, die je Quadratzentimeter Oberfläche bei einer bestimmten Temperatur in Wärme umgesetzt werden können. Diese Belastbarkeit liegt bei den verschiedenen Heizleitermetallen und Betriebstemperaturen praktisch zwischen rund $0{,}5 \cdots 5\ \mathrm{W/cm^2}$. Da Bänder und Drähte nicht frei tragend im Ofenraum ausgespannt werden können, müssen sie von Vorrichtungen getragen werden, die nicht nur wärmebeständig sind, sondern auch die Ableitung der Wärme und Elektrizität verhindern. Die Abb. 27 u. 28a bis c zeigen in Ansicht und schematisch die Befestigungsmöglichkeit von Drähten und Bändern. Diese Bauart verhindert natürlich, daß die ganze Oberfläche des Heizleiters seine Wärme strahlend an das zu behandelnde Gut abgibt, ein großer Teil erhitzt die tragenden Teile und kann erst auf mittelbarem Wege wieder abgestrahlt werden. Eine Verbesserung dieses Zustandes ist von einer Firma dadurch erreicht, daß sie den Querschnitt des Leiters biegungsfest nach Art einer Fahrradfelge (Abb. 29) ausgebildet hat. Damit ist das Heizelement bei Spannweiten bis zu 2 m und bei der Betriebstemperatur selbsttragend. Bei geeigneter Anordnung ist das Felgenheizelement sogar in der Lage, den darüberliegenden Wärmeisolierstoff des Ofens mit zu tragen, man kann dabei einen weniger tragenden, aber die Wärmeverluste besser abdämmenden Stoff ver-

wenden. Die Heizfelgen werden aus bewährten Chromnickellegierungen für Betriebstemperaturen von 600···1100° C hergestellt.

Um die metallischen Heizleiter besser vor Zerstörung zu schützen und um die Wärmeabgabe noch gleichmäßiger zu gestalten, bettet man sie manchmal ganz in Isoliermasse ein, die dann entweder selbsttragend sein muß wie bei Heizmuffeln (Abb. 30) oder Heizrohren (Calodurverfahren Abb. 31 unten) oder noch von einen metallischen Schutzrohr umgeben wird. In dieser Hinsicht hat sich das sog. *Backer*-Rohr (nach dem Erfinder so genannt, Abb. 31 oben) und ähnliche Ausführungen in der letzten Zeit gut eingeführt Ganz eingebettete metallische Heizleiter werden allerdings nur für kleinere und mittlere Öfen und

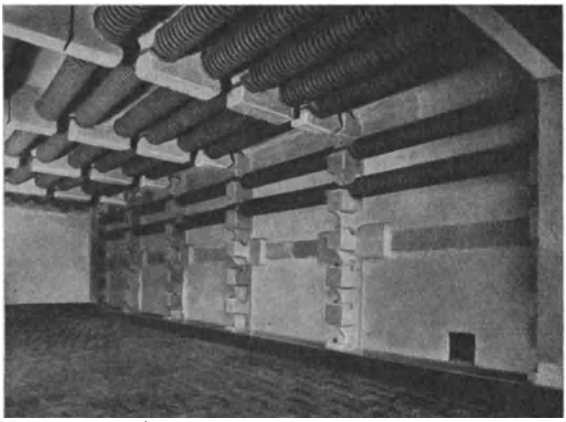

Abb. 27. Befestigung von Widerstandsheizwendeln in einem Kammerofen (*BBC.*).

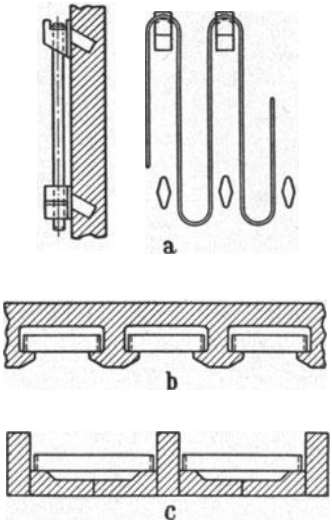


Abb. 28. Einbau von Widerstandsheizbändern in *a* = Seitenwand, *b* = Decke und *c* = Boden eines Ofens (*SSW.*).

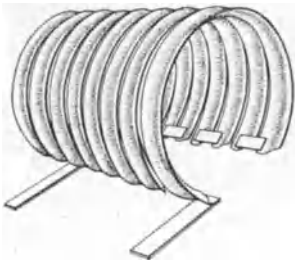

Abb. 29. Heizfelgen (*Junker*).

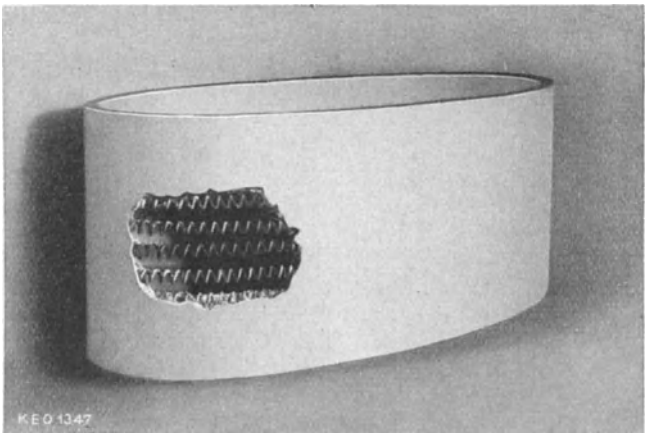


Abb. 30. Heizmuffel mit eingebetteten Heizwendeln (*Junker*).

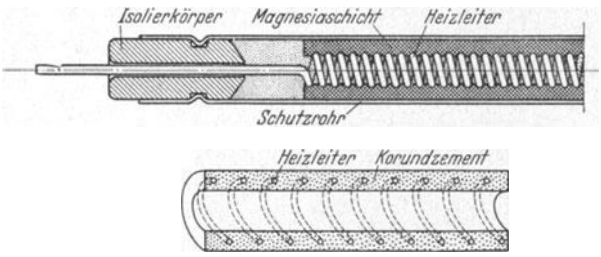


Abb. 31. Heizrohre.

Wärmegeräte verwendet. Passende Einbettungsstoffe für Heizleiter sind geordnet nach ihren Betriebstemperaturen von 500···1200° C: Glimmer, Asbest, Kieselgur, Magnesia, Schamotte, Tonerde. Als weitere Widerstandsmetalle, die allerdings nur in kleinen Geräten, z. B. für Laboratoriumszwecke in der Industrie, verwendet werden, seien noch Platin und Molybdän genannt (Tabelle 3).

c) Nichtmetallische Heizleiter mit hoher Warmfestigkeit werden verwendet, wenn in manchen Fällen die praktisch mit metallischen Heizleitern erreichbare Ofentemperatur von 1100···1200° C nicht ausreichend ist. Dafür haben sich als brauchbar erwiesen die Kohle und eine Verbindung von Kohle mit Silizium, das sog. Siliziumkarbid. Kohle, im reinen Zustand als Graphit bekannt, ergibt bei Stromdurchfluß Temperaturen von 2000···3000° C, sie wird in Stab-, Rohr- und Grießform je nach Anwendungszweck in den elektrischen Stromkreis eingeschaltet. Soweit sie als Träger der Lichtbogenheizung dient, wird sie im nächsten Hauptabschnitt besprochen, im übrigen ist ihre industrielle Anwendung für die Elektrowärme fast nur auf das Laboratorium beschränkt. Dagegen haben sich Heizleiter aus Siliziumkarbid, welche unter dem Namen „Silit" und „Globar" verwendet werden, gut eingeführt, auch für größere Heizleistungen; es lassen sich Temperaturen bis zu 1500° C mit ihnen erreichen, im praktischen Betriebe werden sie von 700···1400° C verwendet. Silit hat einen spezifischen Widerstand je nach Zusammensetzung von 700···6000 Ohm, praktisch werden 1000···2000 Ohm bevorzugt (vgl. Tabelle 3). Das Siliziumkarbid kann zwar nicht schmelzen, wird aber bei den hohen Temperaturen mit der Zeit durch den Luftsauerstoff oxydiert; seine Oxyde sind nichtleitend und erhöhen den Widerstand schnell und erheblich. Daher muß bei den Heizleitern aus Silit und Globar, um den Stromdurchgang und damit die Wärmeerzeugung auf gleicher Höhe zu erhalten, die Spannung von Zeit zu Zeit erhöht werden. Die als Alterung bezeichnete Erscheinung setzt den Silit- und Globarheizleitern eine beschränkte Lebensdauer fest, die bei ununterbrochenem Betrieb 1000···2000 Stunden erreicht; bei unterbrochenem Betrieb liegt sie höher. Siliziumkarbidheizleiter werden in Form von zylindrischen Stäben auf keramischem Wege (vom griechischen Keramik = Töpferkunst) durch Pressen und Brennen hergestellt, man nennt sie daher auch keramische Widerstände. Der An-

Tabelle 3. Zusammenstellung gebräuchlicher Heizleiter.

| Nr. | Bezeichnung | Zusammensetzung | spezif. Widerstand Ohm je m/mm² | Nutzbereich bis °C |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Konstantan | 60 Cu + 40 Ni | 0,45···0,5 | 500 |
| 2 | Nickelin | 58 Cu + 42 Ni | 0,42 | 500 |
| 3 | Manganin | 84 Cu + 4 Ni + 12 Mn | 0,45 | 500 |
| 4 | Eisen | Fe | 0,09···0,15 | 700 |
| 5 | Nickel | Ni | 0,10 | 800 |
| 6 | Chromnickeleisen (Eisen überwiegend) | Fe + Ni + Cr | 0,5···0,9 | 950 |
| 7 | Chromnickeleisen (Nickel überwiegend) | 65 Ni + 20 Cr + 15 Fe | 1,1 | 1050 |
| 8 | Chromnickel | 80 Ni + 20 Cr | 1,1···1,2 | 1150 |
| 9 | Chromeisenaluminium (z. B. Megapyr, Permatherm) | 65 Fe + 30 Cr + 5 Al | 1,4 | 1300 |
| 10 | Chromnickelkobalt (z. B. Kanthal) | Fe + Cr + Ni + Co | 1,5 | 1350 |
| 11 | Platin | Pt | 0,14 | 1600 |
| 12 | Molybdän | Mo | — | 2000 |
| 13 | Glühsalze | etwa BaCl | ~ 5000 | 1200 |
| 14 | Siliziumkarbid | C + Si | ~ 1000···2000 | 1400 |
| 15 | Kohle | C | 12···100 | 2500 |

schluß dieser harten und spröden Nichtmetalle an die elektrische Stromzuführung macht besondere Vorrichtungen nötig. Bei den Silitstäben werden die Enden jenseits der Glühlänge verdickt, mit einem dünnen Metallüberzug versehen und mit Nickeldraht umwickelt (Abb. 32). Um die Anschlußteile der zerstörenden Wärme zu entziehen, müssen sie aus dem Glühraum hinausgeführt werden. Bei den Globarstäben werden die Enden mit einer Metallkappe versehen, gegen die federnde Kontakte drücken, die Anschlußvorrichtung wird mit Wasser gekühlt.

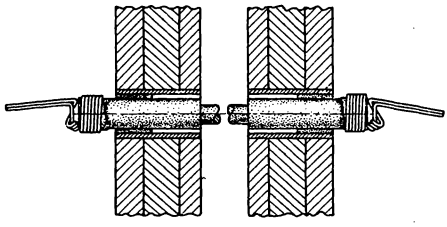

Abb. 32. Einbau eines Silitstabes mit Stromanschlüssen (*S.u.H.*).

Zur Vervollständigung seien noch als nichtmetallische Widerstände die Salzbäder genannt (s. Tabelle 3). Salze der Metalle Barium, Kalium und Natrium, darunter Zyanverbindungen, die nur im warmen Zustande (negativer Temperaturkoeffizient) leitend sind, werden unter Stromdurchgang in helle Glut (800···1300° C) gebracht, sie geben durch Leitung ihre Wärme an das eingetauchte Gut weiter. Da sie im kalten Zustande nicht leitend sind, muß Erwärmung und Stromschluß durch einen Hilfsvorgang eingeleitet werden.

**22. Lichtbogenelektroden.** Als Träger des Lichtbogens dient in der Elektrowärmetechnik die Kohlenelektrode, wenn wir vom metallischen Zusatzstab bei der Lichtbogenschweißung absehen. Man hat Kohle als Elektrode gewählt, weil sie an und für sich elektrisch verhältnismäßig gut leitet und an der Ansatzstelle des Lichtbogens, die außerordentlich hohe Wärmegrade aufweist, nur langsam abgenutzt wird. Diese Abnutzung geschieht durch Verbrennung und Verdampfung bzw. Zerstäubung der Kohlenstoffteilchen. Man muß also im Lichtbogenofenbetrieb dafür sorgen, daß möglichst wenig Sauerstoff (frische Luft) hinzutreten kann. Bei Wechsel- oder Drehstrombetrieb, der praktisch für Lichtbogenöfen nur in Frage kommt, ist der sog. Abbrand an allen Elektrodenenden gleichmäßig. Die Elektrode spitzt sich dabei etwas zu (Abb. 33). Die Lichtbogenelektrode soll selbst möglichst geringen Leitungswiderstand aufweisen, der dazu verwendete technische Kohlenstoff hat einen spezifischen Widerstand von 12···100 Ohm; die Kohlenstoffart mit guter kristallinischer Ausbildung, Graphit genannt, hat einen geringeren Widerstand als die mit ungeordnetem Molekulargefüge, die sog. amorphe Kohle. Beide Formen kommen in den Lichtbogenöfen zur Verwendung, doch wird die Graphitelektrode bevorzugt, da die Leitungsverluste in den Elektroden sehr ins Gewicht fallen. Der Querschnitt der Kohlenelektrode richtet sich nach der Kohlensorte, der benötigten Stromstärke und nach der Querschnittsbelastungsfähigkeit. Je nach Leitvermögen rechnet man mit rund 10···20 Amp/cm², am zugespitzten Elektrodenende steigt diese Belastung dann schon auf 40 Amp/cm². Diese Stromdichten gelten für Elektroden bis 50 cm Durchmesser; muß man größere Querschnitte anwenden (es gibt Elektroden über 1 m Durchmesser mit Stromstärken von 50000 Amp), so muß diese Querschnittsbelastung aus elektrotechnischen und wärmetechnischen Gründen erheblich (auf 4···5 Amp/cm²) herabgesetzt werden. Die stabförmigen Elektroden werden aus pulverförmiger Kohlenmasse (Graphit, Anthrazit, Koks) in Pressen mit riesigen Drücken vorgeformt und dann in einem Ofen fertiggebrannt. Da die üblichen Fabrikationslängen nur etwa 1···2 m be-

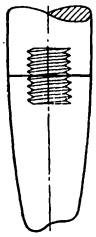

Abb. 33. Kohlenelektrode mit Schraubnippelverbindung.

tragen, müssen die Elektroden im durchgehenden Ofenbetrieb nach Maßgabe des Abbrandes angestückt werden; das geschieht durchweg dadurch, daß man die zylindrischen Kohlen an ihren Enden durch Schraubnippel (Abb. 33) aus dem gleichen Kohlenmaterial verbindet. Das Annippeln kann auf dem Ofen erfolgen. Festigkeitsmäßig sollen die Elektroden mit ihren Nippeln so zuverlässig sein, daß keine Brüche und Abbröckelungen eintreten, die das Schmelzbad verunreinigen oder Betriebsstörungen hervorrufen können. Muß man Kohlenelektroden von größeren Durchmessern gebrauchen, als sie gepreßt werden können, so kommt eine Verstärkung dadurch in Frage, daß man über die Kernelektrode Kohlenringe schiebt, die durch Eisenhalter und Schwalbenschwanzfugen fest miteinander verbunden sind. Eine Elektrodenart, die nicht gepreßt und gebrannt wird und infolgedessen keinen Beschränkungen in den Abmessungen unterliegt, ist die sog. *Söderberg*-Elektrode. Sie wird aus amorpher Kohlenmasse in einen Blechzylinder von gewünschtem Durchmesser eingestampft. Im Ofenbetrieb brennt die Kohlenmasse unter der Einwirkung der Lichtbogenhitze zu einem festen Körper zusammen. Am oberen Elektrodenende wird die Kohle in den Schüssen der Blechzylinder ununterbrochen nachgeschüttelt und eingestampft. Ein Elektrodenwechsel fällt also bei dieser Elektrodenart ganz fort.

Da die Kohlen am Lichtbogenende abbrennen, müssen sie während des Betriebes dauernd nachgeschoben werden, auch muß ihr Abstand vom Einsatzgut oder von der Gegenelektrode dauernd geregelt werden. Für Nachschub und Regelung sind, von kleineren Öfen mit Handbetrieb abgesehen, starke und sinnreiche Regeleinrichtungen notwendig (Abschn. 27).

**23. Dämmstoffe für Wärme und Elektrizität.** Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Elektrowärmegeräte verlangen, daß schädliche und verlustreiche Ableitungen von Strom und Wärme abgedämmt werden. Die Elektrotechnik verfügt über eine Reihe guter Isolationsmittel, die einen hohen Widerstand und eine große Durchschlagsfestigkeit aufweisen, leider aber nicht hitzebeständig, geschweige denn feuerfest sind, wie z. B. Gummi, Papier, Kunstharze u. ä. Preßstoffe. Sie kommen für die Einrichtungen der Elektrowärme nur da in Frage, wo keine Übertemperaturen auftreten. Bis zu einigen hundert Grad lassen sich auch noch Porzellan, Asbest, Speckstein (Steatit), Glimmer u. ä. verwenden, für die hohen Glühtemperaturen in den Öfen aber sind ausgesprochen elektrotechnische Isolierstoffe nicht vorhanden. Es hat sich da zum Glück erwiesen, daß die Wärmedämmstoffe, wie Schamotte, Magnesiumoxyd, Tonerde, Kieselsäure, Korundzement, für die Betriebsspannungen bei den betreffenden Temperaturen — vielfach überschreiten sie 800° C nicht — auch elektrisch genügend gut isolieren, wenn sie auch als sog. Leiter zweiter Klasse mit dem Widerstand bei hoher Erhitzung heruntergehen (negativer Temperaturkoeffizient). Die Betriebsspannungen liegen bei Widerstandsheizgeräten zwischen 220 und 500 Volt, bei mittleren und größeren Lichtbogenöfen zwischen 110 und 220 Volt (Lichtbogenspannungen 80···180 Volt) und bei Induktionsöfen zwischen 200 und 3000 Volt.

a) Bei der Betrachtung der Wärmeisolierung beginnen wir mit den Glühöfen. Als Wärmeverluste kommen in Frage die Abstrahlung durch die äußere Oberfläche, die Verluste durch das Öffnen der Türen, Hinein- und Herausführen der Beschickungsvorrichtungen, als Türverlust bezeichnet, und der größte Teil der Wärme, die man beim Anheizen des Ofens aufwenden muß, die sogenannte Speicherwärme. Will man die Speicherwärme verringern, so muß man die Maße des Ofens verkleinern und ihr geringe spezifische Wärme geben. Der eine Weg ist begrenzt durch die verlangte solide Bauweise und die erforderlichen Größenmaße für den beabsichtigten Zweck, der andere durch den hohen Preis der Bau-

stoffe mit geringer spezifischer Wärme. Auch hier läßt sich zwischen Wärmeverlust und zusätzlichen Stromkosten einerseits und den Baukosten andrerseits der Bestwert finden. Die Türverluste lassen sich durch geschickte Ausbildung der Türen wie Beschickungseinrichtungen und durch aufmerksame Bedienung verringern. Bei absatzweisem Betrieb sind natürlich diese Verluste größer als bei durchlaufendem. Die Strahlungsverluste des Ofens sind abhängig von seiner Oberfläche nach Größe, Wärmeleitvermögen und Temperatur. Diese sollte man nicht über Handwärme (etwa 50°) steigen lassen. Glatte, helle Oberfläche setzt die äußere Wärmeleitfähigkeit herab.

Für die innere Auskleidung der Glühräume genügt hinsichtlich des Wärmeschutzes die sonst übliche Schamotte (feuerfest gebrannter Ton) nicht, da sie eine für Elektroöfen zu hohe innere Wärmeleitfähigkeit hat. Dafür werden Isoliersteine gebraucht, die keramisch aus Tonerde ($Al_2O_3$), Magnesia ($MgO$) und Kieselsäure ($SiO_2$) zusammen gebrannt sind und einen genügend kleinen Ausdehnungsbeiwert besitzen. Auch Isolierpulver werden verwendet, die aus Magnesiumoxyd und Kieselgur bestehen und eine viel geringere Wärmeleitzahl haben (rund $^1/_6$ der Schamotte). Sie haben auch ein entsprechend kleineres spezifisches Gewicht, sind aber besonders bei hohen Temperaturen weniger fest als Schamotte, so daß sie für tragende Teile in den Öfen nicht in Frage kommen. Sofern man also nicht selbsttragende Heizleiter verwendet, muß man die Heizdrähte und -bänder in oder an hochtonerdehaltigen Schamottetragsteinen befestigen (Abb. 28a und b). Als sehr leichte, gut wärmedämmende Isolierstoffe kommen noch Schlackenwolle, Glaswolle und Alfol (zerknitterte Aluminiumfolie) in Frage, da bei ihnen die eingeschlossene Luft, der beste Wärmeisolator, einen sehr großen Raum einnimmt. Die graphische Aufstellung in Abb. 34 gibt Raumgewichte und Wärmeleitfähigkeiten der hauptsächlichen Wärmeschutzstoffe an. Da jede Isoliermasse Wärme aufnimmt und festhält, so ist es unwirtschaftlich

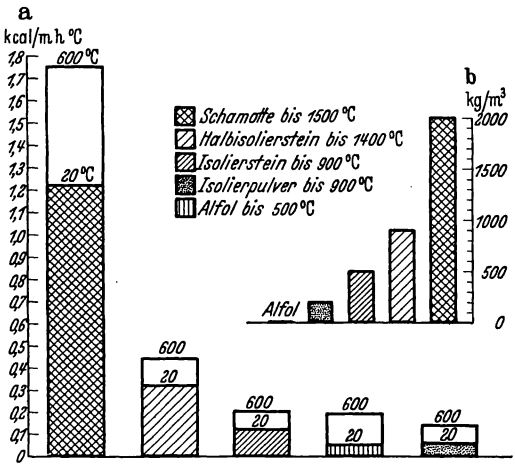


Abb. 34. Eigenschaften verschiedener Ofenbaustoffe. *a* = Wärmeleitzahlen; *b* = Raumgewichte.

für absatzweisen Betrieb, bei dem in jeder längeren Betriebsunterbrechung die festgehaltene Wärme doch wieder verfliegt, ebensoviel Aufwendungen für den Wärmeschutz zu machen wie bei Dauerbetrieb. Sind die regelmäßigen Betriebsunterbrechungen allerdings so kurz, daß das Wiederanheizen noch die Nachhitze aus dem letzten Ofengang verwenden kann, so ist die Wärmeaufspeicherung in der Isolation von Nutzen.

b) Für die Tiegel und Wannen der Schmelzöfen, soweit sie nicht aus Metall bestehen und durch irgendeinen der vorerwähnten Isolierstoffe vor Wärmeverlust geschützt sind, kommen besonders bei den Lichtbogen- und Induktionsöfen Gesichtspunkte in Betracht, die über den Wärmeschutz hinaus die Frage der Auskleidung (Zustellung) der Schmelzräume nach metallurgischen Anforderungen zu lösen haben, da hier das Schmelzbad in chemischer Wechselwirkung (asure oder basische Reaktion) zur Tiegelwandung steht. Die nicht mit dem Bad

in Berührung kommenden Abdeckungen und Beschickungstüren müssen natürlich gegen Wärmeverluste abgedämmt sein. Aus dem Reich der Steine und Erden kommen als Baustoffe für die Elektroschmelzöfen Ton, Kalk, Schamotte, Magnesit, Dolomit und Silika teils als Formsteine, teils als Stampfmasse mit Bindemitteln in Frage.

Bei einigen Erwärmungsvorgängen auf elektrischem Wege spielt der Wärmeschutz keine Rolle, da die Wärmeerzeugung hier im Innern des Werkstückes und so schnell vor sich geht, daß die schädliche Wärmeableitung nicht in Rechnung kommt (z. B. Widerstandsschweißung, Nieterhitzung u. ä. Verfahren).

c) Die übrigen für den Aufbau der industriellen Elektrowärmegeräte benötigten Baustoffe sind die gleichen wie die sonst für Schmelzöfen, Glühöfen, Dampferzeuger usw. in Anwendung kommenden, wie auch die Formen dieser Geräte sich äußerlich ähneln, gleichviel mit welchem Wärmeträger sie beschickt werden. In den Widerstandsschweißmaschinen sind allerdings Geräte entstanden, die sonst ihrer Art Ähnliches nirgends finden. Daß zu allen Elektrowärmegeräten ihrer Größe entsprechende Stromumformungs-, Leitungs-, Schalt-, Meß- und Regelanlagen gehören, versteht sich von selbst. Hinsichtlich der im Bau und Betrieb zu verwendenden Stoffe sind die elektrischen Wärmeerzeuger in der Industrie Diener am Gelingen des Vierjahreplanes.

# III. Ausführungsformen der Elektrowärmeanlagen.

## A. Schmelzöfen.

**24. Allgemeines.** Wir beginnen die Beschreibung der industriellen Elektrowärmegeräte mit den Schmelzöfen, weil für die Fertigung in der Werkstatt das Schmelzen der Metalle einschließlich des Eisens irgendwie den Anfang bezeichnet, sei es, daß Metalle aus Erzen erschmolzen werden, oder sei es, daß sie durch Umschmelzen gereinigt und veredelt oder durch Zusammenschmelzen mit anderen Metallen zu Legierungen gemischt werden, wobei auch Nichtmetalle wie Silizium, Kohlenstoff, Mangan usw. mit ihnen in Verbindung gebracht werden können, sei es, daß sie durch Flüssigmachen lediglich in einen gießfähigen oder sonst verarbeitungsfähigen Zustand gebracht werden sollen. Arten und Abmessungen der Schmelzöfen sind sehr verschieden, sie hängen ab vom Schmelzpunkt der Metalle und der Größe des Einsatzes. Leichtmetalle schmelzen von 250° C an, bei legierten Stählen und Ferrosiliziumverbindungen übersteigen die Temperaturen 1500° C; der Größe nach erstrecken sich die Schmelzöfen von einigen Kilogramm Inhalt bei wenigen Kilowatt Anschlußwert bis zu Großöfen mit 50000 kg Einsatz und vielen tausend Kilowatt Leistungsaufnahme. Als Beheizungsart kommen die in Kap. I D beschriebenen Möglichkeiten: Widerstands-, Lichtbogen- und Induktionserhitzung in ihren verschiedenen Unterarten in Betracht. Die folgende Beschreibung behandelt nach Umfang und Bedeutung die Schmelzöfen in der Reihenfolge Lichtbogenöfen, Induktionsöfen und Widerstandsöfen, wobei jeweils von der geringeren bis zur höheren Schmelzleistung (Temperatur, Menge und Art des Einsatzes) fortgeschritten wird. Die allen elektrischen Schmelzöfen gemeinsamen Vorteile seien der Einzelbeschreibung vorangestellt; sie sind der Fortfall unreiner Heizgase und Brennstoffe, die gute Mischfähigkeit im Schmelzbade, daraus folgend die Herstellungsmöglichkeit gleichmäßiger Metalle und ihrer Legierungen, geringer Verlust durch Abbrand und schließlich die durchaus wichtige Verbesserung der Arbeitsbedingungen durch einfache, saubere und gesunde Bedienung.

**25. Allgemeines über Lichtbogenöfen.** a) Als Heizträger kommen die Kohlen- (Graphit-) Elektroden in Frage, welche die Hitze des Lichtbogens und der Elektrodenenden mittelbar durch Strahlung auf das Schmelzgut (und das Schmelzraumgewölbe) abgeben (Abb. 10) oder unmittelbar, indem der Lichtbogen in das Bad eintritt (Abb. 11). Ein gewisser Betrag an Strahlungswärme bleibt auch hier bestehen, während der Betrag an Wärme, der durch den ohmschen Widerstand des vom Lichtbogenstrom durchflossenen Schmelzgutes entsteht, wegen seiner Geringfügigkeit außer Ansatz bleiben kann. Der Lichtbogen kann einphasig, zweiphasig oder dreiphasig gebildet werden. Bei größeren Öfen kommt nur die letzterwähnte Anordnung mit Drehstromspeisung in Frage. Die Umschaltung der Elektroden von Stern- auf Dreiecksschaltung und umgekehrt ist dabei ein Mittel der Spannungsregelung am Lichtbogen, es muß allerdings dann das Schmelzbad mit dem Nullleiter verbunden sein. Bei einigen Öfen kann durch Umschaltung vom freischwebenden auf den badgebundenen Lichtbogen von mittelbarer zur unmittelbaren Beheizung übergegangen werden. Lichtbogenöfen sind schon um die Jahrhundertwende eingeführt worden. Zuerst (1898) wurde der reine Strahlungsofen mit 2 oder 3 über dem Bad horizontal oder leicht geneigt angebrachten Elektroden von *Stassano* angegeben. Der Ofen mit den auf das Schmelzgut übergehenden Lichtbögen wurde 1900 dem Erfinder *Heroult* patentiert. Eine dritte von *Girod* 1906 angegebene Form leitete den durch den Lichtbogen in das Schmelzbad eingeführten Strom durch eine unten im Bad angebrachte Gegenelektrode zur Stromquelle zurück. Obwohl die Elektrodenanordnungen noch heute grundsätzlich dieselben sind, werden die Namen der Erfinder kaum mehr gebraucht.

b) Die Schmelzgefäße (Herde) der Lichtbogenöfen können wegen der hohen Temperaturen nur aus keramischen Stoffen bestehen, die Ausfütterung (Zustellung) der Schmelzräume mit feuerfesten und gegen chemische Einwirkungen widerstandsfähigen Stoffen ist entsprechend dem Schmelzgut und den damit beabsichtigten Reaktionen verschieden zusammengesetzt und muß nach einer begrenzten Anzahl von Schmelzungen erneuert werden. Das Deckelgewölbe muß besonders scharfe Angriffe der strahlenden Hitze aushalten und daher aus hervorragend feuerfesten Stoffen (z. B. Silika, Korund u. ä.) hergestellt sein. In einigen Sonderfällen ist der Lichtbogenofen über dem Schmelzraum offen. Die Form des Schmelzgefäßes kann die eines Tiegels, eines liegenden Hohlzylinders oder einer Wanne sein. Fast alle Schmelzöfen sind wegen der Notwendigkeit, das flüssige Gut zu entleeren, kippbar eingerichtet. Neben der Öffnung für das Ausgießen (Gießschnauze, Abstichloch) sind noch Öffnungen für das Beschicken mit festem oder flüssigem Einsatz und vielfach auch für das Abziehen der Schlacken vorhanden. Bei großen Öfen für die Stahlerzeugung wird durch Fortnehmen des oberen Deckels der ganze Schmelzraum freigelegt und durch geeignete mechanische Beschickung schnell und wärmesparend mit dem Einsatz gefüllt. Bei allen Beschickungs- und Schlackenarbeiten an Lichtbogenöfen muß Vorsorge getroffen sein, daß die Elektroden nicht beschädigt werden, da Elektrodenbrüche den Betrieb erheblich stören. Neben der für das Ausgießen nötigen Kippbewegung sind manche Schmelzöfen mit einer Vorrichtung versehen, um durch Rollen oder Drehen des Schmelzraumes eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und Durchmischung des Schmelzgutes zu erreichen.

c) Nach der Größe kann man die industriellen Lichtbogenöfen in kleinere, mittlere und große Öfen einteilen, allerdings ohne feste Grenzen. Die kleineren Öfen fassen etwa 150···1200 kg Einsatz bei Anschlußwerten von 75···500 kVA, sie werden meist zum Schmelzen von Nichteisenmetallen gebraucht. Mittlere Öfen kann man etwa bis zu 6 oder 8 t Fassungsvermögen bei 1800···2000 kW Leistungs-

bedarf rechnen; die Großöfen reichen bis zu 25 und neuerdings sogar 50 t und Anschlußleistungen von 6000···12000 kW. Mittlere und große Öfen werden meistens für das Erschmelzen, Veredeln und Legieren von Eisen und Stahl verwendet. Der Anschlußwert ist aber nicht unmittelbar verhältnisgleich der Einsatzgröße des Ofens, er ist um so größer, je kürzer die Schmelzzeit sein soll, je höher der Schmelzpunkt des Einsatzes liegt und je einschneidender eine chemische Wirkung (Reduktion) im Schmelzgut erstrebt wird. Auch die Stromverbräuche für die erschmolzenen Metalle, Stähle, Ferrolegierungen usw. sind daher sehr unterschiedlich; sie werden weiter unten im einzelnen angegeben. Der Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) der Lichtbogenöfen liegt im allgemeinen zwischen 0,75 und 0,9.

**26. Die kleineren Lichtbogenöfen** werden meist als Trommelöfen ausgebildet, d. h. sie haben einen Schmelzraum in Form eines liegenden Hohlzylinders, der um seine Längs- oder seine Querachse gedreht werden kann. Abb. 35 zeigt in vereinfachter Form die Ausbildung eines solchen Ofens als Rollofen. Der Eisenzylinder als Tragkörper des Ofens ist innen wärmedämmend und feuerfest ausgefüttert, die Beschickung geschieht durch eine obere Öffnung, das Abstichloch ist unten an einer Stirnwand angebracht. In der Mittelachse befinden sich in beiden Stirnwänden die Durchführungen für die Elektroden, die vielfach von Hand nachgestellt werden. Die Rollbewegung wird dadurch ermöglicht, daß sich der Ofenzylinder auf Rollenlagern drehen oder auf einer Rollbahn abwälzen läßt; meist genügt für die Badbewegung ein Drehwinkel von 90°. Bei einigen Öfen wird die Zustellung als vorher fertiggebranntes keramisches Hohlgefäß ausgeführt, das in den eisernen Ofenkörper schnell ein- und auszubauen ist. Die Zusammensetzung der Zustellung wird dem Schmelzgut angepaßt; meist wird Kupfer und seine Legierungen, Nickel, Silber, aber auch Eisen für hochwertigen Grauguß in solchen Öfen geschmolzen. Abb. 36 zeigt einen Graugußrollofen für 1 t Fassungsvermögen. Dieser Ofen wird mit drei Elektroden betrieben, von denen zwei im Winkel zueinander geneigt an der einen Stirnseite und die dritte gegenüber an der anderen Seite angebracht sind, sie werden von Hand geregelt. Beschickungs- und Ausgußöffnung sind bei diesem Ofen vereinigt, der Verschluß ist an der vorderen Zylinderwand erkennbar. Bei der Beschickung dieser Öfen

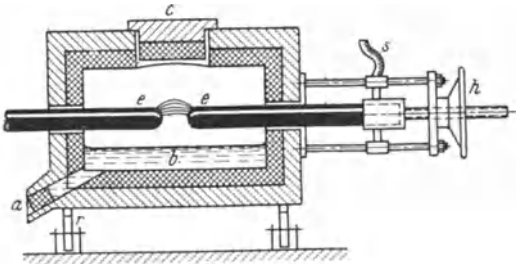


Abb. 35. Einphasenlichtbogen-Rollofen.
$a$ = Abstichöffnung; $b$ = Schmelzbad; $c$ = Beschickungsöffnung; $e$ = Elektroden; $h$ = Handregelung; $r$ = Rollvorrichtung; $s$ = Stromzuführung.

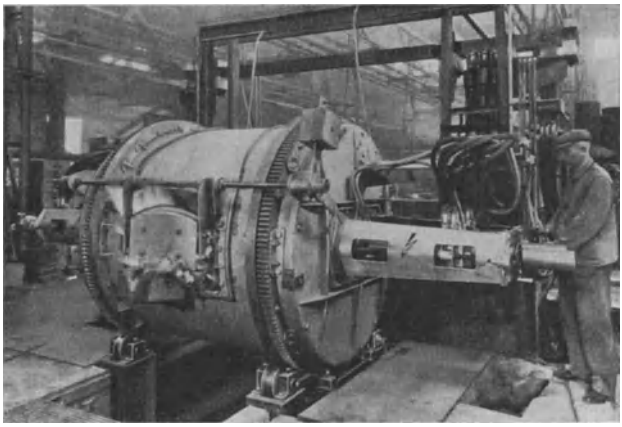

Abb. 36. Drehstromlichtbogen-Schaukelofen (*SSW.*).

mit stückigem Einsatz müssen die Elektroden zurückgezogen werden. Bei öligem Einsatz (Drehspäne) müssen die Beschickungsöffnungen bis zum völligen Ausbrennen des Öles offen bleiben.

Eine andere Form der Öfen mit zylindrischem Schmelzraum zeigt Abb. 37. Es ist ein Metallschmelzofen (Kupfer, Nickel, Silber, Zink, Zinn, Blei und Legierungen) für 600 kg Fassungsvermögen. Die Kohlenelektroden sind hier durch die obere Zylinderwandung senkrecht eingeführt. Nachschub und Lichtbogenlänge wird hier selbsttätig geregelt. Eine dritte Elektrode befindet sich fest eingebettet im Boden des Schmelzbades und in unmittelbarer Berührung mit ihm. Der Ofen kann mit ein-, zwei- oder dreiphasigem Wechselstrom betrieben werden, wobei Transformatorleistungen von 60···250 kVA benötigt werden. Beschickungstür und Ausgußschnauze liegen sich gegenüber an den Stirnseiten. Die Kippbewegung des Ofens wie auch die selbsttätige Elektrodenregelung wird mit Druckwasser betrieben; die Elektrodenführung muß natürlich die Kippbewegung mitmachen.

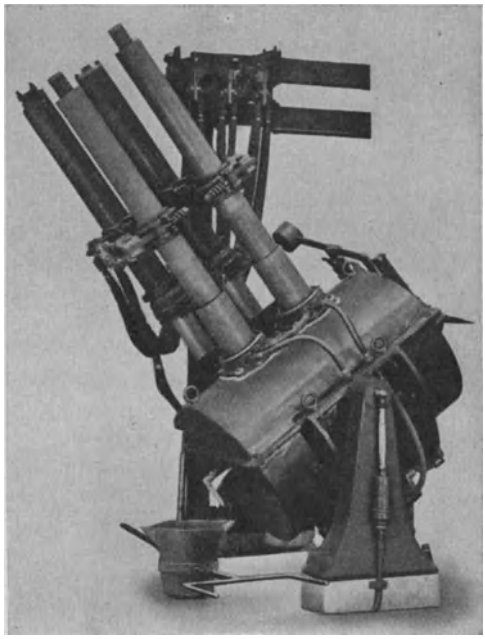

Abb. 37. Lichtbogenmetallschmelz-Kippofen (*BBC.*).

Der Verbrauch an Elektroden (100···150 mm Durchmesser) der bisher beschriebenen kleineren Lichtbogenöfen beträgt etwa 0,8···2,5 kg je t Einsatz, an Strom wird für die Tonne erschmolzenen Metalles etwa verbraucht:

| | | | |
|---|---|---|---|
| für Nickel | rund | 900···995 | kWh |
| „ Grauguß | „ | 650···750 | „ |
| „ Kupfer und Kupferlegierungen | „ | 350···450 | „ |
| „ Silber | „ | 200···250 | „ |
| „ Blei | „ | 60···80 | „ |

**27.** Bei den **mittleren und größeren Lichtbogenöfen** sei, um Wiederholungen zu vermeiden, das grundsätzlich Gleiche oder Ähnliche in Bau- und Betriebsweise vorweggenommen. Das bezieht sich besonders auf die Führung, Abdichtung und Regelung der Elektroden, auf die Beschickung und Entleerung der Öfen, auf die sonstigen mechanischen Einrichtungen, auf die Ausbildung der Schmelzräume und sonst Allgemeines.

a) Die Schmelzräume (Herde) dieser Öfen sind durchweg Wannen mit zylindrischer Wandung in starkem Eisengestell entsprechend gemauert und ausgekleidet. Abb. 38 zeigt die grundsätzliche Anordnung eines solchen Ofens mit Schmelzraum, Deckel, Beschickungs- und Ausgußöffnung und Schaukelvorrichtung. Bei Öfen mit aufliegendem Deckel (Gewölbe) müssen natürlich die Elektroden nebst Führung und Regelvorrichtung die Schaukelbewegung, sei sie nun zum Badmischen oder zum Entleeren nötig, mitmachen. Neuere Öfen haben Deckelformen, die es ermöglichen, das Gewölbe samt den Elektroden und ihrem Zubehör in einer

Hebevorrichtung anzuheben und seitlich fortzubewegen. Abb. 39 zeigt eine solche Vorrichtung über einer Schmelzwanne, die zudem noch drehbar angeordnet ist. Dabei ergibt sich ein doppelter Vorteil. Zunächst kann der ganze Ofen von oben freigelegt werden, was besonders bei der Beschickung, Neuauskleidung und Ausbesserung des Schmelzraumes von Nutzen ist. Sodann kann das Bad unter dem Deckel gedreht werden, wobei die Elektroden ihre Stellung im Raum beibehalten. Das hat den Nutzen, daß der flüssige oder kalte Einsatz nicht immer an denselben Stellen von den Lichtbögen getroffen wird, was wärmetechnisch und metallurgisch von Vorteil ist. Bei der Drehbewegung des Bades (etwa 90 %) darf natürlich das Deckelgewölbe nicht so weit abgehoben werden, daß Wärme entweichen und schädliche Verbrennungsluft hinzutreten kann. Das Gewölbe wird vorsichtig nur um so viel angehoben, daß ein Eisenblechrand des Deckels in einer Sandrinne am Schmelzgefäß sich noch luftdicht bewegen kann. Diese sog. Sandtasse ist im Schema (Abb. 38) gut zu erkennen. Selbstverständlich muß Vorsorge bei der Bedienung solcher Öfen getroffen sein, daß Schmelzgefäß und Deckel mechanisch und elektrisch gefahrlos bewegt werden können, besonders die Elektroden müssen bei den Bewegungen geschützt werden. Da der Deckel vom Schmelzraum bequem zu trennen ist, kann man den Ofen schnell und leicht beschicken.

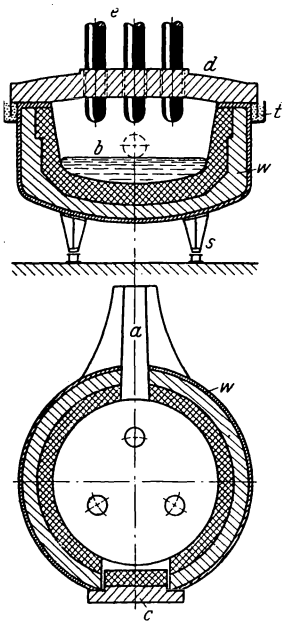


Abb. 38. Schema eines Lichtbogenschmelzofens.
$a$ = Ausgußöffnung; $b$ = Schmelzbad; $c$ = Beschickungsöffnung; $d$ = Deckelgewölbe; $e$ = Elektroden; $s$ = Schaukelkufen; $t$ = Sandtasse; $w$ = Schmelzwanne (Herd).

b) Beschickt werden die Lichtbogenschmelzöfen mit flüssigem oder festem Einsatz. Flüssiges Eisen wird durch eine Gießrinne in den Ofen eingeführt; im sog. Duplexverfahren, d. h. beim ständigen Zusammenarbeiten der Elektroöfen mit einem anderen Schmelzofen des Eisenhüttenbetriebes ist das die Regel. Hier wird natürlich der Elektrowärmebetrag zum Einschmelzen des kalten Einsatzes gespart. Der feste Einsatz besteht meist aus Schrott, Stahlwerksresten u. ä. in grobstückiger oder zerkleinerter Form. Er wird durch die Seitentüren (Schafftüren), die je nach Ofengröße $^1/_3$ bis $^2/_3$ m² bedecken, in den Schmelzraum geschafft. Solche Türen sind feuerfest verkleidet, schwer und meist nur mit mechanischer Kraft zu bewegen, so daß die Beschickung keine leichte Arbeit ist. Bei kleinstückigem, gut rutschfähigem Einsatz hilft man sich manchmal so, daß man ihn durch eine schräge Rinne, die vor der Beschickungstür angebaut ist, in den Ofen hineinrutschen läßt. Um die Beschickung

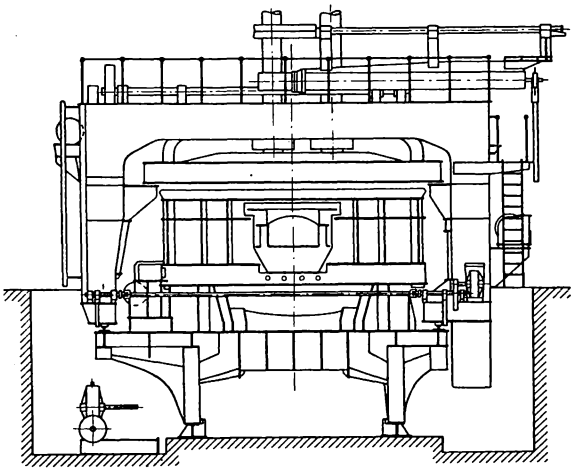

Abb. 39. Lichtbogenofen mit ausfahrbarem Gewölbe und drehbarem Herd (*SSW.*).

zu beschleunigen und damit Zeit- und Wärmeverluste einzusparen, hat sich in den letzten 10 Jahren bei den mittleren Öfen immer mehr das Korbbeschickungsverfahren eingeführt. Es beruht darauf, daß der ganze Einsatz — es kommt dabei nur fester in Frage — auf einmal in den Schmelzraum hineingetan wird. Dazu muß, wie oben schon beschrieben, der Deckel mit dem ganzen Elektrodengerät von dem Schmelzraum entfernt und ein entsprechendes Gefäß mit dem Einsatz mit Kranhilfe darüber gebracht werden können. Bei der einen Form dieser Schnellbeschickung wird der Einsatz in einem Drahtnetz gefaßt und nach Lösen der Halteschlaufen in den Ofenraum gesenkt. Bei dieser Beschickung wird das Netz jedesmal mit eingeschmolzen. Eine andere Form solcher Beschickung, bei der das Gefäß nicht verlorengeht, zeigt Abb. 40. Hier wird ein Greifer oder Klappkübel mit Kranhilfe über den Ofen geschwenkt und durch Aufklappen entleert. Solche Beschickung dauert wenige Minuten und erspart, wenn auch kurze Zeit das ganze Schmelzgefäß offen daliegt, mehr Wärmeverluste als bei der länger dauernden Türbeschickung.

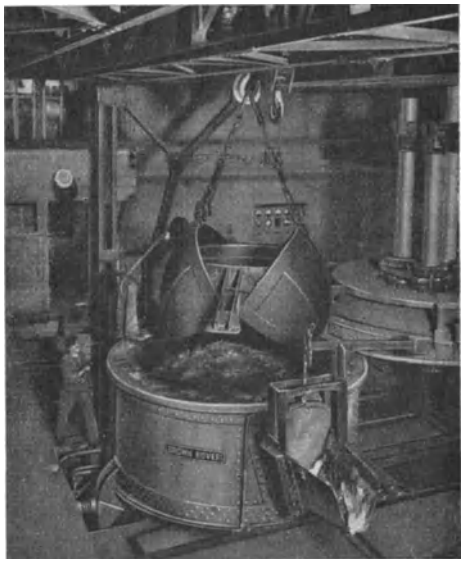

Abb. 40. Korbbeschickung eines Elektrostahlofens.

c) Fassung, Führung und Regelung der Elektroden ist ein wichtiges Gebiet im Bau und Betrieb der Lichtbogenöfen. Die Kohlenstäbe, die schon bei mittleren Öfen einen Durchmesser von etwa 25···50 cm haben, müssen durch das Deckelgewölbe hindurchgeführt werden, ohne daß falsche Luft zu den Abbrandenden der Elektroden und ins Schmelzbad gelangen kann, auch Wärmeverluste durch abziehende Gase sind zu vermeiden, und schließlich muß die Abdichtung so beschaffen sein, daß sie den Kohlennachschub nicht hindert und selbst gegen hohe Wärmegrade geschützt ist. Abb. 41 stellt eine gebräuchliche Durchführungsabdichtung dar, deren Mantel und Ring durch Wasser gekühlt werden. Die Zuführung des Betriebsstromes zu den Elektroden kann bei den mittleren Lichtbogenöfen noch durch Klemmbacken geschehen, welche die Kohlenstäbe umspannen und von Zeit zu Zeit entsprechend dem Kohlenabbrand wieder nach oben versetzt werden müssen. Bei den sehr großen Öfen mit Elektroden bis zu 1 m Durchmesser und mehr und Stromstärken in der Größenordnung von einigen 10000 Ampere genügen versetzbare Klemmbacken nicht mehr, hier muß der Strom der Kohle durch große in einem Ring zusammengefaßte Schleifkontakte zugeführt werden. Es muß dabei durch entsprechenden Anpressungsdruck und Kühlung für störungsfreien Betrieb gesorgt werden. Abb. 42 zeigt eine solche Elektrodenkontaktvorrichtung für einen Lichtbogeschmelzofen von 7500 kVA Anschlußwert. Die

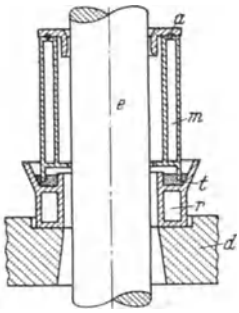


Abb. 41. Elektrodenabdichtung.
$a$ = Dichtungsring; $d$ = Deckengewölbe; $e$ = Elektrode; $m$ = Kühlmantel; $r$ = Kühlring; $t$ = Sandtasse.

Rohrleitungen für die hydraulische Druckregelung und die Wasserkühlung sind gut zu erkennen.

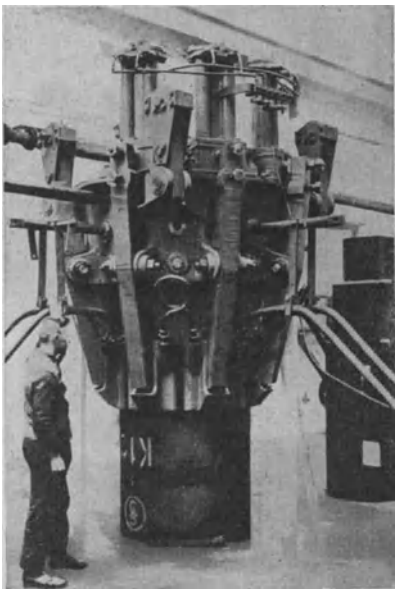

Abb. 42. Elektrodenfassung für große Drehstromöfen (*SSW.*).

Der Abbrand der Elektroden (je nach Größe des Ofens und Art des Betriebes zwischen 3···10 kg je t Erzeugnis schwankend) bringt es mit sich, daß der Lichtbogen immer länger und schließlich bei der begrenzten Spannung des Ofentransformators abreißen würde, wenn nicht die Kohlen in geeigneter Weise nachgeschoben würden. Andrerseits bringen Unregelmäßigkeiten im Bad (besonders beim kalten Einsatz) starke Stromstöße hervor. Diese kann man durch die Wirkung einer zusätzlichen Selbstinduktion, die man in einer besonderen Drosselspule oder im Ofentransformator selbst unterbringt, dämpfen. Den Nachschub der Elektroden und damit Energie- und Wärmeleistung im Ofen regelt man aber durch Einrichtungen, die abhängig von Strom oder Spannung oder beiden Größen des Lichtbogens die Elektroden nach Bedarf senken oder heben. Die schweren Elektroden können dabei mechanisch durch Wasserdruck oder elektromotorisch bewegt werden. Selbstverständlich kommt bei mittleren und großen Lichtbogenöfen keine Handregelung in Frage. Der Wasserdruck oder der motorische Antrieb der Elektrodenbewegung wird durch elektrisch betätigte Ventile und Schalter gesteuert mit Hilfe sog. Relais oder Steuerschütze. Abb. 43 zeigt im stark vereinfachten Schema solche selbsttätige Elektrodenregelung. Das Steuerschütz *r* schließt bei zu hohem Lichtbogenstrom einen Kontakt in dem Sinne, daß der Elektromotor *m* die Elektrode nach oben bewegt. Der Lichtbogen wird damit länger gezogen, die Stromstärke geht zurück, bis das Schütz den Motor abschaltet. Ist durch Abbrand der Lichtbogen zu lang, die Stromstärke zu gering geworden, so wirken Steuerschütz und Motor im entgegengesetzten Sinne. Um ein etwa mögliches hartes Anstoßen der Elektroden bei der Bewegung auszuschließen, hat manche Elektrodenführung eine Rutschkupplung.

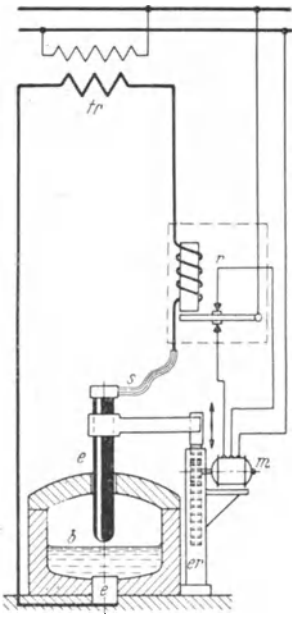


Abb. 43. Vereinfachtes Schema einer selbsttätigen Elektrodenregelung.
*b* = Schmelzbad; *e* = Elektroden; *er* = Elektrodenregler; *m* = Bewegungsmotor; *r* = Steuerschütz; *s* = Stromzuführung; *tr* = Ofentransformator.

**28. Als Beispiel für mittlere und größere Lichtbogenschmelzöfen** diene die Ansicht eines Hochleistungs-Lichtbogenschmelzofens für 7 t und die Werkzeichnung eines ganz großen Ofens für die Erschmelzung von Roheisen.

a) In der Abb. 44 erkennen wir die besprochenen Hauptteile eines Elektroschmelzofens (er dient der Erzeugung von Edelstählen) wieder, wie z. B. die Beschickungstür, die Elektroden mit Fassung, Regelung usw.

Der Ofen ist nach hüttentechnischen Gesichtspunkten so aufgestellt, daß Beschickung, Abstich und die sonst nötige Bedienung möglichst bequem sind.

Verbrauchszahlen für Elektrostahlöfen mit Lichtbogenheizung gibt die Tabelle 4, wobei flüssiger und fester Einsatz unterschieden wird und der Verbrauch für das Feinen (Fertigmachen durch Raffinieren und Legieren) damit gesondert ermittelt werden kann.

Beim flüssigen Einsatz werden also erhebliche Energiemengen eingespart, desgl. auch entsprechende Zeiten an der Gesamtschmelzdauer, die bei den mittleren Öfen etwa zwischen 2 und 6 Stunden liegt. Alle Zahlen sind abgerundet und dienen nur als Anhalt.

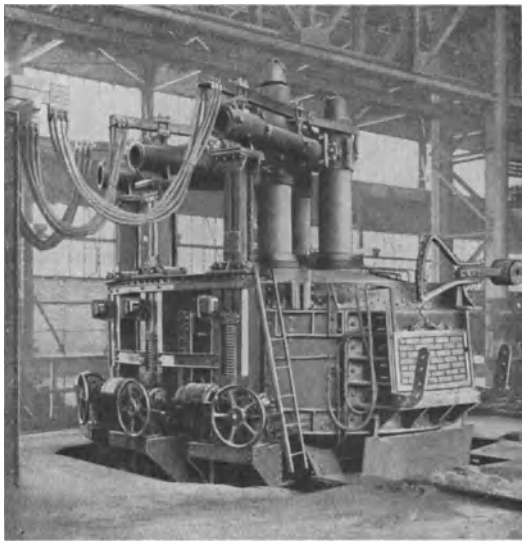

Abb. 44. Elektrostahlofen für 7 t Einsatz (*Demag-Elektrostahl GmbH.*, Düsseldorf).

b) Zu den größten Lichtbogenöfen gehören die zur Verhüttung von Roheisen dienenden. Sie sind allerdings nur dort wirtschaftlich vertretbar, wo Kohlen knapp sind, dafür aber billiger, durch Wasserkraft erzeugter Strom vorhanden ist; das trifft besonders für die nordischen Länder und Italien zu. Die Ersparnis an Kohlenstoff in den elektrisch beheizten Niederschachtöfen beträgt bis zu $^2/_3$ des Verbrauches in den gewöhnlichen Hochöfen; damit wird auch der Bedarf an Verbrennungsluft und der Anfall an Abgasen geringer, und die dazu nötigen Erzeugungs- und Verwertungsanlagen sind weniger kostspielig; hingegen spielen die Kosten der riesigen Elektroden natürlich wieder eine beachtliche Rolle. Da solche Roheisenverhüttungsöfen bedeutende Strommengen verbrauchen und viele tausend kW Anschlußleistung benötigen, so ist für ihren Betrieb neben dem billigen Strom auch eine Stromquelle nötig, die solche Verbraucher ohne störende Ungleichheit ihres Netzes versorgen kann. Da die heutige Elektrodenpraxis durch ununterbrochenen Nachschub (Annippeln u. ä.) einen Dauerbetrieb gewährleistet, können solche Großöfen erwünschte Abnehmer der Stromversorgungsunternehmen werden. Abb. 45 zeigt einen solchen für Italien bestimmten elektrischen Roheisenofen in einer Schnittzeichnung. Er ist im Gegensatz zu den älteren elektrischen Hochöfen der Roheisengewinnung als Niederschachtofen ausgebildet. Die Größe der Anlage ist durch den Anschlußwert des Ofens, den ein 12000 kVA-Umspanner speist, und durch den Durchmesser der Kohlenelektroden von 1100 mm gekennzeichnet. Oberhalb des Ofenschachtes erkennt man die gasdichten Durchführungen, Fassungen und Aufhängevorrichtungen der Elektroden. Die biegsamen Stromzufüh-

Tabelle 4. Stromverbrauch von Lichtbogenöfen.

| Herstellung | Fester Einsatz kWh/t | Flüssiger Einsatz kWh/t |
|---|---|---|
| Stahl und Stahlformguß einschließlich Feinen . . . . | 700···750 | 250 |
| Grauguß . . . . . | 650···750 | — |
| Hochwertige Stähle . . . . . | 800···950 | 450···550 |

rungen von dem in mehreren Spannungsstufen regelbaren Transformator sind links von den Elektroden zu erkennen, rechts davon die Beschickungsvorrichtung. Gefüllt wird der Ofen mit Erz, Reduktionskohle und Zuschlägen durch ein luftdichtes Rohr und geschlossene Gichtkübel; die Abgase werden durch seitliche Absaugerohre abgeführt und weiter verwertet. Bei den riesigen Stromstärken des Ofens müssen zur Vermeidung von Verlusten die Stromzuführungen zu den mit besonders ausgebildeten Fassungen versehenen Elektroden kurz, unmittelbar und unterteilt sein. Man rechnet bei diesem Ofen unter der Voraussetzung, daß geeignete Rohstoffe zur Verhüttung kommen, mit einem Stromverbrauch von 2000···2600 kWh/t Roheisen.

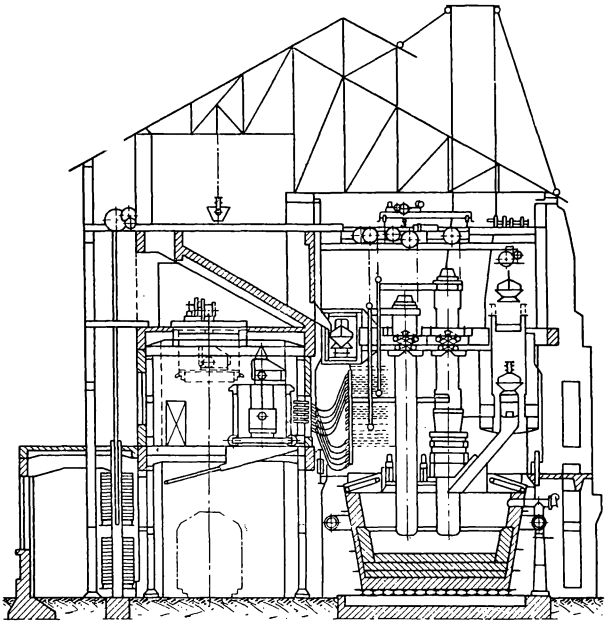

Abb. 45. Lichtbogen-Roheisenofen, Gesamtanlage im Schnitt (*SSW.*).

Auch zum Erschmelzen anderer Metalle, z. B. Zinn, werden Reduktionslichtbogenöfen benutzt, desgl. zur Herstellung von Ferrolegierungen. Diese Öfen sind allerdings kleiner als die Roheisenöfen und arbeiten teilweise mit bedeckten Lichtbögen im offenen Herd (vgl. Abb. 12). Da sich in den Reduktionsöfen meist langdauernde und energiebindende chemische Vorgänge abspielen, so ist hier der Strom- und damit der Elektrodenverbrauch viel größer als bei den Öfen, die Stahl und Metalle umschmelzen und veredeln. Der Stromverbrauch je t Fertigerzeugnis beträgt beispielsweise bei

| | | |
|---|---|---|
| Zink . . . . . | rund | 1700 kWh |
| Ferrosilizium je nach Gehalt . . . . . | „ | 6000···12000 kWh |
| Ferrochrom, je nach Chrom- und Kohlenstoffgehalt . . | „ | 7000···27000 „ |
| Andere Ferrolegierungen . . . . . | „ | 6000···16000 „ |

Vergleichsweise sei hier der Energiebedarf zur Gewinnung von Aluminium aus seinen Rohstoffen angegeben, er beträgt 22000···25000 kWh/t. Das Verfahren arbeitet zwar auch mit bedeckten Kohlenelektroden, ist aber kein rein elektrothermischer, sondern mehr ein elektrochemischer Vorgang, eine sog. Schmelzflußelektrolyse.

**29. Induktionsöfen, Allgemeines.** Diese Öfen, deren elektrotechnische Grundlagen in Abschn. 17 behandelt sind, weisen gewisse Vorteile gegenüber den Lichtbogenöfen auf. Induktionsofen und Transformator bilden eine Einheit. Die von den Kraftlinien des letzteren durchdrungenen Teile des Schmelzgutes werden gleichmäßiger erwärmt als beim Lichtbogen, örtliche Überhitzungen sind dabei ausgeschlossen, zumal das Schmelzbad durch elektrische Kräfte in Bewegung gerät und gut durchmischt wird. Die Temperaturregelung des Schmelzbades in engen Grenzen ist verhältnismäßig einfach möglich, der Wärmewirkungsgrad sehr hoch. Neben diesen allgemeinen Vorteilen hat der Hochfrequenzofen noch weitere.

Die Anfertigung und Zustellung seines Schmelzgefäßes wird für einfacher gehalten als bei den anderen Hochtemperaturschmelzöfen, als einfacher Tiegel erfordert er auch weniger Arbeit in der Bedienung. Die Treffsicherheit in der Zusammensetzung von Legierungen und die weitgehende Verfeinerung (Raffinierung) des Schmelzgutes haben den Hochfrequenzofen in der letzten Zeit starke Zunahme finden lassen, während der Niederfrequenzofen für die Stahlverarbeitung ziemlich in den Hintergrund getreten ist. Lästig ist für Hochfrequenz die Bedingung, eine besondere Stromquelle mit Regeleinrichtungen zu beschaffen (ursprünglich auch für Niederfrequenzöfen nötig), welche den guten Ofenwirkungsgrad im Gesamtbetriebsergebnis natürlich wieder herabsetzt.

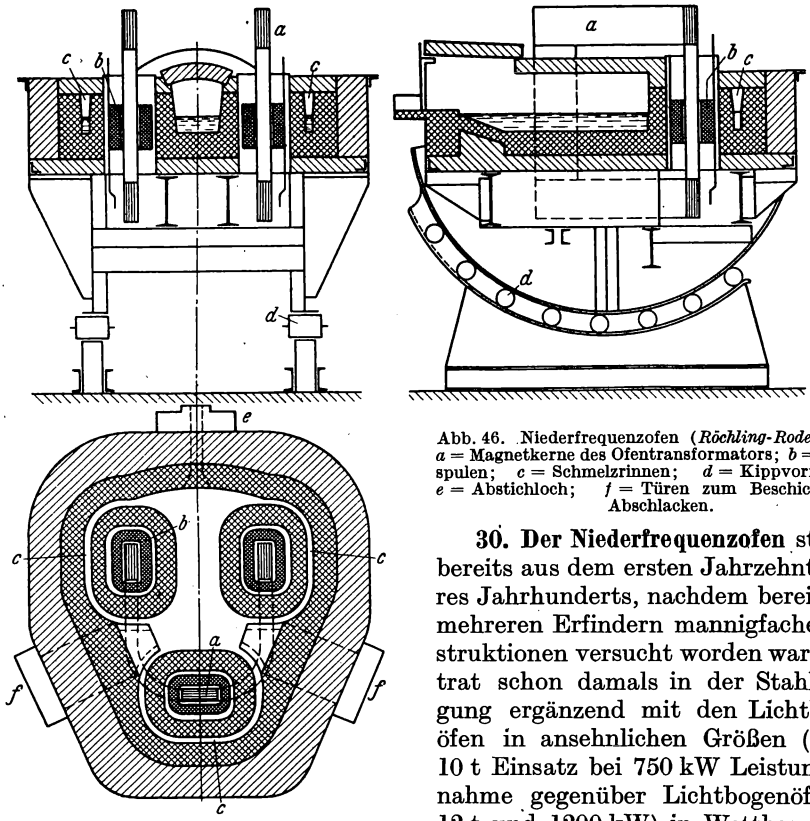


Abb. 46. Niederfrequenzofen (*Röchling-Rodenhauser*). *a* = Magnetkerne des Ofentransformators; *b* = Primärspulen; *c* = Schmelzrinnen; *d* = Kippvorrichtung; *e* = Abstichloch; *f* = Türen zum Beschicken und Abschlacken.

**30. Der Niederfrequenzofen** stammt bereits aus dem ersten Jahrzehnt unseres Jahrhunderts, nachdem bereits von mehreren Erfindern mannigfache Konstruktionen versucht worden waren. Er trat schon damals in der Stahlerzeugung ergänzend mit den Lichtbogenöfen in ansehnlichen Größen (bis zu 10 t Einsatz bei 750 kW Leistungsaufnahme gegenüber Lichtbogenöfen bis 12 t und 1200 kW) in Wettbewerb.

a) Das in Abb. 17 angedeutete Wesen eines Niederfrequenzofens stammt von *Kjellin* und ist in Deutschland u. a. von *Rodenhauser* (*Röchling*-Stahlwerke) verbessert und erweitert worden. Die Schmelzräume fielen bei seiner Bauart eng aus und gaben dem Schmelzbad einen erhöhten ohmschen Widerstand, so daß hier mit besserem Erfolg als bei ersten Versuchen mit den Lichtbogenöfen eine zusätzliche, unmittelbare Widerstandsheizung des Bades wirksam wurde. Abb. 46 zeigt schematisch in drei Schnitten die grundsätzliche Anordnung eines *Röchling-Rodenhauser*-Ofens für Drehstrombetrieb. Kippbewegung, Beschickung und Abstich ähneln den Einrichtungen beim Lichtbogenofen, grundsätzlich verschieden davon ist aber die Anordnung des Ofentransformators, der hier ein festeingebauter Teil des Ofens ist und wegen der Wärmebeanspruchung in Kühlung

und Spulenaufbau anderen Bedingungen genügen muß als die getrennt aufgestellten Umspanner anderer Elektroöfen. Niederfrequenzöfen werden mit 25···60 Hz betrieben, ursprünglich verwendet man noch niedrigere Frequenzen (5···20 Hz), um einen brauchbaren Leistungsfaktor zu erzielen. Dazu waren natürlich besondere Stromerzeuger notwendig, später gelang dann eine Bauweise zum Anschluß an ein gewöhnliches Drehstromnetz. Die Transformatorspannung wird durch vorgeschaltete Einrichtungen geregelt und damit auch der Kraftlinienfluß und die Wärmeerzeugung. Da grobstückig in die Schmelzrinnen eingebrachter Einsatz eine elektrisch nur unzulänglich zusammenhängende Leitung bildet, die bei der im Schmelzraum entstehenden geringen Spannung nur kleinste Strom- und Wärmeerzeugung zulassen würde, so wird im praktischen Betrieb zu Beginn flüssiger Einsatz aus einem anderen Schmelzofen eingefüllt. Im fortgesetzten Betrieb wird der zusammenhängende erkaltete oder flüssige Schmelzrest (Sumpf) aus der vorhergehenden Schmelzung zum Aufheizen benutzt. Etwa gehegte Befürchtungen, daß sich in den engen Schmelzrinnen eines Niederfrequenzofens eine schlechte Baddurchmischung ergeben könnte, haben sich nicht als stichhaltig erwiesen, da starke elektromagnetische Wirkungen des das Bad durchfließenden Stromes dasselbe nach allen Richtungen in Bewegung bringen. Auf die Erklärung dieser Wirkungen, die teils von der Frequenz abhängen und unter Umständen den Badquerschnitt unzulässig einschnüren (sog. Pinch-Effekt, von engl. to pinch = schnüren, kneifen), kann hier nicht eingegangen werden. Ausgemauert und zugestellt werden die Schmelzräume, die natürlich abgedeckt sind, nach hüttenmännischen Gesichtspunkten. Der Niederfrequenzofen der beschriebenen Art eignet sich vorzüglich zur Herstellung hochwertiger Stähle, da das Schmelzgut, stamme es aus flüssigem oder kaltem Einsatz, in genau kontrollierbarer Weise gereinigt und gemischt werden kann; dahin gehört das Entkohlen, die Beseitigung von Schwefel und Phosphor, die Zugabe von Ferrolegierungen usw. Auch können Nickel und seine Legierungen in diesem Ofen geschmolzen werden.

b) Neben der Verarbeitung von Stahl, für die der beispielsweise beschriebene *Röchling-Rodenhauser*-Ofen und der von *Frick* in Deutschland vorzugsweise verwendet wird, eignet sich der Niederfrequenzofen auch ebensogut für das Schmelzen und Legieren von Nichteisenmetallen, da hier seine Vorteile, das gleichmäßige Durchwärmen ohne örtliche Überhitzung, das Fernhalten des Luftzutrittes, die gute Durchmischung infolge der Badbewegung und die genaue Temperaturregelung von besonderer Wichtigkeit sind. Diese Metallschmelzöfen sind durchaus kleiner als die Elektrostahlöfen, sie bleiben meist unter 1000 kg Fassungsvermögen und 400 kVA Anschlußwert bei $\cos\varphi =$ rund 0,7···0,8. Als Schmelzmetalle werden Kupfer und Nickel und die Legierungen mit Zinn, Zink, Blei, Silizium verarbeitet. Die üblichen Einsatzmengen liegen zwischen 300 und 750 kg bei Schmelzzeiten von 50···100 min und Leistungsaufnahmen von 75 bis 150 kW. Um ein Beispiel für eine grundsätzlich andere Aufbauweise des Niederfrequenzofens zu bringen, sei hier der aus Amerika stammende, aber auch von deutschen Firmen gebaute sog. *Ajax-Wyatt*-Ofen (Erbauer *Wyatt* bei den *Ajax*-Werken, Philadelphia) beschrieben. Die Schmelzrinne ist hier senkrecht unter dem Bad gelagert, als einrinnig wird der Ofen auch einphasig betrieben, der Transformator hat waagerechte Magnetschenkel. Der Ofen, dessen wirksame Bestandteile in Abb. 47 gezeigt werden, ist in ein Eisengestell eingebaut, das ihn um die Ausgußschnauze kippen läßt. Auch in diesem Ofen finden die starken Badbewegungen statt. Der erste Einsatz muß flüssig erfolgen, für spätere Schmelzungen kann der Rest aus der vorhergehenden Schmelze im warmen oder eingefrorenen Zustande verwendet werden, um den nötigen Stromschluß zu bilden.

Die Zustellung geschieht in zwei Teilen, der obere zylindrische Teil wird gewöhnlich aus gebrannten Formsteinen gemauert, während der untere Teil mit der engen Schmelzrinne, dem sog. Bodenstein, gestampft wird. Für hochschmelzende oder sehr dünnflüssige Metalle wird die gewöhnliche Zustellung noch mit einer Schicht aus Quarzitsand überzogen, die mittels einer genau anliegenden und durch die Induktionswirkung des Ofens erhitzten Metallschablone feuerfest und dicht gebrannt wird. Diese Zustellung hält je nach der Art des bearbeiteten Metalles 500 bis 1000 Schmelzen ohne weiteres aus. Bei den Niederfrequenzmetallöfen wird übrigens neben der Bauform der senkrecht unter dem Schmelzbad liegenden Induktionsrinne auch die der seitlich vom Bad liegenden Rinne angewendet. Ihr äußeres Aussehen hat viel mit demjenigen widerstandsbeheizter Tiegelschmelzöfen gemeinsam.

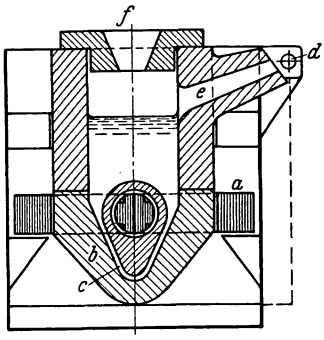

Abb. 47. Niederfrequenzofen (*Ajax-Wyatt*). *a* = Magnetkern des Ofentransformators; *b* = Bodenstein; *c* = Schmelzrinne; *d* = Achse der Kippvorrichtung; *e* = Ausguß; *f* = Beschickungsöffnung.

Als Stromverbrauchszahlen der Niederfrequenzöfen für Metalle werden angegeben für

| | | |
|---|---|---|
| Kupfer | 290···330 kWh/t | |
| Neusilber und Messing | 250···350 „ | je nach Zusammensetzung |
| Kupfer-Nickel-Legierungen | 300···400 „ | |
| Bronzen | 380···550 „ | |

Die Werte liegen durchweg unter denen beim Lichtbogenmetallschmelzen, wodurch sich eben der höhere Wärmewirkungsgrad der Induktionsöfen ausdrückt.

**31. Der Hochfrequenzofen** wurde in den Nachkriegsjahren entwickelt. Er hat die bekannten Vorteile des Niederfrequenzofens und ist außerdem infolge der sehr schnellen Schwingungen des elektromagnetischen Feldes in der Lage, auf eine als Spulenwindung nötige Schmelzrinne zu verzichten. Vielmehr kann der metallische Einsatz in einen feuerfesten, nichtleitenden Tiegel bequem eingebracht und bedient werden (Abb. 18).

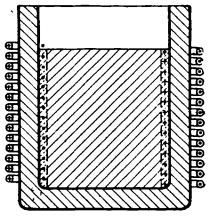
Abb. 48. Wirkungsweise des kernlosen Induktionsofens.

a) Die den Schmelztiegel umgebenden Hochfrequenzwindungen erzeugen ein Wechselfeld, das in den Einsatz allerdings nur bis zu beschränkter Tiefe eindringt, ihn aber in der beeinflußten Ringzone (Abb. 48) mit außerordentlich kräftig wirkenden Heizströmen durchsetzt, von denen die Heizwirkung auf die inneren Teile des Einsatzes übertragen wird. Die sehr hohe Frequenz des magnetisierenden Stromes, die in kleineren und in Laboratoriumsausführungen bis über 100000 Hz steigt, in den industriell verwendeten Öfen aber auf höchstens 20000 Hz beschränkt wird, muß nach anderen Grundsätzen bewertet und rechnerisch berücksichtigt werden als die übliche Niederfrequenz von 50 Hz. Das schnell schwingende elektromagnetische Feld erzeugt eine Strahlung, welche die Außenfläche des Einsatzes trifft und sich dort in einer mehr oder weniger dünnen Schicht (je nach Frequenz, Metallart und Temperatur) in *Joule*sche Wärme umsetzt; in das Innere des Schmelzbades dringt die Strahlung nicht (Hautwirkung, Skineffekt). Trotzdem ist die Durchmischung des Bades auch bei Hochfrequenzöfen sehr gut, denn durch die elektromagnetische Wirkung und die Temperaturunterschiede in den verschiedenen Schichten wird eine starke Bewegung der Flüssigkeit hervorgerufen, und zwar um so mehr, je niedriger

die Frequenz und der spezifische Widerstand des Schmelzgutes ist (Abb. 49). Die Verwendung hochfrequenter Wechselströme schließt die Anwendung von Eisenkernen, die bei den Niederfrequenzöfen zur Ausbildung eines starken magnetischen Feldes nötig sind, aus, da in diesem Falle die Selbstinduktion der erregenden Spule einen praktisch unzulässig kleinen Leistungsfaktor hervorrufen würde. Die Hochfrequenzöfen werden daher auch kernlose Induktionsöfen genannt. Eine andere Bedingung, die der Gebrauch der Hochfrequenzöfen auferlegt, ist die Beschaffung eigener Stromumformungsanlagen, da ja Frequenzen über 50···60 Hz, zumal in einphasiger oder zweiphasiger Schaltung, von den Stromversorgungsunternehmungen nicht geliefert werden. Die Frequenz eines kernlosen Induktionsofens wird nach Größe und Art des Einsatzes oder, was dem entspricht, nach der Anschlußleistung gewählt, dabei können diese Zahlen in weiten Grenzen (500···20000 Hz) schwanken. Im allgemeinen sucht man mit möglichst niederen Frequenzen auszukommen, wenn damit auch die Unruhe in der Badbewegung steigt.

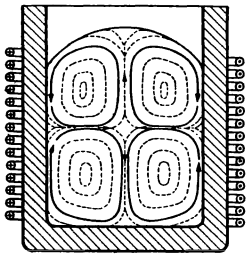

Abb. 49. Badbewegung des kernlosen Induktionsofens.

b) Erzeugt werden die schnellschwingenden Wechselströme —abgesehen von den kleinen Laboratoriumsöfen — ausschließlich durch besondere Generatoren, die durchweg von Elektromotoren normaler Frequenz angetrieben werden; deshalb kann man einen solchen Maschinensatz als Frequenzumformer bezeichnen. Die Umformungsverluste dieses für den Hochfrequenzofen nötigen Zubehörs setzen natürlich seinen Gesamtwirkungsgrad gegenüber dem Niederfrequenzofen erheblich (etwa um 15···20 %) herab. Der Ausfall an Elektrowärmeausnutzung wird aber durch andere wesentliche Vorteile in der Beschaffung der Zustellung und Behandlung der Metalle mehr als wett gemacht. Als weiteres Zubehör wird für den Hochfrequenzofen eine Vorrichtung zur Verbesserung des schlechten Leistungsfaktors benötigt. Da ein Eisenkern, der bei Niederfrequenz die Entwicklung eines starken magnetischen Feldes begünstigt, bei Hochfrequenz nicht angewendet werden kann, muß ein sehr starker Magnetisierungsstrom durch die kernlose Induktionsspule hindurchgeschickt werden. Reine Magnetisierungsströme sind wattlos, d. h. sie haben einen Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0$. Wie wir in Kap. I C sahen, ist es möglich, die phasenverschiebende Wirkung einer magnetisierenden Spule durch die in entgegengesetzter Richtung verschiebende Wirkung eines Kondensators auszugleichen; Selbstinduktion und Kapazität heben sich gegenseitig auf. Solche Kondensatoren bestehen aus Metallbelegen von großer Oberfläche, die durch elektrisch isolierende Schichten voneinander getrennt in Zylinder- oder Plattenform zusammengebaut sind. Der Wechselstrom, der in diesen Belegen der Kondensatoren im Takt der Frequenz zu- und abfließt, ist wie der Magnetisierungsstrom theoretisch wattlos; praktisch sind jedoch gewisse Energieverluste im Kondensator vorhanden. Sie bringen eine Erwärmung mit sich, die durch Luft- oder Wasserkühlung wieder abgeführt werden muß. Die zum Betrieb einer Hochfrequenzofenanlage nötige Kondensatoreneinrichtung bis zu vielen tausend kVA Anschlußwert ist daher technisch und wirtschaftlich bedeutsam. Die zur Verbesserung des Leistungsfaktors (von 0,1···0,9) benutzten, nach der Ofengröße zu bemessenden Kondensatoren können zur Regelung stufenweise nach Bedarf in Reihe oder nebeneinandergeschaltet werden. Sie sollen zur Verringerung der Stromverluste möglichst dicht am Ofen aufgestellt werden.

c) Die Hauptbestandteile des Hochfrequenzofens selbst sind Induktionsspule und Tiegel. Spulen, die von hochfrequenten Wechselströmen durchflossen

werden, können praktischerweise nicht aus massivem Kupferdraht gewickelt werden, da die bei Hochfrequenz unvermeidbare Erscheinung der Stromverdrängung (Hautwirkung) den Strom doch nur in geringer Tiefenschicht auf der Oberfläche fließen läßt. Man wählt daher als Spulendraht Kupferrohre ovalen oder rechteckigen Querschnittes, die gleichzeitig den großen Vorteil mit sich bringen, daß sie mit durchfließendem Wasser gekühlt werden können. Strom- und damit Wasseranschlüsse solcher Spulen können unterteilt werden. Die Betriebsspannungen für die Spulen liegen etwa zwischen 500···3000 Volt. Abb. 50 zeigt die Induktionsspule eines 6-t-Hochfrequenzofens, sie hat bei einem Innendurchmesser von 1160 mm eine Höhe von 1230 mm und einen Kupferquerschnitt von 60 × 61 mm. Die Bauweise der Spule, die ja gleichzeitig Trägerin des Tiegels ist, macht sie mechanisch und elektrisch fest und widerstandsfähig gegen die Wärmebeanspruchungen. Die sonstigen zum Aufbau des Ofens dienenden Metallteile müssen gegen die Wirkung der Hochfrequenzstrahlung natürlich gut abgeschirmt sein.

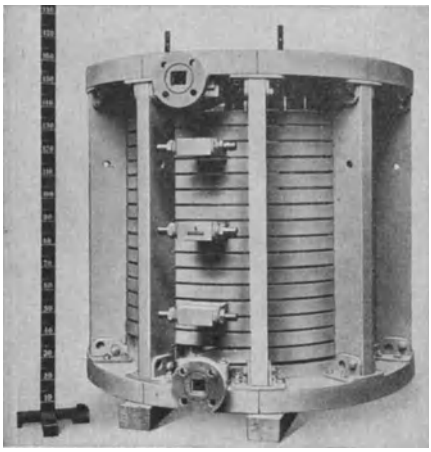

Abb. 50. Spule eines 6 t-Hochfrequenzofens (*SSW.*).

Die Schmelztiegel der Hochfrequenzöfen sind entweder fertiggeformt in die Spule einzusetzen oder sie werden, wie das bei mittleren und größeren Öfen bevorzugt wird, innerhalb der Spule aufgebaut und ihre Zustellung aufgestampft, wobei ein Bodenstein Spule und Tiegel trägt. Als Baustoffe kommen Dolomit, Magnesit, Ton, Kalk, Klebesand u. ä. in Frage. Die Tiegel der Hochfrequenzöfen die nach verschiedenen Verfahren gestampft, gebrannt und gehärtet werden (z. B. im sog. Frittverfahren), halten etwa 50···100 Schmelzungen aus, wenn auch in gewissen Fällen durch die Badbewegung starke Schlackenangriffe gegen die Tiegelwandungen ausgeübt werden, die durch besondere Maßnahmen bekämpft werden müssen. Alles in allem ist aber die Herstellung und Bedienung der Hochfrequenztiegel einfacher, zeitsparender und damit wirtschaftlicher als bei den anderen Schmelzöfen, so daß sich der kernlose Induktionsofen weitere Anwendungsgebiete über die Verarbeitung von Stahl, Kupfer und Nickel hinaus erobert, so z. B. Leichtmetall, Wolframkarbid usw.

An Stromverbrauchszahlen für die Erschmelzung von Edelstählen mittels des Hochfrequenzverfahrens werden angeführt:

vom kalten Einsatz bis zum Schmelzen . . . . . 550···650 kWh/t
für das Feinen bis zum Enderzeugnis . . . . . 200···250 kWh/t
hierbei gelten Einsätze von 250···500 kg bei Schmelzungsdauern von 70···110 min.

Bei größeren Einsätzen geht der Verbrauch für das Fertigerzeugnis auf 600 bis 700 kWh/t herunter bei Schmelzdauern von 2···4 Stunden.

Trotz der großen Vorteile der Hochfrequenzinduktionsöfen ist es wünschenswert, gewisse Nachteile wie die ungewöhnliche Stromversorgung (einphasige Hochfrequenz) und die für die Schlackenarbeit ungünstige Badabmessung (kleine Oberfläche, große Tiefe) und die damit zusammenhängende starke Abnutzung der Tiegel zu umgehen. Diese Bestrebungen führten zur Entwicklung eines an das übliche Dreh-

stromnetz anzuschließenden Drehfeldwirbelstromofens mit großer Badoberfläche. Da die Entwicklung noch im Gange ist, möge hier diese Andeutung genügen.

**32. Widerstandsschmelzöfen** sind entsprechend der beschränkten Temperatur, die man mit metallischen Heizleitern erzeugen kann, auch in der Verwendung eingeengter als Lichtbogen- oder Induktionsöfen. Praktisch werden sie nur für Metalle mit einem Schmelzpunkt bis zu etwa 800° C angewendet. Auch die keramischen Heizleiter Silit und Globar lassen keine höheren Schmelztemperaturen zu. Graphit kann allerdings in der Form von Tiegeln, Röhren oder Stäben, die unmittelbar vom Strom durchflossen werden, viel höhere Temperaturen (2500° C) ertragen, so daß er für alle schmelzbaren Metalle verwendbar ist. Einen Kohlenstabofen in Trommelform mit gekühlten Stromanschlüssen zeigt im Schema Abb. 51. Durchweg kommt aber für die Schmelzöfen die Widerstandserhitzung mit metallischen Heizkörpern in der mittelbaren Form vor, d. h. der zu schmelzende Einsatz wird selbst nicht vom Strom durchflossen; für diese mittelbare Erhitzung gibt es zwei Ausführungsarten, den Tiegelofen und den Herdofen.

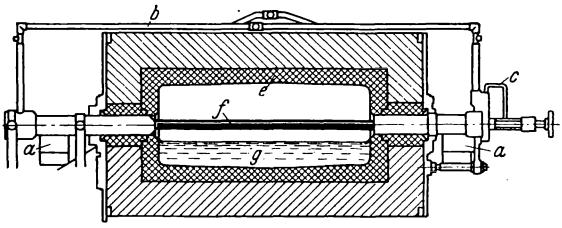


Abb. 51. Kohlenstabschmelzofen im Schnitt (*Junker*). *a* = Stromzuführung; *b* = Kühlwasserleitung; *c* = Griff zum Herausziehen des Kohlenstabes; *e* = feuerfeste Auskleidung; *f* = Graphitstab; *g* = Schmelzbad.

a) Der Tiegelofen wird meist für kleinere Einsätze benutzt, sein Tiegel besteht je nach Art und Schmelzpunkt des zu verarbeitenden Metalls aus Eisen oder einem keramischen Stoff, meistens Graphit. Die Heizleiter sind seitlich um die Tiegelwandung herumgelegt. Der Ausguß ist so angebracht, daß der Gießstrahl beim Kippen des Tiegels eine bestimmte Lage im Raum beibehält, was beim Gießen bequem ist und Metallverluste vermeidet. Abb. 52 zeigt im Querschnitt einen Graphittiegelofen mit auswechselbaren Heizwiderständen. Für den Fall, daß der Tiegel zerbricht, ist eine Ablauföffnung für das flüssige Metall vorgesehen, so daß die Heizkörper nicht beschädigt bzw. kurzgeschlossen werden können. Der Ofen hat bei einem Fassungsvermögen von 50 kg Aluminium einen Anschlußwert von 25 kW, stündlich können mit ihm 25 kg mit einem Stromverbrauch von 700 kWh/t geschmolzen werden. Die äußere Ansicht solcher Tiegelschmelzöfen vermittelt Abb. 53. Es handelt sich hier um einen Widerstandsofen mit eisernem Tiegel für Schmelztemperaturen unter 600° C, also für Lager- und Weißmetall, Blei, Zinn u. ä. mit 42 kW Anschlußwert. Gekippt wird er durch Motorenantrieb. Der Tiegelofen ist wegen seiner Handlichkeit und einfachen Bedienung beliebt für Metallgießereien, Druckereibetriebe und Unterhaltungswerkstätten.

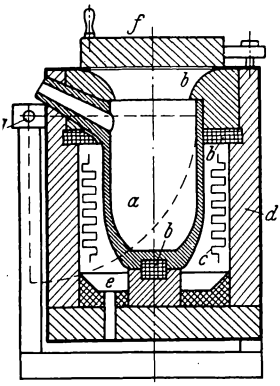


Abb. 52. Schmelztiegel-Widerstandsofen. *a* = Schmelztiegel; *b* = Haltesteine; *c* = Heizleiter; *d* = Wärmeschutz; *e* = Wanne und Abfluß beim Undichtwerden; *f* = Beschickungsöffnung; *g* = Kippachse.

b) Der Herdofen in der Form der Badbeheizung durch Widerstandselemente, die an der Herddecke angebracht sind und das Schmelzgut von oben durch Strahlung erhitzen (Abb. 54), hat für die Leichtmetallverarbeitung, besonders für das in unserer sparsamen Metallbewirtschaftung so wichtige Aluminium und Magnesium und ihre Legierungen, eine große Bedeutung erlangt, sofern die Einsatzmengen die Leistungsfähigkeit des Tiegelofens überschreiten, also von 500 bis

1000 kg aufwärts. Da Aluminium im flüssigen Zustand gern wasserstoffhaltige Gase aufnimmt, die beim Erstarren unter Blasenbildung wieder ausgeschieden werden, so kommt eine sehr reine Ofenluft für dies Metall in Frage. Die Temperatur muß in engen Grenzen genau eingehalten werden, damit nach unten die beste Gießwärme nicht unterschritten, nach oben aber die eben erwähnte Gasaufnahme nicht gesteigert wird. Diesen Bedingungen entspricht ausgezeichnet der Herdofen mit gemauerter Wanne, gut abdichtbaren Beschikkungs- und Ausgußöffnungen und Deckenbeheizung, der wie die meisten Widerstandsöfen mit einer genau arbeitenden selbsttätigen Temperaturregelung versehen ist. Die Öfen können feststehend oder kippbar eingerichtet werden. Abb. 55 zeigt die Ansicht eines großen kippbaren Herdschmelzofens für Aluminiumlegierungen mit einem Fassungsvermögen von etwa 2500 kg. Der Stromverbrauch liegt beim Einschmelzen von Aluminiumlegierungen aus Rohmasseln und Schrott etwa bei 600 kWh/t. Bei stark verschmutztem Einsatz muß das Einschmelzen unter einer Salzdecke erfolgen, die leichtflüssig der Reinigung des Metalles dient. Übrigens muß ein solches Reinigungssalz nicht nur als Schutzdecke, sondern auch als Durchrührmittel bei Magnesium (Elektron) immer verwendet werden. Dies Metall wird am besten in kleineren eisernen Tiegelöfen verarbeitet bei einem Stromverbrauch von rund

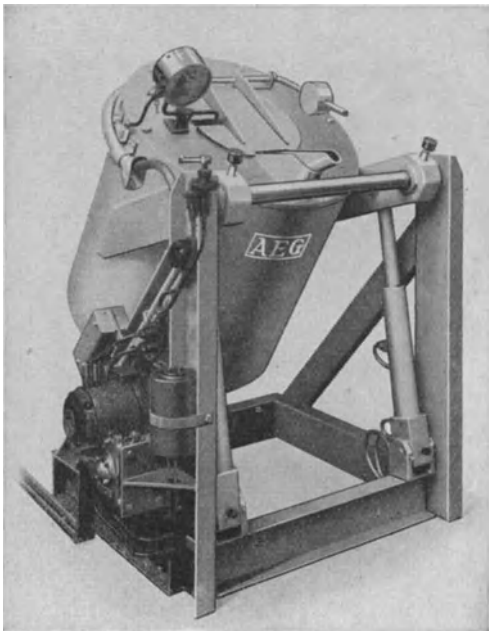


Abb. 53. Widerstandsschmelzofen mit Kippvorrichtung (*AEG.*).

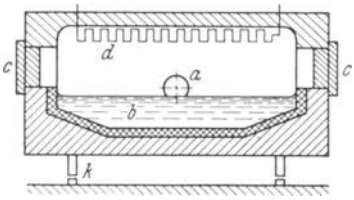


Abb. 54. Herdofen im Schnitt. $a$ = Ausgußöffnung; $b$ = Schmelzbad; $c$ = Beschickungstüren; $d$ = Deckenheizung; $k$ = Kippvorrichtung.

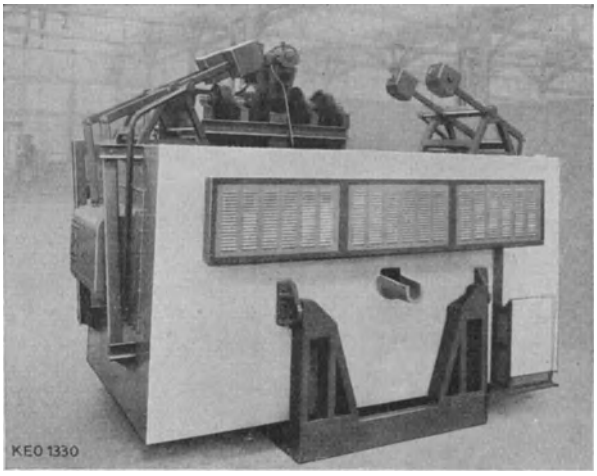


Abb. 55. Elektrischer Herdschmelzofen (2,5 t Inhalt) für Aluminiumlegierungen (*Junker*).

800 kWh/t. Die Gießtemperaturen der Leichtmetallegierungen liegen zwischen 700 und 800° C.

c) Weitere Widerstandsschmelzöfen für Metalle kommen in Sonderausführungen in Frage, z. B. um in größeren Wannen flüssige Zinn- und Zinkbäder zu erhalten, die zum Überziehen von Rohren, Stangen und Drähten (vgl. Abb. 25) mit diesen Metallen dienen. Die Rohre werden dabei absatzweise getaucht, während Drähte in ununterbrochenem Lauf durch das Bad gezogen werden. Solche Öfen müssen bei großen Leistungen die Temperaturen, die nach Art des Metalles und des Betriebsvorganges zwischen 300 und 500° C liegen, sehr genau innehalten; das geschieht selbsttätig. Blei wird in Widerstandsöfen besonderer Bauart geschmolzen, z. B. für Bleipressen und für Bleibäder zum Glühen von Werkzeugstählen. Die Wannen und Tiegel für solche Blei-, Zink- und Zinnschmelzbäder bestehen aus Eisen und werden durch seitlich oder unter ihnen angebrachte Widerstandskörper beheizt.

## B. Glühöfen.

**33. Allgemeiner Überblick.** Wohl die mannigfaltigste Anwendung der Elektrowärme weisen die Glühöfen auf, was schon die Vielheit ihrer Bauarten bezeugt. In der Eisen- und Metallindustrie haben sie wohl ihr ausgedehntestes Verwendungsgebiet. Für folgende Gruppen der Metallbearbeitung kommen sie besonders in Frage:

Anwärmen und Warmhalten für nachfolgendes Schmieden, Walzen, Pressen, Ziehen;

Glühen zum Härten, Anlassen, Vergüten, Zementieren, Tempern, Altern;

Glühen zum Enthärten, Weichmachen, Entspannen,

Blankglühen;

Emaillieren und Trocknen.

Ihre Entwicklung hat nach dem Kriege erst Fortschritte gemacht, und besonders im letzten Jahrzehnt haben sie sich außerordentlich ausgebreitet, nachdem man das Vorurteil der zu hohen Kosten für die Elektrowärme durch die guten Erfahrungen mit den Vorteilen der elektrischen Glühöfen überwunden hatte. Besonders muß hervorgehoben werden, daß man mit der Elektrowärme die nötige Temperatur mit den geringsten Verlusten und unmittelbar am Werkstück erzeugen kann, daß man sie gleichmäßig und genau regelbar auf den Einsatz wirken lassen kann. Bei unseren hochwertigen Stählen und Metallen ist das genaue Innehalten der vorgeschriebenen Temperaturen von großer Bedeutung. Ferner ist es leicht möglich — ebenfalls wichtig für die Güteerhaltung des Einsatzes —, eine reine oder eine bestimmt zusammengesetzte Ofenatmosphäre (Schutzgas) aufrechtzuerhalten. Abbrand, Verzundern und Verglühen wird damit gering gehalten. Die Bedienung der Elektroöfen ist sauber und einfach, es sind keine festen oder flüssigen Brennstoffe vorhanden, Schmutz, Schlacke, Rauch und Abgase entfallen gänzlich. Der Platzbedarf ist gering, da Verbrennungsanlagen mit ihren Vorratsräumen für Brennstoffe nicht benötigt werden. Einfachheit, Bequemlichkeit und Sauberkeit des Betriebes erhöhen die Freude am Werk und dürfen heutzutage eine besondere Wertschätzung beanspruchen. Daß Elektroglühöfen leicht instand zu setzen und zu erhalten sind, erhöht ihre Wirtschaftlichkeit (Kap. V).

Wegen aller dieser Vorteile vermehrt sich der industrielle Elektroglühofen sehr schnell (es mögen z. Z. Öfen mit weit über einer Million kW Anschlußwert in Deutschland vorhanden sein). Im Zuge des Vierjahreplanes bevorzugt die Entwicklung Öfen für die Bearbeitung der heimischen Leichtmetalle und Öfen für mechanisierten selbsttätigen Betrieb, um Handarbeit und Wärme weiter einzusparen. Verwendungszweck und Bauart sind nicht geeignet, bei den Glühöfen

eine klare Ordnung zu schaffen (vgl. Abschn. 18 u. 19), da manche Ofenart verschiedene Verwendungen zuläßt und mancher Verwendungszweck, z. B. Weichglühen, in verschiedenen Ofenarten erreicht werden kann. Es empfiehlt sich vielmehr unter dem Gesichtswinkel des Werkstattbetriebes, die verschiedenen Öfen nach ihrer Betriebsweise zu betrachten, und zwar einmal als Öfen mit stehendem (ruhigem) Einsatz und zweitens mit durchlaufendem (wanderndem) Gut; bei beiden Ofenarten wird dabei zusätzlich die Betrachtung auf den Zustand der Ofenatmosphäre auszudehnen sein, ob sie stehend oder ziehend (bewegte Umluft) und ob sie aus gewöhnlicher Luft oder einem besonders zugeführten Schutzgas besteht. Zum Schluß werden die Salzbadöfen behandelt. Selbstverständlich wird bei dieser Anordnung, die mehr die Geräteseite berücksichtigt, der Verwendungszweck nicht vernachlässigt werden. Wenn es auch unmöglich ist, Glühöfen nach ihrer Größe einzuteilen (es gibt Glühofenanlagen bis 2500 kW Anschlußwert und 70 m Länge), so sollen doch hier innerhalb der Abschnitte zuerst die kleineren, dann die größeren Ausführungen behandelt werden.

**34. Glühöfen für stehenden Einsatz.** a) Die handlichste, viel verwendbare Form ist die des Muffel- oder Kammerofens, von der Abb. 56 eine grundsätzliche Anordnung wiedergibt. Der Glühraum ist im Längs- und Querschnitt meist rechteckig und bietet bei den kleineren Muffelöfen etwa Inhalte von 300···500 Litern, bei den größeren Kammeröfen bis zu einigen Kubikmetern. Bei den kleineren und mittleren Öfen werden oft mehrere Glühräume in einem Ofen vereinigt, etwa zwei übereinandergelegene oder noch mehr nebeneinandergelagerte, damit Vorwärmen und Hauptglühen oder mehrere gleichartige Glühvorgänge gleichzeitig vorgenommen werden können. Der Glühraum wird durch eine Tür abgeschlossen, die zum Heben oder zum Drehen um die Ober- oder Unterkante eingerichtet ist, auch Doppeltüren zum Heben oder Schieben werden angewendet. Für Temperaturen von 500···1100° C werden metallische Heizträger verwendet, die entweder in die Muffeln eingebettet sind oder aber als aufgehängte Drahtwendeln oder freistehende Felgen eingebaut werden. Die Heizträger werden in Decke und Seitenwände eingebaut, bei größeren Heizleistungen auch in die Rückwand und sogar in die Tür. Bei Glühtemperaturen bis zu 1350° C ist man auf keramische Heizkörper (Silit- oder Globarstäbe) angewiesen. Die Heizung wird entweder feinstufig oder grobstufig, von Hand oder selbsttätig geregelt. Es kommen alle Stromarten und Spannungen bis zu 500 Volt in Frage bei Anschlußleistungen von einigen wenigen bis zu 200 und 300 kW. Der Leerwert (Abschn. 21) sinkt dabei von etwa 30 % bei kleinen Öfen auf 8 % bei großen. Als Beispiel zeigt Abb. 57 einen Doppelkammer-Härteofen (950 bzw. 1350° C) mit bequemen Schiebetüren und elektrischem Temperaturregler. Diese Öfen haben bei 72 l Kammerinhalt einen Anschlußwert von 20 bzw. 40 kW. Die Verwendung der Muffel- und Kammeröfen in der Metallindustrie erstreckt sich auf das Glühen, Härten, Anlassen, Vergüten von Werkzeugen aller Art, Nadeln, Federn, kleinen Maschinenteilen, Kugeln und Kugellagern, Wärmen von Schmiedeteilen und Walzgut, Emaillieren, Einbrennen von Farben usw. Zur Erleichterung der Beschickung und Entleerung haben einige Muffel- und Kammeröfen einfache mecha-

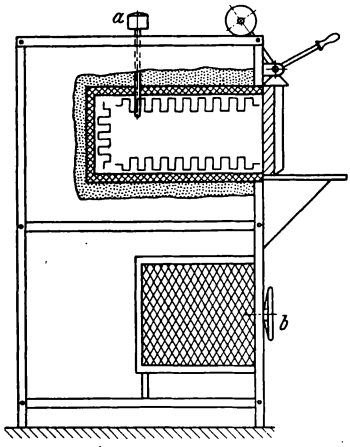

Abb. 56. Kammerofen, Schema.
a = Wärmemesser; b = Wärmeregler.

nische Vorrichtungen erhalten. Bei Emaillieröfen werden stets Beschickungsmaschinen verwendet, weil der meist kleinstückige Einsatz vorher kunstgerecht aufgebaut sein muß. Zum Emaillieren eignet sich ein größerer Kammerofen (2,5···4 m³ Inhalt) sehr gut, da er bequem allseitige Heizung zuläßt, hier kommt es besonders auf die Bodenhitze an. Temperaturen werden, je nachdem Gußeisen oder Stahl zu verarbeiten ist, zwischen 680 und 850° C benötigt. Das Brenngut liegt im Ofen auf einem Rost, der entweder dauernd darin bleibt oder von Beschickung zu Beschickung gewechselt wird. Wegen der Wärmewirtschaftlichkeit wird der Dauerrost bevorzugt, da ohnehin beim Emaillieren die Wärmeverluste schon groß genug sind (etwa 40 %). Übliche Ofengrößen setzen etwa 300···700 kg Emailliergut in der Stunde bei 125···220 kW Leistungsaufnahme durch, wobei 10···20 Beschickungen (Schübe) erfolgen.

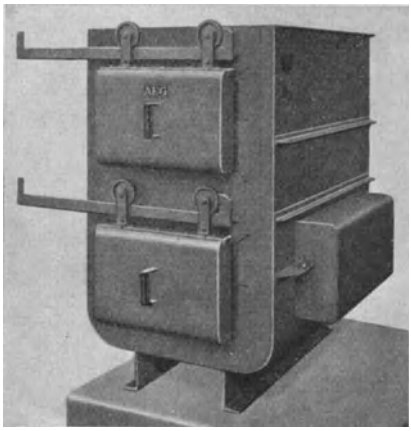

Abb. 57.
Doppelkammerhärteofen, 20 u. 40 kW (*AEG.*).

b) Werden die Kammeröfen noch größer, besonders länger, weil das Glühgut, Stabstahl, Röhren, Langbleche u. ä. es verlangt, so nennt man sie auch wohl Tunnelöfen oder, weil in diesem Fall der schwere Einsatz nicht mehr in den Ofen hineingelegt werden kann, sondern auf Wagen hineingefahren werden muß, Wagenöfen (vgl. Abb. 26). Solch ein Wagen bildet dann gleichzeitig den Boden des Ofens und ist in vielen Fällen selbst mit elektrischer Heizung versehen. In Abb. 58 sehen wir einen Wagenofen von 2,6 m Tiefe; er dient zum Glühen (950° C) von großen Werkstücken. Einschließlich des beheizten Beschickungswagens beträgt der Anschlußwert 200 kW. Dieser Ofen kann auch mit Luftumwälzung bei 500° C betrieben werden. Auch zum Wiederabkühlen der geglühten Stähle werden solche Tunnel- oder Wagenöfen benutzt, sie sind dann bei entsprechender Länge durch Wärmeisoliertüren in verschiedene Abteilungen unterteilt, so daß der Einsatz auf demselben Wagen nacheinander angewärmt, geglüht und abgekühlt werden kann; die Wagenkette rückt absatzweise durch den Ofen, wobei immer ein draußen befindlicher Wagen wieder neu beladen wird. Bei der Verarbeitung von langen Stangen, Rohren u. dgl. (bis zu 10 m Länge) werden ebenfalls Wagen zum Einsatz verwendet, bei Metallen (Kupfer, Messing, Aluminium) benutzt man auch Einsatzgestelle, die in den Ofen hineingeschoben werden. Bei dem Hantieren mit diesem Einsatz, derge-

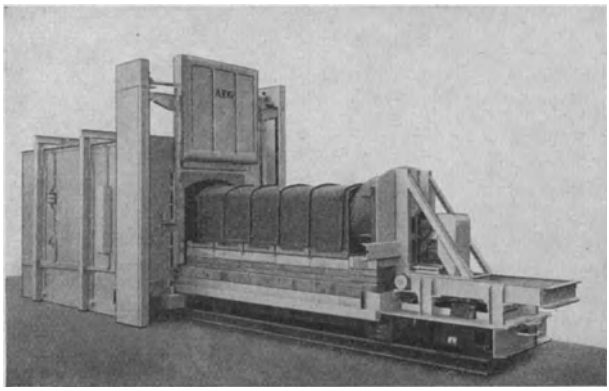

Abb. 58. Wagenglühofen 200 kW (*AEG.*).

wendet und gezogen werden muß, ist Vorsorge zu treffen, daß die offenliegenden, Spannung führenden Heizleiter nicht berührt werden können. In langen Kammeröfen sind die Heizdrähte in Gruppen unterteilt, damit man die einzelnen Zonen entweder auf gleichmäßige oder verschiedene Temperaturen einstellen kann.

c) Das Bestreben, die Wärme besser zu übertragen und gleichmäßiger zu verteilen, hat in den letzten Jahren immer mehr zur Entwickelung der sog. Umluftöfen geführt. Da die Wärme bei niederen Glühtemperaturen (300···500° C) durch Strahlung und natürliche Luftbewegung nicht sehr wirtschaftlich übertragen und das Glühgut in langen Öfen und bei ungünstig geschichtetem Einsatz nicht genügend gleichmäßig erwärmt wird, so wälzt man zur besseren Wärmeleitung (Konvektion) die Luft des Glühraumes künstlich um. Zu diesem Zweck entzieht man das Glühgut der unmittelbaren Strahlung der Heizträger und bringt diese in Kanälen oder Schlitzen an, durch welche von einem Fliehkraftlüfter ein kräftiger Luftstrom bewegt wird, der dann entsprechend hoch erhitzt in passenden Austrittsöffnungen auf das Glühgut trifft und es wärmeabgebend umwirbelt. Dies Luftumwälzverfahren kann bei allen Ofenarten und für alle Metalle verwendet werden, es kann auch Schutzgas umgewälzt werden. Außer der gleichmäßigeren Wärmeübertragung (unter Umständen nur $^1/_2$ % Temperaturunterschied im Glühraum) und der damit zusammenhängenden Wärme- und Zeitersparnis ist auch besonders der metallurgische Einfluß, zumal bei Leichtmetallen, günstiger. Wo Umluft bei den verschiedenen Ofenarten in Frage kommt, wird an der betreffenden Stelle erwähnt werden; hier zeigen wir zunächst für die besprochene Bauart der Kammeröfen in Abb. 59 eine Umwälzeinrichtung. Der gut wärmegeschützte Lüfter liegt an der Hinterwand des Glühraumes und treibt die Luft durch blechabgedeckte Kanäle, in denen freiliegende Heizwendeln angebracht sind, so daß sie von der Türseite das Einsatzgut beaufschlagt. Da die Ofenwandung aus Blech besteht wie auch die Luftkanäle, so kann für die Wärmedämmung hochwertiges Isolierpulver benutzt werden. Auch für lange Tunnelöfen wird Luftumwälzung angewendet.

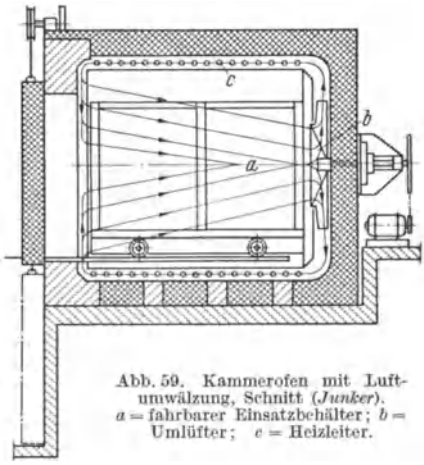

Abb. 59. Kammerofen mit Luftumwälzung, Schnitt (*Junker*). *a* = fahrbarer Einsatzbehälter; *b* = Umlüfter; *c* = Heizleiter.

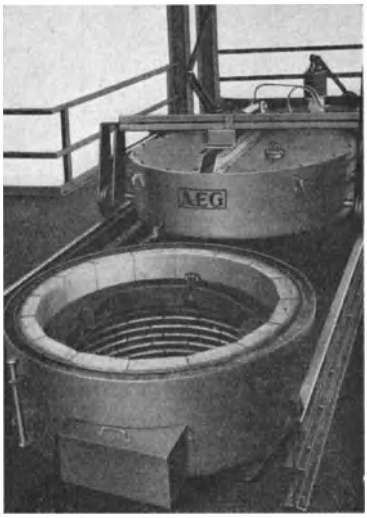

Abb. 60. Versenkter Schacht- (Tief-) Ofen (*AEG.*).

d) Schacht- und Muldenöfen sind eine weitere vielbenutzte Form der Glühöfen. Kennzeichnend für sie ist die oben liegende Beschickungsöffnung. Die Hauptachse des Glühraums liegt bei den meist zylindrischen Schachtöfen senkrecht, bei den meist rechteckigen Muldenöfen waagerecht. Schacht- und Muldenöfen kommen in allen Abmessungen vor, langgestreckt für Stangen, Wellen, Rohre,

tiegelförmig für kleinstückige Teile, Werkzeuge, Maschinenteile, Band- und Drahtringe usw. Alle Temperaturen, Metallarten und Behandlungsweisen können in diesen Ofenarten zur Geltung kommen. Große Schachtöfen zum Vergüten von langen Wellen und Rohren werden zur bequemeren Bedienung in die Erde eingebaut, ähnlich wie der Ofen Abb. 60, der 8 m tief ist und für eine Höchsttemperatur von 950° C 500 kW Leistung aufnimmt. Einen freistehenden Doppelschachtofen mit angebauter Schaltanlage zeigt Abb. 61: Kleinere Schachtöfen kommen in Doppelanordnung manchmal auch kippbar zur Ausführung. Schacht- und Muldenöfen werden ebenso wie andere Öfen mit Schutzgas ausgeführt, wenn die Behandlung des Glühgutes eine vollkommen sauerstoffreie Ofenatmosphäre verlangt. Solche Schutzgase sind meist Kohlenwasserstoffe wie Leuchtgas, Koksgas, Naturgas; auch Stickstoff und Wasserstoff und in geeigneten Fällen sogar Wasserdampf wird zur Verhütung des Verzunderns und Oxydierens verwendet. Selbstverständlich entstehen durch die Bereitstellung dieser Gase Kosten, die aber durch die höhere Güte des fertigen Glüherzeugnisses wieder einkommen. Das Schutzgasverfahren kann wie Umluft durchweg bei allen Ofenarten angewendet werden; selbstverständlich muß der Ofen gasdicht gebaut sein. Abb. 62 läßt eine solche Anordnung im Querschnitt eines 50-kW-Muldenofens erkennen. Der wassergekühlte Deckel ist durch eine Öltasse gasdicht aufgesetzt. Eine andere Art, im Schachtofen zunderfrei weich- und blankzuglühen (Eisen- und Metalldrähte und Bänder), ist die Einbettung in fest verschlossene Glühtöpfe, die in die Öfen hineingestellt werden, sie findet in verschiedenen Systemen Anwendung. Sehr große Muldenöfen bedürfen natürlich zur Handhabung ihrer Deckel besonderer mechanischer Einrichtungen.

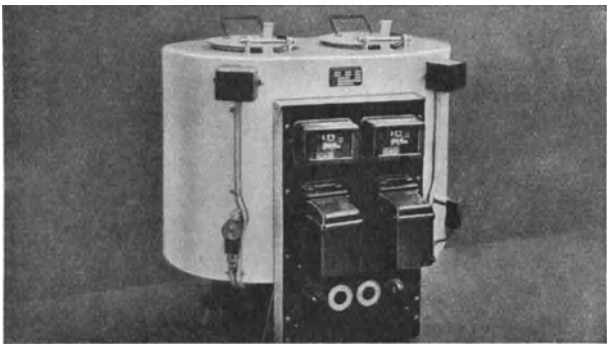

Abb. 61. Doppelschachtofen (*Junker*).

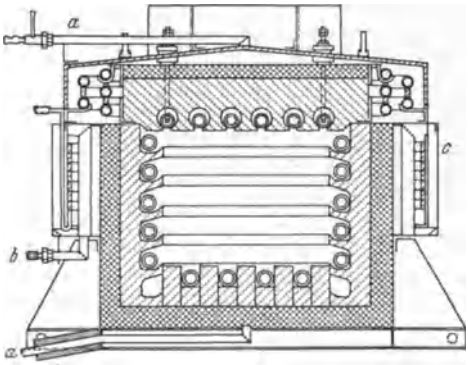


Abb. 62. Schutzgas-Muldenofen (*SSW.*).
*a* = Gasanschluß; *b* = Kühlwasseranschluß; *c* = Öltasse.

e) Hauben- oder Glockenöfen sind am Platze, wenn der Glüheinsatz aus bestimmten Gründen nicht in den Ofen hineingebracht werden kann. Der Einsatz wird hier auf einer Unterlage oder einem Traggestell fertig aufgeschichtet und dann die Glocke oder Haube darübergestülpt. Entweder kann der Untersatz oder die Haube oder beides mit Heizträgern versehen sein. In der Schnittzeichnung Abb. 63 erkennt man den heizbaren Untersatz mit dem Blechstapel, der geglüht werden soll, und die aufgesetzte Ofenhaube. Bei einer anderen sinnreichen Anwendung des Haubenofens (Abb. 64) stülpt man zwar nicht die Haube über das

Glühgut (Kupferbänder und -drähte), sondern hebt dieses in den Ofen und senkt es von da in ein Wasserbad. Kupfer kann in Wasserdampf blankgeglüht und im Wasserbad ohne Erhärtung gekühlt werden. Der Vorgang bei diesem Glühverfahren ist folgender: Der Einsatz wird auf einem an einer Winde hängenden Gestell fertig gemacht und ins Wasserbad gesenkt; dann wird die Ofenhaube darübergefahren und das Gestell hineingezogen. Auf diese Weise herrscht in der heißen Haube eine Wasserdampfatmosphäre. Nach dem Fertigglühen wird der Einsatzkorb mit dem Gut zum Abkühlen ins Wasser gesenkt und die Ofenhaube über einen neuen Draht- oder Bandstapel verfahren. Auch noch in anderen Formen und für schwereres Glühgut (Stahlblöcke, Radreifen u. ä.) kommen Hauben- und Glockenöfen vor.

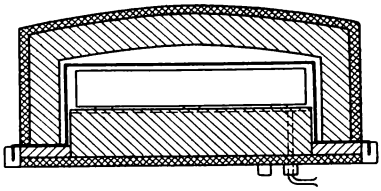

Abb. 63. Haubenofen für flaches Glühgut, Schnitt (*Junker*).

Es muß mit diesen wenigen Beispielen für Glühöfen mit stehendem Einsatz sein Bewenden haben; den anregenden Bau- und Betriebsarten dieser großen Ofengruppe weiter nachzugehen, verbietet der beschränkte Umfang dieses Büchleins.

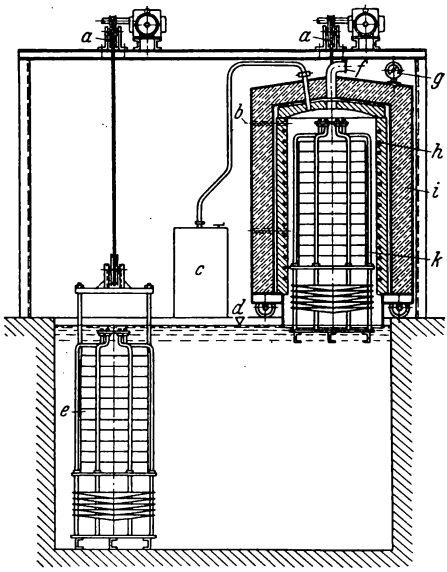


Abb. 64. Haubenofen mit Taucheinsatz (*SSW.*).
*a* = Hebewerk für Einsatzkorb; *b* = Thermometereinführung; *c* = Dampferzeuger; *d* = Oberfläche des Tauchbades; *e* = Einsatzkorb mit Glühgut im Tauchbad; *f* = Sicherheitsklappe; *g* = Druckmesser; *h* = Heizleiter; *i* = fahrbarer Haubenofen; *k* = Einsatzkorb mit Glühgut im Glühraum.

**35. Glühöfen für durchlaufenden Einsatz.** Allgemein sind Durchlauföfen alle Elektrowärmegeräte, bei denen das Glühgut den Glühraum durchwandert: in stetig gleichmäßiger oder ruckweiser Bewegung, auf waagerechtem, senkrechtem oder geneigtem Wege, durch Schwerkraft oder motorisch bewegt, in einer Richtung geradeaus oder zusätzlich in Umkehrrichtung, mit oder ohne Schutzgas und Luftumwälzung, im Gleichstrom- oder Gegenstromverfahren. Bedenkt man dabei, daß sich alle diese Möglichkeiten für mehrere Ofenarten ergeben, so erkennt man wieder die große Mannigfaltigkeit auch auf dem Gebiete der Durchlauföfen. Die Mechanisierung des im Glühraum wandernden Einsatzes und damit die Ermöglichung eines ununterbrochenen Ofenbetriebes liegt durchaus im Gedankenkreis der schon seit Jahren in der ganzen Technik angestrebten fließenden Fertigung, hat hier aber neben der Arbeitsersparnis noch die Wirkung einer manchmal verblüffend großen Wärmeersparnis. Eingangs- und Ausgangstüren für stetig wanderndes Glühgut müssen natürlich zur Verminderung der Wärmeverluste entsprechend eingerichtet sein; wird Schutzgas verwendet, so kommen unter Umständen Luftschleusen in Frage.

Die Berechnung der Wärmeleitung von Durchlauföfen wird für einfacher gehalten als die von absatzweise arbeitenden Öfen, weil der Einsatz als gleichartiges Gut in dünner Schicht und gleichbleibender Zeit zu erwärmen ist. Die Luftumwälzung kann bei den Durchlauföfen in hervorragendem Maße zur besseren Wirtschaftlichkeit verwendet werden, wenn sie im Gegenstrom arbeitet, d. h.

wenn die Luft erst die schon hocherwärmten Teile und danach die weniger erwärmten, heranrückenden Teile bestreicht. Wird die Anordnung des Wandergutes so getroffen, daß die erwärmten Teile nach Umkehr ihres Weges den entgegenkommenden ihre Wärme abgeben können, so wird der Aufwand an Elektrowärme durch diese Rückgewinnung wesentlich verringert. Die meisten Durchlauföfen arbeiten allerdings nur in einer Richtung. Folgende Ofenarten sind die wichtigeren:

a) Der Durchziehofen kommt für ununterbrochene Wärmebehandlung von Drähten und Bändern aus Stahl und Metallen zur Anwendung. Früher pflegte man diese Erzeugnisse in Ringen, die in Kästen, Muffeln oder in Schutzgas untergebracht waren, stundenlang der erforderlichen Wärme auszusetzen, ohne dabei immer die Gewähr zu haben, daß das Glühgut überall gleichmäßig von der Hitze durchdrungen war. Eine schnellere und dabei sichere Wärmebehandlung erzielt man, wenn Bänder und Drähte in einem oder mehreren Strängen ausgestreckt durch den langen Glühraum des Durchziehofens gezogen werden. Das Schema eines solchen Ofens zeigt Abb. 65. Das Glühgut kann dabei entweder seiner Warmfestigkeit entsprechend frei durchhängen, oder bei größerer Härte auch durch ein Glührohr oder Formsteine gezogen werden. Für die verschiedenen Metallsorten, Stahl, Nickel, Kupfer, Aluminium, Messing, kommen Glühtemperaturen zwischen 500 und 800° C vor. Gegenüber dem früheren stundenlangen Erhitzen kommen im Durchziehofen nur einige Minuten in Frage, es mußten daher die veränderten Verhältnisse für die innere Gefügeänderung in den Metallen genau untersucht und die Durchzuggeschwindigkeiten mit Wärmestrahlung und -aufnahmefähigkeit in Einklang gebracht werden, bevor man zu günstigen Ergebnissen kam. An den Glühvorgang im Durchziehofen kann sich Abschrecken und Kühlen im Wasser, Öl- oder Bleibad, Anlassen, Beizen, Waschen und Trocknen je nach Bedarf anschließen. Die meist sehr langen Öfen sind wärmetechnisch in mehrere Zonen für Anwärmen, Glühen, natürliches und künstliches Abkühlen unterteilt, etwa für 0···700°, 700···350° und 350···150° C. Durchziehöfen können mit Schutzgas betrieben werden, auch wird in neuzeitlichen Anlagen aus dem geglühten Bandgut die Wärme teilweise wiedergewonnen. Man rechnet für das Glühen von Kupfer- und Messingbändern rund 100 kWh/t, bei Stahl und Aluminium rund 220 kWh/t als rohen Mittelwert. Die Anschlußwerte sind je nach Metallart und Stundendurchsatz sehr verschieden, es gibt Öfen mit mehreren hundert kW Leistungsaufnahme.

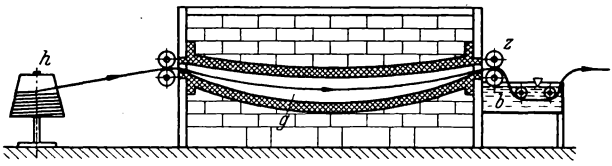

Abb. 65. Drahtdurchziehofen, Schema.
$h$ = Drahthaspel; $g$ = Glühraum; $z$ = Zugvorrichtung; $b$ = Kühlbad.

b) Der Drehherdofen (vgl. Abb. 22) hat eine ringförmige Durchlaufbahn für das Glühgut, er ist daher bequem zu bedienen, da Beschickungs- und Entnahmetür dicht beieinanderliegen, auch nimmt er mit seinem Durchmesser von höchstens 4 m wenig Platz ein. Die Querschnittszeichnung Abb. 66 läßt die Anordnung des ringförmigen Drehtisches, der auf Rollen läuft, erkennen; er ist in seinem Aufbau so bemessen, daß wenig Wärme verlorengeht. Die Beheizung erfolgt in diesem Fall durch seitlich angebrachte *Junker*-Chromnickelfelgen. Bei andern Firmen werden Silitstäbe oder Heizwendeln verwendet. Der Ringherdofen Abb. 67 wird gern zum Anwärmen von Schmiede-, Preß- und Walzteilen, zum Vergüten, Anlassen und Ausglühen beliebiger Metallteile benutzt. Bei Gebrauchstemperaturen zwischen 400 und 1100° C liegen seine Anschlußwerte je nach Durchsatz etwa

zwischen 50 und 200 kW. Angetrieben wird er meist motorisch und ist dabei auf genaue Umlaufzeiten einstellbar, bei kleinen Öfen kann der Drehherd auch absatzweise durch Hand- oder Fußhebel bewegt werden. Auch bei diesen Öfen kann Luftumwälzung und selbsttätige Temperaturregelung angebracht werden.

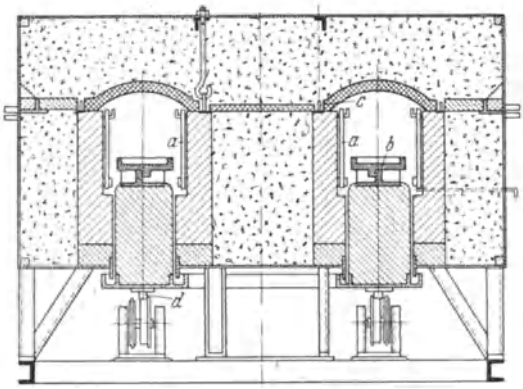


Abb. 66. Drehherdofen, Schnitt (*Junker*).
*a* = Felgenheizkörper; *b* = Tischring; *c* = Gewölbering; *d* = Laufring.

c) Der Rollofen gehört zwar zu den Öfen mit wanderndem Einsatz, die Bewegung wird aber nicht durch eine Maschine, sondern durch die Schwerkraft hervorgerufen, indem die zum Erwärmen eingesetzten Rundblöcke (meist handelt es sich um Metalle) den geneigten Ofenherd langsam herabrollen und so von allen Seiten gleichmäßig erwärmt werden. Zum Abrollen besitzen größere Öfen zwei Herdböden, Abb. 68 zeigt einen solchen sog. Doppelrollofen. Da diese Öfen ziemlich lang sind, werden die Heizwiderstände in mehrere getrennt regelbare Gruppen unterteilt. Um die Wärmeübertragung zu beschleunigen und zu vergleichmäßigen, ist die Luftumwälzung bei dem langen Glühraum gut angebracht, man kann dabei die Umluft längs oder quer zur Raumachse führen. In Abb. 68 ist die Umluft in zwei parallelen Zügen im Gegenstrom zum Glühgut längs der Ofenachse geführt. Die Querlüftung, die baulich schwieriger anzuordnen ist, hat den Vorteil, nach Erfordernis in den Ofenzonen verschiedene Temperaturen aufrechtzuerhalten; übrigens wird die Längslüftung in den bestehenden Bauarten bevorzugt. Rollöfen haben in der letzten Zeit für die Bearbeitung unserer heimischen Leichtmetalle Beachtung gefunden.

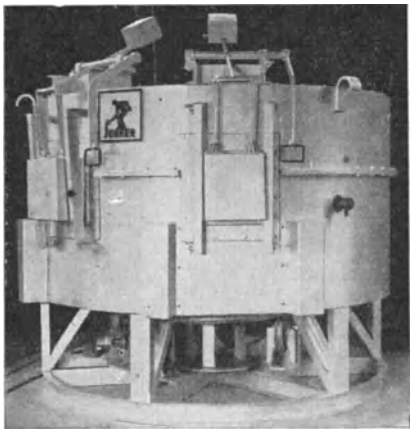

Abb. 67. Drehherdofen, Ansicht (*Junker*).

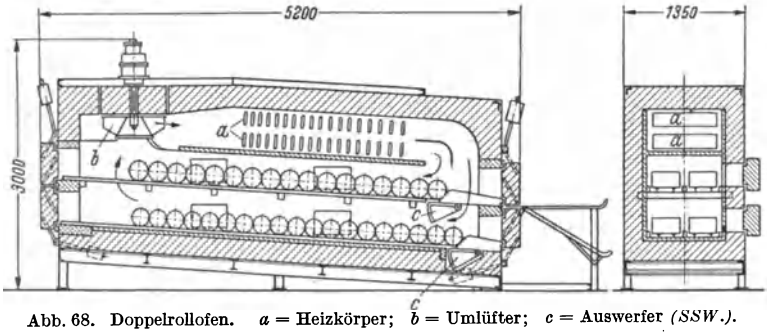


Abb. 68. Doppelrollofen. *a* = Heizkörper; *b* = Umlüfter; *c* = Auswerfer (*SSW.*).

Nicht zu verwechseln mit dem Rollofen ist der Tunnelofen mit Rollbahn, ein Ofen mit mechanisierter Einsatzbewegung. Der Herdboden in dem langgestreckten Glühraum wird hier durch dicht nebeneinandergelagerte, mechanisch angetriebene warmfeste Rollen gebildet, auf denen das Glühgut langsam vorangerollt wird. Auch durch Kettenförderer, die auf dem Herdboden laufen, kann der Einsatz mechanisch durch den Ofen bewegt werden. Es ist natürlich dabei vorauszusetzen, daß an dem Bewegungsteil die Temperaturen nicht höher sind, als die Gelenke und Lager der Rollbahnen und Ketten vertragen können.

d) Die Stoßöfen umgehen diese Beschränkung, indem der ganze Antriebsmechanismus außerhalb des Ofens liegt und nur die sehr robuste Stoßstange mit dem Glühraum in Berührung kommt. Bereits in Abb. 24 war die grundsätzliche Anordnung eines Stoßofens gezeigt worden; in diesem Falle kann der Stoßofen, der mit einem Kettenofen verbunden ist, das hier auf etwa 400···500° C vorgewärmte Gut auf die Endtemperatur von 800···900° C bringen. Die Führung und Regelung der Wärme kann hier sehr wirtschaftlich gestaltet werden, zumal wenn der Betrieb durchgehend ist. Stoßöfen werden für die Warmbehandlung von Eisen, Schwer- und Leichtmetall benutzt, teilweise kann solcher Ofen sogar für mehrere Hitzegrade (etwa 550 und 800° C) benutzt werden, was sich durch Regelung der Heizkörper, vor allem aber durch entsprechende Bemessung der Umluft erreichen läßt. In diesem Falle wird für den langgestreckten Ofenraum die Querbelüftung mit Vorteil angewendet.

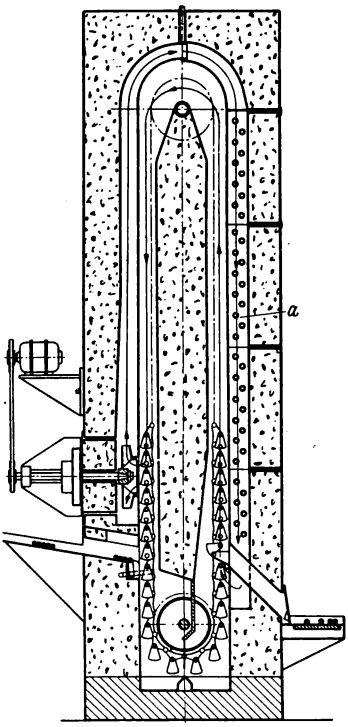

Abb. 69. Paternosterofen, Schnitt (*Junker*). *a* = Heizleiter.

Ähnlichkeit in der mechanischen Anordnung haben die Schüttelöfen mit den Stoßöfen. Hier ist die Herdplatte aus hitzebeständigem Stoffe als Schüttelrinne ausgebildet, in der die kleinstückigen Einsatzteile durch jeweiliges Beschleunigen und starkes Abbremsen nach vorne gestoßen werden. Der Antrieb für diesen ungleichmäßigen Bewegungsvorgang liegt natürlich außerhalb des Ofens. Auch hier ist der Betrieb mit Schutzgas möglich.

Außer den bis hier erwähnten Glühöfen für waagerechten oder schwach geneigten Durchlauf des Einsatzes kommen noch einige andere Formen zur Anwendung, die aufzuzählen zu weit führen würde. Kurz erwähnt sei nur noch der Trommelofen, bei dem eine drehbare Trommel aus warmfestem Stoff( Gußeisen) an ihrer Außenseite durch Widerstandsheizleiter in einem Ofenraum erhitzt wird. Die Trommel ist innen mit schraubenförmigen Führungen versehen, so daß bei langsamer Drehung der aufgegebene kleinstückige Einsatz langsam die Glühzonen durchwandert und am anderen Ende der Trommel herausfällt.

Zum Schluß unserer Betrachtung der Glühöfen für Eisen und Metalle, die Strahlungshitze mit oder ohne Luftumwälzung benutzen, seien zwei neuere Bauformen erwähnt, in denen abweichend von den bisher beschriebenen Durchlauföfen das Glühgut in senkrechter Richtung wandert. Die Hauptabmessung dieser Öfen geht in die Höhe, während ihre Grundfläche wenig Platz in Anspruch nimmt.

e) Der Paternosterofen beruht auf der Einrichtung, daß in zwei benachbarten Ofenschächten eine endlose Becherkette auf und ab bewegt wird (Abb. 69). Dieser Ofen dient zum Anwärmen, Vergüten, Anlassen, Ausglühen von Preßgut, Schmiedestücken, Maschinenteilen u. ä. aus Leicht- und Schwermetall. Die Teile werden (links auf dem Bilde) in die Behälter des Paternosterwerkes gelegt und wandern nun dem heißen Umluftstrom entgegen schachtaufwärts, um dann über den Scheitelpunkt des Ofens zur Abgabeöffnung (rechts) herabzusteigen, dort fallen sie von selbst heraus. Diese Ofenform hat sich aus dem Bestreben der Platzersparnis herausentwickelt, zeigt aber in ihrer Betriebsweise metallurgisch und wärmetechnisch hervorragende Eigenschaften, so daß sie auch deswegen Anwendung findet. Der Paternosterofen ist für Glühtemperaturen von 300···700° C bis zu 100 kW Anschluß und 300 kg Stundendurchsatz gebaut worden.

f) Der von den Siemens-Schuckert-Werken entwickelte Turmofen benutzt ebenfalls die senkrechte Auf- und Abführung des Glühgutes, bei der auf diese Weise eine ausgezeichnete Wiedergewinnung der Wärme aus dem sich abkühlenden Gut (es handelt sich hier um Bandeisen) erzielt wird. Der Turmofen Abb. 70 hat einen sehr hohen, mit neutralem Schutzgas gefüllten Ofenschacht. Das bandförmige Glühgut läuft von unten über Umlenkrollen senkrecht bis zum Heizraum am oberen Schachtende, wobei es von dem auf der anderen Seite niedersteigenden Bandteil bereits vorgewärmt wird; der Wärmeaustausch durch Schutzgasumwälzung ist besonders innig. Das Bandeisen bleibt im Schutzgas vollkommen blank, der Schutzgasaufwand ist gering, da es aus der unvollständigen Verbrennung wohlfeiler Brennstoffe (Leuchtgas u. ä.) gewonnen wird.

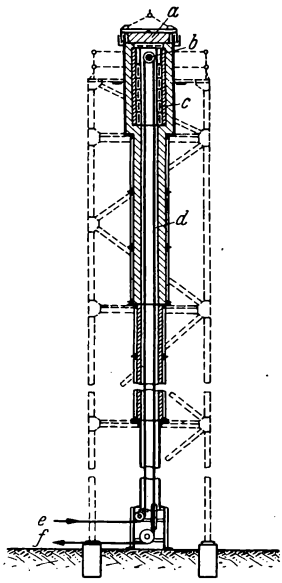

Abb. 70. Turmofen, Schnitt (*SSW.*).
*a* = Deckel; *b* = herausnehmbare Umlenkrolle; *c* = herausziehbare Heizeinrichtung; *d* = Glühgut; *e* = Einlauf; *f* = Auslauf.

Die hohe Wärmewirtschaftlichkeit dieses Ofens erhellt daraus, daß er je t Durchsatz weniger als 100 kWh verbraucht, während der Stromverbrauch bei den besprochenen Glühöfen für Eisen und Stahl je nach Art und Glühtemperatur 180···240 kWh im groben Durchschnitt beträgt.

**36. Schmelzbäder zum Glühen** von Metallen sind schon lange bekannt, es wurden dazu je nach Höhe der zu erreichenden Temperatur Schmelzen von Metallen oder Salzen genommen. Auch die Elektrowärmeverwertung hat sich seit längerem dieses Gebietes angenommen. Wärmetechnisch hat das Glühen im Bade vor der Strahlungserwärmung im Glühraum den Vorteil, daß die erhitzte Flüssigkeit das Glühgut allseitig umspült und die Wärme gleichmäßig abgibt. Allerdings ist man mit den neueren Umluftverfahren der gleichmäßigen Wärmeverteilung ja auch sehr nahe gekommen, so daß die Glühung im Schmelzbad oft mit derjenigen im Glühofen unter Luftumwälzung in Wettbewerb treten wird. Die elektrische Erwärmung metallischer Bäder (etwa Blei) ist unter dem Abschnitt „Schmelzöfen" bereits behandelt. Der hier angewendeten Beheizung von eisernen Tiegeln und Wannen durch außenliegende Widerstandsheizkörper stehen die Salzbäder wenigstens für höhere Temperaturen in ihrer Beheizung völlig andersartig gegenüber. Elektrisch werden nämlich alle Salzbäder über 1000° C von innen beheizt, was ihnen auch hinsichtlich der Haltbarkeit der Wannen und Tiegel einen Vorzug vor der Koks-, Gas- oder Ölfeuerung gibt. Die bekanntere Innenheizung der Glüh-

salze (es sind Chlor-, Zyan- und Stickstoffverbindungen der Metalle Barium, Kalium, Natrium oder Kalzium) besteht darin, daß man durch das Salz unmittelbar einen Strom leitet, der sich an seinem hohen Leitwiderstand in Wärme umsetzt. Allerdings leiten diese Salze als Leiter zweiter Klasse erst im erwärmten Zustande, so daß vorher mindestens ein Teil des Bades durch eine Hilfsvorrichtung erwärmt sein muß. Dann genügen allerdings für die Aufrechterhaltung des flüssigen Zustandes (die Schmelzpunkte liegen zwischen 500 und 1000° C) verhältnismäßig geringe Spannungen (10···25 Volt) zur Aufrechterhaltung des Heizstromes. Für Glühtemperaturen von 1100···1350° C wird Bariumchlorid benutzt. Der das Bad durchsetzende Strom muß Wechselstrom sein, er kann durch zwei (einphasiger Wechselstrom) oder drei Elektroden (Drehstrom) dem Bad zugeführt werden. Abb. 71 zeigt schematisch die Anordnung, ebenfalls die Hilfselektrode, mit der die Erhitzung eingeleitet wird. Die andere Form der Innenbeheizung ist eine mittelbare; Heizkörper, die in eine keramische, elektrisch isolierende Masse eingebrannt und zum Schutz mit Stahlblech überzogen sind, werden auf dem Boden des Bades eingesetzt, wobei sie durch Isolierstege vom Boden, von den Wänden, voneinander und vom Einsatzgut getrennt sind, so daß ungestörter Wärmeaustausch im Bad stattfinden kann.

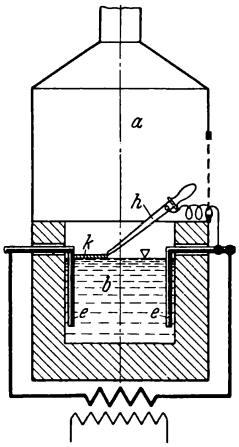

Abb. 71. Tiegelsalzbadofen, Schema.
$a$ = Haube mit Abzug; $b$ = Salzbad; $e$ = Elektroden; $h$ = Hilfselektrode; $k$ = Kohleheizplättchen.

Neben der gleichmäßigen Wärmeabgabe wird dem Salzbad nachgerühmt, daß es beim Herausnehmen des Einsatzes diesen mit einer dünnen glasartigen Schicht überzieht und ihn vor dem Oxydieren bewahrt, diese Kruste springt erst beim plötzlichen Erkalten. Andrerseits haben die Salzbäder den Nachteil schädlicher Dämpfe, weswegen stets Abzugshauben vorgesehen werden müssen; auch ist das Hantieren mit Flüssigkeiten, in die das Glühgut eingetaucht und dann wieder herausgenommen wird, nicht immer sauber. Immerhin haben die Salzbadöfen in der Werkzeughärterei eine fast umumschränkte Anwendung gefunden, wo sie in Größen bis zu 100 kW vorkommen. Für Sonderzwecke, wie etwa das Vergüten großflächiger Teile aus Leichtmetallegierungen, werden entsprechend große Salzbäder mit einigen hundert kW Anschlußwert hergestellt (z. B. 10 m³ Badinhalt, 360 kW).

## C. Sonstige Elektrowärmeverwertung.
## Schweißgeräte, Trockenschränke, Verschiedenes.

**37. Die elektrischen Schweißverfahren** gehören zu den wichtigsten Anwendungsgebieten der Elektrowärmeverwertung. Als einen ihrer größten Vorteile muß man die durch sie ermöglichte Ersparnis an Metallen, vornehmlich Eisen, bezeichnen, die im Sinne unserer Rohstoffwirtschaft nicht hoch genug angeschlagen werden kann. Daneben gestatten sie die Gestaltung glatter, gefälliger Formen, die leichter zu unterhalten sind als die mit anderen Verbindungsverfahren hergestellten. Die Metallersparnis bedeutet gleichzeitig eine Gewichtserleichterung, die sich für viele bewegte Bauwerke, wie Schiffe, Fahrzeuge, Fördergeräte usw., entweder in der Einsparung an Antriebskraft oder einer erhöhten Arbeitsleistung ausdrückt. Die riesige Verbreitung der elektrischen Schweißverfahren ist eben die Folge der jetzt nirgends mehr bezweifelten Vorteile. Die elektrische Schweißung, die grundsätzlich zwei Arten der Wärmeerzeugung benutzt, nämlich die Lichtbogen- und

die Widerstandswärme, ist eine der ältesten Anwendungen der Elektrowärme, denn sie stammt schon aus den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts; ihren Siegeslauf hat sie allerdings erst mit Ausgang des Krieges begonnen. Da sie in den Werkstattbüchern gesondert[1] behandelt werden, so genügt es, hier einen kurzen Überblick zu geben.

a) Die Lichtbogenschweißung (zu den Schmelzschweißungen gehörig) bevorzugt noch immer den Handbetrieb mittels Gleichstrom; trotzdem sind die automatischen Schweißmaschinen, darunter solche für stark umhüllte Elektroden, weiter entwickelt worden. Die Schweißstromerzeuger sind hinsichtlich Aufbau und Wirkungsweise vereinfacht worden; neben den rotierenden Gleichstromerzeugern sind auch Gleichrichter auf dem Markt erschienen. In der Art der Stromversorgung ist die Einstellen-Schweißmaschine (jeder Schweißer hat seine eigene fahrbare Schweißdynamo) noch immer die meist vertretene; neben großen ortsfesten Sammelanlagen bis zu mehreren 100 kW wird noch die Gruppenversorgung von 30···40 Schweißern aus einem beweglichen Umformer angestrebt. Unter den gaselektrischen Schweißverfahren hat sich das Verfahren des im Wasserstoffstrahl brennenden Lichtbogens („Arcatom") weiter durchgesetzt. Die Schweißstäbe (Elektroden) sind in der letzten Zeit außerordentlich verbessert worden sowohl in der Legierung ihrer Metallbestandteile als auch in der Zusammensetzung ihrer Umhüllungsmasse, die bei einer Art sogar im rohrförmigen Innern der Elektroden (Seelenelektroden) untergebracht ist. Es können heute sicherer als früher die bei einer Schweißung beabsichtigten mechanischen und metallurgischen Eigenschaften erzielt werden, wenn auch die vollkommene Beherrschung der Wärmespannung bei großen Werkstücken und Bauteilen noch schwierig ist.

b) Die Widerstandschweißung gehört zu den sog. Preßschweißungen, d. h. die zu verschweißenden Teile werden nur so weit durch die Elektrowärme erweicht, daß sie zur innigen Verbindung in diesem teigig weichen Zustand zusammengepreßt werden müssen. Da der für die Erwärmung maßgebende Berührungswiderstand nur sehr gering ist, bedarf es auch nur kleiner Spannungen (0,5···10 Volt), um ihn zu überwinden, dafür aber um so größerer Stromstärken für die nötige Schweißwärme, die bei großen Schweißmaschinen 100000 Amp. und mehr erreichen. Solche Ströme können nur als (einphasiger) Wechselstrom in besonderen Umspannern hergestellt werden. Sie können auch nicht weit fortgeleitet werden, ihre Zuführung zum Schweißwerkstück bedarf besonders geformter Kontakte mit Vorrichtungen zum Kühlen und Pressen. Der Strom muß nach Zeitdauer und Stärke geregelt, der Preßdruck im richtigen Verhältnis dazu gesteuert werden. Die Erfüllung dieser Bedingungen und der dazu nötige Zusammenbau der Einzelteile (Transformator mit Leitung und Schalteinrichtung, Schweißkontakte mit Kühlung und Steuerung, Stauchdruckeinrichtung usw.) machen aus dem Widerstandsschweißgerät eine Art Werkzeugmaschine, die in Sonderfällen schon recht verwickelt und kostspielig ausfällt. Im Gegensatz zur Lichtbogenschweißung, die geschickte und zuverlässige, besonders ausgebildete Schweißer erfordert, ist die Bedienung der Widerstandsschweißmaschinen einfach und bedarf nur angelernter Leute. Auch die metallurgischen Verhältnisse liegen hier günstiger als beim Lichtbogenverfahren. Zudem ist der Stromverbrauch von ganz untergeordneter Rolle, der bei der Bogenschweißung mit 4···8 kWh je kg niedergeschmolzenen Eisens doch als erheblich angesehen werden muß. Allerdings besitzt die Widerstandsschweißung nicht die allgemeine Verwendbarkeit wie die Licht-

[1] *Schimpke, P.*: Die neueren Schweißverfahren. Heft 13. — *Klosse, E.*: Das Lichtbogenschweißen. Heft 43. — *Fahrenbach, W.*: Das Widerstandsschweißen. Heft in Vorbereitung.

bogenschweißung, sie eignet sich, im Gegensatz zur Lichtbogenschweißung, vorzugsweise nur für die reihenweise Anfertigung gleichartiger leichterer Stücke in großen Mengen. Schweißmaschinen, die für die folgenden drei Hauptverwendungsarten gebaut werden, kommen in Anschlußwerten bis zu 400 kVA vor.

1. Stumpfschweißmaschinen nach Abb. 72 zum Zusammenfügen von Querschnitten aller Art, wie Rohre, Stäbe, Profileisen, Bleche usw. Man unter-

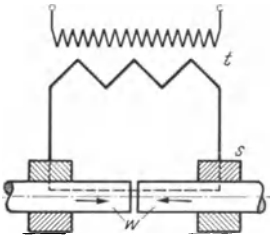


Abb. 72. Stumpfschweißung. $t$ = Umspanner; $s$ = Spannbacken; $w$ = Werkstücke.

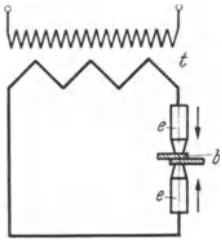


Abb. 73. Punktschweißung. $t$ = Umspanner; $e$ = Elektroden; $b$ = Bleche.

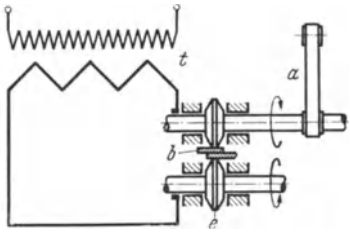


Abb. 74. Nahtschweißung. $t$ = Umspanner; $e$ = Rollenelektroden; $a$ = Antrieb; $b$ = Bleche.

scheidet die gewöhnliche Stumpfschweißung, bei der sich die Schweißquerschnitte in stetiger Gleichrichtung nähern, von der sog. Abbrennstumpfschweißung, bei der durch Nähern und Entfernen der Schweißenden Funkenbildung mit gleichmäßigem Abbrennen der Schweißflächen erzeugt wird und der Stauchwulst am Werkstück geringer ausfällt.

2. Punktschweißmaschinen. Hier wird den zu verbindenden Blechen der Strom durch stabförmige Elektroden zugeführt. Da diese gut leitend und gekühlt sind, entsteht die Schweißhitze nur an den Innenseiten der sich berührenden Bleche, die nun nach Art der Nietung punktförmig zusammengefügt werden (Abb. 73).

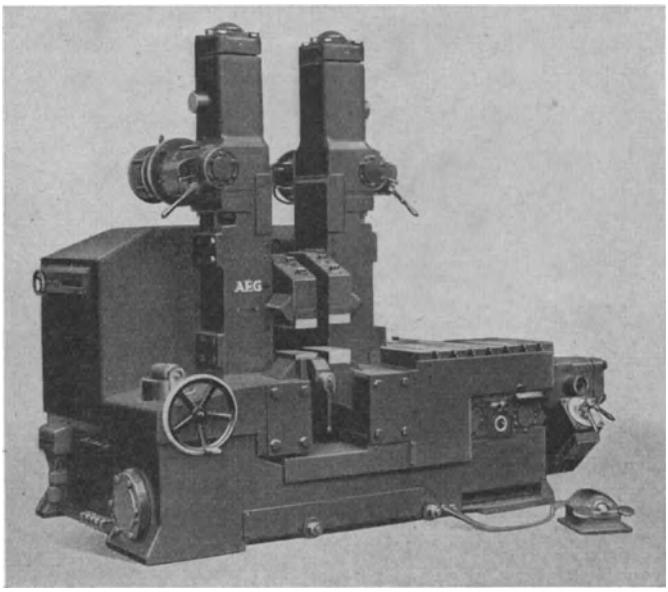


Abb. 75. Vollselbsttätige Abbrennschweißmaschine (*AEG.*).

3. Nahtschweißmaschinen. Sollen Bleche (etwa bis zu 2 × 6 mm Stärke) in fortlaufender Naht zusammengefügt werden, so werden die Schweißstromkontakte als Kupferrollen (Abb. 74) ausgebildet. Die Bewegung dieser Rollen ist nicht stetig fortlaufend, sondern eigenartig (teils unterbrochen und rückläufig) gesteuert, um gute Festigkeiten der Naht zu erhalten. Alle diese Maschinen, die für einzelne Erzeugnisse in vielen Sonderbauarten vorkommen, können von Hand, halbautomatisch oder vollselbsttätig betrieben werden.

c) Als Beispiele von ausgeführten Schweißmaschinen können unter der Vielzahl der vorhandenen Erzeugnisse hier nur ganz wenige angeführt werden. Abb. 75 zeigt eine vollselbsttätige Abbrennschweißmaschine für einen größten Schweißquerschnitt von 10000 mm², der etwa bei schweren Eisenbahnschienen vorhanden ist. Von den Einspannvorrichtungen mit den kupfernen Kontaktbacken ist die rechtsstehende auf einem Schlitten beweglich gegen die linke angeordnet. Der Schweißvorgang bei dieser Maschine wird durch Druckknopf oder Fußtrittschalter eingeleitet und wickelt sich dann auf dem durch die jeweilige Einstellung der Steuerungsorgane gegebenen Wege vollkommen selbsttätig ab. Elektrisch und mechanisch sind die Vorgänge aufeinander abgestimmt und durch Relais gesteuert. Im geschweißten Gehäuse der Maschine befinden sich Transformator, Rädergetriebe, Schalter u. dgl. vollkommen geschützt. Stumpfschweißmaschinen werden bis zur Querschnittsleistung von 25000 mm² hergestellt, die Schweißzeit ist abhängig vom Querschnitt und der aufgewendeten Elektrowärmeleistung, sie liegt

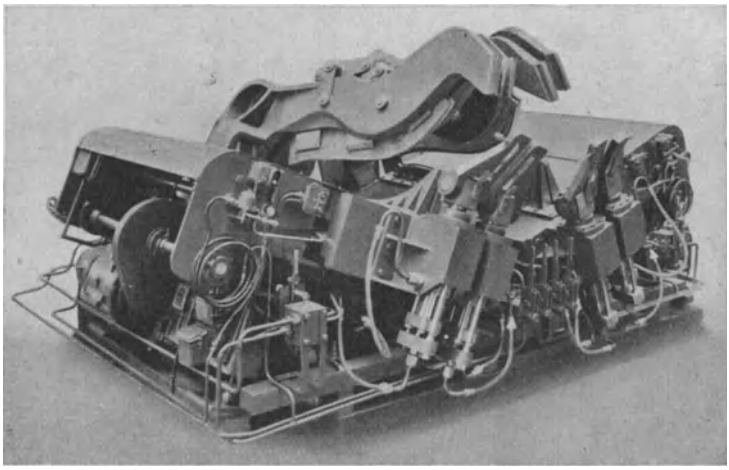

Abb. 76. Doppel-Karosserieschweißmaschine 2 × 300 kVA (*Ottensener Eisenwerk AG.*, Hamburg).

zwischen einigen Sekunden und einigen Minuten. Eine sehr sinnreiche Anwendung haben die Stumpfschweißmaschinen beim Zusammenfügen von Blechen (meist 1···2 mm stark) zur Herstellung von Fässern, Behältern und Wagenkästen des neuzeitlichen Kraftwagenbaus gefunden. Besonders die vielfach gekrümmten Bleche des Karosseriebaues (Dach, Rückwand, Kotflügel usw.) verlangen verwickelte Einspannvorrichtungen, zumal hier Schweißnahtlängen bis zu 1,5 und 2 m vorkommen. Sollen spiegelbildgleiche Nähte paarweise auf einmal geschweißt werden und liegen diese Nähte nicht in einer Ebene, so ergibt sich eine Maschine (Abb. 76), die höchste Anforderungen an den Gestalter stellt. Diese Maschine dient zum gleichzeitigen Zusammenschweißen der Wagenrückwand mit den beiden Seitenwänden bei einer zeitgemäßen Ganzstahlkarosserie. Die entsprechend geformten Schweißbacken mit den hydraulischen Riegeln, das Vorschubgetriebe, der geneigte Schweißtisch sowie die zahlreichen Steuerungsteile der vollselbsttätigen Maschine geben den Eindruck einer leistungsfähigen, wenn auch kostspieligen Maschine, die sich nur bei Massenanfertigung bezahlt macht.

Bei den Punktschweißmaschinen hat man angestrebt, die Leistung der Punktzahl in der Zeiteinheit zu vergrößern. Von den Lösungen seien hier zwei angeführt.

Die verbesserte Doppelpunktschweißmaschine arbeitet nach dem in Abb. 77 angegebenen Verfahren. Zwei voneinander unabhängige Schweißumspanner senden ihren Strom, der sich beim Schweißen hintereinanderschaltet, an zwei Stellen durch

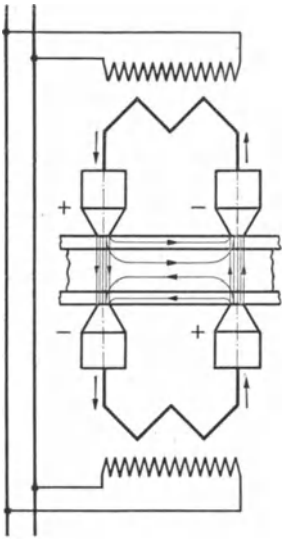


Abb. 77. Zweipaarige Doppelpunktschweißung, Schaltschema.

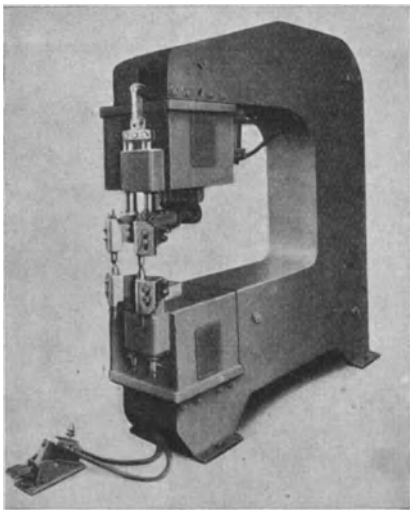

Abb. 78. Zweipaarige Doppelpunktschweißmaschine (*Ottensener Eisenwerk AG.*, Hamburg).

die zu verschweißenden Bleche, deren es bis zu drei sein können und die nicht gleichmäßig dick zu sein brauchen. Eine ausgeführte Maschine veranschaulicht Abb. 78. Als besonderer Vorteil erscheint die große Ausladung, welche die Verarbeitung breiter Bleche ermöglicht. Ganz unabhängig in den Abmessungen der zu verschweißenden Bleche wird man, wenn der eine Umspanner mit seinen Doppelelektroden an der Decke, der andere freistehend auf dem Flur

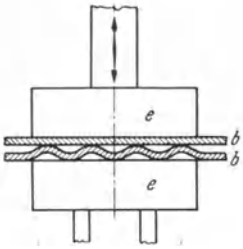


Abb. 79. Warzenschweißung, Schema.
*e* = Elektroden; *b* = Bleche.

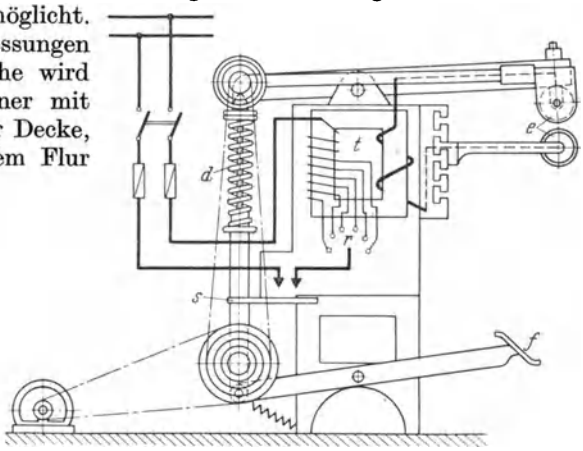


Abb. 80. Nahtschweißmaschine, Schema.
*d* = Druckfeder; *e* = Elektroden (Rollen); *f* = Fußhebel zum Einschalten des Stromes und gleichzeitigen Andrücken der oberen Elektrode; *r* = Stromregler; *s* = Schalter; *t* = Transformator.

der Werkstatt angebracht wird. Die Elektroden werden durch Preßluft bewegt, die auch den Stauchdruck erzeugt. Einschalten von Bewegung, Strom und Druck geschieht durch Fußsteuerventil oder Druckknopf.

Eine andere Einrichtung zur Vermehrung der Punktleistung besteht darin, daß man die Punkte auf den Blechen durch eingepreßte Warzen oder Buckel vorbereitet. Wie in Abb. 79 ersichtlich ist, berühren sich dann die zu verschweißenden Bleche *b* nur an den Kuppen der Warzen, weshalb dort die Erwärmung und Verschweißung eingeleitet wird. Gleichzeitig werden durch den Druck der Schweißbacken *a* während dieses Vorganges die Buckel glattgedrückt, so daß die gepunkteten Bleche glatt erscheinen. Mit Maschinen von 500 kVA Anschlußleistung können bis zu 25 Punkte gleichzeitig in einigen Sekunden hergestellt werden. Andere Verbesserungen der Punktschweißmaschinen, allerdings der kleineren, beziehen sich darauf, daß man Umspanner und Punktelektroden trag- oder fahrbar macht. Die Elektroden können in Form von Zangen leicht an das Werkstück herangebracht werden (Punktschweißzange).

Um bei Nahtschweißmaschinen (Abb. 80) feste, saubere und spurlose Nähte zu erhalten, hat man für die Steuerung der Rollenbewegung, des Druckes und des Stromes viel Geist und Mühe aufgewendet. Bei neuzeitlichen Nahtschweißmaschinen wird z. B. der Strom durch die Steuerung von Gitterröhren ein- und ausgeschaltet. Gitterröhren sind sozusagen masselose Elektronenventile, wie sie besonders aus der Funktechnik bekannt sind.

**38. Trockenschränke.** Neben den vorbesprochenen Warmbehandlungen Schmelzen, Glühen, Schweißen spielt die Elektrowärme in der Eisen- und Metallindustrie eine bescheidene Rolle, meist in verschiedenartigen, im einzelnen nicht oft vorkommenden Ausführungen. Am einheitlichsten unter diesen ist wohl der Trockenschrank vertreten, ein Gerät mit geschlossenem Heizraum, das in den Temperaturlagen von 50···500° C (meist 100···300° C) zum Trocknen und Anwärmen benutzt wird, z. B. zum Trocknen von gelackten Eisen- und Metallteilen, von Gußkernen, zum Anwärmen von Preß- und Gießformen, von Werkzeugen, Gußteilen u. dgl. Meist wird dieses Gerät in der Form eines Schrankes mit großen Beschickungstüren gebaut, oft kommt aber auch die Trommelform (Abb. 81) in Anwendung; ganz große elektrische Trockenvorrichtungen haben einen langgestreckten Tunnel als Heizraum. Da die Temperaturen einfachere Bauart gestatten, wird meist Eisenblech für Innen- und Außenwände gewählt und der Zwischenraum mit Isoliermasse ausgefüllt. Im übrigen werden auch die bei Glühöfen üblichen Bauweisen angewendet: z. B. Widerstandsheizung in verschiedenen Arten, mechanische Beschickung durch Wagen, Durchlauf- oder Wanderöfen für den Fließbetrieb langsam trocknender Gegenstände (darunter Öfen bis 1000 kW Anschlußwert zum Trocknen gelackter Kraftwagenkarosserien), Luftumwälzung, selbsttätige Temperaturregelung u. a. m. Auf die Luftführung in Trockenschränken ist besondere Aufmerksamkeit zu verwenden. Meist gilt es bei der Trocknung, Dämpfe oder Gase zu entfernen, dazu dient ein Lüfter mit Abzug. Bei verpuffungsfähigen Gasen erhalten die Öfen eine sog. Ex-

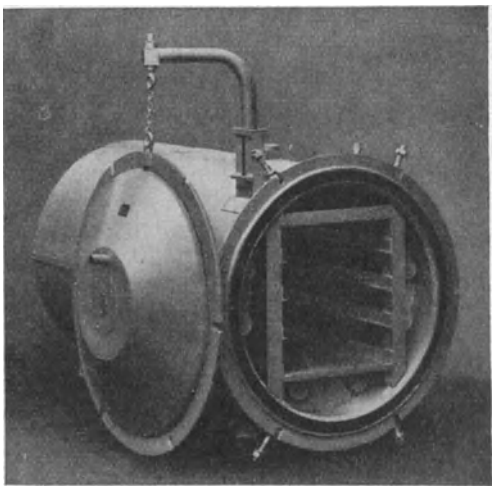

Abb. 81. Vakuumtrockenschrank, 4,2 kW (*SSW.*).

plosionsklappe zum Druckausgleich. Muß ein sehr hoher Grad der Trockenheit erzeugt werden, so werden die Trockenschränke für eine mehr oder weniger hohe Luftleere gebaut. Abb. 82 zeigt einen Trockenschrank mit künstlicher Luftumwälzung und selbsttätiger Wärmeregelung. Die Anlage zur Entlüftung und Wärmeregelung ist auf dem Bilde zu erkennen.

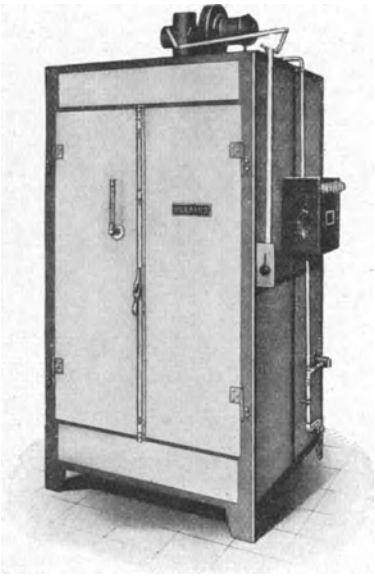

Abb. 82. Trockenschrank mit Luftumwälzung (*Heraeus G.m.b.H.*, Hanau).

**39. Verschiedenes.** Unter den übrigen Elektrowärmegeräten, die fast alle bekannten Erhitzungsarten verwenden, können hier nur ganz wenige Beispiele veranschaulicht werden. Einrichtungen wie Lötkolben, Tauchlötöfen, Hartlötmaschinen, Maschinen zur unmittelbaren Widerstandserhitzung gleichartiger Schmiedeteile, Signiermaschinen zum Einbrennen von Kennzeichen etwa auf Werkzeuge u. ä. seien

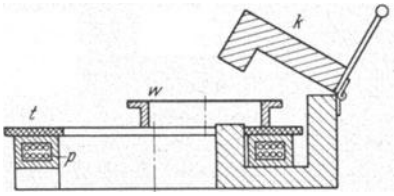


Abb. 83. Induktionserhitzer (*Vits-Elektro GmbH.*, Düsseldorf). $k$ = aufklappbarer Magnetkern; $p$ = Primärspule; $t$ = warmfester Isoliertisch; $w$ = Werkstück.

dem Namen nach erwähnt. Eine bemerkenswerte Verwendung der Induktionsheizung, etwa zum Anwärmen von Radbandagen, zeigt Abb. 83 im Schnitt; nach dem früher Erläuterten versteht sich die Wirkungsweise von selbst. Einen Walzenheizer stellt Abb. 84 dar; wie eine Leibbinde umgeben die abnehmbaren Heizkörper die Walzen, welche im Walzwerk zum Ersatz auszuwechselnder Walzen auf Betriebstemperatur gehalten werden müssen. Ein gutes Beispiel elektrisch unmittelbarer Widerstandserhitzung gibt der Nietenwärmer (vgl. Abb. 16). Beliebig große Nieten (bis zu drei gleichzeitig) werden zwischen federnden Kontakten erwärmt, und zwar ohne Abbrand, Verschmutzung und Qualm in niettechnisch einwandfreier Weise.

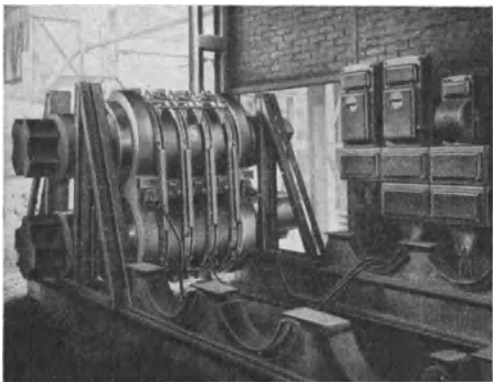

Abb. 84. Walzenheizer, 80 kW (*SSW.*).

# IV. Messen und Regeln der Elektrowärme.

## A. Messen.

**40. Meßverfahren.** Überall, wo Wärme gebraucht wird, mißt man sie, und zwar hauptsächlich die Temperatur, während die Messung der Wärmemengen (vgl. Kap. I A) seltener angewendet wird. Es gibt eine ganze Reihe von physikalischen

Möglichkeiten, um die Temperaturänderungen merkbar und damit meßbar zu machen. Wir betrachten nur die daraus für die Industrie sich ergebenden praktischen Verfahren. Die eine Gruppe beruht auf dem physikalischen Grundsatz, daß Wärme die Körper ausdehnt, die andere darauf, daß sie das elektrische Verhalten der Körper ändert. Genauigkeit und Meßbereich der einzelnen Verfahren sind verschieden.

a) Von den Ausdehnungswärmemessern ist das Quecksilberthermometer bekannt; praktisch verwendet man es bis zu 300° C, in Sonderausführungen bis 600°. Da in der Elektrowärme Temperaturen bis 1800° vorkommen (die Temperaturen der Heizträger Kohlenstäbe und Kohlenelektroden liegen noch viel höher), so kommt dem Quecksilberthermometer nur ein kleiner Verwendungsbereich zu, etwa bei Trockenschränken, Außenwärme der Öfen u. ä. Eine andere auf der Ausdehnung beruhende Meßeinrichtung benutzt die Längenänderung der durch Wärme sich ausdehnenden Stäbe aus bestimmten Metallen (Stabthermometer); sie können etwa bis 600° C verwendet werden.

b) Den elektrischen Wärmemeßverfahren liegen zwei physikalische Erscheinungen zugrunde: einmal die der Widerstandsänderung erwärmter Metalle (vgl. Kap. I B), sodann die sog. Thermoelektrizität. Sie entsteht dadurch, daß man die Stelle inniger Berührung zweier verschiedenartiger Metalle erwärmt. Die in einem solchen Thermoelement erzeugte Spannung ist sehr gering und abhängig von der Art der verwendeten Metalle und dem Temperaturunterschied an der Berührungsstelle (Lötstelle) und den freien Enden. Als Metalle kommen in Frage Nickel, Kupfer, Eisen, Platin, Iridium und Rhodium und deren Legierungen. In der genannten Gruppe der unedlen Metalle liegt die Spannung bei Temperaturen zwischen 500 und 1000° C im Bereich von 20···40 Millivolt, bei den edlen Metallen bei 1000···2000° C etwa zwischen 10 und 20 Millivolt. Ein vielbenutztes Thermoelement für Temperaturen von 500···1600° ist aus Platin und Platin mit 10 % Rhodium zusammengesetzt. Unter 500° sind Elemente aus Kupfer oder Eisen mit Konstantan (40 % Nickel, 60 % Kupfer) gebräuchlich. Um hohe und unveränderliche Meßgenauigkeit zu erzielen, werden an die Beschaffenheit der Thermoelemente große Ansprüche gestellt, vor allen Dingen müssen sie metallisch rein sein und vor chemischen Einwirkungen (Ofenatmosphäre) geschützt werden; sie werden daher nur in gasdichten und festen Schutzrohren verwendet, die je nach Temperatur aus Stahl, Porzellan, Silit, Quarz bestehen können. Ähnliche Rohre kommen auch in Frage, wenn man den Widerstand der darin eingeschlossenen Meßmetalle zur Temperaturbestimmung benutzen will. Den Einbau elektrischer Wärmemeßgeräte im Ofenraum veranschaulicht Abb. 85. Meßgeräte für hohe Temperaturen werden Pyrometer genannt.

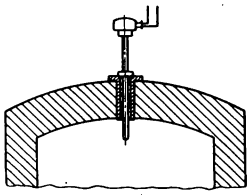

Abb. 85. Einbau eines Thermoelementes im Glühraum.

c) Optische Pyrometer werden dann verwendet, wenn man die Meßgeräte nicht unmittelbar in den Schmelz- oder Glühraum bringen kann. Sie beruhen darauf, daß man in einem kleinen Fernrohr die Strahlungshelligkeit des glühenden oder geschmolzenen Gutes mit der Fadenhelligkeit einer geeichten Glühlampe vergleicht. Da man mit ihnen keine selbsttätige Wärmeregelung vornehmen kann, sollen sie hier nur erwähnt werden.

**41. Meßgeräte.** Um die beschriebenen Verfahren für eine Messung ausnutzen zu können, wodurch erst ein Meßgerät entsteht, bedarf es noch der Anzeige- und Ablesevorrichtungen. Die beim Quecksilberthermometer bekannte Skala ist bei Stabthermometern wegen der geringen Ausdehnung nicht unmittelbar anwendbar:

hier werden die Ausdehnungskräfte, unter Umständen durch die Unterschiedswirkung zweier verschiedener Metalle verstärkt, auf eine Zeigeranordnung übertragen.

Die elektrischen Meßverfahren gestatten eine sehr genaue Ablesung. Wenn auch die beim Thermoelement erzeugten Spannungen sehr gering und die mit einer Hilfsspannung festgestellten Unterschiede beim Widerstandsverfahren ebenfalls nur mäßig sind, so hat die elektrische Meßgerätetechnik doch für die kleinsten Anzeigekräfte ausreichend empfindliche und genaue Instrumente hergestellt. Abb. 86 zeigt eine vielbenutzte Form eines Ablesegerätes für elektrische Pyrometer und Abb. 87 die Schaltung, in der es angeschlossen ist. Es können an ein Thermoelement mehrere Anzeigeinstrumente oder auch an ein Anzeigegerät umschaltbar mehrere Thermoelemente (Meßstellen) angeschlossen werden. Die mit *bd* und *ce* bezeichneten Ausgleichsleitungen sind in diesem Falle nötig, um im Bereich der höheren Temperaturen nicht die Widerstandsänderung der Zuleitung zum Anzeigeinstrument fehlerhaft auf das Meßergebnis einwirken zu lassen. Die Wirkung der Ausgleichsleitung beruht auf dem entsprechend gewählten Temperaturbeiwert (vgl. Abschn. 6). In den meisten Fällen wird der Betriebsmann nicht damit zufrieden sein, nur den jeweiligen Temperaturzustand seines Ofens ablesen zu können. Zur besseren Betriebsüberwachung verlangt er, den ganzen Verlauf einer Schmelzung oder Glühung oder gar einer Ofenreise (vom Inbetriebnehmen bis zum Stillsetzen) auch noch nachträglich übersehen zu können, zumal wenn die Wärmeleistung nach einem gewissen Programm geregelt wurde. Zu diesem Behuf werden schreibende Meßgeräte verwendet, die auf einem fortlaufenden Papierstreifen durch den Zeiger punkt- oder strichweise die Aufzeichnungen festhalten. Die Genauigkeit elektrischer Meßverfahren kann allgemein dadurch verbessert werden, daß man der zu messenden Spannung eine gleich große entgegensetzt, so daß die Ablesung stets in einem Nullwert (Nullspannungs- oder Kompensationsmethode) erfolgt. Auch von diesem Verfahren wird beim Messen und Regeln der Elektrowärme Gebrauch gemacht. Die Genauigkeit elektrischer Meßverfahren ist leicht auf $\pm$ 1 % und darunter zu bringen.

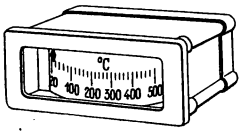


Abb. 86. Elektrischer Temperaturanzeiger (*Heraeus GmbH.*, Hanau).

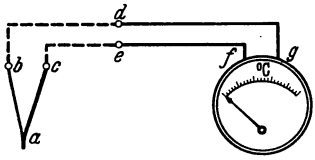


Abb. 87. Schaltung einer elektrischen Temperaturmessung.
*abc* = Thermoelement; *a* = Lötstelle; *bd* und *ce* = Ausgleichsleitungen; *dg* und *ef* = Zuleitungen zum Meßinstrument.

## B. Regeln.

Wichtiger noch als das Messen ist das Regeln der Wärme bei ihrer praktischen Verwertung; selbstverständlich ist zu einem wirksamen Regeln die Kenntnis der Temperatur Voraussetzung, weshalb auch in diesem Kapitel die Messung vorangeschickt wurde. Gerade in der Eisen- und Metallindustrie ist die Innehaltung genau begrenzter Temperaturen beim Reinigen und Mischen, beim Erzielen bestimmter Festigkeits- und Härtegrade usw. erforderlich. Wirtschaftlich kann die Elektrowärme nur geregelt werden, wenn man den sie erzeugenden Strom regelt, denn $Q = 0{,}86 J^2 R t$ (Formel 3 S. 6). Da nach dem Ohmschen Gesetz $J = U/R$ (Formel 1) ist, kann die Stromstärke durch Spannungs- oder Widerstandsveränderung beeinflußt werden. Von beiden Verfahren wird bei der Elektrowärme Gebrauch gemacht, und zwar indem man diese Veränderung von Hand oder, wie es fast immer angewendet wird, selbsttätig ausführen läßt.

**42. Spannungsregelung.** Die Schaltungsarten zur Wärmeregelung sind mannigfaltig. Das Regeln der Spannung an der Erzeugungsstelle ist wenig üblich, weil es nur in Frage kommt, wenn man für ein Elektrowärmegerät einen besonderen Stromerzeuger aufgestellt hat. Das war früher bei Lichtbogen- und Niederfrequenzöfen und ist noch bei den Hochfrequenzöfen die Regel. Da heutzutage die Energie für die Elektrowärme fast regelmäßig einem öffentlichen oder industriellen Stromversorgungsnetz mit gleichbleibender Hoch- oder Niederspannung entnommen wird, kommt für die Elektroöfen nur eine Spannungsregelung am Umspanner in Frage. Als Reguliertransformatoren werden durchweg solche mit Stufenschaltung verwendet; bei ihnen sind die Wickelungen an der Gebrauchsspannungsseite (Abb. 88) für den Gesamtregelbereich in den entsprechenden Spannungsstufen angezapft. Die Kontaktvorrichtungen für diese Anzapfungen sind den Stromstärken entsprechend für funkenloses Überschalten von einer zur anderen Stufe ausgebildet und können von Hand oder motorisch betätigt werden. Für ein stufenloses Regeln kommt noch der Drehtransformator in Frage, bei dem die Spannung durch gegensätzliches Verdrehen von Spulen- und Magnetsystem stetig geändert wird. Regulierumspanner kommen bis zu den größten Öfen (z. B. Lichtbogenöfen) zur Anwendung. Die in Abschn. 27, S. 30 beschriebene Regeleinrichtung für Lichtbogenöfen dient allerdings nur der Gleichhaltung der Wärme, indem der Elektrodennachschub geregelt, Strom- und Spannungsschwankungen aufgefangen werden. Die Spannungshöhe für den Ofenbetrieb dadurch zu regeln, daß man einen gewissen Spannungsbetrag durch Vorschaltwiderstände abdrosselt, kommt nur für ganz kleine Öfen in Frage, da der Spannungsverbrauch in ohmschen Vorschaltwiderständen ein glatter Energieverlust ist. Beim Lichtbogenschweißen wird der Wärmeaufwand durch die am Generator oder Transformator einzustellende Spannung geregelt, bei der Widerstandsschweißung tritt als Regelelement noch die Zeit hinzu, die ja gemäß der Jouleschen Formel für die Wärmemenge auch eine Rolle spielt und die hier unter Umständen bis auf Bruchteile von Sekunden geregelt wird.

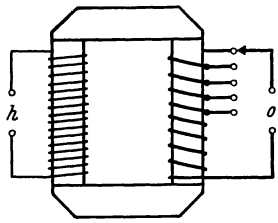

Abb. 88. Stufentransformator. $h$ = Hochspannungsseite; $o$ = Ofenspannungsseite.

**43. Die Widerstandsschaltung** ist die am meisten für die Wärmeregelung der Glühöfen benutzte Einrichtung. Sie beruht darauf, daß man die Heizwiderstände im ganzen oder in Gruppen unterteilt ein- und ausschaltet, hintereinander oder nebeneinander, von Stern auf Dreieck oder umgekehrt schaltet. Diese Schaltungen sind durchweg nicht so feinstufig wie die bei Spannungsregelung, tun aber bei einer empfindlichen Selbstregelung ebenfalls gute Dienste, zumal da die Speicherwärme des Ofens den Übergang von einer zur anderen Wärmestufe etwas ausgleicht. In Abb. 89 sind die Wärmebeträge in ihrer Größenordnung eingetragen, die dem Elektrowärmegerät bei gleichbleibender Betriebsspannung in den verschiedenen Schaltungen zugeführt werden. Bei größeren (besonders langgestreckten) Durchlauföfen ist es häufig zweckmäßig, die gesamte Heizleistung in mehrere Gruppen zu unterteilen, die

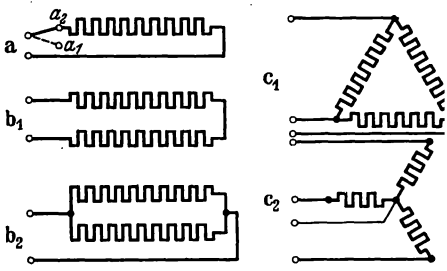

Abb. 89. Regelstufen der Widerstandsschaltung.

| Schaltung | $a_1$ | $a_2$ | $b_1$ | $b_2$ | $c_2$ | $c_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Wärmezufuhr in % | 0 | 100 | 25 | 100 | 57,8 | 100 |

dann wieder durch eine der vorgenannten Schaltungsarten geregelt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, dem Ofen an verschiedenen Stellen verschiedene Wärmebeträge zuzuführen, wie es manchmal der Betrieb erfordert. Der Durchlaufofen verlangt z. B. an der Eingangsseite, wo der kalte Einsatz hineinkommt, zum wirtschaftlich schnellen Aufheizen mehr Wärme als in der eigentlichen Glühzone in der Mitte; noch weniger Wärme als diese braucht die Auslaufseite.

**44. Selbsttätige Wärmeregelung** ist die Verbindung eines Temperaturmeßverfahrens mit einer der Regelungsarten für Energie und Wärme. Die in den Wärmemeßgeräten, seien es nun Ausdehnungsthermometer oder elektrische Pyrometer, auftretenden Bewegungskräfte sind zu klein, um damit unmittelbar irgendeinen Vorgang zur Spannung- oder Widerstandsänderung zu betätigen; wohl aber kann man mit ihnen kleine Steuerströme ein- und ausschalten, die nun über Strom- oder Spannungsschützen (Relais) stärkere elektrische Energien zum Schalten der Energie- und Wärmequellen auf den Weg bringen können. Als einfachste Art eines solchen Wärmeregelgerätes kann das Kontaktthermometer gelten (Abb. 90); in seine Skala sind zwei Platindrähte eingeschmolzen für Höchst- und Mindesttemperatur. Unterschreitet der Quecksilberfaden, der mit dem anderen Pol der Stromquelle in Verbindung steht, den Mindestkontakt, so löst der unterbrochene Strom ein Steuerschütz zum Einschalten der Wärmeenergie aus, erreicht der Faden den Höchstkontakt, so schaltet ein anderes Schütz die Wärmeenergie wieder ab. Auch die Stabthermometer lassen sich zum Ein- und Ausschalten zwischen zwei Temperaturgrenzen benutzen; ihre schleichende Bewegung verbietet aber die Anwendung einfacher Kontakte in Luft. Hier hilft der sog. Vakuumschalter (Abb. 91), bei dem die beiden im luftleeren Raum untergebrachten Kontaktfedern schon bei einer Bewegung von 0,005 mm eine Steuerleistung von 1500 Watt bei 10 Ampere einwandfrei abschalten. Ein Gerät, welches bei höchsten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen Anzeigeinstrument mit Einstellvorrichtung und Steuerschaltern vereinigt, ist der sog. Fallbügelregler; er soll an einer vereinfachten Zeichnung in Abb. 92 erklärt werden. Das Meßwerk *l* mit dem Meßzeiger *b* ist wie bei einem üblichen Präzisionsinstrument ausgeführt. Über dem Zeiger befindet sich an einem Tragarm *i* eine Quecksilberschaltröhre *k*, die durch eine Wippe *c* ein- und ausgeschaltet werden kann; man kann diese Vorrichtung mittels eines Schiebezeigers *a* auf eine gewünschte Einstellmarke (in Celsiusgraden bezeichnet) einstellen. Im Ruhezustande verändert sich

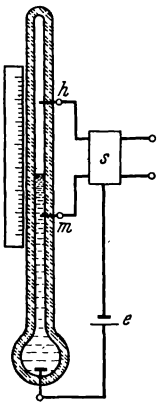


Abb. 90. Kontaktthermometer. *e* = Stromquelle; *h* = Kontakt für Höchsttemperatur; *m* = für Mindesttemperatur; *s* = Steuerschütz für Regler.

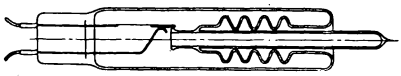

Abb. 91. Vakuumschalter für Ausdehnungsregler (*SSW.*).

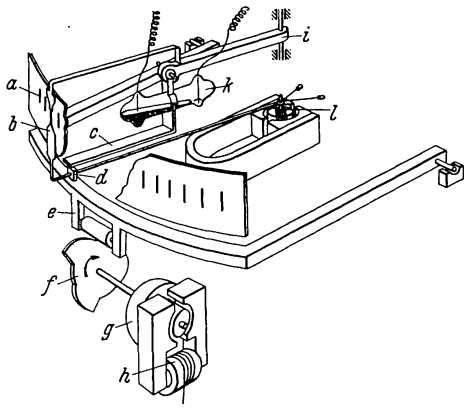


Abb. 92. Schema des Fallbügelreglers. *a* = Einstellmarke; *b* = Meßzeiger; *c* = Wippe; *d* = Druckstück; *e* = Fallbügel; *f* = Kurvenscheibe; *g* = Getriebe; *h* = Synchronmotor; *i* = Tragarm; *k* = Schaltröhre; *l* = Meßwerk.

die Schaltung der Quecksilberröhre nicht. Nun wird in bestimmten Zeiträumen (etwa alle 10···30 s) durch einen Druck- oder Fallbügel *e*, der durch einen Synchronmotor *h* über Getriebe *g* und Kurvenscheibe *f* gehoben oder gesenkt wird, der Meßzeiger gehoben. Trifft er dabei die über ihm befindliche Wippe, so wird die Quecksilberröhre gekippt und eine Schaltung eingeleitet. Es können bis zu fünf Schaltröhren in solchem Fallbügelregler untergebracht werden, so daß ebensoviele Ein- und Ausschaltungen an den entsprechend eingestellten Marken, sobald der Meßzeiger sie erreicht, sicher vorgenommen werden. Abb. 93 u. 94 zeigen Außen- und Innenansicht eines solchen Temperaturreglers, der mit motorisch gehobenem und gesenktem Bügel arbeitet. Versieht man solche Regeleinrichtung noch mit einem Zeitschalter, so kann ein gewisses Warmbehandlungsprogramm selbsttätig durchgeführt werden, z. B. 2 Stunden auf 950° C und darauf 3 Stunden auf 500° C glühen.

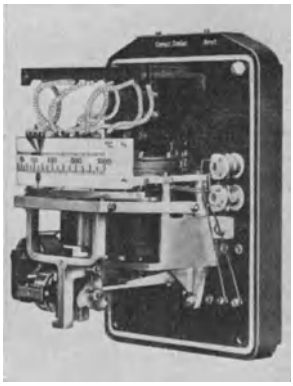

Abb. 93. Außenansicht. Abb. 94. Innenansicht.
Abb. 93 u. 94. Fallbügelregler (*Hartmann & Braun*, Frankfurt).

Die selbsttätige Elektrowärmeregelung ist so gut entwickelt, daß man die Wärme innerhalb von 0,5 % gleichmäßig halten kann.

## V. Wirtschaftlichkeit der Elektrowärme.

**45. Allgemeines.** Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens oder einer Anlage wird nach dem Ausmaß der Kosten beurteilt, welche die Herstellung des beabsichtigten Erzeugnisses verursacht, und nach dem Vergleich dieser Kosten im Wettbewerb mit anderen Verfahren oder Herstellern. Die Erzeugungs- (Selbst-) Kosten setzen sich zusammen aus den Posten für Löhne (Bedienung und Unterhaltung), aus den Stoffkosten, zu denen in diesem Falle auch die Wärmekosten zu rechnen sind, und aus dem Kapitaldienst (Verzinsung und Tilgung) und sonstigen Nebenkosten. Man ist geneigt, bei den Anlagen der Elektrowärmeverwertung den Energie- oder Wärmekosten ohne weiteres die Hauptrolle zuzuweisen; was es damit für eine Bewandtnis hat, werden wir bald sehen. Selbstverständlich ist der elektrische Strom, soweit er aus Wärmekraftwerken stammt, teuerer als die dort verbrauchten Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas), aus denen er doch mit Unkosten hergestellt wird. Der verhältnismäßig hohe Preis dieser Edelwärme gewinnt aber ein anderes Ansehen, wenn man bei den Elektrowärmegeräten die viel bessere Ausnutzung gegenüber den mit anderen Wärmeträgern beheizten Geräten betrachtet. Die Tabelle 5, die mit groben Durchschnittswerten, etwa für mittlere Industrieverhältnisse, rechnet, läßt das erkennen.

Aber selbst der durch den besseren Wärmewirkungsgrad der Elektroöfen günstiger erscheinende Preis der Elektrowärme vermöchte noch nicht das Vorurteil gegen den „zu teuren Betrieb" zu entkräften, wenn nicht eine Reihe weiterer Vorteile der Elektrowärme hinzukämen, die, obwohl bei der einzelnen Geräte-

Tabelle 5. Einheitspreise in Rpf. für 1000 kcal.

| Wärmeträger | Industriegas | Kohle | Heizöl | Strom |
|---|---|---|---|---|
| Wärmeinhalt in kcal je m³, kg, kWh | 4000 | 7000 | 9000 | 860 |
| Preis in Rpf. je m³, kg, kWh | 5 | 1,5 | 8 | 5 |
| Preis in Rpf. je 1000 kcal, Rohwert | 1,25 | 0,2 | 0,9 | 6 |
| Wirkungsgrad der Wärmegeräte in % | 35 | 20 | 30 | 70 |
| Preis in Rpf. je 1000 kcal, Nutzwert | 3,6 | 1,0 | 3,0 | 8,5 |

beschreibung schon erwähnt, hier noch einmal zusammengefaßt werden mögen. Wir lassen dabei solche Verfahren ganz außer Betracht, bei denen die Stromkosten überhaupt keine Rolle spielen, einerlei mit welchem Wirkungsgrad die Elektrizität dabei in Wärme umgesetzt wird. Das ist bei einigen Schmelz- und Glühprozessen und bei der elektrischen Widerstandsschweißung der Fall, bei denen ein gleichwertiges Erzeugnis anders als durch die Elektrowärme überhaupt nicht erreicht werden kann. Selbstverständlich kann mit der Hervorkehrung dieser Vorteile niemals gemeint sein, daß die Stromkosten in der Elektrowärmeverwertung keine Rolle spielten, in vielen Fällen wird man sich bemühen müssen, sie noch weiter zu senken, sei es, daß man den Stromverbrauch am Ofen durch Verminderung der Verluste noch weiter herabzusetzen sich bemüht, sei es, daß man in der Zusammenarbeit mit den Stromversorgungsunternehmungen noch günstigere Stromtarife für Elektrowärme anstrebt (Abschn. 47).

**46. Die Vorteile der Elektrowärmegeräte** beziehen sich auf die Bedienung und die Arbeitsbedingungen, auf das Erzeugnis und auf die Unterhaltung.

Die Bedienungskosten sind gering, da die Wärme meist selbsttätig geregelt wird, vielfach, wie bei den neueren Durchlauföfen, auch die Beschickung, auch einige Schweißverfahren sind weitgehend automatisch gestaltet. Zufuhr und Lagerung von Brennstoffen fällt ganz fort, damit auch die Beseitigung von Schlacken. Die Bedienung ist nicht nur einfach, sondern auch gesundheitlich einwandfrei, da Staub, Schmutz, Qualm und Abgase den Arbeitsraum nicht beeinträchtigen. Die Bedenken, die man oft von nichtelektrischer Seite der Berührungsgefahr bei der Elektrizität entgegenbringt, sind erfahrungsgemäß geringer zu bewerten als die Gefahren beim Umgang mit verpuffungsfähigen Brenngasen. Für die Erzeugnisse der Elektrowärmebehandlung wirkt sich die Möglichkeit der scharfen Überwachung und genauen Steuerung des Wärmevorganges in der gleichmäßigen und fehlerfreien Herstellung aus; Mischung, Reinigung und sonstige metallurgische Zwecke können treffsicher erzielt werden, auch die mechanischen Eigenschaften der Metalle wie Festigkeit, Dehnung, Härte, Oberflächenbeschaffenheit usw. erreicht man mit großer Sicherheit. Ein gar nicht zu überschätzender Vorteil beim elektrischen Glüh- und Schmelzvorgang liegt in dem geringen Abbrand, der durch die verhältnismäßig leicht rein zu haltende Ofenatmosphäre erreicht wird. Besonders dieser Vorteil rückt oft die Bedeutung des Strompreises in den Hintergrund, wie ein kleines Rechnungsbeispiel zeigt: Wird der Preis je Tonne Glühgut (Kupfer- oder Stahlwaren) zu 1000 RM. angesetzt und mit dem Elektroofen gegenüber anderen Verfahren eine Verringerung an Ausschuß und Abbrand um nur 0,5 % = 5 RM. erzielt, so bedeutet diese Ersparnis bei dem mittleren Stromverbrauch für das Glühen (rund 100···250 kWh/t) so viel, als ob man den Strompreis um 5···2 Rpf. herabgesetzt hätte, was seinen Einfluß bei den Gesamtgestehungskosten noch weiter verringert. Bei der Elektroschweißung spielt die Stoffersparnis, die gegenüber anderen Verbindungs- und Fertigungsverfahren bis zu 50% erreichen kann, die größte wirtschaftliche Rolle.

Die Unterhaltung der meisten Elektrowärmegeräte, wie Glüh- und Trockenöfen, Widerstandsschweißmaschinen, ist leicht auszuführen, da Flammen mit stechender Hitze, Rauchabzüge u. ä. nicht vorhanden sind und die Auswechselung der Heizträger, die heutzutage eine hohe Lebensdauer erreicht haben, bequem vonstatten geht. Auch die platzsparende, leicht zugängliche Betriebsweise der meisten Elektroöfen trägt zur wirtschaftlichen Instandsetzungsmöglichkeit bei.

**47. Der Wirkungsgrad der Elektrowärme.** In dem Verhältnis „gesamte aufgewendete Wärmemenge zur nützlich verwendeten" ist der Gesamtaufwand bei den Elektrowärmegeräten sehr leicht festzustellen, er besteht lediglich aus elektrischer Energie, die mit Meßgeräten und Zählern hervorragend genau erfaßt werden kann. Nicht so genau und leicht kann die Nutzwärme erfaßt werden, so beim Schmelzen, Schweißen und Glühen, was ja die Hauptgebiete der industriellen Wärmeverwertung beim Eisen und Metall sind. Wohl kann man aus Masse, Temperatur und spezifischer Wärme des Einsatzes die auf ihn verwandte Wärmemenge berechnen, aber nicht immer liegen diese Werte genau fest bzw. lassen sich genau feststellen. Wohl weiß man aus Erfahrung, wieviel zum Schmelzen, Glühen, Schweißen je Einheitsgewicht an Kilowattstunden verbraucht wird — solche Zahlen sind fast überall bei den einzelnen Geräten in der Beschreibung angegeben —, und man kann dann dem errechneten Nutzbedarf an Wärme einen Wirkungsgrad gegenüberstellen, womit sich die vermutliche Größe der Wärmeverluste herausstellt; wo diese aber stecken, wie sie sich im einzelnen unterteilen und wie sie etwa vermieden oder vermindert werden können, das bedarf der eingehenden Forschung von Bau- und Betriebsleuten.

Der theoretische Wärmebedarf z. B. zum Glühen von Messing ist wie folgt errechnet worden: Die spezifische Wärme für diese Legierung wurde in der Temperaturlage von 600° C zu rund 0,1 kcal/kg ermittelt, das ergibt für die Tonne Glühgut einen theoretischen Wärmebedarf von $600 \times 1000 \times 0{,}1 = 60000$ kcal oder, in Kilowattstunden ausgedrückt, rund 70 kWh/t. Die im praktischen Betriebe erzielten Stromverbräuche liegen zwischen 100 und 120 kWh/t, so daß man auf einen Ofenwirkungsgrad von 64 % kommt. Beim Elektrodampfkessel läßt sich der Wirkungsgrad verhältnismäßig leicht und genau bestimmen, er liegt zwischen 90 und 95 %. Im übrigen sind in den voraufgegangenen Beschreibungen hin und wieder Wirkungsgrade genannt worden, sie liegen im großen und ganzen bei der Elektrowärmeverwertung zwischen 50 und 90 %. Eine Ausnahme davon macht die Lichtbogenschweißung mit ihrem außerordentlich geringen Wärmewirkungsgrad zwischen 5 und 10 %. Gerade dies Beispiel beweist, daß die Strom- und Wärmewirtschaftlichkeit von Fall zu Fall eine sehr verschiedene Rolle spielt, sonst hätte dies Schweißverfahren keine so überragende Bedeutung gewonnen.

Die Verlustquellen eines Elektroofens ergeben sich einmal aus den baulichen Gegebenheiten, sodann aus der Betriebsführung. Über die Wärmeverluste, welche die Speicherwärme und der Leerwert des Ofens mit sich bringen, ist im Kap. II B bereits einiges gesagt worden. Um sie zu verringern, müßte man das tote Gewicht des Ofens und die spezifische Wärme seiner Baustoffe herabsetzen und andererseits Isolierstoffe mit schlechtester Wärmeleitfähigkeit wählen. Nicht immer sind beide Forderungen miteinander vereinbar. Isolierpulver haben die geringste Wärmeleitzahl, sind aber nicht tragend und können nur bei selbsttragenden Heizkörpern gut ausgenutzt werden. Auch die Ofengröße ist maßgebend für die Wirtschaftlichkeit. Im allgemeinen ist der Leerwert bei großen Öfen günstiger als bei kleinen (er liegt zwischen 8 und 30 % des Anschlußwertes), andrerseits sind Öfen, die nicht immer räumlich voll ausgenutzt werden, weil man sie zur Er-

ledigung einer Spitzenleistung bemessen hat, unwirtschaftlich. Auch die Betriebsführung hat starken Einfluß auf die Wärmeausnutzung. Selbstverständlich fallen im Dauerbetrieb die Wärmespeicherungsverluste nicht so ins Gewicht wie beim absatzweisen Ofenbetrieb, bei dem auch noch Verluste für kurzzeitiges Leergehen in Frage kommen. Auch die Verluste, die durch unsachgemäßes Beschicken und Entnehmen an den Öffnungen der Glüh- und Schmelzöfen entstehen, kann die Betriebsführung vermindern. Weiter kann man dadurch, daß man immer für vollen Einsatz sorgt oder etwa günstige Nachtstromtarife ausnutzt, die Wirtschaftlichkeit im Betriebe heben. Da die meisten industriellen Strompreistarife so angelegt sind, daß der mittlere Strompreis dann am geringsten ausfällt, wenn eine bestimmte Leistungshöhe möglichst lange gleichmäßig beansprucht wird, so wird man sich beim Anfahren der Öfen zu überlegen haben, ob man mit hoher Leistung kurzzeitig aufheizen oder dazu bei kleinerer Leistung längere Zeit aufwenden will. Außer den Strompreisen spielen hierbei noch Lieferzeiten und Wärmeverluste mit. Oft setzt die Dauerbelastung einer großen Ofenanlage die Gesamtstrompreise eines Unternehmens durch die höhere Benutzungsdauer herab. Daß ein kostspieliges Elektrowärmegerät bei langdauernder Ausnutzung und großem Ausbringen das Erzeugnis mit weniger Kapitalkosten belastet als bei kurzzeitigem, oft unterbrochenem Betrieb, ist einleuchtend. Betriebsmann, Erbauer der Elektrowärmegeräte und Elektrizitätswerke müssen bei allen diesen Fragen gebührend zu Worte kommen.

Preise für Elektrowärmegeräte und Kosten für die mit ihrer Hilfe hergestellten Erzeugnisse anzugeben, darf im Rahmen dieses Werkstattbüchleins nicht erwartet werden, desgl. keine Vergleichsrechnung mit anderen Warmbehandlungen in der Eisen- und Metallindustrie. Auch die oft gestellte Frage, bei welchen Strompreisen die Elektrowärme mit anderen Verfahren günstig in Wettbewerb treten kann, könnte hier nicht eindeutig beantwortet werden. Zu verschieden sind die Voraussetzungen für die einzelnen Kostenstellen. Es möge die Angabe genügen, daß die Elektrowärmeverwertung wegen ihrer gesamten Vorteile unaufhaltsam im Vorrücken ist.