

# ELEKTRISCHE SCHMELZÖFEN

VON

**DR. RUDOLF TAUSSIG**

BERATENDER INGENIEUR-CHEMIKER

MIT 214 TEXTABBILDUNGEN



WIEN  
VERLAG VON JULIUS SPRINGER  
1933

ISBN-13: 978-3-7091-5671-1      e-ISBN-13: 978-3-7091-5725-1  
DOI: 10.1007/978-3-7091-5725-1

Alle Rechte, insbesondere das  
der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Copyright 1933 by Julius Springer in Vienna.  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1933

## Vorwort.

Die Literatur gibt kein richtiges Bild von dem mächtigen technischen Fortschritt und der wachsenden Bedeutung der elektrischen Schmelzöfen während des letzten Jahrzehnts. Vor allem fehlt ein Buch, das sich mit dem modernen Werkzeug selbst, namentlich mit dem großen Elektrodenofen beschäftigt. Das vorliegende Buch versucht diese Lücke auszufüllen.

Die Technologie der Elektroöfen erfordert Kenntnisse in Chemie, Elektrotechnik und Maschinenbau, daher wurde in den ersten zwei Abschnitten eine kurze, technisch brauchbare Einführung in die thermochemischen und elektrotechnischen Grundlagen gegeben. Im dritten Abschnitt sind die Bauarten des elektrischen Ofens behandelt. Hier wird auch an Hand eines reichhaltigen, dem Lehrzweck entsprechend ausgeführten Abbildungsmaterials auf Einzelheiten konstruktiver Natur eingegangen. Phantastische Patentzeichnungen und nichtssagende Katalogbilder genügen hierfür ebensowenig wie nur Verkleinerungen technischer Pläne, auf denen Unwesentliches dem Lernenden den Überblick erschwert. Durch Umzeichnung derartiger Pläne, wobei Unnötiges weggelassen wurde, entstanden viele der vorliegenden Abbildungen. Sie wurden durch einige besonders anschaulich wirkende, axionometrische Konstruktionen ergänzt.

Die Patentliteratur kommt im Elektroofenbau nicht so zur Geltung wie in anderen modernen Industriezweigen. Viele der wertvollsten Neuerungen wurden hier zwecks Geheimhaltung gar nicht zum Patent angemeldet, andere haben nur mangelhaften Patentschutz genossen. Dagegen findet man minderwertige oder sogar technisch widersinnige Angaben in Patentschriften niedergelegt. Einige von ihnen sind in die Fachliteratur geraten und führen seit Jahrzehnten die Leser irre. Aus diesen Gründen wurde von der bequemeren Besprechung an Hand der Patentschriften Abstand genommen.

Da in Fachwerken (wie z. B. V. Paschkis, Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung, oder I. Bronn, Der elektrische Ofen im Dienste der keramischen Gewerbe und der Glasindustrie, schließlich H. Pauling, Elektrische Stickstoffbindung) die zugehörigen Elektroöfen behandelt sind, beschränkt sich das vorliegende Buch im Sinne der eingangs gestellten Aufgabe auf die elektrischen Schmelzöfen.

Im Rahmen des vorliegenden Buches fehlt aber auch der Raum für die ausführliche Behandlung des Chemismus der Ofenreaktionen und der betreffenden Industrien. Dies geschieht kurz in den Werken über technische Elektrochemie, ausführlich in den Einzeldarstellungen, wie: Sisco-Kriz, Das Elektrostahlverfahren, ferner W. Pick und W. Conrad, Die Herstellung von hochprozentigem Ferrosilizium im elektrischen Ofen, oder R. Taussig, Die Industrie des Kalziumkarbides usw.

Beim Zustandekommen des vorliegenden Buches wurde der Verfasser von Fachgenossen und Firmen durch wertvolle Angaben und Abbildungen zum Teil aus der allerletzten Zeit unterstützt. Er dankt allen, ebenso auch den Herren Ing. Hugo Nasty für die Bearbeitung des elektrotechnischen Teiles, Dr.-Ing. W. Fischer für die Bearbeitung seines Spezialgebietes des Hochfrequenzofens sowie Dr. O. Gamber und L. Jensen. Der Verlagsbuchhandlung gebührt herzlicher Dank für die schöne Ausstattung, bei der mancher nicht leicht erfüllbare Wunsch des Verfassers in entgegenkommender Weise berücksichtigt wurde.

Wien, im Mai 1933.

**Der Verfasser.**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung. . . . .	1
<b>Elektrothermische Grundlagen.</b>	
<b>I. Physikalische Wärmeberechnungen . . . . .</b>	<b>4</b>
A. Spezifische Wärmen fester Körper . . . . .	4
a) Handhabung der Tabellenwerte . . . . .	4
b) Berechnung fehlender Daten . . . . .	6
B. Spezifische Wärmen geschmolzener Körper . . . . .	7
C. Spezifische Wärmen vergaster Körper. . . . .	7
a) Einatomige Dämpfe . . . . .	7
b) Mehratomige Dämpfe . . . . .	8
D. Schmelzwärmen . . . . .	8
E. Verdampfungswärmen . . . . .	9
F. Gesamtwärmeaufwand . . . . .	9
a) Berechnung aus spezifischen und latenten Wärmen . . . . .	9
b) Berechnung aus Schmelz- und Siedetemperatur der Metalle . . . . .	10
<b>II. Chemische Wärmeberechnungen (Wärmetönungen). . . . .</b>	<b>10</b>
A. Umwandlungswärmen der Elemente . . . . .	10
B. Wärmetönungen der Verbindungen . . . . .	11
C. Berechnung der bei einer Reaktion theoretisch möglichen Temperatur . . . . .	12
<b>Die Schlacken.</b>	
<b>I. Schmelzfähigkeit und Viskosität . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>II. Schlackenindex . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>Berechnung der Chargen.</b>	
A. Chargenberechnung für die Erzeugung von 75% FeSi ohne Rücksicht auf die Verunreinigungen der Rohstoffe . . . . .	21
B. Chargenberechnung für die Erzeugung von 75% FeSi unter Berücksichtigung der Schlackenbildung . . . . .	23
C. Chargenberechnung für die Erzeugung von 50% FeSi unter Berücksichtigung der Schlackenbildung . . . . .	26
D. Roheisenerzeugung unter Schlacke von vorgeschriebener Zusammensetzung . . . . .	27
<b>Energieausnutzung.</b>	
A. Berechnungsbeispiel des Material- und Energieaufwandes für die Erzeugung von künstlichem Korund . . . . .	29
B. Vorberechnung des effektiven Energieverbrauches . . . . .	32
<b>Die Wärmeverluste im elektrischen Ofen.</b>	
<b>I. Theorie . . . . .</b>	<b>33</b>
A. Innere Wärmeleitung . . . . .	33
a) Spezifische Leitfähigkeit . . . . .	33
b) Leitungsquerschnitt . . . . .	34

	Seite
B. Wärmeabgabe nach außen . . . . .	35
a) Wärmeabgabe durch Mitteilung (Konvektion) . . . . .	35
1. Übergangswiderstände . . . . .	35
2. Wärmeabgabe an ruhende Luft . . . . .	35
3. Wärmeabgabe an bewegte Luft . . . . .	37
b) Wärmestrahlung . . . . .	37
<b>II. Praktische Anwendung der Theorie der Wärmeabgaben . . . . .</b>	<b>38</b>
A. Bestimmung der Wärmeverluste durch die Ofenwände . . . . .	38
a) Versuchsöfen . . . . .	38
b) Technische Öfen . . . . .	38
1. Berechnung des Wärmeflusses . . . . .	39
$\alpha$ ) Berechnung des ideellen Querschnittes . . . . .	39
$\beta$ ) Leitvermögen des Mauerungsmateriales . . . . .	40
$\gamma$ ) Gesamter Wärmefluß (Endresultat) . . . . .	41
2. Berechnung der Konvektion und Strahlung . . . . .	41
$\alpha$ ) Bei meßbaren Oberflächentemperaturen . . . . .	41
$\beta$ ) Bei nichtmeßbaren Oberflächentemperaturen . . . . .	45
B. Wärmeverluste durch die Elektroden . . . . .	46
<b>III. Maßnahmen zur Verminderung der Wärmeverluste . . . . .</b>	<b>47</b>
A. Wärmeersparnis durch Schutzhüllen . . . . .	47
B. Wärmeersparnis durch Wandverstärkung . . . . .	49
C. Wärmeersparnis durch Verringerung der Wärmestrahlung (Einfluß der Anstrichfarbe) . . . . .	52
<b>Elektrotechnische Grundlagen.</b>	
<b>I. Grundbegriffe für den Energieumsatz im Elektroofen . . . . .</b>	<b>56</b>
A. Elektrothermische Berechnung der verbrauchten Wärmemenge . . . . .	56
B. Widerstände in Gleich- und Wechselstromanlagen . . . . .	56
C. Phasenverschiebung . . . . .	58
D. Wirk- und Scheinwiderstand einer Ofenanlage . . . . .	59
E. Darstellung der charakteristischen Größen der Mehrphasenströme . . . . .	60
<b>II. Umformung der Spannung . . . . .</b>	<b>62</b>
A. Zweck der Umspannung . . . . .	62
B. Bemessung des Transformators . . . . .	64
C. Mantel- und Kerntransformatoren . . . . .	67
D. Kühlung des Transformators . . . . .	67
E. Beschreibung einiger Ofentransformatoren . . . . .	69
F. Wartung . . . . .	73
<b>III. Richtlinien für den Entwurf der Stromzuleitung . . . . .</b>	<b>74</b>
A. Gleichstrom, Wechselstrom, Drehstrom . . . . .	74
B. Selbstinduktion, gegenseitige Induktion, Skineneffekt . . . . .	75
C. Behebung der unerwünschten Beeinflussungen . . . . .	76
D. Bedeutung des Leistungsfaktors . . . . .	76
E. Widerstände in verschiedenen Abschnitten der Leitung . . . . .	78
<b>IV. Die technische Anwendung der theoretischen Erwägungen . . . . .</b>	<b>79</b>
A. Leitungen . . . . .	79
B. Transformatorschaltungen . . . . .	81
C. Anordnung der Elektroden im Ofen . . . . .	84

	Seite
<b>Bauarten der elektrischen Öfen.</b>	
<b>I. Elektrodenöfen</b> . . . . .	89
A. Reine Widerstandsöfen . . . . .	89
a) Direkte Erhitzung . . . . .	89
b) Indirekte Erhitzung . . . . .	90
B. Reine Lichtbogenöfen . . . . .	91
C. Kombinierte Widerstand-Lichtbogenöfen . . . . .	93
Herdform und Ofenkörper . . . . .	97
Elektroden . . . . .	110
A. Amorphe Kohlenelektroden . . . . .	111
a) Stückelektroden und Formkohlen . . . . .	113
b) Dauerelektroden . . . . .	113
c) Selbstbackende Dauerelektroden . . . . .	120
d) Kombination zwischen angestückelten und selbstbackenden Dauerelektroden . . . . .	122
B. Graphitelektroden . . . . .	125
Elektrodenfassungen und Tragkonstruktionen . . . . .	125
A. Zangenfassungen . . . . .	126
B. Kopffassungen . . . . .	138
C. Ringfassungen . . . . .	140
Elektrodenbewegung und Regulierung . . . . .	155
Baumaterialien . . . . .	165
A. Feuerfeste Stoffe . . . . .	165
B. Isolierstoffe . . . . .	168
Bauarten von Elektrodenöfen . . . . .	169
A. Metallurgische Öfen . . . . .	169
a) Reine Lichtbogenöfen . . . . .	169
b) Kombinierte Widerstand-Lichtbogenöfen . . . . .	171
B. Öfen der chemischen Industrie . . . . .	177
a) Offene Öfen . . . . .	178
b) Gedeckte Öfen . . . . .	193
c) Geschlossene Öfen . . . . .	195
<b>II. Induktionsöfen</b> . . . . .	203
A. Induktionsöfen mit Eisenkern (Niederfrequenz-Induktionsöfen) . . . . .	203
a) Theorie . . . . .	203
b) Elektrodynamische Erscheinungen . . . . .	207
c) Energieaufnahme und Phasenverschiebung . . . . .	212
d) Bauarten der Induktionsöfen mit Eisenkern . . . . .	213
e) Vor- und Nachteile der Induktionsöfen mit Eisenkern . . . . .	217
B. Induktionsöfen ohne Eisenkern (Hochfrequenz-Induktionsöfen) . . . . .	218
a) Geschichtliches . . . . .	220
b) Theoretische Betrachtungen . . . . .	220
c) Aufbau des Ofens . . . . .	225
d) Elektrische Ausrüstung . . . . .	227
e) Verwendung . . . . .	229
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	233

## Einleitung.

In der Entwicklung der Elektrothermie können wir drei Phasen unterscheiden. Die erste Phase begann mit den Entdeckungen Galvanis und Voltas und der bald folgenden Einführung elektrischer Energie als neues Rüstzeug in das chemische Laboratorium. Diese wunderbare Kraft schien geradezu die Erfüllung der vom „Stein der Weisen“ erhofften Zauberwirkung zu bringen, aber mangels Beschaffung in genügend großen Mengen, kam sie für gewerbliche Zwecke noch nicht in Betracht.

Erst die großen elektrotechnischen Errungenschaften der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts beseitigten dieses Hindernis und schufen die Grundlage für die zweite Phase, in welcher der Chemiker endlich seine in manchen Fällen mehr als ein halbes Jahrhundert im Laboratorium vorbereiteten Prozesse in den technischen Maßstab übersetzen konnte. Die elektrische Energie erfüllte — sofern man sich nur ihren Eigenheiten anpaßte — auch im Großbetriebe die in sie gesetzten Erwartungen. Ängstlich hütete man aber die neuen, meist sehr einfachen Einrichtungen als große Geheimnisse. Ihr Urheber, der Chemiker, baute deshalb seine Apparate tunlichst selbst. Dieses Vorgehen hemmte vielfach den Fortschritt und die apparative Entwicklung. Die Einrichtung blieb zumeist eine bloße Vergrößerung chemischer Laboratoriumsapparate. Bekanntlich ist der Chemiker gewohnt, in seinem Laboratorium neue Apparate mit Verwendung vorhandener Einrichtungsstücke und primitivsten Hilfsmitteln zusammenzustellen. Einfachheit und Billigkeit gelten hier geradezu als Maßstab für Genialität und praktische Verwendbarkeit. Bei der Durchführung der interessanten Versuche helfen eigener Eifer und Geschicklichkeit.

Bei neuen, konkurrenzlosen Verfahren kommt es in erster Linie auf die schnelle gewerbsmäßige Erzeugung an, da gerade anfangs die Aussicht auf ansehnliche Gewinne besteht. Die Herstellungskosten fallen weniger in Betracht. Erst später, im Zwange des allgemeinen Wettbewerbes, müssen sie durch erhöhte Leistungsfähigkeit der ganzen Anlage, namentlich durch möglichste Vergrößerung der Ofeneinheiten, verbilligt werden. Jetzt genügt selbst die aufopferndste Arbeitsfreude und Geschicklichkeit des einzelnen nicht mehr. War in der zweiten Phase der Entwicklung der Ingenieur kaum mehr als eine Hilfskraft des Chemikers, so wurde er in der dritten ein wichtiger Partner, der auch die theoretischen Grundlagen und den Chemismus des Betriebes vollkommen beherrschen mußte. Nur auf diese Weise gelang es, den ehemals primitiven chemischen Apparat in eine Maschine umzuwandeln, die, vom Arbeiter gesteuert, fast alle Verrichtungen selbsttätig durchführt.

Der elektrische Ofen dient zur Umsetzung elektrischer Energie in Wärme. Ursprünglich kannte man nur den Elektrodenofen. Er bestand (Abb. 1) aus einem Kohletiegel *a*, der die eine, während ein vertikaler Kohlenstab *b* die andere Elektrode bildete (Anordnung von Werner Siemens). Kohlenstäbe von größerem Durchmesser kannte man zunächst nicht. Für die Steigerung der Ofenleistung brauchte man größere Elek-

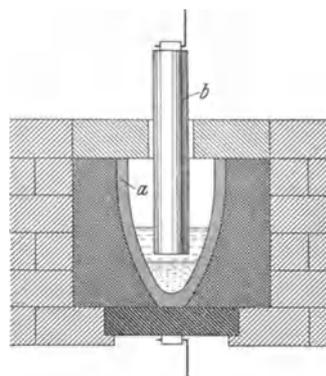


Abb. 1. Tiegelofen mit einfacher Stabelektrode.

troden, die man durch Vereinigung einzelner Kohlenplatten  $a$  (Abb. 2) zu einem Paket von rechteckigem Querschnitt herstellte. Nachdem der Franzose Bertolus den Drehstromofen mit bloß drei Elektroden eingeführt hatte, entwickelten sich die kleineren zumeist für metallurgische Zwecke verwendeten Öfen schnell und wurden von Spezialfirmen bald als Typen geliefert. Sie bewähren sich in der Stahlerzeugung sodann für Messing-, Bronze- u. dgl. Viel interessanter gestaltete sich die Entwicklung der großen, chemischen Öfen, weil hier schwierigere Probleme zu lösen waren. Den großen Drehstromofen schuf Helfenstein (s. Abb. S. 101). Er ordnete die drei großen, im Grundriß rechteckigen Elektrodenpakete nebeneinander in einem ebenfalls rechteckigen Ofenschacht an. Er erleichterte durch Fernhaltung des Reaktionsherdes mit seiner extremen Temperatur den Schutz der Ofenwand und damit Erhöhung der Lebensdauer des Ofenkörpers. Mit zunehmender Belastung des Drehstromofens lernte man die Beeinträchtigung der Ofenleistung durch induktive Widerstände kennen und ersann Mittel zu ihrer Behebung. Man hatte in dieser Zeit den technischen Elektroofen von 100—200 kW

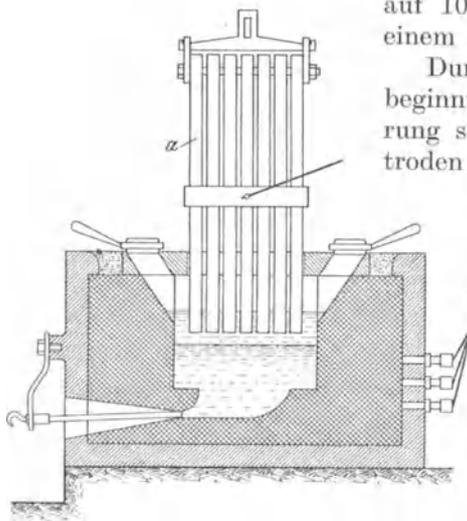


Abb. 2. Héroult-Ofen mit zusammengesetzter Elektrode.

auf 10000—20000 kW erweitert und begnügte sich mit einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,8$ .

Durch Einführung der Söderbergschen Dauerelektrode beginnt ein neuer Zeitabschnitt. Die wesentliche Verbesserung scheint weniger in der Selbsterzeugung der Elektroden zu liegen, als vielmehr in der Einführung der großen runden Elektrode mit ihren großen Vorteilen, z.B. Ermöglichung des Dauerbetriebes (durch Entfall des Elektrodenwechsels), ferner vollständige Ausnutzung der Elektroden (ohne Elektrodenreste), weiter wesentlichen Verkürzung der flexiblen Stromzuführungen, des Hauptfaktors für die Phasenverschiebung. Aber wie bei vielen anderen Neuerungen, verkannte man anfangs auch wesentliche Vorzüge der großen runden Elektrode. Beispielsweise ordnete man sie, genau wie die rechteckigen Pakete, zunächst nebeneinander an, anstatt wie heute im gleichseitigen Dreieck, ihrer natürlichen Stellung, und dadurch Lösung des

Problems der gleichmäßigen Belastung der Phasen. Außerdem gestatten die runden Elektroden auf Grund naheliegender Überlegungen eine höhere Belastung. In Ansehung der großen Vorteile der runden Elektroden werden sie auch von den Elektrodenfabriken erzeugt, und heute gibt es eine Anzahl gut bewährter Rutschfassungen (Siemens-Plania, Siemens-Hütten, Miguet). Wohl hat man verstanden, durch zweckentsprechende Anordnungen, wie Elektrodenregulierung, sodann verschiedene sinnreiche Arten der automatischen Beschickung usw. den Betrieb des Drehstromofens zu erleichtern. Seine höchste Vollkommenheit erreicht aber der Elektroofen erst durch die Rückkehr zu seiner prinzipiell einfachsten Type mit einer einzigen vertikalen Elektrode. Diese wird in bezug auf Elektrodenregulierung, Beschickung und Stochen selbstwirkend ausgebildet und weist sowohl in wirtschaftlicher Beziehung hinsichtlich Energie-, Material- und Lohnkosten als auch in hygienischer Beziehung durch Vermeidung der den großen Öfen anhaftenden Belästigungen des Bedienungspersonales durch Hitze und Staubplage, die günstigsten Ergebnisse auf.

Um die Jahrhundertwende entstand der elektrodenlose Induktionsofen, der aber erst als „Induktionsofen ohne Eisenkern“ (Hochfrequenzofen) als Ersatz des Tiegelofens weite Verbreitung findet.

Nach seiner Verwendung kann man zwei Arten des Elektroofens unterscheiden:

1. Öfen, in denen die Heizwirkung des Stromes ausschließlich oder doch hauptsächlich

für Schmelzzwecke verbraucht wird. Hierher gehört vornehmlich das Schmelzen und Raffinieren der Metalle, und wir bezeichnen daher diese Gruppe von Öfen als metallurgische Öfen.

2. Öfen, in welchen auch chemische Prozesse vor sich gehen, und bei denen die dem Ofen zugeführte Wärme zum großen Teil zur Durchführung chemischer Reaktionen verwendet wird, bezeichnen wir als chemische Öfen. So ist beispielsweise im Karbidofen der gesamte Wärmebedarf je Kilomol (64 kg):

CaC <sub>2</sub> (100%): Reaktionswärme . . . . .	109750 kcal
Erwärmung von CaO . . . . .	34888 „
Erwärmung von C . . . . .	31680 „
	176318 kcal

Dementsprechend ist der Verbrauch an elektrischer Energie für die metallurgischen Öfen geringer und beträgt z. B. für

Stahlraffination mit flüssigem Einsatz . . . . .	250 kWh/t
Stahlraffination mit festem Einsatz . . . . .	700 kWh/t

dagegen für die chemischen Öfen erheblich größer. Der Verbrauch beträgt für die Erzeugung von

Karbid . . . . .	3000 kWh/t
Ferrosilizium (45% Si) . . . . .	6000 kWh/t
Ferrosilizium (75% Si) . . . . .	12000 kWh/t

Die Öfen für die chemische Industrie müssen daher für die Aufnahme großer Strommengen gebaut werden. Schon wegen der hierzu erforderlichen elektrischen Ausrüstung verursachen sie große Anlagekosten und arbeiten nur mit sehr billigem Strom wirtschaftlich.

Die Namen der Männer, welche mit der Entwicklung des elektrischen Ofens eng verbunden sind, werden an entsprechender Stelle erwähnt. Hier seien nur genannt: Henry Moisan wegen seiner klassischen Untersuchungen über die Reaktionen und Erzeugnisse im elektrischen Ofen, ferner Héroult, der Schöpfer der ältesten technisch brauchbaren und noch immer verwendeten Ofentype, und schließlich T. L. Wilson, der erste Erzeuger technischen Karbides, weil an diesem einfachsten Schmelzvorgang der Elektrofen zu seiner heutigen Vollkommenheit entwickelt wurde.

# Elektrothermische Grundlagen.

## I. Physikalische Wärmeberechnungen.

Wärmezufuhr oder Wärmeentzug haben in Körpern entweder Temperaturänderungen zur Folge oder Änderungen physikalischer oder chemischer Zustände. Die Wärmebewegung verursacht daher

1. Temperaturänderungen,
2. Änderungen des Aggregatzustandes,
3. Einflüsse auf chemische Reaktionen.

### A. Spezifische Wärmen fester Körper.

#### a) Handhabung der Tabellenwerte.

Gleiche Wärmezufuhr oder -abfuhr bewirkt bei gleichen Gewichtsmengen verschiedener Körper verschiedene Temperaturerhöhungen. Oder: um gleiche Gewichtsmengen verschiedener Körper um gleichviel Grade zu erwärmen oder abzukühlen, bedarf es je nach der Natur des Körpers verschieden großer Wärmemengen.

Jene Wärmemenge, welche nötig ist, um die Gewichtseinheit eines Körpers von der Temperatur  $t^\circ$  auf die Temperatur  $(t + 1)^\circ$  zu erhöhen, nennt man die wahre spezifische Wärme bei der Temperatur  $t$ .

Die wahren spezifischen Wärmen gelten nur je für die bestimmte angegebene Temperatur<sup>1</sup>.

Der experimentellen Bestimmung sind nur die sog. mittleren spezifischen Wärmen über ein Temperaturintervall zugänglich, indem die Änderung des Wärmeinhaltes kalorimetrisch gemessen wird, während sich die Temperatur des Körpers von  $t_2$  auf  $t_1$  ändert. Für Näherungsrechnungen nimmt man die mittlere spezifische Wärme innerhalb des Intervalles als konstant an und macht dabei einen um so kleineren Fehler, je enger das Temperaturintervall bei der Beobachtung gewählt wurde, oder man bedient sich empirischer Interpolationsformeln.

Die zur Erwärmung der Masseneinheit eines Körpers von der Temperatur  $t$  auf  $t'$  nötige Wärmemenge  $Q_{t'}$  sei durch die folgende empirische, rechnerisch handsame Formel wiedergegeben:

$$Q_{t'} = \alpha (t' - t) + \beta (t'^2 - t^2),$$

worin  $\alpha$  und  $\beta$  der Natur des Körpers eigene Konstanten sind.

Die mittlere spezifische Wärme innerhalb des in Rede stehenden Temperaturintervalles ergibt sich, indem obige Gleichung durch das Temperaturintervall  $(t' - t)$  dividiert wird als

$$c_{t'} = \frac{Q}{t' - t} = \alpha \frac{(t' - t)}{t' - t} + \beta \frac{t'^2 - t^2}{t' - t}, \quad c_{t'} = \alpha + \beta (t' + t)$$

( $c_{t'}$  mittlere spezifische Wärme zwischen  $t$  und  $t'$ ).

Man achte hier und im folgenden auf die Stellung der Temperaturindizes bei  $c$ , um eine Verwechslung der Angaben zu vermeiden.

<sup>1</sup> Selbst die vorstehende Definition ist nicht streng richtig, denn während der Temperaturerhöhung um einen Grad hat sich die spezifische Wärme schon geändert. Bei Einhaltung aller Genauigkeit müßte die wahre spezifische Wärme als Differentialquotient der Wärme nach der Temperatur definiert werden. Sie ist nicht direkt bestimmbar, sondern wird aus den Versuchsdaten über ein Temperaturintervall berechnet.

Erstreckt sich der Geltungsbereich von  $0^\circ$  der Celsius-Skala an, so wird  $t = 0$ , somit ist die mittlere spezifische Wärme

$$C_0^t = \alpha + \beta t \quad (\text{mittlere spezifische Wärme zwischen } 0^\circ \text{ und } t^\circ).$$

Für die wahren spezifischen Wärmen, die bei einem einzigen Temperaturpunkt herrschen, wird  $t'$  mit  $t$  identisch, d. h. das Temperaturintervall ist unendlich klein. Es ergibt sich somit die wahre spezifische Wärme  $C_t$  bei der Temperatur  $t$  rechnerisch zu

$$C_t = \alpha + \beta(t + t) = \alpha + 2\beta t \quad (\text{wahre spezifische Wärme bei } t^\circ).$$

(Der häufig anzutreffende Bezug wahrer spezifischer Wärmen auf den Nullpunkt der Celsius-Skala wird durch  $C_0$  angedeutet.)

Von allen festen und flüssigen Körpern hat (flüssiges) Wasser die größte spezifische Wärme, seine wahre spezifische Wärme bei  $15^\circ\text{C}$  gilt jetzt allgemein als Einheit, ihr Wert heißt eine Kalorie, „kcal“ bezeichnet, wenn 1 kg als Gewichtseinheit angenommen wird, „cal“ bezieht sich auf je 1 g. (Kilogrammkalorie, Grammkalorie).

Somit sind die spezifischen Wärmen aller festen und flüssigen Körper kleiner als 1. Der Koeffizient  $\alpha$  beträgt meist nur wenige Zehntel,  $\beta$  ist erfahrungsgemäß viel kleiner, (d. i.  $\frac{2\alpha}{10000}$  etwa 0,02% von  $\alpha$ ). Von dieser empirischen Verhältniszahl wird später noch oft Gebrauch gemacht werden.

Gasförmige Körper weichen mit ihren spezifischen Wärmen von den obigen Regeln oft weit ab. So hat Wasserstoff als Gas die spezifische Wärme 3,4.

In der Literatur und den Tabellen der Sammelwerke werden häufig die Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  sowie ihr Geltungsbereich angegeben. Daraus lassen sich mit Hilfe der Definitionsgleichungen  $C_t'$ ,  $C_0^t$  und  $C_t$  berechnen.

Angaben, die sich auf einen engen, mäßig hohen Temperaturbereich beziehen und nur eine einzige Zahl anführen, sind für andere Bereiche nur zu Annäherungsrechnungen brauchbar.

Fehlende Angaben über  $\alpha$  und  $\beta$  können durch Rechnung nach den Definitionsgleichungen aus je zwei Angaben über mittlere oder wahre spezifische Wärmen bei verschiedenen Temperaturen berechnet werden; fehlt die Angabe der Konstanten  $\beta$ , dann setze man  $\beta = \frac{2}{10000} \alpha$ .

Beispiel: Zwei wahre spezifische Wärmen sind bekannt,  $\alpha$  und  $\beta$  und die mittlere spezifische Wärme zwischen  $0^\circ$  und  $800^\circ$  zu berechnen.

Für Si ist die wahre spezifische Wärme bei  $100^\circ$   $C_{100} = 0,199$ , bei  $1000^\circ$   $C_{1000} = 0,286$ .

1. Somit ist  $0,199 = \alpha + 2\beta \cdot 100$ ,  $0,286 = \alpha + 2\beta \cdot 1000$   
durch Auflösung der Gleichung nach  $\alpha$  und  $\beta$  als Unbekannte ergibt sich

$$\alpha = 0,190 \qquad \beta = 0,000048.$$

Daraus die mittlere spezifische Wärme zwischen  $0^\circ$  und  $800^\circ$

$$\begin{aligned} C_0^{800} &= \alpha + \beta \cdot t \\ &= 0,190 + 0,000048 \cdot 800 \\ &= 0,190 + 0,0384 = 0,228. \end{aligned}$$

2. Dieselbe spezifische Wärme zwischen  $0^\circ$  und  $800^\circ$  ließe sich auch aus der Zahl für  $C_{100} = 0,199$  berechnen, wenn kein zweiter höherer Wert in Tabellen zur Verfügung stünde. Wie bereits erwähnt, ist  $\beta$  etwa  $\frac{2}{10000}$  von  $\alpha$ .

In der Definitionsgleichung der wahren spezifischen Wärme  $\alpha + 2\beta t = C_t$  ist

$$\beta = \frac{2\alpha}{10000}, \quad C_t = 0,199, \quad t = 100.$$

Somit

$$\begin{aligned} \alpha + \frac{2\alpha \cdot 100}{10000} &= 0,199; \text{ woraus } 102\alpha = 19,9 \\ \alpha &= 0,1951 \quad \beta = 0,000039 \end{aligned}$$

und schließlich:  $C_0^{800} = 0,1951 + 0,000039 \cdot 800 = 0,226$ .

Die Übereinstimmung der beiden auf verschiedenem Wege erhaltenen Werte für  $C_0^{800}$  ist völlig befriedigend, die Unsicherheit im zweiten Falle beträgt nur 0,8%.

### b) Berechnung fehlender Daten.

Wie schon erwähnt, versagen die Tabellen häufig vollkommen. Hier bietet die Regel von Dulong und Petit, nach welcher die Atomwärme der festen Elemente (mit bekannten Ausnahmen) bei gewöhnlicher Temperatur 6,4 beträgt, einen Anhaltspunkt zur Berechnung.

Atomwärme ( $C_a$ ) nennt man bekanntlich das Produkt aus der spezifischen Wärme  $C_0$  und dem Atomgewicht  $A$ .

Es besteht somit die Beziehung:  $C_a = C_0 \cdot A = 6,4$ ,  
somit ist die gesuchte spezifische Wärme  $C_0$

$$C_0 = \frac{6,4}{A}.$$

Beispielsweise für Nickel:  $A = 58,5$

$$C_0 = \frac{6,4}{58,5} = 0,109 \text{ (direkt bestimmt } 0,108).$$

Dies ist zugleich auch der Wert von  $\alpha$ , und nach der erwähnten Regel ist dann

$$\beta = \frac{2}{10000} = \frac{0,218}{10000} = 0,0000218.$$

Jetzt kann die mittlere spezifische Wärme für andere Temperaturbereiche nach der Formel:

$$t = \alpha + \beta t$$

$$C_0 = 0,109 + 0,0000218 t$$

annähernd berechnet werden.

Die experimentelle Ermittlung lieferte die Gleichung  $C_0^t = 0,108 + 0,0000223 t$  in vorzüglicher Übereinstimmung.

Die Dulong-Petitsche Regel versagt bei den Metalloiden. Am ehesten entsprechen ihr noch die Metalloide mit höheren Atomgewichten und niedrigen Schmelzpunkten.

Die wichtigsten Abweichungen der Atomwärmern, bezogen auf den festen Zustand, sind in folgender Tabelle ersichtlich. (Bei  $0^\circ \text{C}$ )

H = 2,3	O = 3,6	N = 5,5	C = 1,8
F = 5,0	S = 5,4	P = 5,4	Si = 4,0
Cl = 6,0			B = 2,7

Bei hohen Temperaturen nähern sich auch die irregulären Atomwärmern dem Werte 6.

Die Dulong-Petitsche Regel läßt sich nicht nur auf die Elemente, sondern auch auf feste chemische Verbindungen anwenden, weil die Atomwärme in festen Verbindungen bei Metallen ebenfalls 6,4 beträgt und für die irregulären Elemente jene Werte gelten, welche in der obigen Tabelle verzeichnet sind. Die Molekularwärme ist also eine additive Zahl, die Summe der Atomwärmern aller Atome. Tritt ein Atom in der Verbindung mehrmals auf, wie z. B. O in  $\text{CaSO}_4$ , so ist natürlich die Atomwärme für Sauerstoff (in fester Form!) entsprechend mehrfach zu nehmen, im Beispiele des Gipses viermal.

	Atomwärme	Atomgewicht
Ca . . . . .	6,4	40
S . . . . .	5,4	32
4 O . . . . .	14,4 (= 4 × 3,6)	64
$C_0$ . . . . .	26,2	136

In obigem Rechnungsschema ergibt die linke Additionskolonne die Molekularwärme, die rechte das Molekulargewicht.

Demnach ist die spezifische Wärme  $C_0 = \alpha$  des Gipses gleich dem Quotienten:

$$\frac{\text{Molekularwärme}}{\text{Molekulargewicht}} = \alpha = \frac{26,2}{136} = 0,192;$$

nach der bekannten Regel ist dann  $\beta = 0,000384$ .

Die mittlere spezifische Wärme des entwässerten Gipses ist somit durch die Gleichung gegeben:  $C_0^t = 0,192 + 0,000384 t$ .

In vielen Fällen ist man genötigt, von prozentischen oder relativen Gewichtsangaben auszugehen. Dann berechnet man nach Dulong-Petit die spezifische Wärme jedes Bestandteiles, vervielfacht sie entsprechend dem gegebenen Gewichtsverhältnis und addiert.

Beispiel: Ein Schlackenrezept oder eine (gleiche) Schlackenanalyse (siehe nebenstehende Tabelle).

Zeilenweise  $C_0$  mit den Teilen bzw. Prozenten multipliziert, ergeben folgende Ad-ditionskolonnen bzw. Summen derselben:

	Rezept Teile	Analyse %	Spez. Wärme $C_0$
SiO <sub>2</sub> . . . . .	3,5	38,89	0,1835
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	1	11,11	0,1456
CaO . . . . .	3	33,33	0,1780
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	1,5	16,66	0,2081
	9	100	
SiO <sub>2</sub> . . . . .	0,6425	7,136	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,1456	1,617	
CaO . . . . .	0,5340	5,933	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	0,3121	3,468	
	16,34 (für 9 Teile)	18,154 (für 100 Teile)	

somit  $C_0 = 0,18155$  bzw.  $C_0 = 0,18154$  (für 1 Teil), da ferner

$$\beta = \frac{2 C_0}{10000} = 0,0000363,$$

ergibt sich die mittlere spezifische Wärme der Schlacke zu:  $C_0^t = 0,1815 + 0,0000363 t$ .

### B. Spezifische Wärmen geschmolzener Körper.

Die spezifischen Wärmen für geschmolzene Körper sind nur in seltenen Ausnahmefällen experimentell bestimmt worden; aber mit großer Wahrscheinlichkeit decken sie sich mit denen der festen Körper bei den Schmelztemperaturen und ändern sich dann nicht mehr wesentlich. Auf Grund dieser Annahmen ist es möglich, Näherungswerte zu er-rechnen.

Die spezifische Wärme des Aluminiumoxydes ist eine der genauest bekannten Größen. Sein Schmelzpunkt liegt bei 2050°.  $\alpha$  ist nach Richards 0,2081,  $\beta$  nach demselben Autor zu 0,0000876 bestimmt; daher ist seine wahre spezifische Wärme beim Schmelz-punkt  $C_{2050} = 0,2081 + 0,0001752 \cdot 2050 = 0,567$ . Und dieselbe Zahl wird dann für höhere Temperaturen des geschmolzenen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als konstant angenommen.

### C. Spezifische Wärmen vergaster Körper.

Bei den Gasen ist die spezifische Wärme vom Druck abhängig, so daß man ein  $C_p$  als spezifische Wärme bei konstantem Druck und ein  $C_v$  als spezifische Wärme bei kon-stantem Volumen zu unterscheiden hat. Zwischen beiden besteht die Beziehung  $C_p = C_v + \frac{R}{M}$ , worin  $R$  die Gaskonstante (1,98 cal, rund 2 cal) und  $M$  das Molekularge-wicht des Gases ist.

a) Einatomige Dämpfe.

Metalldämpfe sind einatomig. Für sie gelten in Ermangelung experimenteller Daten die Wärmen

	Konstante Volumina	Konstanter Druck
für das Mol . . . . .	$\frac{3 R}{2}$ (rund 3)	$\frac{5 R}{2}$ (rund 5)
für die Gewichtseinheit . . .	3 $A$	5 $A$
für die Volumeinheit . . . . .	$\frac{3}{22,4}$	$\frac{5}{22,4} = 0,223$ .

( $A$  bedeutet das Atomgewicht, das hier wegen der Einatomigkeit zugleich auch Molekulargewicht ist. 22,4 dm<sup>3</sup> ist das Molvolumen — hier gleich dem Atomvolumen — der Gase.)

Da in der technischen Elektrothermie meist bei Atmosphärendruck gearbeitet wird, sind die Wärmehzahlen für konstanten Druck hier die wichtigsten und meistgebrauchten.

Beispiel: Kalziumdampf (eiatomig) bei konstantem Druck:

Atomgewicht . . . . .	40
Atomwärme . . . . .	4,95, also annähernd 5
Spezifische Wärme je Gramm . . . . .	$\frac{5}{A \cdot c_a} = 0,125 \text{ cal}$
Spezifische Wärme je dm <sup>3</sup> . . . . .	$\frac{5}{22,4} = 0,223 \text{ cal.}$

#### b) Mehratomige Dämpfe.

Für mehratomige Gase (Atomzahl  $n$  im Molekül) erhöht sich die Molwärme bei konstantem Druck um  $n$ , sie ist also  $5 + n$ , daher gelten hier die nachstehenden Formeln für konstanten Druck:

Molwärme . . . . .	$5 + n$
Spezifische Wärme je Gramm . . . . .	$\frac{5 + n}{A \cdot n}$
Spezifische Wärme je dm <sup>3</sup> . . . . .	$\frac{5 + n}{22,4}$

### D. Schmelzwärmen.

Diejenige Wärmemenge, welche bei konstanter Temperatur die Änderung des Aggregatzustandes von fest in flüssig oder umgekehrt bewirkt, heißt Schmelzwärme. Sie kann auf die Gewichtseinheit, auf das Atomgewicht oder auf das Molgewicht bezogen werden.

Da in der Literatur nur wenig experimentell ermittelte Angaben über Schmelzwärmen zu finden sind, muß für elektrothermische Zwecke fast immer von schätzungsweisen Berechnungen Gebrauch gemacht werden.

Van't'Hoff fand, daß zwischen der kryoskopischen Konstante  $\kappa$  einer Flüssigkeit und ihrer Schmelzwärme  $L$ , bezogen auf 1 g derselben, die Beziehung

$$L = 0,01988 \frac{T^2}{\kappa} \doteq 0,02 \frac{T^2}{\kappa}$$

besteht, worin  $T$  die absolute Temperatur bedeutet.

Leider sind nur wenige kryoskopische Konstanten ermittelt, so daß diese bequeme Berechnungsweise wegen mangelnder Daten für die gedachten Zwecke wenig Nutzen schafft.

Beispiel: Silber: Atomgewicht 108, kryoskopische Konstante 1080, Schmelztemperatur 962°.

$$L = \frac{0,01988 (962 + 273)^2}{1080} = 28 \text{ cal je Gramm,}$$

experimentell 25 „ „ „ .

Eine andere annähernde Berechnungsweise von Crampton fußt allein auf der Kenntnis des Schmelzpunktes und lautet: Die Schmelzwärme ist annähernd gleich der 2,1fachen absoluten Schmelztemperatur, gebrochen durch das Atom bzw. Molekulargewicht. Für Silber

$$L = 2,1 \frac{962 + 273}{108} = 24 \text{ cal je Gramm.}$$

Die Schmelzwärmen von Verbindungen folgen keinem allgemeinen Gesetz.

Für Silikate gibt Vogt folgende empirische Regel: Die Wärmemenge, welche nötig wäre, 1 g des Silikates vom absoluten Nullpunkt bis zu seiner Schmelztemperatur zu erwärmen, ist gleich der 4,44fachen Schmelzwärme.

Für Anorthit ist die mittlere spezifische Wärme  $C_0^{1200} = 0,294$  und sein Schmelzpunkt 1200° = 1473° abs. (rund 1500°) bekannt. Die Wärmemenge zur Temperatursteigerung von 0° abs. bis 1500° abs. ist  $Q = 0,294 \cdot 1500 = 441$ , daraus

$$L = \frac{441}{4,44} = 99,32, \text{ rund } 100 \text{ cal je Gramm.}$$

## E. Verdampfungswärmen.

Die Verdampfungswärme ist jene Wärmemenge  $l$ , welche zur Überführung der Gewichtseinheit eines Körpers in gesättigtem Dampf bei seiner Siedetemperatur  $t$  verbraucht wird. Sinngemäß geändert, gilt diese Definition auch für das Grammol. und Grammatom.

Mangels experimentell ermittelter Angaben ist man auf die annähernde Berechnung angewiesen, wofür es eine Anzahl mehr oder weniger brauchbarer empirischer Formeln gibt. Sie gehen alle von der Siedetemperatur in absoluter Zählung aus, beziehen sich auf Grammatome bzw. Grammole. Um die spezifischen Werte zu finden, bedarf es dann noch der Division durch das entsprechende Atom- bzw. Molekulargewicht. Metaldämpfe sind durchwegs einatomig, während die Dämpfe der elementaren Metalloide mehratomig sind, aber mit steigender Temperatur und sinkendem Druck dissoziieren. Bei den schwer schmelzbaren Metalloiden, die zugleich hohe Siedetemperaturen aufweisen, kann man in der Elektrothermie der Hochtemperaturen Einatomigkeit annehmen. Darauf ist bei Benutzung der nachstehenden empirischen Formeln zur Berechnung der molekularen (atomaren) Verdampfungswärmen  $l_m$  Rücksicht zu nehmen.

1. Wartenbergs Formel  $l_m = 7,4 T \log T$  cal.
2. Grüneisens Formel  $l_m = T (7 \cdot \log T + 3)$  cal.
3. De Forcrands Formel  $l_m = T (10,1 \log T - 0,009 T + 26 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,5)$ . (Sie gilt von  $5^\circ$  abs. bis  $2583^\circ$  abs. als ziemlich genau.)
4. Ruff und Kenschak haben aus Dampfdruckkurven die molekularen Verdampfungswärme für Si und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  berechnet. Diese Werte sind:

$$\text{Si } l_m = 81,6, \quad \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ } l_m = 115,7.$$

Siliziumdampf ist bei relativ niedrigen Temperaturen bis  $2174^\circ$  abs. und 11 mm Hg-Druck zweiatomig, bei  $2500^\circ$  abs. und 300 mm Hg-Druck bereits vollkommen dissoziiert. Kohle verhält sich wahrscheinlich ähnlich.

## F. Gesamtwärmeaufwand.

Um die ganzen Wärmevorgänge eines Prozesses überblicken zu können, bedarf es der Erkennung aller seiner Stadien von den kalten oder vorerhitzten Ausgangsprodukten bis zu den kalten oder heißen Endprodukten, die alle gesondert berechnet, in ihrer Summe die theoretische Wärmebilanz ergeben. Unter den Endprodukten sind selbstverständlich Schlacken und Abgase, ebenso wie das Hauptprodukt, um dessen willen die Reaktion eingeleitet wurde, zu verstehen.

Der ganz allgemeine Fall, daß die Ausgangsmaterialien mit verschiedenen Temperaturen und in verschiedenen Aggregatzuständen in den Prozeß eintreten, findet sich beispielsweise bei der Stahlraffination, wo das Eisen flüssig, der Schlackenbildner, Ferrolegierungen und Kohlunsmaterial kalt zugesetzt werden.

Die theoretische Bilanz geht von der Temperatur  $0^\circ \text{C}$  aus und umfaßt alle Vorgänge bis zur Wiederabkühlung auf  $0^\circ$ . Praktisch ist alle Wärme bis zur Höchsttemperatur aufzubringen — sei es durch Heizung oder durch Reaktionswärme. Die Abkühlung ist ein Wärmeverlust, der durch Ausnutzung der Abhitze, z. B. in Tunnel- oder Schachtofen, zum Teil wiedergewonnen werden kann.

Die Kenntnis der vorstehenden Kapitel erlaubt nunmehr, den Gesamtwärmeaufwand zu berechnen, den ein Körper von gewöhnlicher Temperatur (der Einfachheit halber setzt man diese immer gleich  $0^\circ$ , statt  $15^\circ$  oder  $20^\circ \text{C}$ ) verbraucht, um in Dampf der Temperatur  $t'$  übergeführt zu werden.

a) Berechnung aus spezifischen und latenten Wärmen.

Die Vorgänge verlaufen stufenweise und sind:

1. Erwärmung von  $0^\circ$  bis zum Schmelzpunkt . . . . .  $C_0^t \cdot t$
2. Schmelzung, Schmelzwärme . . . . .  $L$

3. Erhitzung der Schmelze bis zum Verdampfungspunkt  $t'$   $C_i (t' - t)$
4. Verdampfung; Verdampfungswärme . . . . .  $l$
5. Erhitzung des Dampfes von  $t'$  bis  $t''$  . . . . .  $C_p (t'' - t')$

Für Zink liegen alle erforderlichen Daten vor, weshalb es bei der Wahl eines Beispiels den Vorzug verdient.

Nachstehend die Konstanten:

$$\begin{array}{ll} C_0 t = 0,0906 + 0,000044 t \text{ cal} & l = 425 \text{ cal} \\ C_p = 0,077 \text{ cal} & \text{Schmelzpunkt } 420^\circ \text{ C} \\ L = 22,6 \text{ cal} & \text{Siedepunkt } 930^\circ \text{ C}. \end{array}$$

Es ist nun der Wärmeverbrauch für 1 g Zinkdampf von  $1200^\circ$  aus kaltem Zink zu berechnen.

1. Erwärmung bis $420^\circ$ $(0,0906 + 0,000044 \cdot 420) \cdot 420$ . . . . .	= 45,8
2. $L$ . . . . .	= 22,6
3. $C_{420} \cdot (930 - 420) = (0,0906 + 0,000088 \cdot 420) \cdot (410)$ . . . . .	= 65,0
4. $l$ . . . . .	= 425,0
5. $C_p (1200 - 930) = 0,077 \cdot 270$ . . . . .	= 20,8
Summa	579,2 cal

b) Berechnung aus den Schmelz- und Siedetemperaturen der Metalle.

Richards hat sehr einfache Faustregeln für Metalle angegeben, deren Gebrauch nur die Kenntnis der Schmelz- und Siedepunkte erfordert.

Das Grammatom irgendeines Metalles verbraucht nach Richards vom kalten Zustande an gerechnet

bis zum Dampf . . . . .	33	$T_2 - 1700$ cal	}	$(T_2 = \text{Siedetemperatur})$
bis zum Siedepunkt . . . . .	10	$T_2 - 1700$ cal		
bis zum geschmolzenen Zustand . . . . .	10	$T_1 - 1700$ cal	}	$(T_1 = \text{Schmelztemperatur})$
bis zum Schmelzpunkt . . . . .	8	$T_1 - 1700$ cal		

Im Beispiel vom Zink errechnet sich die totale Verdampfungswärme mit

$$33 \cdot 1203 - 1700 = 38000 \text{ cal}$$

$$\text{oder für 1 g zu } \frac{38000}{65} = 584,6 \text{ cal.}$$

(Durch Addition der ersten vier Summanden in der vorhergehenden detaillierten Rechnung ergaben sich 558,4 cal in guter Übereinstimmung.)

## II. Chemische Wärmeberechnungen (Wärmetönungen).

Chemische Vorgänge sind stets mit dem Freiwerden von Wärme oder mit Wärmeabsorption, kurz mit Wärmetönungen verbunden. Wegen ihrer Größe pflegt man sie in Kilogrammkalorien, bezogen auf Grammatome oder Grammoleküle anzugeben, dies ist unzweckmäßig, weil darin eine Quelle von Mißverständnissen gelegen ist. Eindeutig und daher vorzuziehen ist es, nach dem Vorschlage Richards Wärmetönungen immer in Grammkalorien anzugeben, wie dies in den nachstehenden Ausführungen auch geschehen ist. Freiwerdende Wärme bezeichnet man als positiv, absorbierte Wärme als negativ.

### A. Umwandlungswärmen der Elemente.

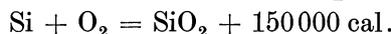
Die allotropen Umwandlungen innerhalb der Elemente werden auf das Grammatom bezogen. Für die Elektrothermie sind die Modifikationen des Kohlenstoffes und Siliziums wichtig, für welche die nachstehenden thermodynamischen Gleichungen gelten.

$$\begin{array}{l} C_{\text{Diamant}} = C_{\text{Graphit } \alpha} + 500 \text{ cal} \\ C_{\text{Diamant}} = C_{\text{Graphit } \beta} + 200 \text{ cal} \\ C_{\text{Diamant}} = C_{\text{Graphit}} - 300 \text{ cal} \\ Si_{\text{amorph}} = Si_{\text{krist}} < + 2000 \text{ cal.} \end{array}$$

## B. Wärmetönungen der Verbindungen.

Bei der Bildung von Verbindungen wird entweder Wärme frei (positive Bildungswärme exothermer Reaktionen) oder es wird Wärme gebunden (negative Bildungswärmen endothermer Reaktionen).

In den thermochemischen Symbolgleichungen werden die Bildungswärmen wie chemische Massen behandelt und treten mit den entsprechenden Vorzeichen auf, z. B.

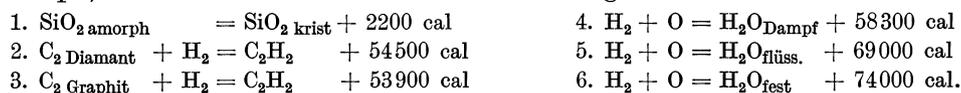


Weiter ist auf den Aggregatzustand Rücksicht zu nehmen, auf den sich jede einzelne thermochemische Gleichung bezieht und dieser als Index zu vermerken, z. B.



Prinzipiell und wichtig ist, daß alle thermochemischen Gleichungen auf 0° C reduziert sind, so daß im obigen Falle des Wassers Dampf von 0° C zu verstehen ist.

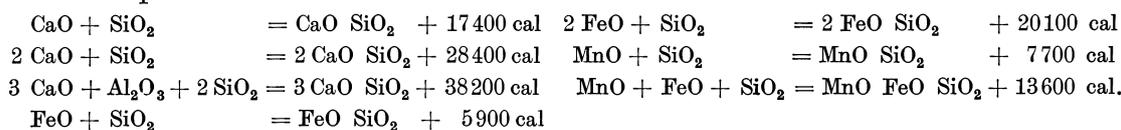
Desgleichen sind Allotropien (z. B. Graphit, Diamant) und Isomerien (ob kristallisiert oder amorph) in Form von Indizes in den Gleichungen zu vermerken. So:



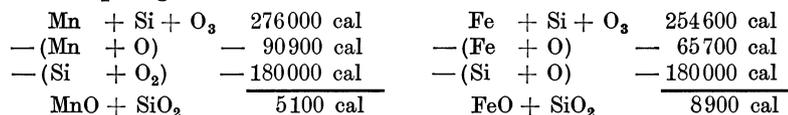
Die beiden Gleichungen für Azetylen unterscheiden sich durch die Umwandlungswärme: Graphit:Diamant, die drei Gleichungen für die Wasserbildung ergeben sinngemäß die Verdampfungs- und die Schmelzwärme des Wassers<sup>1</sup>.

Aus den Bildungswärmen für das Grammoll lassen sich selbstverständlich die Wärmequanten für beliebige Gewichtsmengen sowohl der Elemente wie der entstehenden Verbindung rechnen.

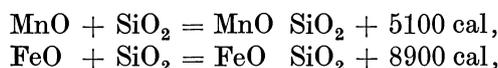
Die Bildung von Silikatschlacken aus dem Kieselsäureanhydrid  $\text{SiO}_2$  und Metalloxyden ist ebenfalls von Wärmetönungen begleitet, die für die wichtigsten Schlackenbildner experimentell ermittelt wurden.



In den Tabellenwerken findet man häufig die Bildungswärmen der basischen und der saueren Komponenten, wie auch die Bildungswärme ihres Neutralisationsproduktes, alle von den Elementen aus, angegeben. Die Neutralisationswärme ergibt sich dann als Differenz der Bildungswärme des Neutralkörpers, vermindert um die Bildungswärmen der beiden Komponenten. So finden sich für die Berechnung einer Schlacke  $\text{MnO FeO 2 SiO}_2$  folgende Daten:



aus denen man die Neutralisationswärmen rechnen kann, indem von der Gesamtbildungswärme die Einzelwerte für  $\text{MnO}$  und  $\text{SiO}_2$  bzw.  $\text{FeO}$  und  $\text{SiO}_2$  abgezogen werden und erhält dann die obigen Neutralisationswärmen



folglich für eine Schlacke aus  $X \text{ MnO}$  und  $Y \text{ FeO}$



<sup>1</sup> Da alle thermochemischen Gleichungen bereits auf 0° C reduziert sind, ist für die Abkühlung von der Reaktionstemperatur bis 0° C, für die Kondensation oder das Erstarren keine nochmalige Korrektur zulässig.



lischen Eisen als Temperatursteigerung wiederfinden müssen. Sie ergibt sich, wie die folgende Rechnung zeigt, zu  $2767^\circ \text{C}$ .

Zur Erhitzung des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf seine Schmelztemperatur sind nötig

$$C_0^{2050} = \alpha + \beta t = [0,2081 + 0,0000876 \cdot 2050] \cdot 2050 = 795\,000 \text{ cal}$$

die Schmelzwärme des  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist  $\frac{48\,000}{\text{„}}$

$$\text{Summa } \frac{843\,000 \text{ cal.}}$$

Ist  $t_{\max}$  die unbekannte Maximaltemperatur, so wird zur Überhitzung der geschmolzenen Tonerde auf diese Temperatur die Wärmemenge

$$Q_{2050}^{t_{\max}} = 0,567 (t_{\max} - 2050) \text{ verbraucht}^1.$$

Insgesamt nimmt das Aluminiumoxyd von  $0^\circ$  bis  $t_{\max}$  die Wärme  $Q_0^{t_{\max}} = 843 + 0,567 (t - 2050) \text{ cal}$  je Gramm auf. Da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  das Molgewicht 102 hat, ist diese Wärmemenge 102mal zu nehmen.

$$102 [Q_{\text{Al}_2\text{O}_3}]_0^{t_{\max}} = 86\,000 + 57,84 (t - 2050) \text{ cal.}$$

Das reduzierte Eisen hat dieselbe Temperatur. Sein Wärmeinhalt ergibt sich als die Summe aus der Erhitzungswärme von  $0^\circ$  bis  $1535^\circ$  (dem Schmelzpunkt) der Schmelzwärme und der Übererhitzungswärme bis  $t_{\max}$ .

$$1. Q_0^{1535} = 0,167 \cdot 1535 = 256 \text{ cal}$$

die Schmelzwärme  $L$   $\frac{60}{\text{„}}$

$$\frac{316 \text{ cal}}$$

die Übererhitzungswärme bis  $t_{\max}$   $Q_{1535}^{t_{\max}} = 0,20 (t - 1535)$ , somit insgesamt für 1 g Eisen

$$[Q_{\text{Fe}}]_0^{t_{\max}} = 316 + 0,20 (t - 1535) \text{ cal};$$

da 2 Atome Fe 112 g wiegen:

$$112 [Q_{\text{Fe}}]_0^{t_{\max}} = 35\,390 + 22,4 (t - 1535); \quad [Q_{\text{Al}_2\text{O}_3}]_0^{t_{\max}} + [Q_{\text{Fe}}]_0^{t_{\max}}$$

müssen der Reaktionswärme gleichkommen

$$86\,000 + 578 (t_{\max} - 2050) + 35\,390 + 22,4 (t_{\max} - 1535) = 190\,400,$$

$t_{\max}$  ergibt sich dann zu  $2767^\circ \text{C}$ .

Dieses von Flusin<sup>1</sup> gewählte Beispiel einer thermischen Reaktion fester Körper ohne Wärmeabfuhr, durch entstehende oder beigemengte Gase ist besonders instruktiv.

2. Beispiel: Eine einfache Gasreaktion ist die Verbrennung von Wasserstoff mit reinem Sauerstoff. Die theoretisch erreichbare Temperatur sei wieder mit  $t_{\max}$  bezeichnet.

Die Verbrennungswärme beträgt je Kubikmeter Gasgemisch oder Wasserdampf — denn das Volumen ist vor und nach der Reaktion gleich — 2613 cal, die Koeffizienten für die Berechnung der spezifischen Wärme von Wasserdampf sind:

$$\alpha = 0,34, \quad \beta = 0,0015.$$

Die mittlere spezifische Wärme ist daher

$$[C_p]_0^{t_{\max}} = 0,34 + 0,0015 t_{\max},$$

die totale fühlbare Wärme

$$[Q]_0^{t_{\max}} = [C_p]_0^{t_{\max}} \cdot t_{\max} = 0,34 t_{\max} + 0,0015 t_{\max}^2 = 2613 \text{ cal},$$

woraus sich die theoretische Verbrennungstemperatur zu  $3191^\circ \text{C}$  berechnet.

Würde zur Erzielung reduzierender oder oxydierender Wirkungen ein Überschuß von 5% Wasserstoff oder Sauerstoff zugegeben, dann würde die freigewordene Verbrennungswärme auch noch diesen Gasüberschuß auf die maximale Verbrennungstemperatur zu erhitzen haben, die, niedriger als bei stöchiometrischen Mengen der verbrennenden Gase, nach dem Schema

$$[Q_{\text{Wasser}}]_0^{t_{\max}} + 0,05 [Q_{\text{Gasüberschuß}}]_0^{t_{\max}} = 2613 \text{ cal beträgt.}$$

<sup>1</sup> Flusin, George: Electrothermie appliquée (Paris 1930).

Für die Verbrennung von reinem Kohlenoxyd in Luft (O + N) hat man

$$[Q_{\text{CO}_2}]_0^{t_{\text{max}}} [Q_{\text{N}}]_0^{t_{\text{max}}} + [Q_{\text{Luft}}]_0^{t_{\text{max}}} = 3062 \text{ cal}$$

zu berechnen, woraus sich  $t_{\text{max}}$  ergibt.

$[Q_{\text{CO}_2}]$  ist ohne weiteres verständlich.  $[Q_{\text{N}}]$  bezieht sich auf jene Stickstoffmenge, die dem verbrannten Sauerstoff entspricht,  $[Q_{\text{Luft}}]$  berücksichtigt einen eventuellen Luftüberschuß.

Bei unvollständiger Verbrennung (reduzierende Flamme) ist statt  $[Q_{\text{Luft}}]$  ein Glied  $[Q_{\text{CO}}]$  zu setzen, das dem unverbrannten Überschuß an CO entspricht.

Da immer dasselbe Schema auftritt, sind selbst komplizierte Gase (wie z. B. das Leuchtgas) leicht rechnerisch zu behandeln, bieten also, wenn sie einmal bei elektrothermischen Prozessen auftreten sollten, keine Schwierigkeit.

## Die Schlacken.

Die bei metallurgischen Prozessen entstehenden Schlacken sollen die als Gangart bezeichneten Verunreinigungen der Erze chemisch binden oder aufnehmen. In den meisten Fällen haben sie die weit wichtigere Aufgabe, durch wechselweise Reaktionen auf das darunter befindliche Metallbad einzuwirken, ihm schädliche Bestandteile zu entziehen oder erwünschte einzuverleiben. Schlacken sollen leichtflüssig sein, um an Temperatur und damit an Heizenergie und Ofenmaterial zu sparen. Leichtflüssige Schlacken bringen aber meist den Nachteil stärkerer chemischer Angriffe auf die Zuströmung mit sich. Besonders die zur Erhöhung der Leichtflüssigkeit zugesetzten Flußmittel wirken meist auch auf das Ofenmaterial nachteilig ein.

Die reinigende Wirkung der Schlacken beschränkt sich nicht auf die chemischen Umwandlungen, sondern wirkt auch physikalisch lösend. Nicht elementare Verunreinigungen des Metallbades, z. B. die Oxyde oder Sulfide des Metalles, sollen in der Schlacke stets leichter löslich sein als im Metallbad, so daß eine Verteilung im Verhältnis der beiderseitigen Löslichkeit derart eintritt, daß sich die Schlacke an den Verunreinigungen möglichst anreichert und das Metallbad von ihnen befreit wird.

Schlacken sind in den meisten Fällen Polysilikate des Kalkes, der Magnesia und des Aluminiumoxydes, wozu häufig Oxyde der Schwermetalle treten, wie in den eisenoxydhaltigen Schlacken der Frischprozesse.

Überwiegendes Siliziumdioxid erteilt den Schlacken sauren Charakter, zum Unterschiede von den basischen Schlacken, welche einen Überschuß von Oxyden der Erdalkalien enthalten. Aluminiumoxyd tritt bald als Säure, bald als Base auf, je nachdem der Grundcharakter der Schlacke basisch oder sauer ist. Die Stellung des Aluminiumoxydes ist also dem Grundcharakter der Schlacke stets entgegengesetzt. Titandioxyd und Phosphorpentoxyd behalten ihren sauren Charakter bei.

### I. Schmelzfähigkeit und Viskosität.

Von alters her haben sich einige empirische Regeln bewährt, um Leichtflüssigkeit zu erreichen. So wirkt der Zusatz von Kieselsäure verflüssigend, während Kalk und Magnesia oder Dolomit saure Schlacken zähflüssiger macht. Schlacken gleicher Basizität sind um so leichtflüssiger, je größer die Anzahl der basischen Komponenten ist. So werden die Aluminium-Kalksilikate flüssiger, wenn ein Teil des Aluminiumoxydes und des Kalkes durch Magnesia ersetzt wird.

Der Einfluß auf die Beweglichkeit der Schmelzen und ihre Verflüssigung ist am energischsten bei den Alkalien, ihnen folgen die Schwermetalloxyde FeO, MnO und Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, weniger wirksam sind der Reihe nach BaO, CaO, MgO und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Nach der Zahl der Komponenten unterscheidet man binäre, trinäre, quaternäre usw. Schlacken.

Im Geophysikalischen Institut in Washington wurden die Systeme aus den hauptsächlichsten Gesteinsbildnern  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{MgO}$  hinsichtlich ihrer Schmelzvorgänge untersucht. Diese Arbeiten sind um so dankenswerter, als im allgemeinen die Schwierigkeit und Langwierigkeit solcher Untersuchungen vor ihrer Inangriffnahme abschreckt und daher sonst nur spärliche Daten vorliegen.

Die sechs möglichen Kombinationen binärer Systeme aus obigen Komponenten liegen vollständig bearbeitet vor und beinhalten auch die Umwandlungen im festen Zustande bei verschiedenen Temperaturen. So interessant dieser Teil für die Petrographie ist, für die Elektrothermie kämen diese Umwandlungen im festen Zustande erst in Betracht,

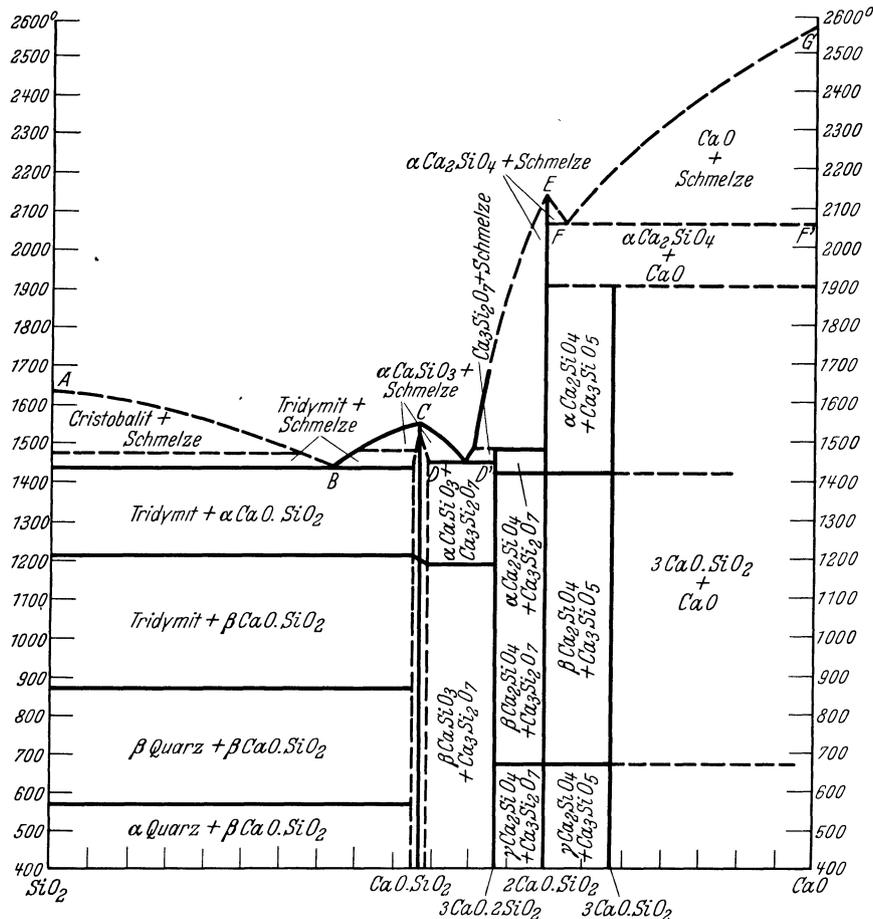


Abb. 3. Diagramm des Systems  $\text{SiO}_2$ -CaO.

wenn die zugehörigen Umwandlungswärmen bekannt wären. Da das aber nicht der Fall ist, genügt für unsere Zwecke die Betrachtung der Linien für die beginnende Ausscheidung der ersten festen Anteile aus der Schmelze, die sog. Liquiduslinienzüge und die Temperaturgrenzen für totales Erstarren, die Soliduslinien. Zwischen beiden liegende Felder der graphischen Darstellung bezeichnen einen Zustand aus einem Gemisch fester und flüssiger Anteile.

Zum besseren Überblick der Verhältnisse bedient man sich eines rechtwinkligen Koordinatensystems, dessen Ordinaten Temperaturen bedeuten, während auf der Abszissenachse die Prozentanteile einer der beiden Komponenten von 0 bis 100 aufgetragen sind. Die Menge der zweiten Komponente ergibt sich aus der Differenz auf 100, so daß der Punkt 0 der ersten Komponente zugleich Punkt 100 der zweiten entspricht.

Das System  $\text{SiO}_2$  —  $\text{CaO}^*$  (Abb. 3). Wir beginnen rechts bei  $100^\circ \text{CaO}$  ( $0 \text{SiO}_2$ ) mit dem Schmelzpunkte  $2600^\circ$ . Mit zunehmendem  $\text{SiO}_2$ -Gehalt sinkt die Liquiduskurve mit einer kleinen Unterbrechung stetig bis auf  $1455^\circ$  (bei  $54,5\% \text{CaO}$ ,  $45,5\% \text{SiO}_2$ ). Die kleine Unterbrechung, die durch ein Teilminimum und ein Teilmaximum erfolgt, ist für

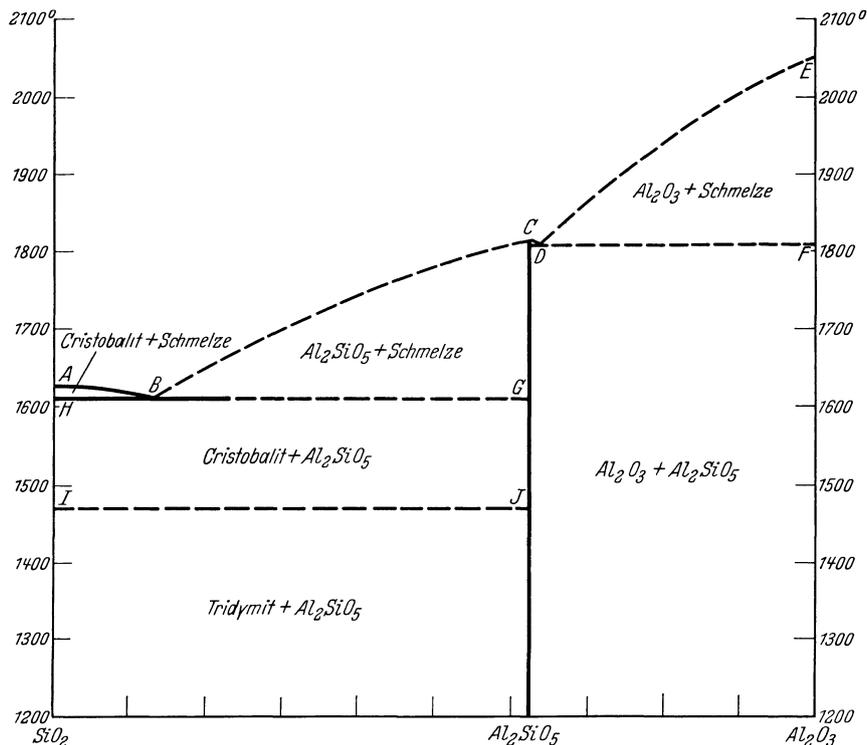


Abb. 4. Diagramm des Systems  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nach Rankin.

die technische Arbeit nur insoweit von Interesse, als durch das Teilminimum die Soliduslinie als Horizontale in der Lage von  $2065^\circ$  festgelegt wird. Von  $100\% \text{CaO}$  bis  $65\% \text{CaO}$  tritt somit vollständige Erstarrung schon bei  $2065^\circ$  ein. Das zweite Stück der Liquiduskurve, das sich unmittelbar anschließt, fällt steil und markiert mit seinem Minimum eine Lage des Solidus bei  $1456^\circ$ , dem nach einem kleinen weiteren Teilmaximum eine neue Soliduslage bei  $1436^\circ$  folgt. Für technische Zwecke kann man beide Solidustemperaturen als gleich ansehen.

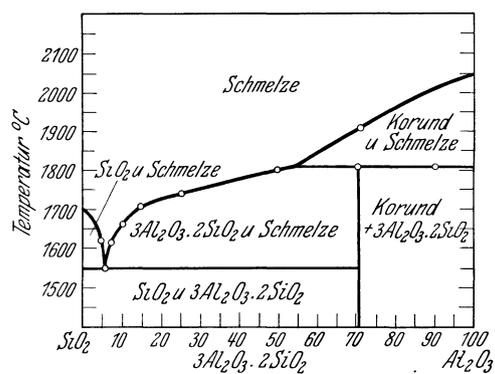


Abb. 5. Diagramm des Systems  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nach Bowen u. Greig.

Das Diagramm lehrt also in dieser vereinfachten Betrachtung, daß zwischen  $100$  und  $65\% \text{CaO}$  die völlige Erstarrung bei  $2065^\circ$  liegt, zwischen  $65$  und  $0\% \text{CaO}$  liegt sie bei  $1450^\circ$ . Der Bereich niedrigster Schmelzpunkte reicht von  $54,5$  bis  $37\% \text{CaO}$ . Damit wäre für technische Zwecke die Betrachtung des Diagrammes erledigt.

Das System  $\text{SiO}_2$  —  $\text{Al}_2\text{O}_3^{**}$  (Abb. 4) ist viel einfacher als das vorhergehende. Es zeigt einen steten Abfall im Bereich von  $100\% \text{Al}_2\text{O}_3$  bis  $13\% \text{Al}_2\text{O}_3$  entsprechend dem Sinken der Liquiduskurve von  $2050^\circ$  bis  $1610^\circ$ , von wo sie wieder bis zum Schmelzpunkt der Kieselsäure mit  $1710^\circ$  ansteigt. Die Temperaturen völliger Erstarrung liegen zwischen  $100\%$

\* Rankin: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 92 (1915) S. 217.

\*\* Rankin: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 92 (1915) S. 222.

und 64%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei 1810°, zwischen 64% und 0%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bei 1610°. Leichtflüssige Schlacken sind nur im engen Umkreise von 13%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zu finden. Dieses Diagramm Rankins wurde von Bowen und Greig als ungenau befunden, und beide Autoren<sup>1</sup> (Abb. 5) geben ein anderes Schaubild, nach welchem die Punkte leichtester Schmelzbarkeit bei 6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und 1545° liegt.

Die Schwierigkeit solcher Untersuchungen läßt solche Widersprüche nicht selten auftreten.

Das System  $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ \* (Abb. 6)

gibt bei 1850° und einer Zusammensetzung 65%  $\text{MgO} : 35\%$   $\text{SiO}_2$  ein Teilminimum, der tiefste Schmelzpunkt (zugleich Soliduslinie) liegt mit 1543° bei 35%  $\text{MgO}$  (65%  $\text{SiO}_2$ ). Ungeklärt ist das Intervall von zwischen 35 und 0%  $\text{MgO}$ .

Das System  $\text{CaO} - \text{MgO}$ \*\* (Abb. 7). Die Verhältnisse liegen ideal einfach. Es existiert nur ein Tiefpunkt bei 2300° mit 33%  $\text{MgO}$  bei 2300°.

Das System  $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ \*\*\* (Abb. 8) ist dadurch etwas komplizierter, daß ein  $\alpha$  und  $\beta$ -Aluminiumoxyd angenommen wird, für unsere Zwecke aber ziemlich belanglos, denn die Lage des Solidus bei 1925° wird dadurch nicht tangiert, ebensowenig sein Umfang von 100 bis 71,6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ein zweiter Solidus liegt bei 2030° mit der leichter schmelzenden Zusammensetzung von 55%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Das System  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (Abb. 9) ist scheinbar ziemlich kompliziert, läßt sich aber durch Vernachlässigung der 3 kleinen Spitzen auf den einfachsten Fall mit nur einem einzigen Eutektikum, zwischen 50 und 55%  $\text{CaO}$ , und mit einer Erstarrungstemperatur von 1400 zurückführen.

Beim Studium der binären Systeme ist stets vor Augen zu halten, daß die Eutektika fast nie mit dem Optimum an Viskosität zusammenfallen.

Da man in der Praxis stets einige Hundert Grad über dem Schlackenschmelzpunkt arbeitet, ist die höhere oder tiefere Lage des Schmelzpunktes von geringerer Bedeutung.

Demnach ist auch die genaue Kenntnis der ternären Systeme von geringerem Werte, es genügt eine ungefähre Orientierung über die Lage der Schmelzpunktmaxima.

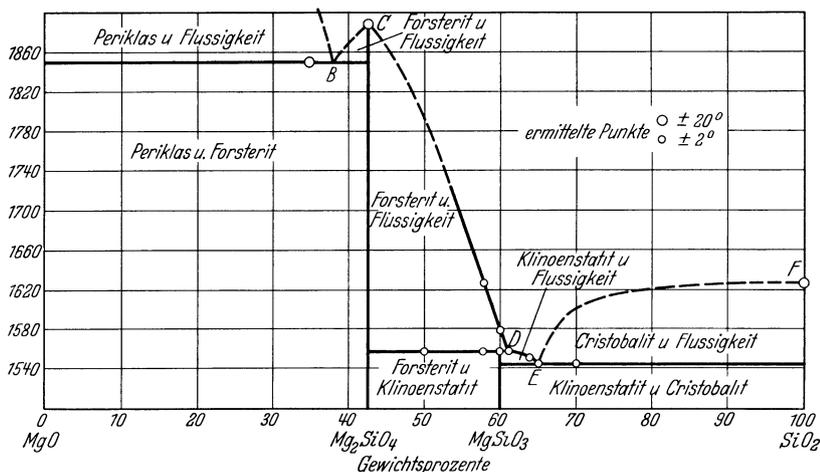


Abb. 6. Diagramm des Systems  $\text{MgO} - \text{SiO}_2$ .

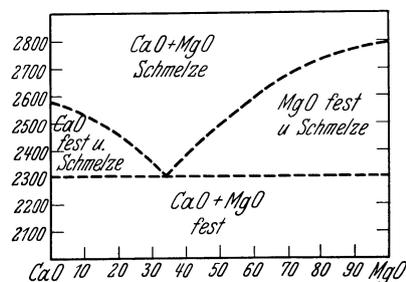


Abb. 7. Diagramm des Systems  $\text{CaO} - \text{MgO}$ .

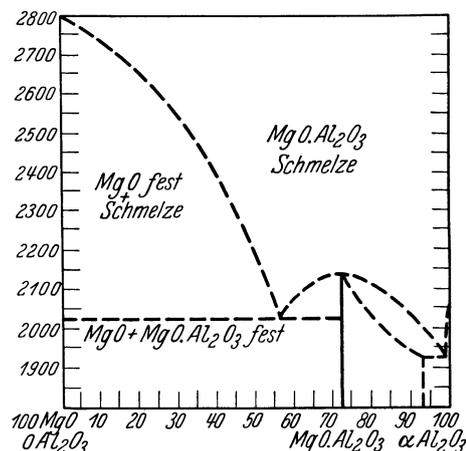


Abb. 8. Diagramm des Systems  $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .

<sup>1</sup> Amer. Ceram. Soc. Bd. 7 (1924) S. 238.

\* Anderson u. Bowen: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 87 (1914) S. 283.

\*\* Rankin: Z. anorg. allg. Chem. Bd. 92 (1915) S. 223.

\*\*\* Rankin u. Merwin: J. Amer. chem. Soc. Bd. 38 I (1916) S. 570.

Das System  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$

Schmelzpunkt-maxima	Zusammensetzung	Schmelzpunkt-maxima	Zusammensetzung	Schmelzpunkt-maxima	Zusammensetzung
1550°	20,1 $\text{CaO}$	1590°	40,8 $\text{CaO}$	1505°	37,5 $\text{CaO}$
1550°	36,6 $\text{Al}_2\text{O}_3$	1590°	37,2 $\text{Al}_2\text{O}_3$	1505°	53,2 $\text{Al}_2\text{O}_3$
1550°	43,3 $\text{SiO}_2$	1590°	22,0 $\text{SiO}_2$	1505°	9,3 $\text{SiO}_2$

Das System  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ . Da hier die Schmelzpunkte im allgemeinen hoch

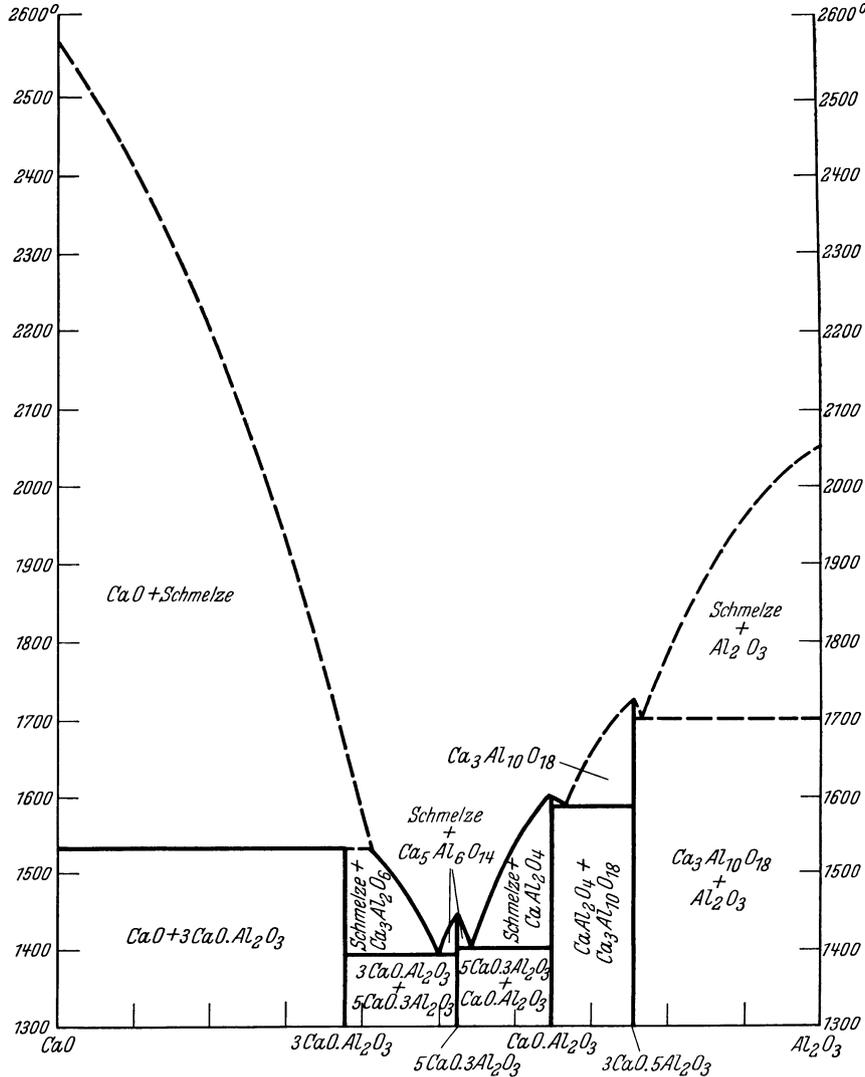


Abb. 9. Diagramm des Systems  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .

liegen, ist die Nähe einer der folgenden Zusammensetzungen niedrigsten Schmelzpunktes zu wählen.

Schmelzpunkt	Zusammensetzung	Schmelzpunkt	Zusammensetzung
1345°	20,3 $\text{MgO}$	1358°	25,0 $\text{MgO}$
1345°	18,3 $\text{Al}_2\text{O}_3$	1358°	21,0 $\text{Al}_2\text{O}_3$
1345°	61,4 $\text{SiO}_2$	1358°	54,0 $\text{SiO}_2$

Das System  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ . Auch dieses ist durch relativ hohe Schmelzpunkte gekennzeichnet. Die niedrigsten Schmelzpunkte liegen zwischen 42 und 80%  $\text{SiO}_2$  bei 5—40  $\text{CaO}$  und 10—20%  $\text{MgO}$ .

Das System  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ .  $\text{MgO}$  bewirkt sehr erhebliche Erhöhungen der Schmelzpunkte, weshalb der Prozentgehalt daran nicht über 6% steigen darf. 40—50%

CaO und 50 bis 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> geben Schmelzpunkte bei 1350—1400°. Schon eine kleine Erhöhung des MgO-Gehaltes über 6% rückt den Schmelzpunkt auf 1600—1700° hinauf.

Zur leichten Trennung von Metall und Schlacke sowie zur leichteren Entfernung der letzteren durch Ausfließenlassen ist häufig eine erhebliche Erhitzung über den Schmelzpunkt nötig.

Sauere Schlacken, die sich den Gläsern nähern, sind wenig über dem Schmelzpunkt im allgemeinen sehr zähflüssig, basische dagegen beweglicher.

Als Maß der Viskosität gilt im C. G. S.-System jene Kraft, welche nötig ist, zwei vollständig in die Flüssigkeit tauchende planparallele Platten von der Fläche 1 cm × 1 cm, welche sich im Abstände 1 cm befinden, binnen einer Sekunde mit der konstanten Geschwindigkeit von 1 cm je Sekunde bis zur Berührung zu nähern.

Das Montanamt der Union-Staaten hat für das trinäre System SiO<sub>2</sub> — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — CaO Viskositätstabellen veröffentlicht, aus denen sichtbar wird, daß die Beweglichkeit der Schlacken bei Überhitzungen nicht mit den Schmelzpunkten parallel geht.

In dem nachstehenden Tabellenauszug sind die beiden Zusammensetzungen mit niedrigstem Schmelzpunkt, und zwar 1310° bei 12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 41% SiO<sub>2</sub> und 47% CaO und 1265° mit der Zusammensetzung 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 42 SiO<sub>2</sub> + 38 CaO herausgehoben. Unter den Rubriken Viskosität 12,6 und 2 (C. G. S.-Einheiten) stehen die Temperaturen verzeichnet, bei welchen die bezüglichen Viskositäten eintreten. Als Vergleich sind jeder dieser Zusammensetzungen ein wenig variierte vor- und nachgesetzt.

Die bei 1310° schmelzende Schlacke bedarf hiernach zur Erreichung der Viskosität einer Überhitzung von 70°, die bei 1265°, also niedriger schmelzende Zusammensetzung erfordert für dieselbe Viskosität eine Überhitzung von 332°. Die zweite angeführte Trias zeigt, daß die beiden Varianten, die einen höheren Schmelzpunkt haben müssen, weil 1265 ein Minimum ist, dennoch geringerer Überhitzung und geringerer Temperatur benötigen.

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	CaO %	Schmelz- punkt	Temperatur bei den Viskositäten		
				17	6	2
12	42	46	—	1329	1401	1620
12	41	47	1310	1381	1456	> 1640
12	40	48	—	1420	1531	> 1640
18	44	38	—	1418	1485	> 1640
20	42	38	1265	1607	> 1640	> 1640
20	40	40	—	1531	1625	> 1640

Die Schonung für die Ofenzustellung oder die bezweckte Reaktion verlangen manchmal die Verwendung wenig flüssiger basischer und hochbasischer Schlacken. In diesem Falle greift man zum Zusatz von Flußmitteln in geringen Mengen (etwa 5%), meist Flußspat, wodurch die chemischen Reaktionen nicht geändert, die physikalische Beschaffenheit der Schlacke aber erheblich verbessert wird.

## II. Der Schlackenindex.

Die alte dualistische Schreibweise, die darin besteht, Oxyde und saure Anhydride nebeneinander, nur durch einen Punkt getrennt, statt der Summenformel zu setzen, erleichterte den Vergleich der Zahl der Sauerstoffatome im basischen und im saueren Teil der Verbindung. Das Verhältnis beider liefert den Index, eine praktische Charakteristik, die heute noch allgemein verwendet wird. Der Index ist also  $i = \frac{O_s}{O_b}$ , worin O<sub>s</sub> der Zahl der Sauerstoffatome im Säureanteil, O<sub>b</sub> im Basenteil entspricht.

Eine Schlacke aus 2 CaO, 1 MgO, 2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und 5 SiO<sub>2</sub> würde folgendermaßen charakterisiert:

$$\begin{array}{r}
 \frac{5 \text{ SiO}_2}{2 \text{ CaO}} \quad \frac{10 O_s}{2 O_b} \\
 \frac{1 \text{ MgO}}{2 \text{ Al}_2\text{O}_3} \quad \frac{1 O_b}{6 O_b} \\
 \hline
 \frac{10}{9 O_b}
 \end{array}
 \quad \text{Index } \frac{10}{9} = 1,11.$$

Sauere Schlacken haben selten einen über 3 liegenden Index. Für Silikatschlacken, die an Häufigkeit der Anwendung alle anderen weit überragen, ist eine alte Einteilung nach dem Schlackenindex in Gebrauch. Man unterscheidet

Sub — . . . . .	} Silikatschlacken	Index = $\frac{2}{3}$	
Singulo—(Mono)			" = $\frac{1}{3}$
Sesqui— . . . . .			" = $\frac{3}{2}$
Bi— . . . . .			" = 2
Tri— . . . . .			" = 3

Diese Bezeichnungen sind aber als mehrdeutig nicht empfehlenswert.

Die Berechnung des Schlackenindex ergibt sich aus der dualistischen Schreibform ohne weiteres. Aus den perzentuellen Analysenresultaten erhält man den Index ohne Schwierigkeit durch Umrechnung auf den Sauerstoff der Bestandteile. In Schlackenanalysen sind gewöhnlich die Prozentgehalte an Oxyden angegeben, seltener weicht man von dieser Gepflogenheit ab und gibt, entsprechend der modernen Auffassung, die Prozentgehalte der Elemente an.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  enthält 54 Gewichtsteile Al und 48 Gewichtsteile O, sein Molekulargewicht ist somit 102. Der perzentuelle Sauerstoffgehalt ist  $48:102 = 0,470$ .

Durch Multiplikation der Analysenangabe für  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit obigem Faktor ergibt sich die entsprechende Sauerstoffmenge. Sind z. B. 6,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in der Schlacke, so beträgt ihr an Al gebundener Sauerstoff  $6,5 \cdot 0,47 = 3,055\%$  in der Schlacke.

Analoge Rechnungen für andere Basen ergeben den an sie gebundenen Sauerstoff in Prozenten, die Summation liefert dann den gesamten Basensauerstoff. Ganz gleich wird der Siliziumsauerstoff erhalten, und der Quotient entspricht dann dem Basenindex. Zur Abkürzung der Rechnung kann man sich folgender Faktoren bedienen:

$\text{SiO}_2$	0,533	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,470	$\text{FeO}$	0,222
$\text{TiO}_2$	0,400	$\text{CaO}$	0,286	$\text{MnO}$	0,225
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,563	$\text{MgO}$	0,400	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,316
		$\text{BaO}$	0,105		

Es sei für die Schlacke folgende Zusammensetzung des Index zu berechnen:

$\text{CaO}$	$35,52 \times 0,286 = 10,16$	$\text{FeO}$	$2,87 \times 0,222 = 0,64$	$\text{SiO}_2$	$49,10 \times 0,533$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$9,35 \times 0,470 = 4,39$	$\text{MgO}$	$3,16 \times 0,400 = 1,26$		

Der Schlackenindex ist somit:

$$I = \frac{26,17}{16,45} = 1,58 = 1,6.$$

Für die Berechnung der Zuschläge kann für die Praxis folgende Tabelle dienen, die für ein Kilogramm  $\text{SiO}_2$  oder Basen das Äquivalent in Kilogramm angibt.

1 kg  $\text{SiO}_2$  entspricht:

$\text{CaO}$	1,86 kg;	1 kg $\text{CaO} = 0,537$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{MgO}$	1,33 kg;	1 kg $\text{MgO} = 0,752$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,13 kg;	1 kg $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,885$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{BaO}$	5,08 kg;	1 kg $\text{BaO} = 0,197$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{FeO}$	2,80 kg;	1 kg $\text{FeO} = 0,416$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{MnO}$	2,36 kg;	1 kg $\text{MnO} = 0,424$ kg $\text{SiO}_2$
$\text{O}_3$	1,69 kg;	1 kg $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0,592$ kg $\text{SiO}_2$

Aus obigen Daten lassen sich Monosilikatschlacken ohne weitere Faktoren berechnen; für Schlacken anderer Charakteristik hat die  $\text{SiO}_2$ -Zahl noch mit dem gewünschten Index multipliziert zu werden.

Beispiel: Für eine  $\text{CaO}$ -Schlacke mit dem Index 2,4 sind für je 2,4 kg  $\text{SiO}_2$  1,86 kg gebrannter Kalk zu nehmen oder für jedes Kilogramm Kalk 1,3 kg  $\text{SiO}_2$ .



Nunmehr verändert sich die Reaktionsgleichung für den praktischen Fall wie folgt:

$$\frac{60 \cdot 1}{0,97} \text{ kg Quarzit} + \frac{24}{0,864} \text{ kg Koks} = 28 \text{ kg Si} + 56 \text{ kg CO} + \Sigma m.$$

$\Sigma m$  ist jeweils ein Glied zur Aufrechterhaltung der Gleichheit und umfaßt alle Verunreinigungen, Verluste, Überschüsse, die durch die technische Führung des Prozesses veranlaßt werden und hier einstweilen nicht interessieren. Übrigens läßt sich die Summe  $\Sigma m$  in ihre Einzelglieder auflösen und jedes davon berechnen, wenn es notwendig erscheint.

Der Schluß auf 100 kg Quarzit ergibt sich aus der Proportion  $\frac{60}{0,97} : \frac{24}{0,864} = 100 : x$ , woraus die Koksmenge

$$x = \frac{2400}{0,864} \cdot \frac{0,97}{60} = 44,92 \text{ kg}.$$

Der Übergang auf 100 kg Quarzit ergibt natürlich eine Erhöhung der Siliziummenge. Das Kohlenoxyd interessiert einstweilen nicht, und seine Menge wird der Vereinfachung wegen ins Summenglied  $\Sigma m$  eingeschlossen.

Die Proportion  $\frac{60}{0,97} : 28 = 100 : y$  führt zur theoretischen Siliziummenge

$$y = \frac{2800}{60} \cdot 0,97 = 45,26 \text{ kg}.$$

Somit lautet die Gewichtsgleichung:

$$100 \text{ kg Quarzit} + 44,92 \text{ kg Koks} = 45,26 \text{ kg Si} + \Sigma m.$$

Erfahrungsgemäß verbrennt  $\frac{1}{8}$  der Koksmenge durch den Luftzutritt zum Ofen ungenutzt, und nur  $\frac{7}{8}$  wirken im Sinne der chemischen Reaktion reduzierend. Infolgedessen muß dieses Abbrandkalo durch eine Erhöhung der Koksmenge um  $\frac{1}{7}$  der Theorie wettgemacht werden, so daß statt 44,92 kg nach der Theorie in praxi 51,34 kg Koks für je 100 kg Quarzit aufzuwenden sind.

Auch die rechte Seite der Gewichtsgleichung bedarf, praktischer Erfahrung zufolge, einer Korrektur. Die Ausbeute an Silizium wird durch Verflüchtigung sehr beträchtlich geschmälert, und zwar um so mehr, je höherprozentig das Endprodukt sein soll, weil der Eisengehalt der Verflüchtigung um so weniger hindernd entgegentritt, je kleiner seine relative Menge im Verhältnis zum Silizium ist.

Für 75prozentiges Ferrosilizium hat die Praxis einen Verlust von ungefähr einem Drittel der theoretischen Menge ergeben, demnach verbleiben nicht 45,26 kg Si, sondern nur 30,18 kg als Ausbeute.

Die Gewichtsgleichung lautet jetzt endgültig:

$$100 \text{ kg Quarzit} + 51,34 \text{ kg Koks} = 30,18 \text{ kg Si} + \Sigma m.$$

Das Eisen wird in Form von Drehspänen mit einem Fe-Gehalt von 96,04% Fe (Rost auf Metall umgerechnet) der Charge zugesetzt. Es erleidet keine wesentlichen Verluste im Ofen.

Da das Ferrosilizium 25% Eisen enthalten soll, verhält sich der Gehalt Si:Fe = 75:25 oder 3:1, demnach bedürfen 30,18 kg Si

$$10,06 \text{ kg Fe oder } \frac{10,06}{0,96} \text{ kg} = 10,48 \text{ kg Drehspäne}.$$

Das Gesamtgewicht an Ferrosilizium beträgt daher 40,24 kg.

Das Resultat der Berechnungen 1. Kolonne auf 100 kg Quarzit kann noch auf 1000 kg Ferrosilizium bezogen werden, woraus sich die Zahlen der zweiten Kolonne in der nachfolgenden Zusammenstellung ergeben:

Quarzit . . . . .	100 kg	2485 kg
Koks . . . . .	51,33 „	1276 „
Eisenspäne . . . . .	10,48 „	260,5 „
Silizium . . . . .	30,18 kg	750 kg
Ferrosiliziumerzeugung . . . . .	40,24 „	1000 „

In dem Summenglied  $\Sigma m$  ist unter anderem das dem Ofen entströmende Kohlenoxyd enthalten. Seine Menge läßt sich dem Gewichte der angewendeten Koks menge entnehmen.

51,33 kg bzw. 1262 kg Koks enthalten 44,35 kg bzw. 1090 kg Kohlenstoff, der vergast 103,5 kg CO, bzw. 2460 kg CO liefert.

Bei etwas Übung kann man sich die Rechnungen vereinfachen, indem man die stöchiometrischen Zahlen nebeneinander schreibt und die bezüglichen Änderungen als Koeffizienten nach und nach beisetzt (wie aus nebenstehender Tabelle ersichtlich ist).

Was hier in sechs Zeilen aufgelöst ist, läßt sich in einer einzigen erledigen. Es bedarf dann nur noch der Ausrechnung mit einem Rechenschieber, um die Übereinstimmung mit den ersterrechneten Zahlen festzustellen.

Im Falle des Kalziumkarbides, das nach der Formel  $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$  gebildet wird, kann ganz analog verfahren werden. Das Endprodukt ist nie hundertprozentig; man wird aber zunächst auf 100%iges  $\text{CaC}_2$  rechnen und den darin enthaltenen Anteil an unverändertem Kalk

und Kohle nachträglich als Vermehrung des Ausgangsproduktes in Rechnung setzen.

SiO <sub>2</sub>	C	Si	CO
40	24	28	56
( $\frac{2}{3}$ Ausbeute an Si:)			
60	24	$\frac{2}{3} 28$	56
( $\frac{1}{7}$ Kohleüberschuß:)			
60	$\frac{8}{7} \cdot 24$	$\frac{2}{3} 28$	$\frac{8}{7} \cdot 56$
(Berücksichtigung des C-Gehaltes im Koks:)			
60	$\frac{8 \cdot 24}{7 \cdot 0,864}$	$\frac{2}{3} 28$	$\frac{8}{7} \cdot \frac{56}{0,864}$
(Berücksichtigung des SiO <sub>2</sub> -Gehaltes im Quarzit:)			
60	$\frac{8 \cdot 24 \cdot 0,97}{7 \cdot 0,864}$	$\frac{2}{3} 28 \cdot 0,97$	$\frac{8}{7} \cdot \frac{56}{0,864} \cdot 0,97$
(Schluß auf die Einheit:)			
1	$\frac{8 \cdot 24 \cdot 0,97}{7 \cdot 0,864 \cdot 60}$	$\frac{2}{3} 28 \cdot \frac{0,97}{60}$	$\frac{8}{7} \cdot \frac{56}{0,864} \cdot \frac{0,97}{60}$

### B. Chargenberechnung für die Erzeugung von 75% Ferrosilizium unter Berücksichtigung der Schlackenbildung.

Im durchgerechneten Beispiele wurde bloß der Reingehalt der Rohmaterialien berücksichtigt. Die Schlackenbildung und Reduktion des stets vorhandenen Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wurde vernachlässigt, was streng genommen nicht zulässig ist. Um die Resultate der nun folgenden exakten Rechnung (nach Fall II) mit der annähernden (nach Fall I) vergleichen zu können, werden im folgenden dieselben Rohmaterialien wie oben als gegeben angenommen, deren Analyse nebenstehende Tabelle zeigt.

Die Schlackenbasen im Quarz und Koks vereinigen sich auf Kosten der Kieselsäure zu einer saueren Schlacke mit 70% SiO<sub>2</sub> und 30% Basen. Dadurch vermindert

sich der für die Reduktion disponible Kieselsäuregehalt im Quarzit wie im Koks. Wenn in letzterem die Basen stärker überwiegen, so daß der natürliche Kieselgehalt im Koks zu der Schlackenbildung nicht genügt, dann binden die Basen auch einen äquivalenten Teil des SiO<sub>2</sub>-Gehaltes im Quarzit. Der Koks hat somit, je nachdem, einen disponiblen SiO<sub>2</sub>-Rest oder ein Manko. Eines wie das andere muß im Gesamtkalkül berücksichtigt werden.

Die Rechnungen lassen sich am besten an Hand eines Schemas durchführen, dem man etwa folgende Gestalt geben kann.

Koks.	Basen verschlackt:	SiO <sub>2</sub> -Bedarf	SiO <sub>2</sub> -Rest	Schlackenmenge
	SiO <sub>2</sub> -Rest:	C-Bedarf	Koksbedarf	Si-Menge
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	C-Bedarf	Koksbedarf	Fe-Menge

	Quarz	Koks	Alteisen
SiO <sub>2</sub> . . . . .	97,0	3,6	—
Schlackenbasen . . . . .	1,6	1,4	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	1,4	1,3	6,2
C . . . . .	—	86,4	—
Fe-Metall . . . . .	—	—	91,4
Feuchtigkeit und flüchtige Substanz	—	7,3	2,4

Quarzit.	Basen verschlackt:	SiO <sub>2</sub> -Bedarf	SiO <sub>2</sub> -Rest	Schlackenmenge
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> reduziert:	C-Bedarf	Koksbedarf	Fe-Menge
	SiO <sub>2</sub> -Rest	C-Bedarf	Koksbedarf	Si-Menge
Eisen.	Met.-Gehalt:			Met.-Gehalt
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> reduziert:	C-Bedarf	Koksbedarf	Fe <sub>2</sub> -Menge
				<u>Σ Fe</u>

**Koks 100 kg.** Zur Bildung einer Schlacke mit 70 % SiO<sub>2</sub>-Gehalt verbraucht je 1 kg Schlackenbase  $\frac{7}{3}$  kg SiO<sub>2</sub> = 2,33 kg SiO<sub>2</sub>.

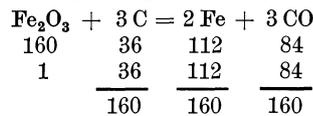
Wenn in 100 kg Koks 1,4 kg Basen enthalten sind, werden für diese 3,26 kg SiO<sub>2</sub> gebraucht, um 4,66 kg Schlacke zu liefern. Da der SiO<sub>2</sub>-Gehalt im Material 3,6 kg beträgt, verbleibt ein SiO<sub>2</sub>-Rest von 0,34 kg zur Reduktion. Dieses verbraucht dabei nach dem Verhältnis

$$\frac{\text{SiO}_2}{2\text{C}} = \frac{60}{24} = \frac{10}{4}$$

theoretisch 0,136 kg C und liefert 0,16 kg Si.

Es ist demnach nicht mehr der ganze Kohlenstoffgehalt im Koks für andere Zwecke disponibel, sondern nur die Differenz 86,4 — 0,136 = 86,264 kg.

Die Reduktion des Eisenoxydes geht nach der Gleichung vor sich:



1 kg Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verbraucht also  $\frac{36}{160} = 0,225$  kg C und liefert 0,7 kg Fe als Metall.

Von der gesamten Siliziummenge verflüchtigt sich ein Drittel.

Der Quarzit liefert . . . . .	43,53 kg
Das Koksmaterial . . . . .	0,08 kg
	<u>43,61 kg Silizium,</u>

von denen aber nur zwei Drittel, das sind 29,07 kg Silizium, in Form der Legierung erhalten werden können.

Der Eisengehalt soll 25 % vom ganzen, also ein Drittel der Siliziumausbeute betragen,

insgesamt . . . . .	9,69 kg Fe
im Koks enthalten . . . . .	0,455 kg Fe
im Quarzit enthalten . . . . .	0,98 kg Fe
	<u>8,255 kg Fe</u>

und zwar in Form von Spänen mit 95,75 % disponiblen Eisen, was 8,62 kg Spänen entspricht. Da auf 100 kg Späne 1,67 kg Koks zur Reduktion der rostigen Korrosionen entfallen, würde sich der Koksbedarf um 0,144 kg theoretisch und unter Berücksichtigung des Abbrandes von  $\frac{1}{8}$  um 0,1643 kg vermehren, die zur Gesamtmenge des Koksmaterials zu addieren sind; mithin beträgt der gesamte Koksbedarf

für Quarzit . . . . .	50,00
für Rost . . . . .	0,164
	<u>50,164 kg</u>

Die hierdurch verursachte Vermehrung des Siliziums und Eisens kann vernachlässigt werden, beträgt sie doch nur 0,17 g Si und 1,46 g Fe.

Die Charge setzt sich demnach zusammen aus

100 kg Quarzit . . . . .	2580 kg
8,62 kg Spänen . . . . .	222,5 kg
50,164 kg Koks . . . . .	1294 kg

und gibt

29,07 kg Silizium . . . . .	750 kg
38,76 kg Ferrosilizium 75 % . . . . .	1000 kg
7,67 kg Schlacke . . . . .	200 kg

Der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt im Koks (1,3%) verbraucht daher 0,292 kg C und liefert 0,91 kg Fe.

Durch den C-Verbrauch vermindert sich der disponible C-Gehalt im Koks von 86,264 auf 85,97 und 86 kg C in 100 kg Koks.

Der erste Teil des Schemas würde dann unter Einsetzung der errechneten Daten so aussehen:

Koks 100 kg.	SiO <sub>2</sub> -Gehalt	3,60 kg	
	Verschlackung: SiO <sub>2</sub> -Bedarf	3,26 kg	4,66 kg Schlacke
	SiO <sub>2</sub> -Rest	0,34 kg	
	SiO <sub>2</sub> -Reduktion C-Bedarf	0,136 kg C	0,16 Si
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Reduktion C-Bedarf	0,292 kg C	0,91 kg Fe
	Summa C-Bedarf	0,428 kg C	
	C-Gehalt	86,4 kg C	
	Disponibles C	85,972 kg C	85,972 kg C

Fortan ist für den disponiblen C-Gehalt im Koks die Zahl  $\frac{86}{100}$  zu verwenden.

**Quarzit 100 kg.** Die Verschlackung der Fremdbasen im Quarzit und im Koks führt bei dem großen Kieselsäureüberschuß wie erwähnt, von selbst zu einer saueren Schlacke mit 70% SiO<sub>2</sub>. Da der Quarzit 1,6% Fremdbasen (ohne Eisenoxyd) enthält, somit 1,6 kg in 100 kg Quarzit, so entziehen ihm diese  $\frac{7}{3} \cdot 1,6 = 3,73$  kg SiO<sub>2</sub>, die mit den Basen 5,33 kg Schlacke bilden. Dadurch vermindert sich der disponible SiO<sub>2</sub>-Gehalt auf  $97,0 - 3,73 = 93,27$  kg SiO<sub>2</sub>, die durch Koks mit einem disponiblen C-Gehalt von 86% zu reduzieren sind. Wie im vorigen Beispiel, kann auch hier bei der Rechnung abgekürzt verfahren werden:

$\frac{\text{SiO}_2}{60}$	$\frac{2\text{C}}{24}$	$\frac{\text{Si}}{28}$	2 CO
Quarzit	Koks		
$\frac{60}{0,933}$	$\frac{24}{0,96}$	28	
1	$\frac{24}{60 \cdot 0,86}$	$\frac{28}{60}$	
$\frac{1}{0,933}$	$\frac{24 \cdot 0,933}{60 \cdot 0,86}$	$\frac{28 \cdot 0,933}{60}$	
100	43,3	45,53	

100 kg Quarzit verbrauchen somit zur Si-Reduktion theoretisch 43,4 kg Koks und liefern 45,53 kg Si.

Der Eisengehalt im Quarzit, 1,4 kg in 100 kg, unterliegt ebenfalls der Reduktion. Nach den vorhin abgeleiteten Relativzahlen ist der Koksbedarf  $0,225 \cdot 1,4 = 0,36$  kg Koks, und es entstehen  $1,4 \cdot 0,7 = 0,98$  kg Fe.

Der Mehrverbrauch von 0,36 kg Koks ist zu der eben für die Siliziumreduktion berechneten zuzuzählen. Somit ist der Koksverbrauch für 100 kg Quarzit endgültig  $43,4 + 0,36 = 43,76$  kg.

Das Schema:

Quarzit 100 kg (97% SiO <sub>2</sub> )	
1,6 kg Fremdbasen	}
+ 3,73 kg SiO <sub>2</sub>	
97 — 3,73 kg SiO <sub>2</sub>	= 5,33 kg Schlacke
<u>93,27 kg</u>	disponibles SiO <sub>2</sub>
<u>45,53 kg</u>	Si (reduziert)
43,4 kg Koks	}
0,36 kg Koks	
1,4 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,76 kg Koks
<u>0,98 kg</u>	Fe.

**Drehspäne 100 kg.** Der SiO<sub>2</sub>-Gehalt im Eisen 0,2—0,4% kann vernachlässigt werden. Dagegen verbraucht der Restgehalt von 6,2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,225 seines Gewichtes an Kohlenstoff; sein C-Bedarf ist daher 1,439 kg C, oder auf Koks mit 86% disponiblen C umgerechnet, 1,67 kg Koks. Der Rost liefert 4,34 kg Fe zu den bereits als Metall vorhanden gewesenen 91,4 kg, so daß insgesamt 95,74% Fe disponibel sind.

Das Schema:

Drehspäne 100 kg			
6,2 kg Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C-Bedarf	1,439 kg	
	Koksbedarf	1,67 kg	Reduziertes Eisen 4,34 kg
	Vorhandenes Eisenmetall, nicht oxydiert . . . . .		91,4 kg
	Disponibles Eisen, metallisch . . . . .		<u>95,74 kg</u>

Damit ist das Schema erledigt und alle Daten zur Berechnung der Charge gegeben. Der besseren Übersicht wegen seien hier nochmals alle errechneten Daten wiederholt.

100 kg Koks entsprechen:	4,66 kg Schlacke	0,16 kg Si reduziert
	86,00 kg disponibler C	0,91 kg Eisen reduziert
	0,34 kg disponibles SiO <sub>2</sub>	
100 kg Quarzit entsprechen:	93,27 kg disponibles SiO <sub>2</sub>	43,53 kg Silicium (reduziert)
	43,4 kg Koks für Si-Reduktion	0,98 kg Eisen (reduziert)
	0,36 kg Koks für Fe-Reduktion	5,33 kg Schlacke
	Summa 43,76 kg Koks für Reduktionen	
100 kg Drehspäne entsprechen:	91,4 + 4,34 = 95,74 kg Fe	
	1,67 kg Koks.	

### C. Chargenberechnung für die Erzeugung von 50prozentigem Ferrosilizium unter Berücksichtigung der Schlackenbildung.

Der niedrige Siliziumgehalt des Endproduktes ist nach technischen Erfahrungen mit einer Verminderung des Koksabbrandes und geringerer Siliziumverflüchtigung verbunden. Ersterer betrage rund  $\frac{1}{11}$  des chargierten Koksgewichtes, mithin ist um  $\frac{1}{10}$  mehr zu berechnen, als der Theorie entspricht. Vom Silizium verflüchtigen sich 16—18%, das ist rund  $\frac{1}{6}$ ; daher beträgt die Siliziumausbeute  $\frac{5}{6}$  der Theorie.

Es entsprechen daher 100 kg Quarzit nach der obigen Aufstellung:

Koks . . . . .	theoretisch	43,76 kg	praktisch	48,14 kg
Silizium . . . . .	„	43,53 kg	„	36,27 kg
Eisen . . . . .	„	0,98 kg	„	0,98 kg
Schlacke . . . . .	„	5,33 kg	„	5,33 kg

4814 kg Koks geben

Si . . . . .	theoretisch	0,077 kg	praktisch	0,064 kg
Eisen . . . . .	„	0,44 kg	„	0,44 kg

Die gesamte Siliziumausbeute beträgt somit  $36,27 + 0,064 = 36,33$  kg Si, dem ebensoviel Eisen in Form von Spänen zugesetzt werden soll.

Von den 36,33 kg Eisen sind durch Quarzit und Koks  $0,98 + 0,44 = 1,42$  kg gedeckt, es verbleiben demnach 34,91 kg Fe in Form von Drehspänen zuzusetzen, wovon 36,46 kg nötig sind (disponibler Eisengehalt 95,74% Fe), die einen Mehraufwand von 0,61 kg Koks zur Reduktion des Rostes nötig machen. (Der Si- und Fe-Gehalt dieser geringen Menge kann vernachlässigt werden.)

Es sind somit folgende Quantitäten zu chargieren: 100 kg Quarzit, 48,75 kg Koks, 36,46 kg Drehspäne. 100 kg Quarzit bedürfen somit zur Reduktion theoretisch

$$43,53 + 0,36 = 43,76 \text{ kg Koks.}$$

Der praktische nötige Überschuß an Koks ändert sich mit dem Siliziumgehalt der beabsichtigten Ferrolegerung. Wie erwähnt, geht bei 75%igem Ferrosilizium  $\frac{1}{8}$  des chargierten Kohlenstoffes durch Verbrennung verloren, bei 25%iger Legierung erniedrigt sich der Verlust bis gegen  $\frac{1}{20}$ , das sind 5%.

Um bei der im ersten Beispiel angenommenen 75%igen Legierung zu bleiben, ist für den theoretisch errechneten Koksbedarf ein Plus von  $\frac{1}{7}$  der Theorie zu veranschlagen, also zu den 43,76 kg Koks noch 6,29 kg zuzuzählen, so daß sich ein Koksverbrauch von 50,05 ergibt.

50 kg Koks enthalten und liefern 0,08 kg Si und 0,455 kg Eisen, ohne weiteren Kohlenstoffaufwand, wie wir ohne Fehler annehmen können.

### D. Roheisenerzeugung unter Schlacke von vorgeschriebener Zusammensetzung.

Ein Beispiel für einen elektrometallurgischen Vorgang, bei welchem durch Zuschläge eine Schlacke ganz bestimmter Zusammensetzung erzeugt werden muß, um ein gewünschtes Produkt zu erschmelzen, ist die Reduktion von Eisenerzen im elektrischen Hochofen.

Es sei ein Eisenerz gegeben mit der Analyse:

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	68,59	CaO	2,34	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,65
SiO <sub>2</sub>	14,23	MgO	1,47	MnO	5,11

Daraus soll unter einer Monosilikatschlacke ein Roheisen vom Gehalte von

Fe = 90%	Mn = 5,1%
C = 4,1%	Si = 0,8%

erschmolzen werden.

Als Zuschlag steht reiner Kalkstein mit 53,20% CaO zur Verfügung. Der Rest sei Kohlensäure und Wasser — ohne sonstige Verunreinigungen.

Das Koksmaterial enthalte:

86,4% C	0,6% CaO	0,4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3,6% SiO <sub>2</sub>	0,4% MgO	

Der Gang der Rechnung ist folgender: Zunächst wird die Menge des reinen Eisens aus 1000 kg Erz berechnet. Hierbei sei die vereinfachende Annahme, daß alles Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> im Roheisen wieder erscheint, die Schlacke also eisenfrei sei.

Der theoretischen Menge Fe sind dann die entsprechenden Fremdbestandteile Si, Mn und C zuzuzählen, um das Gewicht des Roheisens zu erfahren.

Der Koksbedarf ergibt sich aus den tatsächlichen Mengen Fe, Mn, Si, C im Roheisen. Daher ist ein Abbrand von 5% Koks in Rechnung zu stellen.

Die nicht reduzierten Schlackenbildner (sauer und basischer Natur) im Erz und Koks sind durch Kalkstein so zu ergänzen, daß eine Monosilikatschlacke entsteht. Die Faktorentabellen S. 20 erleichtern die langwierige Berechnung der jeder Schlackenbase entsprechenden Kieselsäuremenge.

685,9 kg Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ergeben mit 0,7 multipliziert die erschmelzbare Eisenmenge zu 480,13 kg.

Mit Hilfe der Eisenanalyse findet man die dieser Quantität Fe zugehörigen Mengen Si, C und Mn, welche das Roheisen enthalten soll.

Fe 90%	480,13 kg
C 4,1%	21,87 kg
Mn 5,1%	27,21 kg
Si 0,8%	4,27 kg
Roheisengewicht	533,48 kg

Den zur Reduktion dieser Metallmenge nötigen Kohlenstoff ergeben die folgenden Rechnungen:

a) Eisenreduktion (480,13 kg) . . .	2 Fe — 3 C	
	112 — 36;	$\frac{480,13 \times 36}{112} = 153,61$
b) Manganreduktion (27,2 kg) . . .	Mn — 1 C	
	55 — 12	$\frac{27,2 \times 12}{55} = 5,94$
c) Siliciumreduktion (4,27 kg) . . .	Si — 2 C	
	28 — 24	
	7 — 6	$\frac{4,27 \times 6}{7} = 3,66$
In Roheisen sind enthalten 21,87 C . . . . .		21,87
		195,08 kg C

Diese Kohlenstoffmengen entstammen dem Koks (mit 86,4% C). Die entsprechende Koksmenge beträgt  $\frac{195,08}{0,864} = 225,8$  kg Koks.

Bei einem Abbrand von 5% erhöht sich der Koksbedarf auf 236,0 kg.

1000 kg Erz		236 kg Koks (nach S. 27 Analyse)
SiO <sub>2</sub> 133,15 kg		$236 \times 36 = 8,50$ kg SiO <sub>2</sub>
CaO 23,4 kg		$236 \times 6 = 1,42$ kg CaO
MgO 14,7 kg		$236 \times 4 = 0,84$ kg MgO
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6,5 kg		$236 \times 4 = 0,84$ kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
MnO 16,0 kg		— —
192 kg		11,60 kg

Die Summe in Erz und Zuschlägen gibt die nachfolgenden Multiplikatoren. Die Multiplikatoren sind der Tabelle auf S. 20 entnommen und sind die Faktoren zur unmittelbaren Errechnung der SiO<sub>2</sub>-Komponente für Monosilizide

CaO . . . . .	24,82 kg	( $\times 0,537$ )	=	13,33	SiO <sub>2</sub>
MgO . . . . .	15,54 kg	( $\times 0,752$ )	=	11,68	SiO <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	7,34 kg	( $\times 0,885$ )	=	6,50	SiO <sub>2</sub>
MnO . . . . .	16,0 kg	( $\times 0,424$ )	=	6,78	SiO <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub> -Bedarf der Basen . . . . .				39,29	kg
SiO <sub>2</sub> disponibel . . . . .				141,65	kg
SiO <sub>2</sub> Überschuß . . . . .				103,36	kg

Für den durch Basen nicht gedeckten Überschuß findet man den Kalkbedarf durch Multiplikation mit dem in der Tabelle 1 angegebenen Faktor 1,86

$$103,36 \times 1,86 = 192,25 \text{ kg CaO,}$$

und da der Kalkstein 53,2% CaO enthält, beträgt das äquivalente Kalksteingewicht  $192,25 = 361,4$  kg.

Die Charge müßte demnach folgende Zusammensetzung haben: Erz 1000 kg, Koks 236 kg, Kalkstein 361,4 kg, sie gibt 533,5 kg Roheisen.

Zur Bildung der Schlacke liefert

das Erz . . . . .	193,75 kg	} Summen der SiO <sub>2</sub> - und Basengehalte
der Koks . . . . .	11,60 kg	
der Kalkstein . . . . .	192,25 kg	
	397,60 kg	Gewicht des erforderlichen CaO.

Um die Rechnung nicht allzu langwierig zu gestalten, wurde die vereinfachende Annahme gemacht, daß der Kalkstein keine fixen Bestandteile wie MgO, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiO<sub>2</sub> enthalte.

Der Praxis stehen so reine Kalksteine kaum je zur Verfügung; man rechnet aber häufig die Fremdbestandteile auf CaO um.

Da, wie schon bei der Besprechung der Charakteristik ausgeführt, der Schlackenindex nur auf die Sauerstoffatome der Basen bezogen wird, so sind CaO, MgO, FeO und MnO einander äquivalent. Das Verschlackungsvermögen ist daher für folgende (Molekular-)Gewichte der verschiedenen Oxyde gleich.

$$\begin{array}{l} \text{CaO} = 56 \\ \text{MgO} = 40 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{MnO} = 71 \\ \text{FeO} = 72 \end{array} \quad \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{3} = 34.$$

40 Teile Magnesia sind demnach 56 Teilen Kalk äquivalent. Man hat also einen Gehalt von  $a$  % MgO mit dem Verhältnis  $\frac{56}{40}$  zu multiplizieren, um das Kalkäquivalent zu erhalten.

$$\begin{array}{ll} 1\% \text{ MgO entspricht } \frac{56}{40} \text{ CaO} = 1,40 \text{ CaO} & 1\% \text{ MnO entspricht } \frac{56}{71} \text{ CaO} = 0,79 \text{ CaO} \\ 1\% \text{ FeO} \quad \text{,,} \quad \frac{56}{72} \text{ CaO} = 0,78 \text{ CaO} & \left( \frac{1\% \text{ Al}_2\text{O}_3}{3} \quad \text{,,} \quad \frac{56}{34} \text{ CaO} = 1,65 \text{ CaO} \right) \end{array}$$

Die Stellung des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ist amphoter, bald scheint es als Säure, bald als Base zu wirken. Der oben angeführte Umrechnungsfaktor wird vielfach bestritten und vorgeschlagen,

das  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zur Gänze als  $\text{CaO}$  oder als  $\text{SiO}_2$  zu setzen, also in unserem Falle ohne Faktor wie Rein- $\text{CaO}$  zu betrachten.

In gleicher Weise ist der  $\text{CaO}$ -Gehalt des Kalksteines im Beispiel nicht ein tatsächlicher, sondern ein rechnerischer und drückt nur die Äquivalenz, den „Titer“, aus.

## Die Energieausnutzung.

Aus den Berechnungen, welche in den vorstehenden Kapiteln erläutert wurden, ergibt sich der gesamte theoretische Energiebedarf, welcher in der Praxis natürlicherweise nie genügt, weil stets Energieverluste auftreten, deren Ermittlung die nächstfolgenden Kapitel gewidmet sind.

Je mehr sich der praktische Energiebedarf dem theoretischen Erfordernis nähert, um so größer ist die Energieausnutzung. Das Verhältnis beider

$$\eta = \frac{\text{theoretischer Energiebedarf}}{\text{Effektiver Energiebedarf}}$$

heißt Energieausbeute und dient zur Beurteilung der Ökonomie der Fabrikationsprozesse.

Als Berechnungseinheit war bisher die Kilogrammkalorie benutzt worden. Da die Energie bei den in Rede stehenden thermischen Fabrikationen in Form von Elektrizität zugeführt wird, empfiehlt es sich, und es entspricht auch dem Gebrauch, Wärmequanten durch das praktische Maß der elektrischen Energie, die Kilowattstunde, auszudrücken. Man erreicht dabei den Vorteil, mit kleineren Zahlen rechnen zu können.

Das Wärmeäquivalent für eine elektrische Kilowattstunde sind 864 kcal. Mit Hilfe dieser Zahl kann jede Wärmequantität in elektrische Energie umgerechnet werden.

Um beispielsweise festes  $\text{SiO}_2$  auf seinen Schmelzpunkt zu erwärmen und zu schmelzen, bedarf es einer Wärmezufuhr von 761 kcal (totale Schmelzwärme), das sind  $\frac{761}{864} = 857$  kWh.

Ein größeres technisches Maß elektrischer Energie ist der Kilowatttag und das Kilowattjahr. Für letzteres findet man bei verschiedenen Autoren verschiedene Auffassungen, je nachdem das Jahr zu 360 Tagen = 8640 Stunden oder manchmal auch zu 350 Tagen angenommen wird. Auch Berechnungen, welche unter einem Kilowattjahr 5000 kWh zusammenfassen, trifft man an.

Infolge der unvermeidlichen Energieverluste in der Technik ist der für einen Vorgang praktisch nötige Energieaufwand immer höher, als die Theorie erfordern würde.

Das Verhältnis der theoretischen Energiemenge zur praktisch aufgewendeten (effektiven), nennt man den Wirkungsgrad.

Da sich die theoretischen und effektiven Energien zueinander wie umgekehrt die wahre zur theoretischen Produktion verhalten, besteht die Beziehung:

$$\frac{\text{Theoretischer Energiebedarf}}{\text{Effektiver Energiebedarf}} = \frac{\text{wahre Produktion}}{\text{theoretische Produktion}} = \eta.$$

Daraus geht hervor, daß der Wirkungsgrad sowohl aus Energien wie aus Produktionsgewichten berechnet werden kann.

### A. Berechnungsbeispiel des Material- und Energieaufwandes für die Erzeugung von künstlichem Korund.

Es wäre Bauxit durch elektrothermische Schmelzung in künstlichen Korund überzuführen. Da der Bauxit reduzierbare Verunreinigungen enthält, die im Korundmaterial nicht vorkommen dürfen, wie  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  chargiert man ihn mit Koks, der zwar die genannten Verunreinigungen reduziert und in eine Legierung überführt, gleichzeitig aber auch etwa 40% des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehaltes mit reduziert, wovon 20% ver-

dampfen und 20% von einer FeSiTi-Legierung aufgenommen werden. 5% der Koksmenge verbrennt.

Aus den Analysen läßt sich demnach die Charge berechnen. Im Ofen selbst findet die Erhitzung auf die Reaktions- bzw. Ofentemperatur statt. Die hierzu notwendige Wärme liefert der elektrische Strom. Die vor sich gehenden chemischen Reaktionen geben Wärmetönungen, ferner konsumiert die Verdampfung des Aluminiums Wärme, das Kohlenoxyd entweicht bei etwa 2000° mit dementsprechendem Wärmeinhalt.

Die Analysen der Rohstoffe seien:

Bauxit		Koks	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	79%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5%
SiO <sub>2</sub>	6%	SiO <sub>2</sub>	7%
TiO <sub>2</sub>	3%	TiO <sub>2</sub>	—
H <sub>2</sub> O	—	H <sub>2</sub> O	2%
C	—	C	82%

Der C-Gehalt des Koksmaterials wird durch die Reduktion der Verunreinigungen vermindert.

5 kg Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> verbrauchen . . . . .	1,13 kg C
7 kg SiO <sub>2</sub> verbrauchen . . . . .	2,80 „
Reduktion der Verunreinigung . . . . .	<u>3,93 kg C</u>

Demnach verbleiben für 100 kg Koks rund 78 kg C, von denen wieder annähernd 5% verbrennen, so daß für Reduktionszwecke 74 kg C übrig verbleiben.

Von Bauxit werden Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> und  $\frac{4}{10}$  des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (das sind 31,6 kg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) reduziert.

Diese verbrauchen für 12 kg Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	2,7 kg C und liefern 8,4 kg Fe
6 kg SiO <sub>2</sub> . . . . .	2,4 kg C „ „ 2,8 kg Si
3 kg TiO <sub>2</sub> . . . . .	0,9 kg C „ „ 1,8 kg Ti
31,6 kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> red. . . . .	<u>11,15 kg C „ „ 16,73 kg Al*</u>

Der C-Verbrauch beträgt in Summa . . . . . 17,15 kg C oder  
23,17 kg Koks

Das Chargierungsverhältnis ist demnach auf je 100 kg Bauxit 23,17 kg Koks.

Wir notieren folgende Übersicht:

aus 100 kg Bauxit: 17,15 kg C	aus 23,17 kg Koks: 17,15 kg C	Außerdem ent-
8,36 kg Al-Dampf	0,47 kg Al-Dampf	weichen Reduk-
8,37 kg Al	0,46 kg Al	tionsprodukte
8,4 kg Fe	0,8 kg Fe	(Gase, Wasser-
2,8 kg Si	0,8 kg Si	dampf usw.)
1,8 kg Ti		
47,4 kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> als Korund		

23,17 kg Koks mit 82% fixem Kohlenstoff liefern bei den Reduktionen und dem Abbrand 44,33 kg CO, die bei 2000° den Ofen zugleich mit dem verdampften Feuchtigkeitsgehalt des Koksmaterials (0,463 kg Wasserdampf) und dem verdampften Aluminium (8,83 kg) verlassen.

Die Energiebilanz hat die Reaktionswärmen bei den Reduktionen, ferner die Erwärmung der Stoffe, ihre Verflüssigung bzw. auch die Verdampfung zu umfassen. Sie setzt sich also zusammen aus Reaktionswärmen, fühlbaren Wärmen und latenten Wärmen.

Die Reaktionswärmen sind:

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : — 55000 cal für 56 g Fe	TiO <sub>2</sub> : — 160000 cal für 48 g Ti
SiO <sub>2</sub> : — 122000 cal für 28 g Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : — 99670 cal für 27 g Al
somit für 17,66 kg Al . . . . .	64470 kcal
9,2 kg Fe . . . . .	9040 kcal
3,6 kg Si . . . . .	17700 kcal
1,8 kg Ti . . . . .	6000 kcal
	<u>97210 kcal</u>

\* Zur Hälfte als Dampf, zur Hälfte als Legierung.

Die geschmolzenen Produkte resultieren mit einer Temperatur von 2200° C. Ihr Wärmeinhalt gegenüber der Chargierungstemperatur (0° C) setzt sich aus der fühlbaren Wärme, d. i. spezifische Wärme × Schmelztemperatur  $t_s$  in ° C × Gewicht einerseits und aus der latenten Schmelzwärme  $L$  und ferner der fühlbaren Überhitzung bis auf Ofentemperatur  $t_2$  zusammen nach der schematischen Summenformel:

$$Q = C_{\text{fest}} \cdot t_s + L + C_{\text{flüss.}} (t_2 - t_5).$$

Für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> flüssig 2200°

mittlere spezifische Wärme 0—2050° . . . . .	0,38	}	Daraus für 1 kg $Q_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 928 \text{ kcal}$
Schmelzwärme $L$ . . . . .	48,—		
mittlere spezifische Wärme 2050—2200° . . . . .	0,567		
für 47,4 kg $Q_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 928 \times 47,4 . . =$			43987 kcal

Für die Legierung:

α) Eisen: mittlere spezifische Wärme 0—1535° . . . . .	0,167	}	Daraus für 1 kg $Q_{\text{Fe}} = 449$
Schmelzwärme $L$ . . . . .	60,—		
mittlere spezifische Wärme 1535—2200° . . . . .	0,20		
für 9,2 kg $Q_{\text{Fe}} = 449 \times 9,2 \hat{=} 4100 \text{ kcal}$			

β) bei Silizium ergibt sich in gleicher Weise für 3,6 kg  $Q_{\text{Si}} = 750 \times 3,6 \hat{=} 2700 \text{ kcal}$

γ) bei Titan . . . . . für 1,8 kg  $Q_{\text{Ti}} = 998 \times 1,8 \hat{=} 1800 \text{ kcal}$

δ) bei Aluminium . . . . . für 8,83 kg  $Q_{\text{Al}} = 733,5 \times 8,83 \hat{=} 6375 \text{ kcal}$

Somit für die Legierung (23,43 kg)  $Q_L . . . . . \hat{=} 15000 \text{ kcal}$

Die gas- und dampfförmigen Produkte entweichen bei der (angenommenen) Temperatur von 2000°. Es sind dies

Kohlenoxyd . . . . .	44,33	kg
Aluminiumdampf . . . . .	8,83	kg
Wasserdampf aus dem Koks . . . . .	0,436	kg
Das CO entführt $566,6 \times 44,33 \text{ kcal} . . =$	25116	kcal
Das Al „ $2040 \times 8,83 \text{ kcal} . . =$	21245	kcal
Das H <sub>2</sub> O „ $2177 \times 0,436 \text{ kcal} . . =$	950	kcal
$Q_D . . . . . =$	47311	kcal

Der totale Wärmeverbrauch ergibt sich durch die Summation

$Q_R$ für Reaktionswärmen . . . . .	etwa	97200	kcal
$Q_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ für Aluminiumoxyd . . . . .	„	44000	kcal
$Q_L$ für die Legierung . . . . .	„	15000	kcal
$Q_D$ für die Gase und Dämpfe . . . . .	„	47300	kcal
			203500 kcal

Der theoretische Energieaufwand im elektrischen Maße beträgt

$$\frac{203508 \text{ kcal}}{864} = 235,54 \text{ kWh.}$$

Dafür werden erhalten 47,4 kg Korund, 23,43 kg Legierung und 44,33 kg Kohlenoxyd.

Wenn der praktische Energieverbrauch sich aus der Zählerangabe mit 346 kWh ergeben hätte, so wäre die Energieausbeute  $\eta = 68\%$ .

Der Übersichtlichkeit des Gedankenganges wurden die unschwierigen, aber langwierigen Nebenrechnungen zur Ermittlung des Wärmeinhaltes in dem oben behandelten Beispiele zum Opfer gebracht. Nach den Ausführungen über fühlbare und latente Wärme ist deren Reproduktion nicht nötig. Das Ergebnis der Einzelrechnungen sei hier wiederholt, weil es für den praktischen Gebrauch von Wert sein kann, sie vereint zu finden.

Wärmeinhalte je Kilogramm geschmolzenes	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2200°	928	kcal
„	Si	2200°	750	kcal
„	Ti	2200°	997,8	kcal
„	Al	2200°	733,5	kcal
„	Fe	2200°	449,4	kcal
CO . . . . .		2000°	566,6	kcal
H <sub>2</sub> O . . . . .		2000°	2177	kcal
Al-Dampf . . . . .		2000°	2406	kcal

Aus dieser Aufstellung geht hervor, wie wichtig es ist, die Rohmaterialien mit Abhitze zu trocknen.

### B. Die Vorberechnung des effektiven Energieverbrauches.

In den bisherigen Beispielen fanden die theoretischen Berechnungen stets eine Korrektur durch Erfahrungskoeffizienten, die sich in der Praxis ergeben haben. Der effektive Energieverbrauch war ebenfalls durch eine Erfahrungsziffer gegeben.

Für neue Verfahren oder solche, für welche Erfahrungsziffern nicht zugänglich sind, ist man zur Vorkalkulation des voraussichtlichen effektiven Energieverbrauches auf Schätzungen angewiesen, für die zwei Wege offen sind.

Man kann zunächst annehmen, daß ein Ofen für ein neues Verfahren annähernd den gleichen Wirkungsgrad haben wird wie für ein ähnliches, wohlbekanntes. Von verschiedener Seite wird die Ansicht vertreten, daß bei Öfen gleicher Energieaufnahme der Wirkungsgrad konstant und unabhängig vom Verfahren ist, wenn man ihn auf Totalgewichte der Produkte, also auf die Summe der Produkte und Materialverluste durch Vergasung und Verdampfung bezieht. Diese Annahme ist aber höchstens für ganz oberflächliche Schätzungen anwendbar und versagt sogar bei den verschiedenen analogen Verfahren für Legierungen.

Mit aller Reserve kann für einen Ofen von 1000 kW Leistung der Wirkungsgrad mit 60%, für einen solchen von 5000 kW mit 70% angenommen werden. Aus dem theoretischen Energiebedarf läßt sich der tatsächliche dann leicht, aber in ganz roher Weise schätzen.

Einen anderen Weg gibt Coutagne<sup>1</sup> für Ferrolegierungen an. Es hat sich erfahrungsgemäß ergeben, daß für diese der tatsächliche Energieverbrauch ein additiver ist. Wenn man die Zusammensetzung der Schlacke der Legierung und den Energieaufwand für jeden der Bestandteile kennt, läßt sich leicht der effektive Energieverbrauch berechnen. Das Resultat gibt in vielen Fällen mit hinlänglicher Genauigkeit praktisch verwertbare Daten.

In einem Ofen von 900—1000 kW ergeben sich folgende Einzeldaten des effektiven Energieverbrauches für je 1 kg Produkt.

1 kg Eisen aus blanken Spänen . . .	0,4 kWh	Chromschlacke . . . . .	1,5 kWh
1 kg Eisen aus Spänen mit 10% Rost	1 kWh	Silizium aus Quarzit für einen	
1 kg Eisen aus Erzen . . . . .	2,5 kWh	Si Gehalt Si t% Si bis 10% Si	12 kWh
Mangan aus Erz . . . . .	3 kWh	über 10% Si . . . . .	$12 + 16 \left(\frac{t}{100}\right)^2$ kWh
Mangan, Eisenschlacke . . . . .	1 kWh		
Chrom aus Chromit . . . . .	6,6 kWh		

Coutagne gibt hierzu zwei Beispiele:

#### 1. Erzeugung einer Tonne Roheisens aus Erz mit 90% Fe und 3% Si:

Erzreduktion . . . . .	0,9 t Fe	$2500 \cdot 0,9 =$	2250 kWh
Siliziumreduktion . . . . .	0,03 t Si	$12000 \cdot 0,03 =$	360 kWh
Schlackenbildung. . . . .	0,6 t	$1000 \cdot 0,6 =$	600 kWh
Berechneter effektiver Verbrauch . . . . .			3210 kWh
Betriebsdurchschnitt . . . . .			3260 kWh

#### 2. Erzeugung einer Tonne FeSiMn-Legierung mit 25% Si, 50% Mn und 25% Fe aus Erzen mit 500 kg Schlacke:

0,250 t Fe . . . . .	$2500 \cdot 0,25$	625 kWh
0,250 t Si . . . . .	$13000 \cdot 0,25$	3250 kWh
0,500 t Mn . . . . .	$3000 \cdot 0,50$	1500 kWh
0,500 t Schlacke . . . . .	$1000 \cdot 0,50$	500 kWh
Berechneter effektiver Verbrauch . . . . .		5875 kWh
Mittlerer Betriebsdurchschnitt . . . . .		5840 kWh

Der Energieverbrauch für Si ergab sich aus der obigen Formel zu

$$12 + 16 \cdot 0,25^2 = 12 + 1 = 13 \text{ kWh je 1 kg, } 13000 \text{ kWh je Tonne.}$$

<sup>1</sup> Rev. Métallurg. Bd. 17 (1920) S. 450 (Memoires).

Die Übereinstimmung ist aber nicht immer so glänzend wie in dem Beispiele des Autors. Die Rechnung kann auch zu Werten führen, die von der Praxis um 60% und mehr abweichen, weshalb stets Vorsicht am Platze ist.

## Die Wärmeverluste im elektrischen Ofen.

Durch die den Ofen verlassenden Produkte, Nebenprodukte, Gase und Dämpfe wird dem Ofeninnern ständig oder intermittierend Wärme entzogen, deren Menge nach dem im vorhergehenden erläuterten Wege berechnet werden kann. Außerdem gibt aber jeder Ofen selbst durch seine Oberflächen Wärme an die Umgebung durch Mitteilung und durch Strahlung ab, die als Wärmeverluste im engeren Sinne auch mehr oder weniger der Berechnung zugänglich sind. Alle Wärme, die von der Oberfläche an die Umgebung abgegeben wird, ist auf dem Wege der Leitung dorthin gelangt. Im stationären Betrieb muß die Menge der den Oberflächen zugeleiteten Wärme der Menge der an die Umgebung mitgeteilten und ausgestrahlten Wärme gleich sein.

### I. Theorie.

#### A. Innere Wärmeleitung.

In weitgehender Analogie mit der Elektrizitätsleitung befolgt die Wärmeleitung die gleichen Gesetze wie jene. Demgemäß spricht man von einem spezifischen Wärmewiderstand  $\kappa$ , einem spezifischen Wärmeleitvermögen  $\frac{1}{\kappa} = \lambda$ , bezogen auf den Zentimeterwürfel. An die Stelle der elektrischen Potentialdifferenz tritt die Temperaturdifferenz in Celsiusgraden als treibendes Agens der Wärmeströmung. Man pflegt von einem Ohmschen Gesetze der Wärmeleitung zu sprechen und drückt den Wärmewiderstand in thermischen Ohm, die Leitfähigkeit in thermischen Mho aus. Die Wärmemenge wird in Grammkalorien ausgedrückt, ein Watt sind 0,239 cal je Sekunde. (Für Überschlagsrechnungen kann man mit 4,5% Fehler, die sekundliche Grammkalorie vier Watt gleichsetzen.)

Die einen Leiter vom Querschnitt  $f$  (Wandfläche) und der Wandstärke  $\delta$  sekundlich durchfließende Wärmemenge beträgt bei einem Temperaturgefälle  $t - t'$

$$Q = \lambda \frac{(t - t') f}{\delta}$$

worin  $\lambda$  die spezifische Leitfähigkeit des Zentimeterwürfels bedeutet.

Der Widerstand beträgt

$$W = \kappa \frac{\delta}{f} \text{ thermische Ohm,}$$

das Leitvermögen

$$A = \lambda \frac{f}{\delta} \text{ thermische Mho}$$

##### a) Die spezifische Leitfähigkeit.

Die Erfahrung lehrt, daß feste Körper die Wärme besser leiten als Flüssigkeiten; letztere wieder überragen die schlecht leitenden Gase. Je kleiner lose feste Teilchen sind oder je poröser feste Körper sind, um so schlechter leiten sie. Der Dispersionsgrad spielt also eine sehr einschneidende Rolle. Mit steigender Dispersion steigt der Widerstand.

Der Einfluß der Temperatur ist analog ihrer Wirkung auf die elektrische Leitfähigkeit, so daß mit steigender Temperatur bei Metallen die Wärmeleitfähigkeit abnimmt.

Nichtmetallische Körper sind noch zu selten untersucht, um allgemein Sicheres über die Größe des Temperatureinflusses aussagen zu können, ja man weiß in vielen Fällen nicht einmal, in welcher Richtung die thermische Leitfähigkeit beeinflußt wird. Daher läßt man den Temperatureinfluß in allen zweifelhaften Fällen unberücksichtigt.

Stoff	Temperatur- Intervall °	Leitfähigkeit $\lambda$ in		Wärmewiderstand $\kappa$ in	
		C. G. S.-Einh.	therm. Mho	C. G. S.-Einh.	therm. Ohm
Kupfer . . . . .	100—837	0,88	3,66	1,13	0,27
Eisen . . . . .	100—400	0,22	0,92	4,56	1,09
Eisen . . . . .	100—1245	0,18	0,75	5,52	1,32
Graphit-Elektroden . . . . .	100—400	0,34	1,42	2,93	0,70
Graphit-Elektroden . . . . .	100—900	0,29	1,21	3,43	0,82
Kohleelektroden . . . . .	100—360	0,088	0,37	11,3	2,71
Kohlelektroden . . . . .	100—940	0,127	0,53	7,86	1,88
Graphit-Lehmziegel . . . . .	300—600	0,024	0,10	41,8	10,0
Karborumdum-Lehmziegel . . . . .	200—600	0,023	0,096	43,5	10,4
Magnesitziegel . . . . .	200—900	0,0071	0,030	142	34
Chromitziegel . . . . .	150—1000	0,0057	0,024	176	42
Bauxitziegel . . . . .	170—1100	0,0033	0,014	301	72
Ziegel aus feuerfestem Lehm . . . . .	0—500	0,0014	0,0059	711	170
Ziegel aus feuerfestem Lehm . . . . .	0—1300	0,0031	0,013	322	77
Feuerfeste Ziegel mit 66% SiO <sub>2</sub> . . . . .	200—1000	0,0042	0,018	238	57
Silicaziegel . . . . .	150—1000	0,0031	0,013	322	77
Bauziegel . . . . .	100—1000	von 0,0023	0,0096	418	100
Bauziegel . . . . .	100—1000	bis 0,0035	0,0146	284	68
Kieselgurziegel . . . . .	100—900	0,0018	0,0075	536	133
Grober Quarzsand . . . . .	20—155	0,00085	0,0036	1180	281
Kalk . . . . .	20—100	0,00029	0,0012	3450	824
Asbest . . . . .	bis 50	0,00057	0,0024	1770	422
Asbest . . . . .	bis 600	0,00043	0,0018	2340	560
Infusorienerde . . . . .	bis 50	0,00017	0,0007	5900	1410
Infusorienerde . . . . .	bis 350	0,00022	0,00092	4560	1090

Nusselt nimmt an, daß die Leitfähigkeit der feuerfesten Steine annähernd der absoluten Temperatur proportional ist (wie die Ausdehnung bei permanenten Gasen), daher findet auch die Annahme einen analogen mathematischen Ausdruck

$$\lambda_t = \lambda_0 \left( 1 + \frac{1}{273} t \right).$$

Da die Leitfähigkeit in der Tabelle meist als mittlere spezifische Leitfähigkeit innerhalb eines Temperaturintervalles angegeben ist, kann mit großer Annäherung angenommen werden, daß sie der wahren Leitfähigkeit für das Temperaturmittel entsprechen dürfte. Der Schluß auf eine andere Temperatur ist auf dem Wege über  $\lambda_0$  leicht zu ziehen.

Ist zum Beispiel die Leitfähigkeit eines feuerfesten Materiales zwischen 0 und 1200° zu 0,0030 C. G. S.-Einheiten gegeben, so kann derselbe Wert als wahre Leitfähigkeit bei 600° angenommen werden.

$$\text{Da } \lambda_0 \left( 1 + \frac{600}{273} \right) = 0,0030, \text{ ist } \lambda_0 = \frac{0,0030}{1 + \frac{600}{273}} = \frac{0,0030}{1 + 2,195} = 0,00094,$$

Daraus kann dann die Leitfähigkeit für jede beliebige Temperatur berechnet werden, so für 1640°

$$\lambda_{1640} = 0,00094 \left( 1 + \frac{1640}{273} \right) = 0,00094 \cdot (1 + 6,02) = 0,00659,$$

wenn man es nicht vorzieht, graphisch zu arbeiten.

Nach ähnlichen Erwägungen wie bei der Berechnung der spezifischen Wärmen läßt sich aus zwei wahren spezifischen Leitfähigkeiten für jede beliebige Temperatur die wahre spezifische Leitfähigkeit berechnen, unter Anwendung der Extrapolationsformel

$$\lambda_t = \alpha + 2 \beta t,$$

worin  $\alpha$  und  $\beta$  Unbekannt sind, die sich aus den zwei empirischen Einzelwerten ergeben.

#### b) Der Leitungsquerschnitt.

Bei elektrischen Öfen ist zu beachten, daß die Wärmequelle in der Mitte des Ofens liegt, mithin die Stromrichtungen radial auseinanderlaufen.

Der wahre Querschnitt ebener Wände ist in den Berechnungen durch einen ideellen mittleren Querschnitt  $\Phi$  zu ersetzen, der für quadratische und kugelförmige Öfen sich zu

$$\Phi = \sqrt{O_1 O_2}$$

ergibt, worin  $O_1$  und  $O_2$  die äußere und die innere freie Oberfläche der Wand bedeuten.

Für zylindrische Öfen ist

$$\Phi = \frac{M - m}{2,305 \cdot (\log M - \log m)} \quad (M \text{ und } m \text{ die Zylinderflächen}).$$

Nach Herrings ist das Verhältnis des mittleren ideellen Querschnittes zur Wandstärke  $\frac{\Phi}{\delta}$  ein Charakteristikum der Form, das er thermischen Konduktanzfaktor nennt.

Das Produkt aus dem Konduktanzfaktor und der spezifischen Leitfähigkeit des Ofenmaterials  $A = \lambda \frac{\Phi}{\delta}$  gibt das Leitvermögen.

Herrings hat für verschiedene Ofenformen das Verhältnis  $\frac{\Phi}{\delta}$  berechnet und damit die Berechnung der Leitungsverluste von Öfen sehr vereinfacht.

So ist die thermische Konduktanz für rechtwinkelige und kugelförmige Öfen:

$$\frac{\Phi}{\delta} = \sqrt{\frac{O_1 O_2}{\delta}}$$

Für die Wände parallelepipedischer Öfen ist  $\Phi$  wie oben durch das geometrische Mittel der Innen- und Außenfläche gegeben.

## B. Wärmeabgabe nach außen.

### a) Wärmeabgabe durch Mitteilung (Konvektion).

**1. Übergangswiderstände.** Bisher wurde nur die Wärmeleitung im Innern homogener Körper betrachtet. Die Erfahrung lehrt, daß beim Übertritt in ein anderes Medium, z. B. in Gase oder in Flüssigkeiten, Übergangswiderstände von ansehnlicher Höhe auftreten, die man durch einen zwischengeschalteten Widerstand ersetzt ansehen kann.

Eine Wand von der Dicke  $\delta$  und dem spezifischen Widerstande  $\kappa$  sei beiderseits von Gasen bespült, deren Temperatur  $t_1$  und  $t_2$  betragen. Dann summieren sich die beiden Übergangswiderstände mit dem Leitungswiderstand der Wand zu

$$W = \frac{\kappa \cdot \delta}{O} + \frac{\kappa_x}{O} + \frac{\kappa_y}{O} = \frac{\kappa \delta + \kappa_x + \kappa_y}{O}.$$

In dieser Formel kommt die „Dicke“ der hypothetischen Übergangsschicht nicht vor, sie ist in  $\kappa_x$  und in  $\kappa_y$  bereits enthalten.  $O$  bedeutet die freie Oberfläche.

Für niedere Temperaturen zwischen 0 und 100° hat man die Übergangswiderstände bestimmt und fand zwischen Metall und Luft:  $\kappa = 18000$  C. G. S.-Einheiten, zwischen Metall und Wasser:  $\kappa = 120$  C. G. S.-Einheiten je  $\text{cm}^2$ , d. h. Wärmemengen sind durch Erg auszudrücken. 1 Erg = 0,239 cal.

Der Temperaturkoeffizient dieser Konstanten ist negativ. Die Übergangswiderstände schwinden mit steigender Temperatur sehr rasch. Bei 200° ist der Temperaturkoeffizient von 18000 auf 6000 C. G. S.-Einheiten gefallen. Bei den in der elektrothermischen Praxis vorkommenden Temperaturen werden die Übergangswiderstände außerordentlich klein und sind daher für die Berechnung von keinerlei Wert.

**2. Die Wärmeabgabe an ruhende Luft.** Weit wichtiger als die Übergangswiderstände und ihre Folgen auf die Wärmeleitung sind jene Abkühlungen, die durch die thermische Zirkulation der Gase oder Flüssigkeiten hervorgerufen werden, welche die Trennungsoberflächen bespülen. Die Bewegung ist eine rein thermische „freie“, oder sie wird durch mechanische Mittel hervorgerufen und heißt dann „erzwungen“.

Dulong und Petit haben die Abkühlung heißer Körper zum Gegenstande ihrer Untersuchungen gemacht und festgestellt, daß sie teils durch Ausstrahlung, teils durch

Konvektion zustande kommt, und daß die letztere von der Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und seiner Umgebung als treibendes Agens abhängt, von seiner Gestalt und Lage beeinflußt wird, dagegen von der Natur der Substanz und der Oberfläche unabhängig ist. Sie haben folgendes Gesetz aufgestellt:

$$Q_c = n (t_1 - t_2) b,$$

worin  $n$  als komplexer Koeffizient der Form und Lage Rechnung trägt, während der Potenzexponent  $b$  für alle Körper 1,233 beträgt.

Peclet fand (1860) bei einer Überprüfung der Dulong-Petitschen Regel diese richtig und bestimmte  $n$  für eine große Zahl von Fällen.

In neuerer Zeit hat Langmuir<sup>1</sup> die Erscheinung der Konvektionsverluste als einfaches Leitungsphänomen durch eine Gasschicht aufgefaßt, so daß sich die Gesetze der Wärmeleitung auch auf die Konvektion anwenden lassen, wenn die Dicke der Gasschicht, die sich bildet, bekannt ist.

Langmuir gibt die Stärke der Wärmekonvektion je Zentimeter an, zu:

$$W_c = \textcircled{F} (\varphi_2 - \varphi_1).$$

$\textcircled{F}$  ist ein Formfaktor, der der Form des Körpers und Dicke des Gashäutchens Rechnung trägt. Letzteres bezeichnet Langmuir für eine ebene Fläche mit  $B$  und fand, daß sie für ein gegebenes Gas einen gleichbleibenden Wert hat.

$\varphi_2 - \varphi_1$  ist durch  $\int_{t_1}^{t_2} \lambda dt$  definiert, worin  $\lambda$  die spezifische Wärmeleitfähigkeit des Gases bedeutet.

Zwischen  $\textcircled{F}$  und  $B$  bestehen folgende Beziehungen:

für ebene Flächen:  $\textcircled{F} = \frac{1}{B}$ ,

für einen horizontalen Zylinder mit dem Durchmesser  $D$ :  $\frac{D}{B} = \frac{\textcircled{F}}{\pi} \cdot C - \frac{\lambda}{\pi \textcircled{F}}$ ,

für eine Kugel:  $\frac{1}{D} = \sqrt{\frac{\pi}{\textcircled{F} B}} = \frac{2\pi}{\textcircled{F}}$ .

$B$  wurde unter verschiedenen Versuchsbedingungen bestimmt, und es ergab sich, daß  $B$  unabhängig von der Art des heißen Körpers und bei Luft 0,43 cm (0,43 cm für zylindrische Drähte, 0,45 cm für vertikale Flächen) beträgt. Bei anderen Gasen hat die Dicke der Gashaut andere Werte, die den Gasdichten verkehrt proportional sind.

Weiter wurde der Einfluß der Lage der abkühlenden Flächen für drei Fälle untersucht, und zwar: 1. für vertikale Wände, 2. für horizontale Flächen, die gegen oben hin frei sind, 3. für horizontale Flächen, die gegen unten hin frei sind.

Wand	Wand- temperatur °	Abgeführte Wärme		Wärmeleitungswiderstand	
		C. G. S.	Watt	C. G. S.	Watt
Wand 1 . . . . .	100	0,0093	0,039	7850	1870
	200	0,029	0,120	5970	1440
	300	0,050	0,210	5460	1300
	400	0,074	0,308	5040	1210
	500	0,098	0,410	4780	1150
Wand 2 . . . . .	100	0,011	0,046	6640	1590
	200	0,032	0,132	5410	1300
	300	0,055	0,233	4960	1180
	400	0,081	0,341	4610	1100
	500	0,108	0,450	4380	1050
Wand 3 . . . . .	100	0,0053	0,022	13900	3320
	200	0,014	0,060	12380	2900
	300	0,024	0,100	11380	2730
	400	0,035	0,146	10650	2550
	500	0,048	0,200	10070	2370

<sup>1</sup> Trans. Amer. electrochem. Soc. Bd. 23 (1913) S. 299.

Die Konvektion ist im zweiten Falle am stärksten, wo die heißen Gase frei aufsteigen können (Ofendecken). Der Abtransport von Wärme ist in diesem Falle etwa um 10% größer als bei einer vertikalen Wand. Die dritte Lage — abkühlende Fläche nach abwärts gerichtet (Ofenböden) — besitzt nur 50% der Wärmeströmung der ersten Lage.

Das Verhältnis ist demnach 1:1,1:0,5.

Die Zusammenstellung von Langmuirs Versuchsergebnissen auf S.36 ist von großer praktischer Bedeutung.

**3. Wärmeabgabe an bewegte Luft.** Die Wärmeabfuhr durch künstlich bewegte Medien, z. B. durch einen Luftstrom, ist bedeutend größer als durch ruhende flüssige und gasförmige Körper.

Richards fand bei einer Geschwindigkeit des Gasstromes  $v$

$$\text{für Metall und Luft } \kappa = \frac{36000}{2 + \sqrt{v}}; \quad \lambda = 10^{-6} 28 (2 + \sqrt{v}),$$

$$\text{für Metall und Wasser } \kappa = \frac{36000}{300 + 180 \sqrt{v}} \sqrt{v}; \quad \lambda = 10^{-6} 28 (300 + 180 \sqrt{v}).$$

Wird beispielsweise ein Luftstrom von der Geschwindigkeit von 49 cm auf 100 cm je Sekunde gesteigert, so ist das Verhältnis der abkühlenden Wirkung

$$\frac{2 + \sqrt{100}}{2 + \sqrt{49}} = \frac{12}{9} = 1,33.$$

Die doppelte Windgeschwindigkeit gibt eine Effektsteigerung um ein Drittel.

Langmuir befaßte sich auch mit diesem Problem und fand die Hypothese einer Gashaut im Falle künstlicher Bewegung des Mediums nicht anwendbar. Nach ihm ist die Wärmeabgabe im ruhenden Medium mit dem Faktor  $\sqrt{\frac{35+v}{35}}$  zu multiplizieren, um die Wärmemenge für das mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegte Medium zu finden. Unter Beibehaltung der Zahlen des vorigen Beispiels für die Windgeschwindigkeiten ergibt sich bei Langmuir das Verhältnis

$$\sqrt{\frac{\frac{35+100}{35}}{\frac{35+49}{35}}} = \sqrt{\frac{135}{84}} = 1,27 \text{ (gegenüber 1,33 nach Richards).}$$

Die Übereinstimmung ist hier eine gute. Wird aber für die erste Windgeschwindigkeit 9 cm, für die zweite 100 cm genommen, dann ergibt sich nach Langmuir das Verhältnis 2,45, nach Richards 1,75.

Für ebene Flächen entspricht Langmuirs Formel besser den tatsächlichen Verhältnissen. Für Zylinder und Metalldrähte hat Langmuir die Richtigkeit der nachstehenden Russelschen Gleichungen erwiesen.

$$Q_c = \Sigma (T_2 - T_1) \sqrt{\frac{c d v \cdot r}{\kappa \pi}}.$$

$\Sigma$  für große Zylinder gleich 7 oder 8,  $\alpha$  Wärmeleitungswiderstand des Gases,  
für Drähte . . . . . 5 oder 6,  $v$  Geschwindigkeit des Gasstromes,  
 $T_2 - T_1$  Temperaturdifferenz zwischen Wand und Gas  $r$  Radius des zylindrischen Körpers.  
 $c$  Spezifische Wärme des Gases,

#### b) Die Wärmestrahlung.

Dulong und Petit fanden die Wärmeabgabe durch Strahlung von der Natur der Oberfläche eines Körpers, seiner Temperatur sowie der der Umgebung abhängig, dagegen unbeeinflusst von der Form des Körpers.

Stefan stellt folgende Beziehung für das abgestrahlte Energiequantum je Sekunde auf:

$$\begin{aligned} \eta_r &= 1,41 E \left[ \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] \text{ cal je cm}^2, \\ &= 5,9 E \left[ \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] \text{ Watt je cm}^2. \end{aligned}$$

$E$  ist die Emissionskraft des strahlenden Körpers, die sich von Substanz zu Substanz ändert. Von der Temperatur ist  $E$  so wenig abhängig, daß die dadurch bedingte Änderung vernachlässigt werden kann. Unter diesem Gesichtspunkte gilt also das Emissionsvermögen als Konstante des Stoffes, deren Wert zwischen 0 und 1 liegt.

Unter allen Körpern, die technisch in Frage kommen, hat Ruß das größte Emissionsvermögen, nahezu 1, dagegen emittieren spiegelblank polierte Metalloberflächen sehr schwach, ihnen kommt der Wert 0,03 zu, der sich aber sofort erhöht, sobald der spiegelnde Hochglanz die geringste Trübung erfährt.

Nachstehend einige Werte für  $E$ :

Ruß . . . . .	0,95 bis 0,98
Graphitmehl . . . . .	0,90
Eisenoxyd . . . . .	0,85
Schmutzige Ziegel . . . . .	0,80
Kupferoxyd . . . . .	0,72
Schwarzblech . . . . .	0,70
Gußeisen, schwarz . . . . .	0,62
Gußeisen, glänzend . . . . .	0,22
Kupfer, blank . . . . .	0,03

Wärmeverluste durch Strahlung  $\eta_r$ .

° C	Watt pro cm <sup>2</sup>	
	Eisen, schwarz	Ziegel, verschmutzt
50	0,012	0,013
100	0,047	0,053
150	0,099	0,113
200	0,174	0,198
250	0,276	0,315
300	0,412	0,471
350	0,580	0,673
400	0,814	0,930

Die Außenwände elektrischer Öfen bestehen entweder aus Ziegeln ( $E = 0,8$ ), Schwarzblech oder Gußeisen ( $E = 0,7$ ).

Die nebenstehende Tabelle (nach Flusin) gibt die Wärmeverluste durch Strahlung für verschiedene Temperaturen der strahlenden Wand bei einer Raumtemperatur von 27° C (= 300° absolut).

Die nebenstehende Tabelle (nach Flusin) gibt die Wärmeverluste durch Strahlung für verschiedene Temperaturen der strahlenden Wand bei einer Raumtemperatur von 27° C (= 300° absolut).

## II. Praktische Anwendung der Theorien über Wärmeabgaben.

### A. Bestimmung der Wärmeverluste durch die Ofenwände.

#### a) Versuchsöfen.

Für kleinere Laboratoriumsöfen lassen sich die Wärmeverluste leicht durch Versuche feststellen, indem man den Ofen mittels eines Heizwiderstandes heizt, an den man eine konstante Spannung anlegt, bis die Temperatur im Innern stationär geworden ist. Die Anzahl elektrischer Watt des Heizstromes gibt dann direkt die Wärmeverluste bei der im Innern des Ofens herrschenden Temperatur an.

Dieselbe Anordnung wird oft zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuerfesten Materialien verwendet, indem man aus ihnen einen Versuchsofen baut, die Innentemperatur durch ein Thermoelement und die Außentemperatur der Ofenwand durch ein Thermometer (besser durch ein Thermoelement) mißt, wenn bei konstant gehaltenem Strom die Innentemperatur stationär geworden ist. Über Versuche, die von Fitzgerald mit einem derartigen Ofen vorgenommen wurden, wird weiter unten berichtet werden.

In der bekannten Ohmschen Gleichung

$$Q_A = \frac{(t_2 - t_1)}{\frac{\kappa \delta}{\Phi}} = \frac{(t_2 - t_1) \lambda \Phi}{\delta}$$

ist nur  $\kappa$  bzw.  $\lambda$  unbekannt.  $\delta$  ist die Wandstärke,  $\Phi$  der ideelle Querschnitt.

#### b) Technische Öfen.

Während des Betriebes, wo die elektrische Energie für Vorgänge im Ofeninnern zum Großteil verbraucht wird, kann die an die Umgebung abgegebene Wärme auf zweierlei Art berechnet werden, entweder durch die Berechnung der durchfließenden Wärme  $Q_A$  aus dem Leitvermögen nach dem Ohmschen Gesetz oder durch die Berechnung der durch Leitung und Strahlung an die Umgebung abgegebenen Wärmen  $Q_{rk}$  nach Langmuir und Stefan. Beide Werte müssen einander gleich sein.

Der Ausdruck des Ohmschen Gesetzes

$$Q_A = \frac{t_2 - t_1}{\frac{\kappa \delta}{\Phi}}$$

setzt die Kenntnis von  $\kappa$  als Mittelwert voraus, denn die Ofenkonstruktionen sind selten aus einheitlichem oder homogenem Material. Außerdem muß  $t_2$ , die Temperatur der inneren Ofenwand, bekannt sein (Abb. 9 a).

Die Berechnung der durch Konvektion abgegebenen Wärme  $Q_{rk}$  erfolgt für die Mitteilung (Konvektion) nach Langmuir als Produkt der Oberfläche  $\times \eta$

$$Q_{rk} = O \cdot \eta_k + O \eta_r,$$

worin  $O$  die Oberfläche bedeutet.

$$\eta_k = \textcircled{F} \int_{t_1}^{t_2} \lambda_2 dt \text{ Watt je cm}^2,$$

worin  $\textcircled{F}$  der Formfaktor nach Langmuir.

$\lambda_2$  ist die Leitfähigkeit der Luft.

Die Strahlungsverluste ergeben sich nach Stephan zu

$$\eta_r = 5,9 E \left[ \left( \frac{t_1 + 273}{1000} \right)^4 - \left( \frac{t + 273}{100} \right)^4 \right] \text{ Watt},$$

worin  $t_1$  die Temperatur der Ofenwand,  $t$  die Temperatur der Luft, beides in Celsiusgraden.

Im folgenden werden die Wärmeverluste eines Ofens einmal nach dem Ohmschen Gesetz, das andere Mal zum Vergleich nach Langmuir und Stephan berechnet und die Handhabung der Formeln erläutert werden.

**1. Berechnung des Wärmeflusses.** Es sei ein elektrischer Ofen nach Abb. 10 a und 10 b mit zwei Elektroden gegeben. Das Mauerwerk besteht im Innern aus Magnesitziegeln in einer Mauerstärke von 20 cm, die von einem Schamottemauerwerk, ebenfalls 20 cm stark, umgeben sind. In gleicher Ausführung ist auch der Boden des Ofens gebaut. Der lichte Raum beträgt  $200 \times 125 \times 80$  cm (hoch). Der Ofen ist durch einen aus Schamottesteinen hergestellten Deckel von 30 cm Stärke abgeschlossen. Zur Durchführung der Elektroden und der Kühlvorrichtung sind im Deckel zwei runde Ausnehmungen von je  $2400 \text{ cm}^2$  Fläche ausgespart.

Die Außentemperaturen sind gemessen worden und betragen an den Vertikalwänden  $250^\circ$ , am Boden  $300^\circ$  und am Deckel  $210^\circ$ . Die Innentemperatur ist  $1650^\circ$ .

$\alpha$ ) Berechnung des ideellen Querschnittes. Für die Berechnung nach Ohm ist die Kenntnis der ideellen Leitungsquerschnitte  $\Phi$  nötig, ferner sind die Leitungskoeffizienten für die entsprechenden Temperaturen zu berechnen.

Oberflächen und Leitungsquerschnitte.

1. Stirn- und Rückenwand.

Eine äußere Fläche  $280 \times 160 \text{ cm} = 44,800 \text{ cm}^2$

Eine innere Fläche  $200 \times 80 \text{ cm} = 16,000 \text{ cm}^2$

Ein ideeller Leitungsquerschnitt  $\Phi = \sqrt{44800 \times 16000} = 10000 \sqrt{4,48 \times 1,6} = 26800 \text{ cm}^2$

2. Seitenwände.

Eine äußere Fläche  $205 \times 160 \text{ cm} = 32800 \text{ cm}^2$

Eine innere Fläche  $125 \times 80 \text{ cm} = 10000 \text{ cm}^2$

Ein ideeller Leitungsquerschnitt  $\Phi = \sqrt{32800 \times 10000} = 10000 \sqrt{3,28} = 18100 \text{ cm}^2$

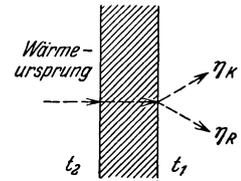


Abb. 9 a. Wärmefluß durch eine Ofenwand.

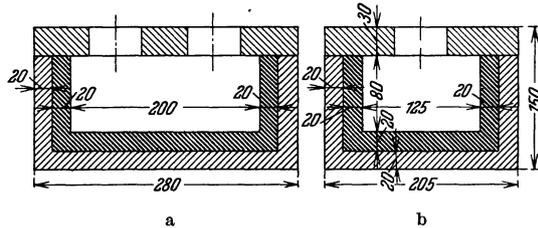


Abb. 10 a u. 10 b. Ofen zum Rechenbeispiel der Wärmeverluste.

## 3. Boden.

$$\text{Äußere Fläche } 205 \times 280 \text{ cm} = 57400 \text{ cm}^2$$

$$\text{Innere Fläche } 125 \times 200 \text{ cm} = 25000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ideeller Leitungsquerschnitt } \Phi = \sqrt{57400 \times 25000} = 10000 \sqrt{5,74 \times 2,5} = 37900 \text{ cm}^2$$

## 4. Deckel.

$$\text{Äußere Fläche } 57400 - 2 \times 2400 = 52600 \text{ cm}^2$$

$$\text{Durchtrittsquerschnitt } 37900 - 2 \times 2400 = 33100 \text{ cm}^2$$

(Die Flächenmaße des Deckels sind um die Ausnehmungen für die Elektrode kleiner als die Flächenmaße des Bodens.)

$\beta$ ) Leitvermögen des Mauerungsmateriales. Die Aufmauerung besteht aus zwei Schichten, Schamotte und Magnesit, die verschiedene thermische Leitfähigkeiten besitzen. Außerdem ändern sich die Leitfähigkeiten mit den Temperaturen, also mit der Zunahme der Entfernung vom lichten Ofenraum. Zunächst ist die Entscheidung zu treffen, welche Temperatur als mittlere für die Dicke des Mauerwerkes angenommen werden soll.

Im Innern des Ofens herrscht eine Temperatur von  $1650^\circ$ , die Vertikalwände haben  $250^\circ$  Außentemperatur. Somit wäre das arithmetische Mittel  $\frac{1650 + 250}{2} = 950^\circ$ .

Nun liegt aber der ideelle Querschnitt nicht in der Mauermitte, sondern näher der parallelen Außenfläche, somit wird seine Temperatur niedriger sein — homogenes Mauerwerk vorausgesetzt. Da hier aber innen Magnesit mit hoher Leitfähigkeit, außen Schamotte mit niedriger Leitfähigkeit aneinandergesetzt sind, wird sich an der Trennungsfäche der Medien ein starkes Temperaturgefälle ausbilden. Wie leicht, aber langwierig berechnet werden kann, entspräche bei homogener Ausführung dem ideellen Querschnitt eine Temperatur von  $705^\circ$ , bei der Kombination wird sie höher sein.

Wir haben also die Wahl zwischen  $930^\circ$  und  $705^\circ$  zu treffen bzw. einen Mittelwert zu schätzen, der entsprechend der besseren Leitfähigkeit des Magnesits höher sein muß als

$$\frac{930 + 705}{2} = \frac{1635}{2} = 820^\circ.$$

Wir wählen  $850^\circ$  und dürfen sicher sein, keinen so großen Fehler zu machen, daß es einer weiteren Kontrollrechnung bedarf. Tatsächlich ergibt die Kontrollrechnung ungefähr diese Temperatur.

Aus der Tabelle (S. 34) sind die Leitfähigkeiten für Magnesit und Schamotte zu entnehmen.

Leitfähigkeit der Schamotte bei  $850^\circ$ . Die Tabelle weist für  $\lambda_0^{800} = 0,013$  Mho nach.

Diese kann als wahre spezifische Leitfähigkeit für die Mitte des Temperaturbereiches, das sind  $650^\circ$ , angenommen werden. Es gilt fernerhin  $\lambda_{650} = 0,013$  Mho, daher ist

$$\lambda_0 = \frac{0,013}{1 + \frac{650}{273}} = 0,00385 \text{ Mho}$$

und daraus

$$\begin{aligned} \lambda_{850} &= 0,00385 \cdot \left(1 + \frac{850}{273}\right) \\ &= 0,00385 \cdot 4,11 = 0,0158 \text{ Mho} = \lambda_{850} \\ K_{850} &= 63,29 \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

Leitfähigkeit für Magnesit bei  $850^\circ$ . Aus der Tabelle ist zu entnehmen  $\lambda_{550} = 0,030$ , daraus

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{0,030}{1 + \frac{550}{273}} = 0,00995 \\ \lambda_{850} &= 0,00995 \left(1 + \frac{850}{273}\right) = 0,041 \text{ Mho} = \lambda_{850} \\ K_{850} &= 24,39 \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

Der mittlere spezifische Widerstand für die Kombination ergibt sich zu

$$\frac{63,29 + 24,39}{2} \text{ Ohm} = 43,89 \text{ Ohm.}$$

Die mittlere spezifische Leitfähigkeit beträgt daher  $\lambda_{850} = 0,02278 \text{ Mho}$ .

Zusammenfassung der Daten für thermische Leitfähigkeiten  $\lambda$  und thermische Widerstände  $K$ :

Kombination Magnesit und Schamotte:  $\lambda_{850} = 0,02278 \text{ Mho}$ ;  $K_{850} = 43,89 \text{ therm. Ohm}$ .

Magnesit allein:  $\lambda_{850} = 0,041 \text{ Mho}$ ;  $K = 24,39 \text{ therm. Ohm}$ .

Schamotte allein:  $\lambda_{850} = 0,0158 \text{ Mho}$ ;  $K = 63,29 \text{ therm. Ohm}$ .

Es ist bequemer, zunächst mit Leitfähigkeiten zu rechnen, weil diese bei Brüchen im Zähler aufscheinen.

Aus obigen Daten ergeben sich folgende Widerstände der Ofenmauerung.

1. *Vertikalwände*. Ihre ideellen Durchtrittsquerschnitte sind

$$2 \cdot 26\,800 + 2 \cdot 18\,100 = 89\,800 \text{ cm}^2.$$

Ihr Widerstand ist — bei 40 cm Wandstärke —

$$W_V = \frac{43,891 \cdot 40}{89\,800} = 0,01955 \text{ therm. Ohm.}$$

2. *Der Boden*. Mitteltemperatur  $875^\circ$ ,  $\lambda_{875} = 42,80 \text{ Ohm}$ .

$$W_B = \frac{42,80 \cdot 40}{37\,900} = 0,04517 \text{ therm. Ohm.}$$

3. *Der Deckel*. Die Wandstärke der reinen Schamottemauerung beträgt 30 cm. Hier bedarf es der Berechnung der thermischen Leitfähigkeit für Schamotte allein für die hier besser definierte Mitteltemperatur, die  $\frac{1650 + 210}{2} = 930^\circ$  beträgt.

$$\lambda_{930} = 0,00385 \cdot \left(\frac{930}{273}\right) = 0,01695 \text{ Mho}$$

$$K_{930} = 58,997 \text{ therm. Ohm.}$$

$$W_D = \frac{59 \cdot 30}{33\,100} = 0,05348 \text{ therm. Ohm.}$$

$\gamma$ ) Gesamter Wärmefluß (Endresultat). 1. *Die Vertikalwände*. Das Temperaturgefälle beträgt  $1650^\circ - 250^\circ = 1400^\circ$ . Somit ist der Wärmeaustritt

$$Q = \frac{\Delta t}{W} = \frac{1400^\circ}{0,01955} \text{ Watt} = 71,61 \text{ Kilowatt.}$$

2. *Der Boden*. Das Temperaturgefälle ist  $1650^\circ - 300^\circ = 1350^\circ$ . Der Wärmeaustritt ergibt sich zu

$$Q_B = \frac{1350}{0,04517} \text{ Watt} = 30,00 \text{ kW.}$$

3. *Der Deckel*.

$$Q_D = \frac{1440}{0,05348} \text{ Watt} = 26,95 \text{ kW.}$$

#### Zusammenfassung.

Die abgegebene Wärme beträgt für die Vertikalwände . . . . .	71,61 kW
für den Boden . . . . .	30,00 kW
für den Deckel . . . . .	26,95 kW
für den ganzen Ofen . . . . .	<u>128,56 kW</u>

2. **Berechnung der Konvektion und Strahlung.**  $\alpha$ ) Bei meßbaren Oberflächentemperaturen. Nach Langmuirs Untersuchungen lassen sich die Wärmeverluste auf viel einfacherem Wege als dem eben beschriebenen ermitteln, nämlich aus der durch die Ofenoberfläche an die umgebende Luft abgegebenen und der ausgestrahlten Wärme, wozu die Messung der Außentemperatur des Ofens genügt. Diese muß allerdings möglichst genau erfolgen.

Auf S. 36 und S. 38 sind die Werte für die Wärmeabfuhr, entsprechend den drei Hauptstellungen der ableitenden Wand und die Strahlungsverluste je  $\text{cm}^2$  bei verschie-

denen Temperaturen für Eisen und schmutzige Ziegel wiedergegeben. Beide werden zweckmäßig in graphische Form gebracht, um bequem interpolieren und extrapolieren zu können.

Zur weiteren Vereinfachung hat Langmuir beide Tabellen durch Rechnung vereinigt und bis 600° die Resultate durch Versuche bestätigt. Nachstehend seine Tabelle, deren Handhabung ohne weitere Erklärung verständlich ist.

Gesamter Wärmeverlust durch Abgabe und Strahlung je Quadratcentimeter  $\eta_{r+k}$  in Watt.  
Außentemperatur 27° C.

Wandtemperatur in °C	Schwarzes Eisen			Schmutzige Ziegel		
	Lage I	Lage II	Lage III	Lage I	Lage II	Lage III
50	0,028	0,030	0,022	0,029	0,031	0,023
75	0,054	0,057	0,043	0,055	0,058	0,044
100	0,086	0,093	0,069	0,092	0,099	0,075
125	0,128	0,133	0,103	0,137	0,142	0,112
150	0,175	0,182	0,139	0,189	0,196	0,153
175	0,231	0,240	0,183	0,251	0,260	0,203
200	0,294	0,306	0,234	0,318	0,330	0,258
225	0,364	0,377	0,292	0,397	0,410	0,325
250	0,439	0,455	0,355	0,478	0,494	0,394
275	0,527	0,543	0,429	0,575	0,591	0,477
300	0,622	0,645	0,512	0,681	0,704	0,571
325	0,729	0,754	0,606	0,800	0,825	0,677
350	0,847	0,876	0,710	0,931	0,960	0,794
375	0,978	1,01	0,828	1,08	1,10	0,925
400	1,12	1,16	0,960	1,24	1,27	1,08
450	1,45	1,49	1,27	1,61	1,64	1,43
500	1,8	1,91	1,65	2,07	2,11	1,86
600	2,91	2,96	2,63	3,25	3,30	2,97

Eine ausführlichere Tabelle befindet sich auf S. 54.

Ist die Außentemperatur einer Ofenwand bekannt und unter 600° liegend, dann kann aus der Oberfläche und der Wandtemperatur mit Hilfe obiger Tabelle der Wärmeverlust, wie nachstehend gezeigt, direkt durch einfache Multiplikation gewonnen werden.

Das vorige Beispiel, dessen Einzeldaten hier soweit nötig, wiederholt werden, beleuchtet am besten die Kürze und Einfachheit der Rechnung.

	Oberflächen- temperatur C°	Lage	Oberfläche	Wärmeabgabe je cm <sup>2</sup> $\eta_{r+k}$	Totale Wärmeabgabe in kW
Vertikalwände . . . . .	250	I	155 200	0,478	73,18
Boden . . . . .	300	II	57 400	0,571	32,78
Deckel. . . . .	210	III	52 600	0,362	19,04
					<u>126,00</u>

Die rechtsstehenden Kilowattziffern sind durch einfaches Multiplizieren der Oberflächen mit den entsprechenden nebenstehenden Faktoren  $\eta_{r+k}$  entstanden.

Die Summe der Wärmeverluste ergibt sich also auf diesem einfachen Wege zu 126 kW, gegenüber 128,56 kW nach der ersten Berechnungsart (s. S. 41). Auffallend ist die relativ große Differenz für den Deckel (19:27!!). Die Fehlerdifferenz hätte durch Korrektur der geschätzten Mitteltemperatur oder der Außentemperatur zum Verschwinden gebracht werden können, was aber absichtlich nicht getan wurde, um nicht ein falsches Bild von der Genauigkeit solcher Berechnungen hervorzurufen, die häufig große Differenzen aufweisen, besonders wenn die Mitteltemperaturen nicht richtig geschätzt wurden. Wie die Richtigstellung zu erfolgen hätte, wird weiter unten gezeigt werden.

Das gewählte Beispiel stellt einen sehr einfachen Fall dar, wesentlich erleichtert durch die Annahme, daß die Temperatur der Außenflächen über deren ganze Ausdehnung gleich ist und 600° nicht übersteigt. Das ist aber in der Praxis nie der Fall.

Daß Herdsohlen, besonders wenn sie auf metallischen Konstruktionen ruhen, regelmäßig oder zeitweise rotglühend werden, daß korrodierte Schächte in der Umgebung der Korrosionen heißer als  $600^\circ$  werden können, desgleichen Türen und Schlackenformen usw., braucht keiner besonderen Begründung. Für diese Fälle, die sich in einem Temperaturbereich von  $600\text{--}1000^\circ$  bewegen, reicht die vorhin gebrachte Tabelle nicht aus. Die fehlenden Daten sind durch Rechnungen zu ersetzen.

Bei ungedeckten Öfen ist selbstverständlich die Ausstrahlung der noch ungeschmolzenen Beschickung oder Oberfläche der Schmelze an Stelle der der Deckelverluste in Rechnung zu setzen. Ihre Temperaturen sowie die der darübertagenden Schachtwände können zwischen  $1400^\circ$  und  $2000^\circ$  liegen. Auch für diesen Fall gibt Langmuirs Tabelle gleichfalls keine Zahlen an.

Den Schmelzen kommt stets die zweite Langmuirsche Lage zu, alle anderen heißen Ofenteile können irgendeine der drei Lagen einnehmen.

Um die Wärmeverluste kennenzulernen, bedarf es der Berechnung der Strahlung und der Konvektion, erstere nach Stefans, letztere nach Langmuirs Formel.

Die Strahlungswärme ist nach der Stefanschen Formel berechenbar:

$$\eta_r = 5,9 \cdot E \left[ \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] \text{ Watt/cm.}$$

Für Eisen ist das Emissionsvermögen  $E$ , wie schon erwähnt, mit 0,7 anzunehmen, für geschwärzte Ziegel mit 0,8; Schlacken und nichtmetallische Schmelzen sind durch  $E = 0,5$  annähernd charakterisiert.

Liegt im Ofenschacht ungeschmolzenes Beschickungsmaterial, so muß eine mittlere Emissionskraft aus dem Verhältnis der einzelnen Rohstoffe und aus deren Einzelemissionskräften errechnet werden.

Der in der Klammer befindliche Subtrahend  $\left( \frac{T_1}{1000} \right)^4$  enthält als  $T_1$  die absolute Temperatur des Arbeitsraumes. Nimmt man sie mit  $300^\circ$  abs. =  $27^\circ$  C an, dann wird der Subtrahend konstant  $\left( \frac{3}{10} \right)^4 = 0,0081$ .

Wäre z. B. die Wärmeemission je  $1 \text{ cm}^2$  bei  $1700^\circ$  für eine Schlacke zu berechnen, dann hätte man  $E = 0,5$  zu setzen und erhält

$$\begin{aligned} \eta_r &= 5,9 \cdot 0,5 [1,973^4 - 0,0081], \\ (1,973)^4 &= 15,154, \\ \eta_r &= 5,9 \cdot 0,5 [15,146] = 44,66 \text{ Watt/cm}^2. \end{aligned}$$

Wie man sieht, ist der Einfluß der Lufttemperatur, sofern es sich um die Temperatur des Arbeitsraumes handelt, nicht so groß, daß man ihn bestimmen und dann in Rechnung setzen müßte. Er beginnt erst dann Bedeutung zu erlangen, wenn die Differenz zwischen den Temperaturen der strahlenden Fläche und des umgebenden Raumes nicht, wie in diesem Falle, allzu weit ist.

Eine weiter unten folgende Tabelle führt die so berechneten Zahlen für die Temperaturen von  $1200\text{--}2000^\circ$  an.

Zur Berechnung der Konvektion dient die bereits angegebene Langmuirsche Formel

$$Q_K = \frac{1}{B} (\varphi_2 - \varphi_1).$$

Sie bedingt die Kenntnis von  $B$ , welches die Dicke der Lufthaut bezeichnet, die eine heiße Fläche als Durchtrittsmedium einhüllt.  $B$  ändert sich je nach der Lage der Fläche und ist

$$B \begin{cases} \text{für vertikale Flächen} & \dots \dots \dots 0,45 \\ \text{für horizontale, nach oben freie Flächen} & \dots \dots \dots 0,41 \\ \text{für horizontale, nach unten freie Flächen} & \dots \dots \dots 0,91 \end{cases}$$

Wie schon erwähnt, ist  $\varphi = \int_0^T \lambda dt$ ; die Werte für Luft wurden von Langmuir berechnet. Die Resultate sind in nachstehender Tabelle verzeichnet.

Werte für  $\varphi$ .

$T^{\circ}$	$\varphi$	$T^{\circ}$	$\varphi$
300	0,0387	1300	0,576
400	0,0660	1500	0,744
500	0,1017	1700	0,931
700	0,189	1900	1,138
900	0,297	2100	1,363
1000	0,426	2300	1,608

Aus der Tabelle kann  $\varphi$  bzw. die Werte für  $\varphi_1 - \varphi_1$  berechnet werden, und somit ist, wenn  $B$  bekannt ist, die durch Luft fortgeführte Wärmemenge in Watt leicht errechenbar.

Für Temperaturen von 600—1000°C nimmt man für  $\varphi_1 = 0,39$ . Für Temperaturen von 1400—2000°C nimmt man

$\varphi_1 = 0,66$  an, entsprechend den Lufttemperaturen von 27°C und 127°C.

Für 1 cm<sup>2</sup> Schlackenoberfläche bei 1700° wurde die Wärmestrahlung bereits zu 44,66 Watt berechnet; nun wäre noch die Wärmeabgabe durch Mitteilung an die Luft zu ermitteln.

$B$  für Schlacke ist 0,41. Die absolute Temperatur ist 1700 + 273 = 1973° abs., hierfür findet man durch Interpolation den Wert  $\varphi_{1973} = 1,214$ ,

$\varphi_0$  ist 0,066, somit  $\varphi_{1973} - \varphi_0 = 1,148$

$$K = \frac{1,148}{0,41} = 2,80 \text{ Watt/cm}^2.$$

Die gesamte Wärmeabgabe der Schlackenoberfläche je cm<sup>2</sup> beträgt somit

$$44,66 + 2,8 = 47,46 \text{ W.}$$

In gleicher Weise wurden für verschiedene Stoffe, verschiedene Temperaturen und für die drei Lagen der Flächen die in nachfolgender Tabelle stehenden Zahlen errechnet:

Totale Wärmeabgabe  $\eta_K + \eta_R$  in Watt je Quadratzentimeter in Luft von 27°C

Außentemperatur des Ofens in °C	Graues Gußeisen			Schmutzige Ziegel			Kalk
	Lage I	Lage II	Lage III	Lage I	Lage II	Lage III	Lage I
700	4,33	4,39	4,00	4,85	4,92	4,52	3,28
800	6,26	6,33	5,84	7,03	7,11	6,62	4,70
900	8,76	8,85	8,26	9,97	9,97	9,38	6,53
1000	11,95	12,06	11,36	13,49	13,60	12,91	8,86

Wärmeabgabe durch Strahlung und Mitteilung an Luft von 27°C von geschmolzenen nichtmetallischen Schlackensubstanzen ( $E = 0,5$ ) je cm<sup>2</sup> Oberfläche:

Außentemperatur 27°C.

Temperatur der Schmelzoberfläche	Mitteilung $\eta_K$	Strahlung $\eta_R$	Summe $\eta_K + \eta_R$
1400	2,04	23,03	25,1
1500	2,28	29,07	31,3
1600	2,53	36,19	38,7
1700	2,80	44,66	47,5
1800	3,07	54,39	57,5
1900	3,36	65,70	69,1
2000	3,67	78,65	82,3

Im vorstehenden Beispiel wurde die Annahme gemacht, daß die Temperatur über die ganzen Flächen gleichbleibend ist bzw. es wurde eine Temperatur als Mittelwert der ganzen Fläche angenommen.

In der Praxis ergibt sich nämlich, daß die Wandtemperaturen sehr verschieden sind. Am heißesten ist die Mitte der Ofenwand, am kältesten die nahe den Kanten liegenden Teile.

Bingham bringt ein Beispiel eines Karbidofens für 1000 kW, dessen Wand er in neun gleiche Rechtecke einteilte, in deren Mitte die Temperaturmessungen vorgenommen wurden.

Das Temperaturmittel war 155,5°C. Der Koeffizient der Wärmeabgabe  $\eta_{rk} = 0,200$ .

Ziegel in vertikaler Wand. Die Oberfläche betrug 87,780 cm<sup>2</sup>. Der Wärmeverlust ergab sich rechnerisch zu

$$Q_{rk} = 0,2 \cdot 87,700 = 17,54 \text{ kW.}$$

Zwei andere, etwas umständlichere Rechnungswege vermögen für denselben Fall genauere Resultate zu liefern, nämlich entweder jedes Rechteck für sich zu behandeln und

die Einzelwärmeabgaben dann zu addieren oder aus drei verschiedenen Koeffizienten  $\eta_{rk}$  einen Mittelwert zu suchen und diesen dann mit der gesamten Oberfläche zu multiplizieren.

Die zweite Rechnungsart wäre, von dem Mittelwert für  $\eta_{rk} \frac{2,046}{9} = 0,227$  auszugehen.

$$Q = 0,227 \cdot 87,780 = 19,926 \text{ kW.}$$

$\beta$ ) Berechnung der Konvektion und Strahlung bei nicht meßbaren Oberflächentemperaturen. In den beiden Gleichungen

$$Q_{rk} = O \eta_{rk} : Q_{\lambda} = \frac{\lambda \Phi}{\delta} (t_1^1 - t_x) = \frac{\lambda \Phi}{\delta} \cdot \Delta t$$

$O$  = Oberfläche,  $\Phi$  = ideeller Durchgangsquerschnitt,  $t_x$  = unbekannte, äußere Oberflächentemperatur,  $\delta$  = Wandstärke muß  $Q_{rk} = Q_{\lambda}$  sein,  $\eta_{rk}$ ,  $\lambda$  und  $t_x$  sind vorläufig

unbekannt.  $\lambda$  kann annähernd für eine angenommene Mitteltemperatur  $\frac{t - t_x}{2}$  berech-

net werden, weil sich  $\lambda$  mit der Temperatur nicht allzusehr ändert. Mit dieser wird ein Vorläufigkeitswert  $Q_A$  gerechnet, der dann ein annäherndes  $\eta_{rk}$  gibt, dessen Wert in der Tabelle aufzusuchen ist, um die Tabellentemperatur für die strahlende Wand zu finden, die dann neuerdings für eine Berechnung von  $\lambda$  zu verwenden wäre. Durch langwierige Rechnung käme man dann schließlich auf eine Temperatur, für welche  $Q_{rk} = Q_A$  ist. Diese umständliche Rechnung läßt sich durch eine graphische Lösung des Problems umgehen.

Man sucht für mehrere willkürlich angenommene Werte für  $t_x$  und berechne  $Q_A$  und  $Q_{rk}$  so lange, bis man zwei um  $50^\circ$  differierende Temperaturen gefunden hat, für welche das Ungleichheitsverhältnis von  $Q_A$  und  $Q_{rk}$  verschieden ist. In der graphischen Darstellung, in deren Koordinatensystem auf der Abszissenachse die beiden um  $50^\circ$  verschiedenen Temperaturen und als Ordinaten die hierzugehörigen Wertepaare für  $Q_A$  und  $Q_{rk}$  aufgetragen werden, ergeben sich zwei sich schneidende Gerade, wenn man die beiden Werte für  $Q_A$  einerseits und die beiden Werte für  $Q_{rk}$  andererseits verbindet. Der Schnittpunkt gibt zugleich die gesuchte Temperatur  $t_x$  und den zugehörigen Wärmeverlust  $Q_A = Q_{rk}$ .

Die sich schneidenden Geraden sind Kurvensekanten, der graphisch ermittelte Wert ist streng genommen nur ein Näherungswert. Den genauen Wert findet man, indem man um eine etwa  $10^\circ$  höhere und eine um ebensoviel Grade tiefere Temperatur nochmals die Rechnung und Konstruktion durchführt.

An dem vorhin behandelten Beispiel eines rechtwinkligen, geschlossenen Ofens, für den die Werte  $Q_A$  und  $Q_{rk}$  bei den einzelnen Flächen differieren, könnte für jede davon die Korrektur graphisch erfolgen. Hier sei nur der Ofendeckel einer Korrekturrechnung unterzogen. Der große Unterschied in den auf zwei Wegen errechneten Wärmeverlusten, legt den Gedanken nahe, daß die Außentemperatur mit  $210^\circ$  nicht richtig bestimmt war.

Versuchsweise soll die Wärmeabgabe für eine mutmaßliche Temperatur von  $210^\circ$ , dann für  $210^\circ - 50^\circ = 160^\circ$  und für  $210^\circ + 50^\circ = 260^\circ$  berechnet werden.

Oben		
1 163°	4 233°	7 143°
2 155°	5 274°	8 172°
3 75°	6 115°	9 70°
Unten		

Rechteck n°	t°	$\eta_{rk}$	Oberfläche	Kilowatt
1	163	0,220	9753	2,145
2	155	0,200	9753	1,950
3	75	0,055	9753	0,536
4	233	0,420	9753	4,096
5	274	0,570	9753	5,560
6	115	0,117	9753	1,140
7	143	0,172	9753	1,677
8	172	0,242	9753	2,360
9	70	0,050	9753	0,488
		2,046		<u>Q = 19,952 Watt</u>

Für den Deckel sind folgende Daten gegeben oder bereits früher errechnet:

Äußere Fläche $O$ . . . . .	52 600 cm <sup>2</sup>	Wandtemperatur angeblich $t_x$ .	210°
Durchtrittsquerschnitt $\Phi$ . . . . .	33 100 cm <sup>2</sup>	Mittlere Temp. des Mauerwerkes	930°
Wandstärke $\delta$ . . . . .	30 cm	$Q_A$ . . . . .	= 26,95 kW
Innentemperatur $t_1$ . . . . .	1 650°	$Q_{rk}$ . . . . .	= 19,04 kW
Lufttemperatur . . . . .	27°	$\eta_{rk}$ . . . . .	= 0,00385.

Pos. II: geschwärzte Ziegel.

Nachstehend die Berechnung der weiteren Daten für obige drei angenommene Temperaturen.

	$t_x = 160^\circ$	$t_x = 210^\circ$	$t_x = 260^\circ$
Mitteltemperatur der Steine $\frac{1650 + t_x}{2} =$	905°	930°	955°
	$\alpha t_{x_1} = \frac{905}{273} = 3,315$	$\alpha t_{x_2} = \frac{920}{273} = 3,41$	$\alpha t_{x_3} = \frac{955}{273} = 3,50$
Leitfähigkeit der Schamottesteine	$\lambda_{905} = 0,00385 \cdot 4,315 = 0,0166$	$\lambda_{930} = 0,06385 \cdot 4,41 = 0,01695$	$\lambda_{955} = 0,00385 \cdot 4,50 = 0,01732$
Temperaturgefälle $\Delta t = 1650 - t_x$	1490°	1440°	1390°
$Q_A$ ; Wärmeverlust durch Leitung $= \frac{\Delta t \lambda \Phi}{\delta} = \Delta t \lambda \cdot 1,109 \text{ kW}$	$Q_A = \underline{\underline{27,43 \text{ kW}}}$	$Q' = \underline{\underline{26,95 \text{ kW}}}$	$Q'' = \underline{\underline{26,73 \text{ kW}}}$
$Q_{rk}$ ; Wärmeverlust durch Strahlung und Abgabe an die Luft	$O = 52\,600 \text{ cm}^2$ $\eta_{rk} = 0,2216$ $Q_{rk} = \underline{\underline{11,67 \text{ kW}}}$	$O = 52\,600 \text{ cm}^2$ $\eta_{rk} = 0,362$ $Q_{rk} = \underline{\underline{19,04 \text{ kW}}}$	$O = 52\,600 \text{ cm}^2$ $\eta_{rk} = 0,553$ $Q'_{rk} = \underline{\underline{29,09 \text{ kW}}}$

Die graphische Darstellung laut Abb. 11 gibt nach der Eintragung der beiden Werttriaden für  $Q_\lambda$  und  $Q_{rk}$  einen Schnittpunkt bei 249°; da die Kurve  $Q$  fast geradlinig verläuft, genügt für die Kontrollberechnung die neuerliche Bestimmung von  $Q_{rk}$  für 250°; hierfür ist  $\eta_{rk}$  direkt aus der Tabelle zu 0,494 abzulesen.  $Q_{rk}$  gibt 25,98 kW, in die graphische Darstellung eingetragen, ergibt sich die Temperatur zu 252,5° und der Verlust an Energie zu 26,76 kW.

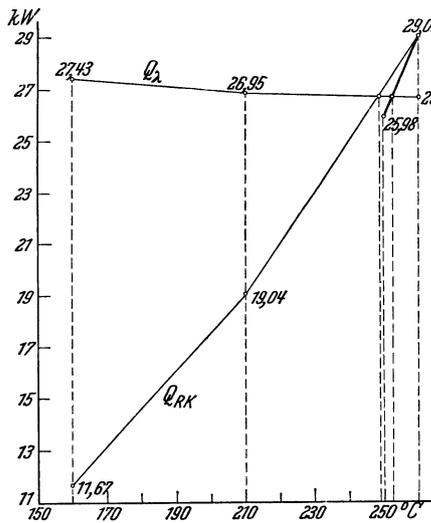


Abb 11. Graphische Ermittlung der äußeren Ofentemperatur.

Mit der Übereinstimmung der Werte  $Q_\lambda$  und  $Q_{rk}$  ist nicht bewiesen, daß die Temperatur tatsächlich 253° betrug. In der Berechnung für  $Q_\lambda$  wurde die spezifische Leitfähigkeit der Mauerungsmaterialien nicht für den Einzelfall bestimmt, sondern den Tabellen entnommen, die einen Mittelwert geben. Somit besteht schon in der ursprünglichen Angabe für die Berechnung eine Unsicherheit. Die Innentemperatur von 1650° ist auch nicht exakt, nicht an allen sechs Begrenzungsflächen des Ofens und nicht an allen Stellen gleich.

Zuverlässiger als  $Q_A$  ist  $Q_{rk}$  zu bestimmen. Auch da ist die Emissionskraft nur annähernd bekannt.

Man wird also gut tun, die Verlustberechnungen nicht höher anzuschlagen, als vorsichtige Schätzungen es verdienen, denn nur um solche handelt es sich.

### B. Wärmeverluste durch die Elektroden.

Die durch die Elektroden verlorengehende Energie hängt von der Jouleschen Wärmeentwicklung ( $J^2 w$ ), sowie von dem Leitvermögen der Kohlen und den aus dem Ofen herausragenden Oberflächenanteilen ab.

Diese Verluste sind im allgemeinen klein und bleiben unter 10% der gesamten Ofenenergie. Bingham gibt sie in einem Falle mit 6% an, nämlich 96 kW bei einer Ofenenergie von 1600 kW.

Die Verluste teilten sich in folgender Weise auf: etwa 40 kW Joulesche Wärme, etwa 37 kW Wärmeableitung und etwa 20 kW Kontaktverluste.

Unter den zahlreichen Versuchen, die Elektrodenverluste zu berechnen, sei die von Perthies gefundene Beziehung deshalb hervorgehoben, weil sie mit einer von Hering unter einschränkenden Bedingungen ermittelten ziemlich übereinstimmt und, zum Unterschiede von letzterer, die Wärmeverluste durch die Mantelflächen mit berücksichtigt.

Perthies fand für den Fall des minimalen Verlustes die Formel

$$Q_{\min} = 2J \sqrt{\alpha \beta \cdot \lambda \kappa \Delta t} \text{ Watt}$$

( $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit,  $\kappa$  elektrischer Widerstandskoeffizient,  $J$  Stromstärke,  $\Delta t$  Temperaturdifferenz).  $\alpha$  und  $\beta$  sind zwei Koeffizienten, welche die Wärmeisolation der Elektroden berücksichtigen. Für den Fall unbedeckter Elektroden, die an einem Ende gekühlt sind, gilt  $\alpha = 1$ ,  $\beta = \frac{1}{2}$ . Diese Formel führt zu folgenden Schlüssen:

Es ist unzweckmäßig, die freistehenden, gefaßten Enden der Elektroden mehr als unbedingt erforderlich zu kühlen.

Um das Produkt  $\alpha \times \beta$  zu verkleinern, sind die Elektroden mit einer Wärmeumhüllung zu versehen, was schon mit Rücksicht auf den Abbrand empfehlenswert ist.

Das Kohlematerial soll hohe elektrische Leitfähigkeit mit geringer thermischer Leitfähigkeit vereinen.

Alle diese Grundsätze hat die Praxis längst erkannt, wenngleich sie nicht immer befolgt werden. Insbesondere wird die Elektrodenkühlung oft übertrieben, statt die Kontakte der Fassungen zu verbessern, und auch durch zu lange Elektroden wird unnötig viel Material und Wärme vergeudet, um die Fassungen kühl zu erhalten.

### III. Maßnahmen zur Verminderung der Wärmeverluste.

#### A. Wärmeersparnis durch Schutzhüllen.

Im Beispiel S. 39 wurde angenommen, daß das Mauerwerk des Ofens im Innern aus Magnesit bestand, der mit einem Mantel aus Schamottesteinen umkleidet wurde. Abgesehen davon, daß Schamotte billiger ist als Magnesit, hat diese Art der Ausführung thermische Vorteile, denn Schamotte ist ein schlechterer Wärmeleiter als Magnesit.

Die Wahl der Auskleidung des Ofeninnern wird hauptsächlich durch die Schwerschmelzbarkeit und chemische Widerstandsfähigkeit beeinflusst, der Mantel, der zugleich die Stabilität erhöht, wird aus möglichst guten Wärmeisolatoren herzustellen sein.

Fitzgerald<sup>1</sup> studierte die Möglichkeit der Verminderung der Wärmeverluste an einem Versuchsofen aus Schamotteziegeln, der würfelförmig mit einer Außenkantenlänge von 23 cm und einer Wandstärke von 6 cm gestaltet war. So fand er beispielsweise die Wattverluste durch eine weitere Umhüllung mit 2,5 cm Kieselgur zwischen 500° und 800° um etwa 50% vermindert. Kieselgur schmilzt bereits bei 1100°, ist also für das Ofeninnere nicht brauchbar, um so wertvoller aber als Umkleidung.

Da die Umkleidung an der Trennungsschicht eine Wärmestauung hervorruft, die Oberfläche der Mauerung demnach wärmer ist als ohne Schutzhülle, liegt der Gedanke nahe, die Außenwände der Öfen durch Abhitze zu heizen. Der Effekt ist aber nicht immer im gedachten Sinne, denn mit der erhöhten Außentemperatur nimmt auch die Leitfähigkeit des Mauerwerkes zu und kann die Wirkung der Außenheizung illusorisch machen.

Der Wärmestrom ist von dem Produkte von  $\lambda (t_i - t_a)$ ; bzw. genauer  $\frac{\lambda_{t_i - t_a}}{2} \cdot (t_i - t_a)$  ab-

<sup>1</sup> Trans. Amer. electrochem. Soc. Bd. 22 (1912) S. 111.

hängig, (worin  $\frac{\lambda_{t_i-t_a}}{2}$  die wahre Leitfähigkeit bei der Mitteltemperatur bedeutet). Von der Änderung dieses Produktes mit variabler Außentemperatur hängt es ab, ob eine Ofenwand gekühlt oder erwärmt werden soll.

Wenn man nach Nusselt annimmt, daß die Leitfähigkeit eine Funktion der absoluten Temperatur ist, mithin durch

$$\frac{\lambda_{t_i-t_a}}{2} = \lambda_0 \left( 1 + \frac{t_i-t_a}{2 \cdot 273} \right)$$

ausgedrückt werden kann, dann hat obiges kritisches Produkt folgende Gestalt

$$\lambda_0 \left( 1 + \frac{t_i-t_a}{2 \cdot 273} \right) t_i - t_a$$

und gestattet nun, für ein gegebenes  $t_i$  zu berechnen, ob bei einem bestimmten Mauerungsmaterial das Produkt mit steigendem  $t_a$  kleiner wird, in welchem Falle es günstig wäre, die äußere Ofenwand zu heizen.

(Ein Beispiel für die Heizung der Außenwand ist der Karborundumofen, dessen lose geschichtete Seitenwände dem Kohlenoxyd Durchtritt durch die Fugen gestattet, so daß der Ofen während des Betriebes in einen Mantel brennenden Kohlenoxydes eingehüllt ist, der natürlich das Mauerwerk von außen beheizt.)

Die Diskussion der allgemeinen Gleichung für die Wärmeleitung fortsetzend, ist noch der Einfluß der Quotienten  $\frac{q}{l}$  zu untersuchen.  $q$  bedeutet

für den Ofen den ideellen mittleren Durchtrittsquerschnitt, den wir mit  $\Phi$  bezeichnet haben,  $l$  ist die Stärke der Wand, in den Ofenrechnungen mit  $\delta$  bezeichnet;  $\frac{\Phi}{\delta}$  als Faktor der thermischen Konduktanz gibt mit der spezifischen Leitfähigkeit multipliziert, das Gesamtleitvermögen des Ofens, die Konduktanz des Ofens.

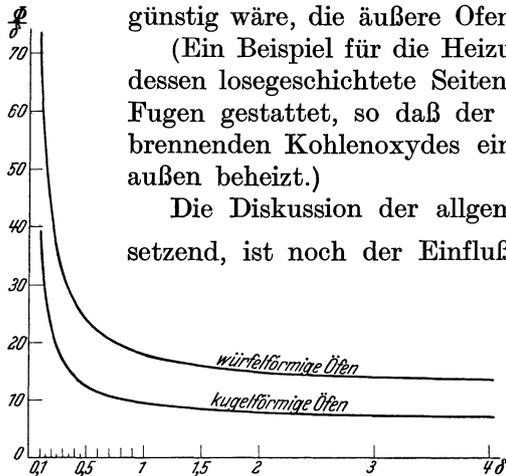


Abb. 12. Schaulinien  $\frac{\Phi}{\delta}$  kugel- und würfelförmiger Öfen.

Es sei erinnert, daß nach S. 35 das Verhältnis

$$\begin{aligned} \frac{\Phi}{\delta} &= \frac{6 D d}{\delta} \quad \text{für würfelförmige,} \\ &= \frac{\Pi D d}{\delta} \quad \text{für kugelförmige Öfen ist,} \end{aligned}$$

wobei mit  $D$  und  $d$  die Längen bzw. die Durchmesser bezeichnet sind.

Herrings hat nachstehende Tabelle für  $\frac{\Phi}{\delta}$  berechnet, die in Abb. 12 graphisch veranschaulicht ist.  $\delta$  ist darin als Vielfaches des inneren Durchmessers oder der inneren Länge ausgedrückt.

Die Zahlen für  $\delta$  und  $\frac{\Phi}{\delta}$  in der Tabelle sind mit der Maßzahl für  $\delta$  in Zentimetern zu multiplizieren, um die Werte für einen gegebenen Ofen in metrischem Maße zu erhalten.

Der Konduktanzfaktor nimmt mit steigender relativer Wandstärke erst rasch ab und verlangsamt dann seinen Fall, der etwa von  $\delta = 0,70 d$  bis  $0,80 d$  hinaus kaum praktisches Interesse hat.

Auf den Versuchsofen von Fitzgerald angewendet, seien folgende Überlegungen als Beispiel für den Gebrauch der Tabelle durchgeführt.

Die Dimensionen des Ofens sind:  $23 \times 23 \times 23$  cm Außenmaße,  $11 \times 11 \times 11$  cm Innenmaße, bei einer Wandstärke von 6 cm.

Der Konduktanzfaktor für einen Würfel ist, direkt gerechnet, ohne Anwendung der Tabelle

$$\frac{\Phi}{\delta} = \frac{6 D d}{\delta} = \frac{6 \cdot 23 \cdot 11}{6} = 253 \text{ Einheiten.}$$

Mit Anwendung der Tabelle:  
 $\delta$  durch  $d$  ausgedrückt:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{6}{11} = 0,55.$$

Die Tabelle gibt für 0,55 und  
 Würfelform

$$\frac{\Phi}{\delta} = 23,00.$$

Diese Zahl mit der Maßzahl der  
 Innenlänge 11 multipliziert, gibt

$$23 \times 11 = 253 \text{ Einheiten.}$$

### B. Wärmeersparnis durch Wandverstärkung.

Der Ofen hatte bei einer be-  
 stimmten Temperatur (800°) 860 W

Verluste; diese sollen auf 600 W herabgedrückt werden, indem die Wand mit dem-  
 selben Material (homogen) verstärkt wird.

$$Q_1 = \lambda (t_i - t_a) \frac{\Phi}{\delta} = 860 \text{ Watt}$$

$$\lambda(t_i - t_a) = \frac{860}{\frac{\Phi}{\delta}} = \frac{860}{253} = 3,4.$$

Es ist erwünscht, daß  $Q_1$  auf  $Q_2$  im Verhältnis von 860:600 herabgedrückt werde.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{860}{600} = \frac{\lambda (t_i - t_a)}{\lambda (t_i - t_a)} \cdot \frac{\frac{\Phi_1}{\delta_1}}{\frac{\Phi_2}{\delta_2}}; \text{ oder annähernd } \frac{860}{600} = \frac{\frac{\Phi_1}{\delta_1}}{\frac{\Phi_2}{\delta_2}};$$

$\frac{\Phi_1}{\delta_1}$  wurde vorhin zu 253 cm-Einheiten berechnet, somit

$$\frac{\Phi_2}{\delta_2} = 253 \cdot \frac{600}{860} = 253 \cdot 0,697 = 174 \text{ in cm-Einheiten.}$$

Der Übergang auf  $d = 11$  als Einheit gibt

$$174 : 11 = 15,8 = \frac{\Phi_2}{\delta_2} \text{ nach Herrings Ausdrucksweise.}$$

Der Wert 16 in der dritten Kolonne der Tabelle läßt für  $\delta = 1,5 \cdot d$  finden; da die Innen-  
 dimension des Ofens  $d = 11$  cm ist, so müßte die neue Wandstärke  $11 \cdot 1,5$  cm = 15,5 cm  
 betragen.

Um den Einfluß des Faktors  $\frac{\Phi}{\delta}$  bei der Projektierung von Öfen kennenzulernen,  
 seien zwei Extremfälle betrachtet: nämlich erstens, daß Öfen verschiedener Größe  
 dieselbe Anzahl von Watt als Wärmeverlust aufweisen sollen, zweitens Öfen verschie-  
 dener Größe je Volumeinheit des Innenraumes gleiche Wattverluste zeigen sollen und  
 drittens, daß Öfen verschiedener Größe gleiche Wandstärke erhalten sollen.

1. Fall. Zur Behandlung des ersten Falles dient folgende Überlegung: Damit die Watt-  
 verluste, absolut genommen, gleich sind, also

$$Q = \lambda \cdot (t_i - t_a) \frac{\Phi_1}{\delta_1} = \lambda (t_i - t_a) \frac{\Phi_2}{\delta_2} = Q_2$$

muß  $\frac{\Phi_1}{\delta_1} = \frac{\Phi_2}{\delta_2}$  sein.

$\frac{\Phi}{\delta}$  für Würfel ist  $\frac{Dd}{\delta}$ , somit

$\frac{D_1 d_1}{\delta} = \frac{D n d n}{\delta n}$  für den  $n$  mal so großen Ofen.  $\delta$  ist allgemein  $\frac{D-d}{2}$  daher

$\frac{D_1 - d_2}{D_1 - d_2} = \frac{D n d n}{D n - d n}$ ; daraus ergibt sich die Unbekannte  $D n$  zu

$$D n = \frac{n D_1 d_1}{n d_1 - (n-1) D_1},$$

in Größen des Modellofens ausgedrückt.

Im Nenner befindet sich eine Differenz, die der Diskussion bedarf. Für

$$n d_1 = (n - 1) D_1 \text{ wird } D n = \infty,$$

also praktisch nicht mehr realisierbar.

Ein Modellofen habe 1 m<sup>3</sup> Rauminhalt bei 15 cm Wandstärke, somit sind  $D = 1,30$  m,  $d = 0,15$  m. Diese Werte in obige Diskussion eingeführt, ergeben  $n \cdot 0,15 = (n - 1) 1,30$ ; daraus  $n = 4,33$ ; das heißt, wenn die lineare Vergrößerung der Innenabmessungen  $4^{1/3}$ mal größer sein soll, müßte die Wandstärke unendlich werden, um stets gleiche

	Lineare Vergrößerung			
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
$d$ . . . . .	1 m	2 m	3 m	4 m
$D$ . . . . .	1,30 m	3,71 m	9,75 m	24,0 m
Fassungsraum . . . . .	1 m <sup>3</sup>	8 m <sup>3</sup>	27 m <sup>3</sup>	64 m <sup>3</sup>
Volumen des Mauerwerkes	1,2 m <sup>3</sup>	43 m <sup>3</sup>	900 m <sup>3</sup>	140 000 m <sup>3</sup>
$\frac{D d}{\delta} = \frac{1}{6} \frac{\Phi}{\delta}$ . . . . .	8,67	8,63	8,65	8,67
Durchtrittsquerschnitt . .	7,8 m <sup>2</sup>	44,5 m <sup>2</sup>	175 m <sup>2</sup>	1248 m <sup>2</sup>
$\frac{\delta}{d}$ . . . . .	0,15	0,34	1,13	6,0

absolute Wärmeverluste zu haben. Wie die nachstehenden Rechnungsergebnisse für den Einheitsofen und die 2—4fache lineare Vergrößerung seiner Innendimensionen zeigen, kommt man rasch zu Mammutkonstruktionen. Die Rechnungsweise wird nur dort einigen praktischen Wert haben, wo relativ geringe Abmessungsänderungen beabsichtigt sind und äußerste Knappheit an elektrischer Energie besteht, wie manchmal in Laboratorien.

Weiter oben wurde gezeigt, daß die thermische Konduktanz sich mit zunehmendem Verhältnis  $\frac{\delta}{d}$  erst rasch, dann aber nur langsam ändert, und daß es praktisch nicht von Wert ist, über ein Verhältnis von 0,8 bis 1,0 hinauszugehen. Von diesem Standpunkte aus wäre der Ofen nach den Daten für  $n = 3$  schon überdimensioniert.

Die Rechnung lehrt also ganz allgemein, daß möglichst an Innenraum gespart werden muß, ohne gegen die Verwendung großer Ofeneinheiten zu sprechen. Über letztere wird weiter unten diskutiert werden.

Fitzgerald gibt hierfür ein Beispiel aus der Praxis. Ein Ofen von 746 kW Aufnahme hatte eine Außenoberfläche von 80 m<sup>2</sup> und ergab für 1 kg des erzielten Produktes einen Verbrauch von 6,1 kWh. Beim Umbau wurde die Oberfläche bis auf 33 m<sup>2</sup> verkleinert, maß also dann nur das 0,62fache des ursprünglichen. Der Energieverbrauch je Kilogramm Produkt sank auf 5 kWh, das sind 82% der vorherigen.

2. Fall. Statt auf die Gewichtseinheit eines bestimmten Ofenproduktes, ist es allgemeiner, die Verluste auf die Volumeinheit des Fassungsraumes zu beziehen.

Aus der Gleichung für die Wärmeverluste für den ganzen Ofen

$$Q = \lambda (t_i - t_a) \frac{\Phi}{\delta}$$

ergibt sich der Verlust je Volumeinheit des Ofens

$$\frac{Q}{v} = \frac{\lambda (t_i - t_a) \Phi}{\delta v}$$

und für den würfelförmigen Ofen mit dem Fassungsraum  $v = d^3$  und dem Konduktanzfaktor

$$\frac{\Phi}{\delta} = \frac{6 D d}{\delta}$$

ergibt sich

$$Q_v = \lambda (t_i - t_a) \frac{6 D d}{\delta \cdot d^3} = \lambda (t_i - t_a) \frac{6 D}{\delta d^2}.$$

Damit  $Q_v$  für verschiedene Größe von  $d$  gleich bleibt, muß der Faktor  $\frac{D}{\delta d^2}$  konstant sein;  $\delta$  ist stets  $\frac{D-d}{2}$ , somit besteht für zwei Öfen gleicher Wärmeverluste je Volumeneinheit die Forderung, daß

$$\frac{D_1}{(D_1-d_1) d_1^2} = \frac{Dn}{(Dn-dn) dn^2}$$

$n$  ist die Verhältniszahl der Vergrößerung von  $d_1$ ;  $dn = n d_1$ , daher

$$\frac{D_1}{(D-d_1) d_1^2} = \frac{Dn}{Dn-n d_1 n^2} + d_1^2$$

daraus

$$Dn = \frac{n^2 D_1 d_1}{D(n^2-1)} + d_1^1.$$

Die lineare Vergrößerung des im vorigen angenommenen Ofenmodelles mit  $1 \text{ m}^3$  Innenraum auf das 2-, 3-, 4fache der Innendimensionen gibt nachstehende Daten:

Unter diesen Verhältnissen nimmt die nötige Wandstärke mit der linearen Vergrößerung rapid ab und erreicht schon bei Ofen 2 bloß 6 cm. Schon aus Konstruktionsgründen wird die Mauerung stärker gehalten werden

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$d$ . . . . .	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
$D$ . . . . .	1,3 m	2,12 m	3,08 m	4,06 m	5,05 m
$\delta$ . . . . .	0,15 m	0,061 m	0,04 m	0,03 m	0,023 m
Innenraum . . . .	1 m <sup>3</sup>	8 m <sup>3</sup>	27 m <sup>3</sup>	64 m <sup>3</sup>	125 m <sup>3</sup>
Mauervolumen . .	1,2 m <sup>3</sup>	1,55 m <sup>3</sup>	2,18 m <sup>3</sup>	2,86 m <sup>3</sup>	3,40 m <sup>3</sup>
$\frac{D}{\delta d^2}$ als Konstante	8,67	8,65	8,64	8,72	8,79

müssen. Die Tabelle zeigt in unverkennbarer Weise die Vorteile großer Ofeneinheiten: Verringerung der relativen Verluste und relative Ersparnis an Mauerwerk, und als Folge während des Betriebes rationelleres Arbeiten.

3. Fall. Da aus praktischen Gründen der Festigkeit eine bestimmte Stärke der Ofenwandungen nicht unterschritten werden kann, hat es Interesse, darüber Aufschluß zu gewinnen, wie sich die Wärmeverluste verhalten, wenn bei gleicher Mauerstärke der Innenraum vergrößert wird. Das ist durch den Vergleich des Verhältnisses der wahren Wärmeverluste mit dem Verhältnis der auf die Volumeinheit bezogenen Wärmeverluste zu ersehen. Der Vergleich kann aus den oben abgeleiteten Beschränkungen und für den Ofen mit dem Innenraum  $1^2$  bis  $4^2$  durchgeführt werden.

Die wahren Wärmeverluste verhalten sich wie:

$$\frac{Q_n}{Q} = \frac{\Phi_{1n}}{\Phi_1} = \frac{n(n d_1 + 2\delta)}{d + 1\delta} \quad \begin{matrix} (n \text{ fach}) \\ (1 \text{ fach}) \end{matrix}.$$

Die relativen Wärmeverluste stehen in folgendem Verhältnis:

$$\frac{Q_{vn}}{Q_{v1}} = \frac{\Phi_n d_1^3}{\Phi_1 d^3 n^3} = \frac{n d_1 + 2\delta}{(d + 2\delta) n^2} \cdot \begin{matrix} (n \text{ fach}) \\ (1 \text{ fach}) \end{matrix}.$$

Für  $n = 1$  bzw. 2,  $\delta = 30$  in beiden Fällen berechnet ergibt

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \frac{1}{0,308} \quad \text{das Verhältnis der wahren Verluste,}$$

$$\frac{Q_{vn}}{Q_{v1}} = \frac{1}{2,46} \quad \text{das Verhältnis der relativen Verluste,}$$

daraus

$$\left. \begin{matrix} Q_n = \frac{Q_1}{0,308} = 3,25 Q_1 \\ Q_{vn} = \frac{Q_{v1}}{2,46} = 0,406 Q_{v1} \end{matrix} \right\} \text{für die lineare Verdopplung der Abmessungen.}$$

Die wahren Verluste steigen zwar auf das  $3\frac{1}{4}$ fache, die relativen Verluste vermindern sich um 60%.

In der vorstehenden Betrachtung der Extremfälle wurde die Vergrößerung der

Innendimensionen und die Wärmeverluste als Basis der Berechnungen gewählt und daraus die Wandstärken bestimmt.

In den vorstehenden Betrachtungen wurde für die beiden Extremfälle gleicher wirklicher und gleicher relativer Wärmeverluste die Wandstärke in Abhängigkeit von den linearen Dimensionen des Innenraumes berechnet.

Häufig tritt an den Konstrukteur die Aufgabe heran, nach dem Vorbild eines Versuchsofens einen Industrieofen zu konstruieren. Die einfachste Lösung findet dieses Problem, wenn für den Industrieofen alle Maße des Vorbildes gleichartig vervielfacht werden.

Ist für den würfelförmigen Versuchsofen der wirkliche Wärmeverlust

$$Q_1 = Z \frac{\Phi_1}{\delta_1} = Z \frac{6 D_1 d_1}{\delta}.$$

so beträgt er für die Vergrößerung allgemein

$$Q_n = Z \frac{\Phi_n}{\delta_n} = Z \frac{6 D_n d_n}{\delta_n};$$

da nun alle Dimensionen in gleichem Maße vergrößert wurden, ist  $D_n = n D_1$ ,  $d_n = n d_1$  und  $\delta_n = n \delta_1$ ; so ist schließlich

$$\frac{Q_1}{Q_n} = \frac{1}{n}; \quad Q_n = n \cdot Q_1.$$

Das Verhältnis der relativen Wärmeverluste läßt sich ohne weitere Rechnung zu

$$\frac{Q_v}{Q_{vn}} = \frac{Q_1}{Q_n} \cdot \frac{n^3}{1^3} = n^2$$

anschreiben.

$$Q_{nv} = \frac{Q_v}{n^2};$$

daher ergeben sich die Sätze:

1. Die wirklichen Wärmeverluste sind proportional der linearen Vergrößerung.
2. Die relativen Wärmeverluste sind dem Quadrate der linearen Vergrößerung verkehrt proportional.

Durch Verdoppelung, Verdreifachung usw. werden die relativen Wärmeverluste auf  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{16}$  usw. herabgedrückt.

Bedingung für die Richtigkeit aller Ableitungen war, daß stets dieselbe Innentemperatur erreicht wurde, daß also die größeren Öfen durch entsprechend gesteigerte Energiezufuhr auf die normale Arbeitstemperatur gebracht werden.

### C. Wärmersparnis durch Verringerung der Wärmestrahlung (Einfluß der Anstrichfarbe).

Die bisherige Aufmerksamkeit galt dem Leitungswiderstande des Mauerwerks, welcher die Wanderung der Wärme an die Oberfläche erschweren soll, wo sie durch Mitteilung und Strahlung den Ofenkörper verläßt.

Die Strahlung läßt sich nach Stephan durch die Gleichung

$$Q_R = 5 \cdot 9 E \left[ \left( \frac{T_i}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_A}{1000} \right)^4 \right] \text{ Watt pro cm}^3$$

berechnen.  $E$  ist das Emissionsvermögen der Oberfläche und von ihr abhängig. Wie erinnerlich, ist  $E$  für schwarze Körper nahezu gleich 1, für schmutzige Ziegel 0,80, für blankes Gußeisen 0,70, für oxydiertes Gußeisen 0,62 (siehe S. 38).

Ein Anstrich mit Aluminiumbronze auf Ziegelmauerwerk verringert das Emissionsvermögen von 0,80 auf 0,50 (Langmuir). Fitzgerald hat mit seinem wiederholt erwähnten Ofen auch darüber Studien gemacht und fand für die Wärmeverluste bei verschiedenem Anstrich der Oberfläche folgende Daten:

Durch den Aluminiumanstrich wurde die Strahlung um 14% bis 11% herabgedrückt.

Oberfläche aus Chamotte	Wärmeverluste in Watt bei den Innentemperaturen		
	500 °	700 °	800 °
berußt . . . . .	355 (106%)	720 (105%)	865 (107%)
naturdunkel . . . . .	430 (100%)	685 (100%)	810 (100%)
mit Aluminiumbronze gestrichen	370 (86%)	600 (87,5%)	725 (89,5%)

Die zwingende

Folge davon ist eine Erhöhung der Oberflächentemperatur, die wieder eine verstärkte Abfuhr der Wärme durch Konvektion zur Folge hat. In der Tat läßt sich mit derartigen strahlungshindernden Anstrichen kein praktischer Erfolg erzielen, wenn höhere Innentemperaturen herrschen. Folgerungen aus Fitzgeralds Versuchen sind daher nur mit Vorsicht und unter rechnerischer Kontrolle zu ziehen.

Fitzgerald hat es unterlassen, die Außen- und Innentemperaturen der Ofenwände bei seinen Versuchen zu messen und gibt nur den Wattverbrauch im stationären Zustande an. Die Aufsuchung dieser Temperaturen ist auch noch nachträglich auf dem Wege der Rechnung möglich. Die Formel

$$Q_{rk} = \eta_{rk} \cdot O \text{ gibt}$$

$$\eta_{rk} = \frac{Q_{rk}}{O}$$

als mittleren Wert der 6 Seiten des Würfels, das seinerseits aus spezifischer Strahlung und spezifische Mitteilung additiv zusammengesetzt ist.

Die Aufgabe, die Außentemperaturen bei Fitzgeralds Versuchen nachträglich zu ermitteln, kann mit Hilfe der Tabelle (S. 46) gelöst werden. Es bedarf nur des Bezuges der wirklichen gesamten Wattverluste der einzelnen Versuche auf die Oberflächeneinheit, also der Division der Wattzahl durch die Oberfläche (3174 cm<sup>2</sup>). Man erhält so ein mittleres  $\eta_{rk}$ , dessen zugehörige Temperatur aus der Tabelle durch Interpolation entnommen werden kann.

	Innentemperatur C°	Watt total	$\eta_{rk}$	$t_a$
Schmutzige Ziegel	500	430	0,135	129
	700	685	0,216	161
	800	810	0,255	177
Aluminiumanstrich	500	370	0,1165	136
	700	600	0,189	176
	800	725	0,218	195

Die Versuchstemperaturen des Innenraumes mit 500°, 700° und 800° sind Lufttemperaturen. Beim

Übertritt von Wärme aus Luft in ein anderes Medium findet ein plötzlicher Temperaturabfall statt, die Temperatur der Innenwände ist daher um ein beträchtliches niedriger als die gemessenen Innenraumtemperaturen.

Fitzgeralds Versuchsdaten geben darüber keinen Aufschluß, doch lassen sie sich — unter Verwendung der eben errechneten Außenwandtemperaturen — ebenfalls nachrechnen.

In der Formel für den Wärmefluß

$$Q_A = \lambda_0 \left( 1 + \frac{t_i + t_a}{2 \cdot 273} \right) (t_i - t_a) \frac{\Phi}{\delta}$$

ist  $t_i$  die einzige Unbekannte.

Bekannt sind

$$\lambda_0 = 0,00385, \quad Q_A = \text{Versuchsdaten}$$

$$\frac{\Phi}{\delta} = 253 \text{ (s. S. 35)} \quad t_a = \text{Berechnungsdaten.}$$

Durch Umformung erhält man die Formel

$$T_i = \sqrt{\frac{Q \cdot 2 \cdot 273}{\lambda_0 \cdot \Phi} + T_a^2}$$

hier  $T_i = \sqrt{Q \cdot 560 + T_a^2}$ , worin  $T_i$  bzw.  $T_a$  die Innen- und Außentemperaturen in absoluter Zählung bedeuten.

Oberflächenbeschaffenheit	Innenraumtemp. °C	Wattverbrauch	$t_0$ °C	$T_a$ ° abs.	$T_i$ ° abs.	$t_i$ °C
Schmutzige Ziegel . .	500	430	129	402	634	361
	700	685	161	434	756	483
	800	810	177	450	809	536
Aluminiumanstrich . .	500	370	136	409	608	335
	700	600	176	449	731	458
	800	725	195	468	791	518

Es ist auffällig, daß sich für Aluminiumanstrich durchweg tiefere Innentemperaturen ergeben als bei schwarzen Ziegeln. Dies widerspricht den Naturgesetzen und läßt mutmaßen, daß bei den Versuchen der volle Gleichgewichtszustand noch nicht erreicht war, wenngleich die Innentemperaturen schon konstant geworden waren.

Bei der Verwertung von Fitzgeralds Versuchen zu neuen Schlüssen ist somit Vorsicht geboten.

Besseren Einblick gewährt eine Rechnung der Wärmestrahlung, die für stationäre gleiche Innenwandtemperatur von 500° einmal bei natürlicher Oberfläche, das andere Mal mit Aluminiumanstrich zu erhalten ist.

Die auf S. 46 geschilderte graphische Methode ergibt sowohl die zu erwartende Außenwandtemperatur als auch den Energieverbrauch bei stationärem Zustande.

Die Durchführung der erforderlichen Berechnungen für  $Q_t$  und  $Q_{rk}$  für die angenommenen Außenwandtemperaturen 150°, 175°, 200° sind durch die Tabellen sehr erleichtert, so daß ihre ausführliche Wiedergabe unterbleiben kann. Im nachfolgenden sind daher bloß die Resultate und die graphischen Lösungen verzeichnet.

Angenom. Temperatur	Näherungsrechnung			Graphische Lösungen	
	150°	175°	200°		
$Q_t$ . . . . .	748	706	670		
$Q_{rk}$ {	Schmutzige Ziegel . . . . .	592	777	—	720 W 167°
	Aluminiumanstrich . . . . .	—	706	747	684 W 188°

Die errechneten Energieverluste sind bei Aluminiumanstrich um 5% geringer.

Temperatur °C	$\frac{T_i}{1000}$	$\left(\frac{T_i}{1000}\right)^4$	$\left(\frac{T_i}{1000}\right)^4 - \left(\frac{300}{1000}\right)^4$	Spez. Wärmestrahlung $\eta_R$			Wärmeabgabe an Luft $\eta_K$				Temperatur °C
				Oberfläche			ebene Flächen			Mittelwert für 6 Flächen des Würfels	
				abs. schwarz $E = 1$	schmutzige Ziegel $E = 0,8$	Alum.-Anstrich $E = 0,5$	vertikal I	horizontal			
								oben frei II	unten frei III		
Watt pro cm <sup>2</sup>											
100	0,373	0,01935	0,01125	0,06637	0,05310	0,03319	0,039	0,0429	0,020	0,0364	100
125	0,398	0,02509	0,01699	0,1003	0,08024	0,05015	0,059	0,0649	0,030	0,0451	125
150	0,423	0,03201	0,02391	0,1407	0,11256	0,07035	0,080	0,0880	0,040	0,0746	150
175	0,448	0,04028	0,03218	0,18986	0,15189	0,09493	0,100	0,1100	0,050	0,0933	175
200	0,473	0,05005	0,04195	0,24750	0,19800	0,12375	0,120	0,1320	0,060	0,1120	200
225	0,498	0,06151	0,05341	0,31506	0,25205	0,15753	0,143	0,1573	0,072	0,1333	225
250	0,523	0,07482	0,06672	0,40032	0,32026	0,20016	0,165	0,1815	0,082	0,1535	250
275	0,548	0,09018	0,08208	0,48427	0,387416	0,24213	0,188	0,2068	0,094	0,1754	275
300	0,573	0,1078	0,0997	0,58823	0,47058	0,2941	0,210	0,2310	0,105	0,1959	300
325	0,598	0,1279	0,1198	0,70682	0,56546	0,35341	0,235	0,2585	0,117	0,2193	325
350	0,623	0,1506	0,1425	0,84075	0,67260	0,42037	0,259	0,2849	0,129	0,2416	350
375	0,648	0,17634	0,16824	0,99262	0,79410	0,49631	0,285	0,3135	0,142	0,2659	375
400	0,673	0,20525	0,19715	1,16320	0,93056	0,5836	0,308	0,3388	0,154	0,2874	400
425	0,698	0,23738	0,22928	1,35275	1,08220	0,67637	0,334	0,3674	0,167	0,3116	425
450	0,723	0,27327	0,26517	1,56450	1,25160	0,78225	0,359	0,3949	0,179	0,3349	450
475	0,748	0,31305	0,30495	1,79921	1,43937	0,89960	0,385	0,4235	0,192	0,3592	475
500	0,773	0,35704	0,34894	2,05875	1,64700	1,02937	0,410	0,4510	0,205	0,3825	500

Weiteren Einblick gewährt die Durchführung analoger Rechnungen bei verminderter Wandstärke unter Beibehaltung der Innenraumdimensionen  $11 \times 11 \times 11$  cm und der gleichen inneren Wandtemperatur von  $500^\circ\text{C}$ .

Halbe Wandstärke.

Innenmaße . . . . .	$11 \times 11 \times 11$ cm	Oberfläche $O$ . . . . .	1734 cm
Wandstärke $\delta$ . . . . .	3 cm	$\frac{\Phi}{\delta}$ . . . . .	374 cm
Außenmaße . . . . .	$17 \times 17 \times 17$ cm	Innenwandtemperatur	$500^\circ\text{C}$

Die graphisch ermittelten Resultate lauten:

Die Energieersparnis durch den Aluminiumanstrich beträgt hier 10,5%.

Dieselbe Rechnung für 12 cm Wandstärke gibt

Die Energieersparnis durch den Anstrich beträgt hier bloß 1,6%, die Verdoppelung der Materialstärke hingegen drückte den Wattverbrauch von 720 Watt bei 6 cm Wandstärke um 11,8% herab.

Zur Übersicht seien für diese Berechnungsserie die Resultate nochmals in folgender Tabelle zusammengestellt.

Wie man sieht, wirkt der Aluminiumanstrich um so mehr, je höher die Außenwandtemperaturen sind, in Übereinstimmung mit der stärkeren Zunahme der Ausstrahlung gegenüber der Wärmemitteilung bei steigenden Temperaturen. Für Öfen mit relativ hohen äußeren Wandtemperaturen, seien sie nun durch hohe Innentemperatur oder durch hohe Leitfähigkeit des Ofenmaterials oder durch zu geringe Wandstärken hervorgerufen, wird ein Aluminium-

Innere Wandtemperatur  $500^\circ\text{C}$ .

Wandstärke cm	Schmutzige Ziegel		Aluminiumanstrich	
	Watt	Außenwand $^\circ\text{C}$	Watt	Außenwand $^\circ\text{C}$
3	855	253	765	282
6	720	167	684	188
12	635	97	625	129

Temperatur $^\circ\text{C}$	Gesamte Wärmeverluste (Strahlung und Wärmeabgabe) $\eta_R + \eta_K$								Temperatur $^\circ\text{C}$
	schmutzige Ziegel				Aluminiumanstrich				
	ebene Flächen			Mittelwert für 6 Flächen des Würfels	ebene Flächen			Mittelwert für 6 Flächen des Würfels	
	vertikal	horizontal			vertikal	horizontal			
I	oben frei II	unten frei III		I	oben frei II	unten frei III			
$^\circ\text{C}$	Watt je $\text{cm}^2$								$^\circ\text{C}$
100	0,0921	0,1093	0,0731	0,0895	0,0722	0,0761	0,0532	0,0696	100
125	0,1392	0,1441	0,1102	0,1253	0,1092	0,1151	0,0802	0,0952	125
150	0,1926	0,2005	0,1966	0,1865	0,1504	0,1584	0,1104	0,1444	150
175	0,2519	0,2619	0,2019	0,2452	0,1949	0,2049	0,1449	0,1882	175
200	0,3180	0,3300	0,2587	0,3107	0,2438	0,2557	0,1837	0,2357	200
225	0,3951	0,4094	0,3240	0,3854	0,3005	0,3148	0,2295	0,2908	225
250	0,4853	0,5018	0,4023	0,4738	0,3652	0,3817	0,2822	0,3537	250
275	0,5751	0,5942	0,4814	0,5628	0,4301	0,4489	0,3361	0,4175	275
300	0,6806	0,7068	0,5756	0,6755	0,5041	0,5251	0,3991	0,4900	300
325	0,8006	0,8231	0,6825	0,7848	0,5884	0,6119	0,4704	0,5727	325
350	0,9316	0,9575	0,8016	0,9142	0,6794	0,7053	0,5494	0,6620	350
375	1,0791	1,1076	0,9361	1,0600	0,7813	0,8098	0,6383	0,7622	375
400	1,2386	1,2694	1,0846	1,2180	0,8916	0,9224	0,7376	0,8710	400
425	1,4162	1,4496	1,2492	1,3938	1,0104	1,0438	0,8434	0,9880	425
450	1,6106	1,6465	1,4306	1,5865	1,1413	1,1772	0,9613	1,1172	450
475	1,8244	1,8629	1,6314	1,7986	1,2846	1,3231	1,0916	1,2588	475
500	2,0570	2,0980	1,8520	2,0295	1,4394	1,4804	1,2344	1,4119	500

anstrich um so mehr Vorteile bieten, je ungünstiger die Verhältnisse der Wärmeverluste liegen. In gegenteiligen Fällen ist der (stets positive) Nutzen des Anstriches nicht in die Waagschale fallend. Die Regel kann auch so ausgesprochen werden: Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der inneren und äußeren Wandfläche ist, um so größere Ersparnisse bietet der Aluminiumanstrich. Hiermit sei das sehr umstrittene Thema des Anstriches verlassen. Die gegebenen Richtlinien werden genügen, um die Frage in jedem Einzelfall zu studieren; die Entscheidung kann nur durch die Rechnung gefällt werden.

## Elektrotechnische Grundlagen.

### I. Grundbegriffe für die Energieumsetzung im Elektroofen.

#### A. Elektrothermische Berechnung der verbrauchten Wärmemenge.

Der elektrische Ofen ist eine Vorrichtung zur Umsetzung elektrischer in thermische Energie. Die in seinen, der Energieumwandlung dienenden Widerständen fester, flüssiger oder gasförmiger Natur erzeugte Wärmemenge  $Q$  kann nach dem Jouleschen Gesetz ermittelt werden.

$$Q = i^2 r t \text{ Joule.}$$

Die Wärmemenge ergibt sich in Joule, wenn man die Stromstärke  $i$  in Ampere, den Widerstand  $r$  in Ohm und die Zeit  $t$  in Sekunden ausdrückt, wobei 1 Joule 0,239 Grammkalorien entspricht. Die resultierende Wärmemenge kann daher unmittelbar durch die Beziehung  $Q = 0,239 i^2 r t$  in Grammkalorien oder durch  $Q = \frac{0,239}{1000} i^2 r t$  in Kilogrammkalorien (kcal) gefunden werden.

Dieser Weg zur Ermittlung der erzeugten Wärmemenge ist in der Regel nicht gangbar, da der Widerstand  $r$  der direkten Messung nur schwer zugänglich ist. Wohl aber können jederzeit nach bekannten Meßmethoden Stromstärke und elektromotorische Kraft (EMK) an den Anschlußklemmen des Ofens bestimmt werden. Das Ohmsche Gesetz bietet durch seine Darstellung der Relation zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand eine Handhabe zur Aufstellung einer neuen Gleichung für die Wärmemenge, in welcher die Größe  $r$  durch eine einfach meßbare Größe ersetzt ist. Eine an einen Widerstand gelegte EMK bewirkt einen Strom, dessen Stärke proportional der Spannung und verkehrt proportional dem Widerstand ist. Benutzt man als Maßeinheiten Ampere und Ohm für Stromstärke und Widerstand, dann ergibt sich  $i = \frac{e}{r}$  in Ampere, wobei die

Spannung in Volt eingesetzt werden muß oder  $r = \frac{e}{i}$ . Eliminiert man in der Gleichung für das Joulesche Gesetz den Widerstand, so resultiert ein neuer Ausdruck für die im Ofen erzeugte Wärmemenge  $Q = e i t$  in Joule. Das Produkt von Stromstärke und Spannung stellt eine Energiemenge oder Arbeit je Zeiteinheit dar, also eine Leistung, deren Maßeinheit mit Watt bezeichnet wird. Für technische Berechnungen erweist es sich als zweckmäßig, größere Einheiten zu benutzen.

$$1000 \text{ Watt} = 1 \text{ Kilowatt (kW).}$$

Die Beziehung zu der speziell im Maschinenbau gebräuchlichen älteren Leistungseinheit einer Pferdestärke ist durch die Gleichung  $1 \text{ PS} = 0,736 \text{ kW}$  gegeben. Wählt man ferner als Zeitmaß die Stunde, erhält man  $Q = \frac{e i}{1000} t$  in Kilowattstunden (kWh) oder, da  $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$  äquivalent ist,  $Q = 860 \frac{e i}{1000} t$  in Wärmeeinheiten.

#### B. Widerstände in Gleich- und Wechselstromanlagen.

Durch Messung von Stromstärke, Spannung bzw. des Produktes mittels Kilowattmeter und der Zeit, kann also auf einfachste Weise die im Ofen erzeugte Wärmemenge

errechnet werden. Diese Gleichung gilt allerdings nur mit der wesentlichen Einschränkung, daß die Speisung des Ofens mit Gleichstrom erfolgt, ein Fall, der nur in den seltensten Fällen zutrifft, da für elektrothermische Zwecke fast ausschließlich der wirtschaftlicher erzeugbare und übertragbare Einphasen- und Dreiphasenwechselstrom herangezogen wird.

Um die Gleichung der Energieumsetzung eines Wechselstromofens aufstellen zu können, ist es erforderlich, die besonderen Eigenschaften dieser Stromart zu untersuchen. Charakteristisch für Ein- und Mehrphasenwechselstrom ist eine sinoidalen Gesetzen gehorchende periodische Änderung der Spannung und des Stromes.

Abb. 13 a zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung. Jene Zeit  $T$ , die für ein vollständiges Spannungsspiel erforderlich ist, wird mit Periode bezeichnet. Der Begriff Periodenzahl oder Frequenz ist durch die Zahl der Spiele je Sekunde definiert. Man spricht ferner vom Maximalwert  $\bar{E}$  und von Momentanwerten  $E$ .

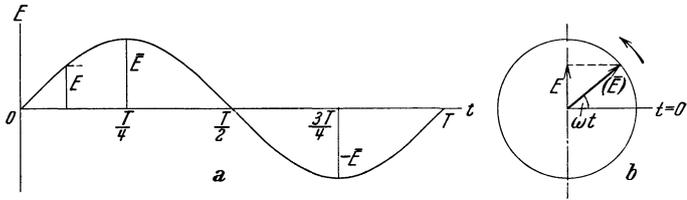


Abb. 13 a und 13 b. Änderung der Spannung für Einphasenstrom.

Die Beziehung zwischen Maximal- und Momentanwert läßt sich auf einfache Weise aus der für elektrische Größen sehr gebräuchlichen Darstellung im Polardiagramm erkennen. In Abb. 13 b ist die periodische Änderung der EMK durch die Projektion eines um einen Endpunkt rotierenden Vektors, dessen Größe dem Maximalwert der Spannung entspricht, auf eine fixe Achse gekennzeichnet, wobei dessen Drehzahl der Frequenz des Wechselstromes gleich ist. Die Winkelgeschwindigkeit des Vektors ist mit  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  gegeben. Daraus errechnet sich der Momentanwert der Spannung zur Zeit  $t$  mit

$$E = \bar{E} \sin \frac{2\pi}{T} t = \bar{E} \sin \omega t.$$

Ähnlichen Gesetzen unterliegt der durch eine Wechselspannung in einem Verbraucher hervorgerufene Strom, jedoch sind hier drei Grenzfälle zu unterscheiden, jene des rein Ohmschen, des induktiven und des kapazitiven Verbrauchers. Abb. 14 zeigt den Verlauf der Stromstärke und der Spannung in Abhängigkeit von der Zeit für einen rein Ohmschen Verbraucher. Die Maximalwerte beider Größen fallen zeitlich zusammen. Der Momentanwert der Stromstärke ist durch  $J = \bar{J} \sin \frac{2\pi}{T} t = \bar{J} \sin \omega t$  gegeben. Es ist auch ohne weiteres ersichtlich, daß, ähnlich wie bei Gleichstrom, das Produkt von Stromstärke und Spannung, hier aber der Momentanwerte, den Momentanwert der Leistung ergibt. Die Abbildung zeigt, daß die Leistungskurve die doppelte Frequenz der Spannungs- und Stromkurve aufweist und durchweg im positiven Bereich des Koordinatensystems verläuft. Die zugehörige Fläche ist, da als Ordinaten die Momentanwerte der Leistung, als Abszisse die Zeit benutzt wurde, schon ein Maß für die Arbeit bzw. für die erzeugte Wärme. Jeder Momentanwert  $E J$  läßt sich nach dem Jouleschen Gesetz auch durch  $J^2 r$  ersetzen. Da ferner  $r$  als konstante Größe anzunehmen ist, stellt die Leistungskurve bei entsprechender Wahl des Maßstabes gleichzeitig auch eine  $J^2$ -Kurve dar und die zugehörige Fläche die je Periode umgesetzte Wärme. Es liegt nun nahe, einen fiktiven Wert  $i$  für die Stromstärke einzuführen, der bei unveränderlicher Intensität die gleiche Wärmeentwicklung hervorruft wie der Wechselstrom. Für diese mit Effektivwert bezeichnete Größe gilt

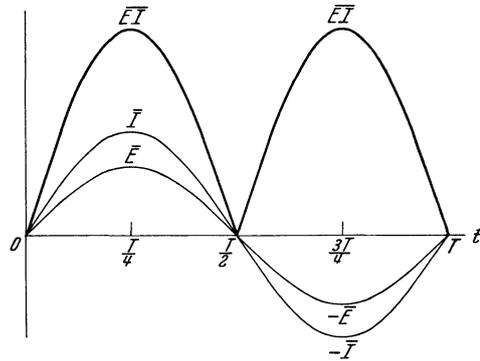


Abb. 14. Spannungsstrom- und Leistungskurve für einen rein Ohmschen Verbraucher.

$$i^2 = \frac{\bar{J}^2}{2} \quad \text{oder} \quad i = \frac{\bar{J}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{und ähnlich für die EMK } e = \frac{\bar{E}}{\sqrt{2}}$$

Nach der Definition für den Effektivwert von Strom und Spannung ist die Leistung  $L = e i$  in Watt und die Wärmemenge  $Q = e i t$  in Joule, bzw.  $Q = 860 \frac{e i}{1000} t$  in kcal.

Rein Ohmsche, von einer Wechselstromquelle gespeiste Verbraucher verhalten sich hinsichtlich Energieumsetzung genau wie an Gleichstrom angeschlossene Verbraucher.

Der Unterschied beider Stromarten in der Wärmewirkung tritt am deutlichsten bei Betrachtung rein induktiver Belastungsverhältnisse in Erscheinung. Jeder von einem Wechselstrom durchflossene Leiter wird von einem pulsierenden elektromagnetischen Kraftfeld umgeben, dessen Feldintensität  $\Phi$  gleichzeitig mit der Stromstärke seine Maximalwerte erreicht. Dieses Wechselfeld induziert in dem Leiter eine EMK, deren Höchstwerte in den Zeitpunkten der größten Feld- bzw. Stromstärkenänderung, also bei Vorzeichenwechsel dieser Größen auftreten.

Man bezeichnet diese Erscheinung als Selbstinduktion. Sie spielt bei allen Hochstromöfen eine beträchtliche Rolle. Der Momentanwert der EMK der Selbstinduktion ist durch die Gleichung

$$E_s = -L \frac{dJ}{dt}$$

gegeben. Der Koeffizient  $L$  wird Selbstinduktionskoeffizient genannt. Die Einheit der Selbstinduktion wird mit Henry bezeichnet und ergibt sich, wenn  $J$  in Ampere und  $E$  in Volt ausgedrückt wird. Die EMK der Selbstinduktion eilt in der Phase dem Strom um  $90^\circ$  nach. Die aufgedrückte Spannung muß, um  $E_s$  jeweils das Gleichgewicht halten zu können, dem Strom um  $90^\circ$  voraneilen.

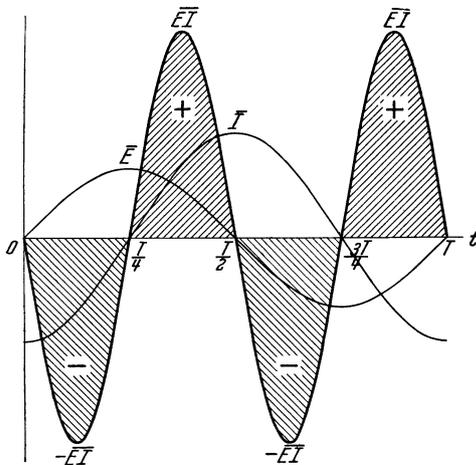


Abb. 15. Spannungsstrom- und Leistungskurve für einen rein induktiven Verbraucher.

Abb. 15 zeigt eine Darstellung dieser Verhältnisse im rechtwinkligen Koordinatensystem. Es

geht schon aus diesem Diagramm augenscheinlich hervor, daß die von der Leistungskurve gebildeten, die umgesetzte Energie darstellenden Flächen, über eine Periode summiert, Null ergeben. Obwohl also ein derartiger Verbraucher von einem Strom  $J$  durchflossen wird, erfolgt keine Energieumsetzung in Wärme. Die elektrische Energie wird vielmehr zu einer periodischen Änderung des magnetischen Zustandes verwendet, wobei die im Feld aufgespeicherte Arbeit immer wieder rückverwandelt wird.

### C. Phasenverschiebung.

Technische Verbraucher, wie z. B. Elektroöfenanlagen, stellen Kombinationen Ohmscher und induktiver Verbraucher dar. Das Vektordiagramm (Abb. 16) gibt über die

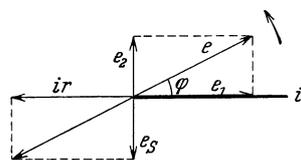


Abb. 16. Kombination eines Ohmschen und eines induktiven Verbrauchers.

hierbei herrschenden Beziehungen Aufschluß. Es ist ohne weiteres gestattet, die Maximalwerte der Ströme, Spannungen usw., reine Sinusform vorausgesetzt, im Vektordiagramm durch die effektiven Größen zu ersetzen, da ihr Verhältnis konstant ist. Der Ohmsche Spannungsabfall  $i r$  kann mit einem dem Stromvektor  $i$  entgegengerichteten Vektor dargestellt werden. Senkrecht zum Stromvektor und ihm um  $90^\circ$  nachteilend, ist die Selbstinduktionsspannung  $e_s$  aufzutragen. Diese beiden Vektoren ergeben eine Resultierende, welcher die dem Verbraucher aufgedrückte Spannung, die auch mit Klemmenspannung  $e$  bezeichnet wird, das Gleichgewicht halten muß. Strom-

vektor und Klemmenspannung schließen miteinander einen Winkel  $\varphi$ , den Phasenverschiebungswinkel, ein. Der Stromvektor eilt dem Spannungsvektor nach. Dieser läßt sich in zwei Komponenten zerlegen, von welchen  $e_1$  den Ohmschen Spannungsabfall zu decken,  $e_2$  die Selbstinduktionsspannung zu kompensieren hat. Für die Leistung und auch für die umgesetzte Wärmemenge ist nur der zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes verwendete Spannungsanteil  $e_1 = i r$  maßgebend. Die Leistung ist

$$L = i^2 r = e_1 i = e i \cos \varphi.$$

Der Wert  $\cos \varphi$  wird mit Leistungsfaktor bezeichnet. Wird  $\varphi = 90^\circ$  und  $\cos \varphi$  daher 0, dann wird auch  $L_W = 0$ . Dies trifft für den vorher beschriebenen Fall eines rein induktiven Verbrauchers zu.

#### D. Wirk- und Scheinwiderstand einer Ofenanlage.

Multipliziert man die Werte der Spannungsvektoren in Abb. 16 mit der Stromstärke und trägt die so gewonnenen Leistungswerte neuerdings als Vektoren auf, so erhält man Abb. 17. Man bezeichnet das Produkt der tatsächlich meßbaren Effektivwerte von Stromstärke und Spannung als Scheinleistung  $L_{Sch}$ , die der tatsächlichen Energieumsetzung entsprechende Leistung  $L_W$  als Wirkleistung und die lediglich zur Erzeugung des magnetischen Kraftfeldes aufgewendete Energie als Blindleistung  $L_B$ . Die vor allem interessierende Wirkleistung ist durch die Beziehung  $L_W = L_{Sch} \cos \varphi = e i \cos \varphi$  in Watt, die Scheinleistung durch  $L_{Sch} = e i$  in Voltampere (VA) und die Blindleistung durch  $L_B = L_{Sch} \sin \varphi = e i \sin \varphi$  in Blindwatt gegeben. Als technische Einheiten sind Kilowatt (kW), Kilovoltampere (kVA) und Blindkilowatt (BkW) gebräuchlich. Analog spricht man von Schein-, Wirk- und Blindstrom.

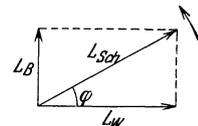


Abb. 17.  
Leistungsdiagramm.

Stellt man ähnliche Überlegungen wie für die Erscheinung der Selbstinduktion auch für den dritten Sonderfall, den rein kapazitiven Verbraucher an, so zeigt sich, daß der Stromvektor dem Vektor der Klemmenspannung um  $90^\circ$  vorauseilt.

Als Analogon zu dem für Gleichstrom entwickelten Ohmschen Gesetz läßt sich auch für Wechselstromkreise der Zusammenhang zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand festlegen.

$$i = \frac{e}{r_{sch}},$$

jedoch muß in diese Gleichung ein fiktiver, vektoriell aus einer Ohmschen und einer induktiven Komponente zusammengesetzter Scheinwiderstand eingeführt werden. Abb. 18 zeigt ein solches Widerstandsdreieck, dessen beide Katheten durch den Ohmschen und den induktiven Widerstand gebildet werden und dessen Hypotenuse den Scheinwiderstand darstellt.

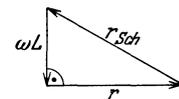


Abb. 18.  
Widerstandsdreieck.

$$r_{sch} = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}.$$

Die Gleichung des Ohmschen Gesetzes für Wechselstromkreise ergibt sich daraus zu

$$i = \frac{e}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}.$$

Für die richtige Projektierung eines eine Elektroofenanlage speisenden Kraftwerkes ist es von ausschlaggebender Bedeutung, über die Größe des zu erwartenden Leistungsfaktors orientiert zu sein bzw. richtige Annahmen zu treffen. Es sei zum Beispiel geplant, zwei Ofeneinheiten mit 3900 und 7800 kW erforderlicher Maximalleistung aufzustellen, ferner würde der Betrieb unter Berücksichtigung eines entsprechenden Gleichzeitigkeitsfaktors 2700 kW für maschinelle Anlagen benötigen. An Hand der Disposition der Zuleitung zu den Öfen wird ein zu erwartender Leistungsfaktor von  $\cos \varphi_2 = 0,85$  errechnet. Der Lieferant der Ofentransformatoren gibt einen Wirkungsgrad  $\eta_2 = 0,975$  und für die Motoren einen solchen von  $\eta_1 = 0,9$  bei  $\cos \varphi_1 = 0,65$  an. Es ist nun zu ermitteln, für

welche Wirk- und Scheinleistung die Kraftanlage zu bemessen ist. Die aufgenommenen Wirkleistungen sind für die Motoren:

$$L_{1W} = \frac{2700}{0,9} = 3000 \text{ kW}$$

für die Öfen auf der Primärseite der Transformatoren:

$$L_{2W} = \frac{3900 + 7800}{0,975} = 12000 \text{ kW}.$$

Die Blindleistungen betragen für die Motoren:  $L_{1B} = L_{1W} \operatorname{tg} \varphi_1 = 3000 \operatorname{tg} \varphi_1 = 3520 \text{ BkW}$  für die Öfen:  $L_{2B} = L_{2W} \operatorname{tg} \varphi_2 = 12000 \operatorname{tg} \varphi_2 = 7500 \text{ BkW}$ . Abb. 19 zeigt die Verhältnisse im Vektordiagramm. Die resultierende, die Stromerzeuger belastende Scheinleistung ergibt sich daraus zu

$$L_{Sch} = \sqrt{(\Sigma L_W)^2 + (\Sigma L_B)^2} = \sqrt{15000^2 + 11020^2} \doteq 18650 \text{ kVA}.$$

Der Leistungsfaktor der Gesamtanlage errechnet sich zu

$$\cos \varphi = \frac{15000}{18650} \doteq 0,8.$$

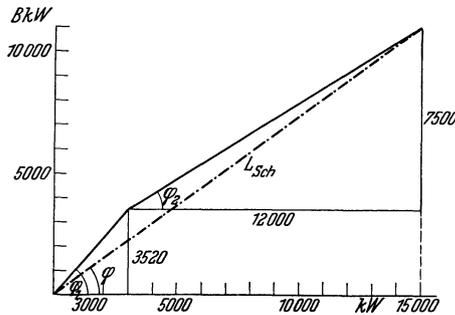


Abb. 19. Leistungsdiagramm für das Rechenbeispiel.

Man wird also den Stromerzeuger für etwa 19000—20000 kVA auslegen müssen, da die Kupferwicklung des Stromerzeugers, obwohl ihr nur 15000 kW entnommen werden, mit einem Scheinstrom entsprechend 18650 kVA Scheinleistung belastet wird. Für die Bemessung der antreibenden Maschine ist die Wirkleistung maßgebend, jedoch muß naturgemäß der Generatorwirkungsgrad, der etwa mit 0,92 eingesetzt werden kann, berücksichtigt werden.

$$L_M = \frac{15000}{0,92} = 16300 \text{ kW oder in Pferdestärken}$$

$$L_M = \frac{16300}{0,736} = \text{ca } 22000 \text{ PS}.$$

## E. Darstellung der charakteristischen Größen der Mehrphasenströme.

Allen bisherigen Überlegungen wurde der einfacheren Darstellungsmöglichkeit halber Einphasenwechselstrom zugrunde gelegt. Die überragende Bedeutung der Mehrphasenstromsysteme, vor allem des Dreiphasenstromes, der häufig auch mit Drehstrom bezeichnet wird, macht es erforderlich, sich mit ihren besonderen Eigenschaften zu befassen. Ordnet man auf einem Stromerzeuger statt einer einzigen Wicklung, wie sie für Einphasenwechselstrom erforderlich ist, drei um  $120^\circ$  versetzte Spulen an, dann werden in jeder Spule wechselelektromotorische Kräfte auftreten, deren Phasen ebenfalls um  $120^\circ$  gegeneinander verschoben sind. Man führt nun aber nicht alle 6 Wicklungsenden zu den Verbrauchern, sondern verbindet 3 Wicklungsausführungen, z. B. alle Wicklungsanfänge, an der Maschine zum sog. Sternpunkt, wie dies Abb. 20 zeigt. Es ist aber auch möglich, jeweils das Ende einer Wicklung mit dem Anfang der nächsten Wicklung zu verbinden. Man erhält auf diese Weise die Dreieckschaltung nach Abb. 21. Selbstverständlich lassen sich auch die Verbraucher in Stern und Dreieck schalten. Die Vereinigung mehrerer Einphasensysteme zu einem Mehrphasensystem wird als Verkettung

bezeichnet, die Spannung zwischen zwei der vom Generator abgehenden Leitungen als verkettete Spannung, zwischen einer abgehenden Leitung und dem Sternpunkt als Phasenspannung. Die Relation zwischen verketteter Spannung und Phasenspannung ist aus dem Spannungsdiagramm (Abb. 22) sofort ersichtlich. Es ist demnach  $e = e' \sqrt{3}$ . Untersucht man einen z. B. in Stern geschalteten Verbraucher hinsichtlich der in ihm fließenden Wechselströme, dann wird man feststellen, daß Stärke und Phase des in der Zuleitung fließenden Stromes  $i$  sich mit dem Phasenstrom des Verbrauchers deckt. Bei der Dreieckschaltung hingegen findet in den Anspeisungspunkten des Verbrauchers eine Aufteilung des zufließenden Stromes  $i$  auf zwei Phasen statt. Jede Phase führt den Strom  $\frac{i}{\sqrt{3}}$ .

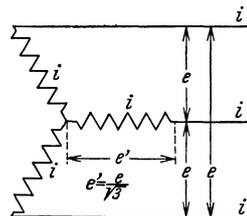


Abb. 20. Sternschaltung.

Widerstände in jeder Phase eines in Stern geschalteten Verbrauchers voraus, dann werden bei gleichen aufgedrückten Spannungen auch die Effektivwerte der Ströme in den einzelnen Phasen von derselben Größe sein. Die Leistung eines solchen Verbrauchers kann aus der Summe der Leistungen jeder Phase bestimmt werden. Die Phasenleistung ist bei Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung durch das Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung, also durch  $L_{Ph} = \frac{e}{\sqrt{3}} i$  oder, falls eine

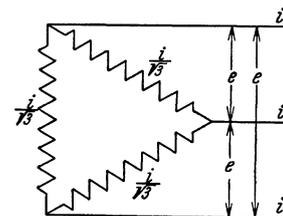


Abb. 21. Dreieckschaltung.

Phasenverschiebung  $\varphi$  vorhanden ist, durch  $L'_{Ph} = \frac{e}{\sqrt{3}} i \cos \varphi$  gegeben. Die Leistung des Dreiphasensystems ist demnach  $L = 3 \frac{e}{\sqrt{3}} i \cos \varphi = e i \sqrt{3} \cos \varphi$  Watt. Zum gleichen Resultat muß man naturgemäß bei einem in Dreieck geschalteten Verbraucher gelangen, nur ist statt der Phasenspannung  $\frac{e}{\sqrt{3}}$  die verkettete Spannung  $e$  und statt des verketteten Stromes der Phasenstrom  $\frac{i}{\sqrt{3}}$  in die Berechnung der Summenleistung einzuführen.

Für Elektrodenöfen trifft eine der für die Entwicklung der Gleichung für die Leistung gemachten Voraussetzungen nicht immer zu. Bei automatisch regulierten Öfen wird wohl der Ohmsche Widerstand in den einzelnen Phasen von annähernd gleicher Größe sein, der induktive Widerstand der Zuleitung zum Ofen kann aber, wie in einem späteren Abschnitte noch näher dargelegt werden soll, in den 3 Phasen beträchtlich voneinander abweichende Werte aufweisen.

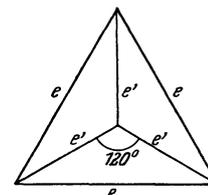


Abb. 22. Spannungsdreieck.

Einige sehr wesentliche Vorteile der Anwendung des Einphasenwechselstromes zur Speisung von Großöfen ließen es wünschenswert erscheinen, Schaltungen zu suchen, die es ermöglichen, einerseits die meist vorhandenen Drehstromzentralen zur Versorgung der Öfen heranzuziehen, diese andererseits dennoch nur einphasig zu betreiben. Dabei muß beifolgendermaßen gefordert werden, daß die Belastungsaufteilung auf die drei Phasen des stromliefernden Netzes möglichst gleichmäßig erfolgt. Eine Schaltung für die Versorgung eines einzigen Ofens aus einem Drehstromnetz, die dieser Bedingung entspricht, existiert nicht, wohl aber können zwei gleich große, mit gleicher Leistung betriebene Einphasenöfen dieser Forderung nachkommen, wenn sie von zwei in Scottscher Schaltung zusammenarbeitenden Transformatoren gespeist werden.

Abb. 23 zeigt diese Schaltung sowie das entsprechende Spannungsdiagramm. Zwischen den Klemmen  $a, b, c$  der Primärwicklungen der beiden Transformatoren herrscht die verkettete Spannung eines Drehstromnetzes.  $d$  ist der Mittelpunkt der Wicklung  $b, c$ . Das Übersetzungsverhältnis bzw. die Relation zwischen den Primär- und Sekundär-

wicklungen muß nun so gewählt werden, daß die Sekundärspannungen  $e_1$  und  $e_2$  ihrem effektiven Werte nach gleich werden. Da sich die Spannungen zwischen  $b$  und  $c$  bzw.  $a$  und  $d$  wie  $1 : \frac{\sqrt{3}}{2}$  verhalten, muß, um der aufgestellten Forderung gerecht zu werden, bei einem Übersetzungsverhältnis des Transformators  $T_2$  von  $m:n$ , dieses Ver-

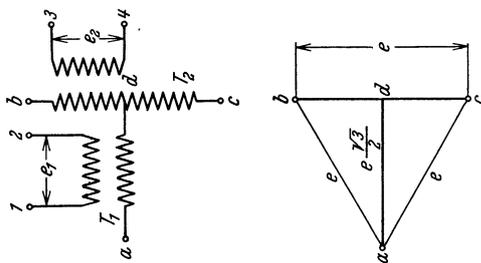


Abb. 23. Scott-Schaltung.

hältnis bei Transformator  $T_1$  mit  $\frac{\sqrt{3}}{2} m:n$  gewählt werden. Die Spannungen  $e_1$  und  $e_2$  sind wohl dem Effektivwerte nach gleich, jedoch in der Phase um  $90^\circ$  verschoben. Man erhält auf diese Weise ein unverkettetes Zweiphasensystem. Die dem Netze entnommene Dreiphasenleistung ist bei gleicher Belastung der Einphasenöfen gleich der Summe der beiden Einphasenleistungen. Auf einen anderen Weg zum gleichen Ziele ist im Abschnitt über den Entwurf der Stromleitungen hingewiesen.

## II. Umformung der Spannung.

### A. Zweck der Umspannung.

In der Regel ist es erforderlich, auf dem Wege vom Erzeuger der elektrischen Energie zum Verbraucher ein Organ einzuschalten, welches der elektrischen Energie jene Eigenschaften verleiht, die für eine bestimmte Ofentype Bedingung sind. Der in den Anfängen des Ofenbaues gelegentlich beschränkte Weg, einen eigenen Generator für den Ofenbetrieb aufzustellen und dieser Maschine die erforderlichen elektrischen Eigenschaften zu geben, ist längst verlassen worden, auch dann, wenn das Hüttenwerk eine eigene Zentrale besitzt. Noch vor 20 Jahren brachte es keine Schwierigkeit mit sich, die verhältnismäßig geringe Energiemenge für die damals gebauten kleinen Ofeneinheiten in einem Generator nicht allzuweit vom Ofen zu erzeugen und sie mit der gewünschten, meist sehr niedrigen Spannung direkt dem Ofen zuzuführen. Die Größe der Ofeneinheiten und besonders der zu ihrem Betriebe erforderlichen Leistungen sind inzwischen progressiv gewachsen. Es wäre heute undenkbar, etwa für einen modernen Karbidofen die Energie in einem Generator ohne Zwischenschaltung eines Umformers zu erzeugen, der auch nur 50 m vom Ofen entfernt wäre. Die Anordnung eines Umformers ist unvermeidlich geworden. Zweck eines solchen Umformers ist es also, die auf der Primärseite, sei es von einer werk-eigenen Zentrale oder von einem Überlandwerk, meist mit hoher Spannung und einer Frequenz von 50 Perioden ankommende Energie, auf eine für den Ofenbetrieb taugliche Spannung und Frequenz umzuformen. Rotierende Umformer vermeidet man möglichst. Ihre Anschaffungskosten sind gegenüber jenen ruhender Umformer, sog. Transformatoren, wesentlich höher. Ferner haben sie betriebstechnische Nachteile. Sie bedürfen einer ständigen Wartung, außerdem sind sie empfindlich gegen die speziell bei Lichtbogenöfen außerordentlich schwankende, stoßweise Belastung. Auch konstruktiv würden sich nicht leicht überwindbare Schwierigkeiten einstellen, wollte man für heute übliche große Ofeneinheiten mit ihren ungeheueren Stromstärken rotierende Maschinen bauen. Man wendet sie daher heute nur mehr dort an, wo eine andere Lösung nicht möglich ist, bei den verschiedenen mit abnormal niedriger oder hoher Frequenz betriebenen Induktionsöfen, bei welchen es sich nicht nur darum handelt, die erforderliche Ofenspannung, sondern auch einen Strom entsprechender Frequenz zu erzeugen. Bei allen Elektrodenöfen, gleichgültig, ob es sich um reine Widerstandsöfen oder um Lichtbogenwiderstandsöfen handelt, werden heute nur mehr ruhende Umformer, Transformatoren, angewendet.

Ein Transformator ist durch die ihm aufgedrückte Primärspannung, durch die Spannung an seinen Sekundärklemmen, also durch sein Übersetzungsverhältnis, durch

die Frequenz und natürlich durch seine Leistung bestimmt. Die Primärspannung kann theoretisch beliebig hoch gewählt werden. Es wäre also ohne weiteres denkbar, den Transformator etwa an ein 50000 V-Netz anzuschließen. Praktisch ist in der Regel dadurch eine Grenze gesetzt, daß in Hüttenwerken auch dann, wenn der Transformator in einem geschlossenen Raum zur Aufstellung gelangt, die Ablagerung elektrisch leitfähigen oder hygroskopischen Staubes zu Überschlügen führen kann. Falls also das Primärnetz die Energie mit sehr hoher Spannung — als untere Grenze seien 35000 V genannt — zuführt, wird man es vorziehen, in genügender Entfernung vom Hüttenwerk einen Zwischentransformator zur Aufstellung zu bringen, der von der Primärspannung auf zum Beispiel 10000 V umspannt und den eigentlichen Ofentransformator mit dieser Spannung speist.

Die Sekundärspannung wird einzig und allein durch den Ofen bzw. das in ihm herzustellende Produkt bestimmt. Es scheint lohnend, einige charakteristische Ofenbauarten in dieser Hinsicht zu untersuchen. Während der alte kleine Karbidofen mit einigen hundert Kilowatt Anschlußwert noch als kombinierter Lichtbogenwiderstandsofen anzusprechen ist, hat die zur Verbilligung der Produktion notwendig gewordene Vergrößerung der Ofeneinheiten dazu geführt, daß die ursprünglich nur geduldete Widerstandsheizung immer mehr angestrebt wurde, um schließlich die Lichtbogenheizung ganz zu verdrängen. Moderne Öfen arbeiten ausschließlich als Widerstandsöfen, wobei die Charge selbst den Widerstand darstellt. Es ist wohl ohne weiteres klar, daß bei einem solchen Ofen die an den Elektroden erforderliche Spannung von den verschiedensten, nicht immer ganz beherrschbaren Faktoren abhängig ist. Elektrodendistanz und Ofenform und damit zum Teil auch Länge und Querschnitte der Stromwege bleiben zumindest für den einmal gewählten Ofen konstant. Während des Erhitzungs- bzw. Schmelzvorganges treten aber ständig Änderungen der Leitfähigkeit des Materials als Folge von Temperaturänderungen in den einzelnen Schichten der Charge auf. Die Eigenschaft des Einsatzgutes eines Karbidofens, seinen spezifischen Widerstand mit sinkender Temperatur zu erhöhen, wurde sogar dazu ausgenutzt, durch Anordnung gekühlter Zonen, dem Strom bestimmte Wege vorzuschreiben, ihn vor allem in tiefere Partien des Beschickungsmateriales abzudrängen. Der Widerstand wird sich aber auch in Abhängigkeit von der Qualität des Einsatzmateriales, seiner Korngröße usw. ändern. Man wird also keineswegs mit einer Sekundärspannung das Auslangen finden. Es wird im Gegenteil erforderlich sein, einen möglichst großen Spannungsbereich zu bestreichen und die Stufenzahl nicht zu klein zu wählen. Die Grenzen der gebräuchlichen Spannungen liegen etwa bei 100 und 170 V.

Über den Höchstwert hinauszugehen, um die schon exzessiv hoch gewordenen Stromstärken bei dem Bau noch größerer Einheiten zu vermeiden, ein Weg, der z. B. beim Stahlofenbau schon längst beschritten wurde, ist für den Karbidbetrieb ungangbar, da man noch nicht genügend wirksame Mittel gefunden hat, dem mit steigender Spannung rasch wachsenden Elektrodenverbrauch und unruhig werdendem Ofengang zu begegnen.

Auch bei den Lichtbogenwiderstandsöfen, besonders bei seinem wichtigsten Repräsentanten, dem Stahlofen, ist es erforderlich, verschiedene Spannungen zur Verfügung zu haben. Im Interesse der Wirtschaftlichkeit liegt es, die Einschmelzdauer auf eine möglichst kurze Zeit zu reduzieren. Rasches Einschmelzen bewirkt eine Verminderung der Ausstrahlungsverluste während einer Charge und damit eine wesentliche Herabsetzung des Energieverbrauches je t Durchsatz. Nach Beendigung des Einschmelzens folgt der Raffinationsprozeß bei annähernd konstanter gehaltener Temperatur. Für die Dauer des Feinens genügt es daher, dem Ofen wesentlich geringere Energiemengen zuzuführen. Erreichen läßt sich dies durch Vergrößerung der Lichtbogenlänge, also durch Reduktion der Stromstärke bei gleichbleibender Spannung oder durch Verkleinerung der dem Ofen aufgedrückten Klemmspannung bei annähernd gleichbleibender Stromstärke und verminderter Lichtbogenlänge. Die zweite Möglichkeit ist unbedingt vor-

zuziehen, da ein kurzer Lichtbogen immer wirtschaftlicher arbeitet, bei langem Lichtbogen hingegen viel Wärme an das Mauerwerk abgegeben wird, und er außerdem unruhig brennt. Bei älteren Ofenanlagen ging man kaum über 120 V Sekundärspannung hinaus und rüstete den Transformator mit mehrstufigen Anzapfungen bis auf etwa 70 V nach abwärts aus. Bei modernen Stahlföfen geht man bei großen Einheiten schon bis 250 V und führt den Transformator auf der Primärseite mit offenen Wicklungen aus, die vor Beginn des Einschmelzens in Dreieck und für die Raffinationsperiode in Stern geschaltet werden. Während man bei den in letzter Zeit geschaffenen großen Karbidöfen fast durchweg auf Ein- und Zweiphasensystem übergegangen ist, benutzt man bei Lichtbogenstahlföfen ausnahmslos Dreiphasenwechselstrom, eine Abart des Einphasenwechselstromes, welche dadurch gekennzeichnet ist, daß 3 Einphasenwechselströme, deren Vektoren mit einer Verdrehung von  $120^\circ$  aufeinanderfolgen, miteinander verkettet sind. Abb. 24a zeigt die

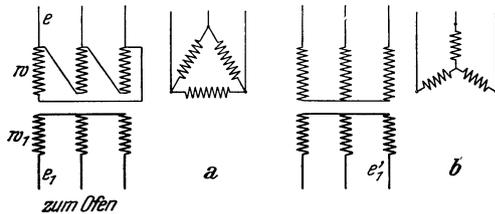


Abb. 24. Dreieck- und Sternschaltung des Transformators.

Dreieckschaltung, Abb. 24b die Sternschaltung des Transformators. Die verkettete Spannung zwischen zwei Phasen der Zuleitung betrage  $e$ , die der Sekundärseite  $e_1$ , die primäre Windungszahl einer Transformatorphase sei  $w$ , die sekundäre  $w_1$ . Bekanntlich verhalten sich bei einem Transformator die Spannungen wie die Windungszahlen, also:  $e:e_1 = w:w_1$ . Bei primärer Dreieckschaltung entfällt auf die Windungszahl  $w$  die verkettete Spannung  $e$ . Aus obenstehender Proportion ergibt sich für diesen Fall die Sekundärspannung zu  $e_1 = \frac{e w_1}{w}$ . Bei primärer Sternschaltung entfällt auf die gleiche

Windungszahl  $w$  nur die Phasenspannung  $\frac{e}{\sqrt{3}}$ . Die Sekundärspannung  $e'_1$  ist dann  $e'_1 = \frac{e w_1}{w \sqrt{3}}$ . Sie ist tatsächlich wesentlich kleiner. Um sich den Betriebserfordernissen

noch besser anpassen zu können, gibt man dem Transformator außerdem noch Anzapfungen, deren Intervall 5—6% beträgt. Man erhält auf diese Weise 6—8 Spannungen, die den praktischen Bedürfnissen vollauf genügen.

Es wurde schon angedeutet, daß es nicht gleichgültig ist, mit welcher Lichtbogenlänge im Ofen die Energie zugeführt wird. Während des Einschmelzens einer Stahl- oder Graugußcharge schmelzen die Elektroden sehr rasch tiefe Trichter in den Einsatz, so daß die Lichtbogen abgeschirmt in der Nähe des Bodens der Wanne arbeiten. Mit allmählich höher steigendem Bad wandern die Elektroden langsam empor, um ihre Höchststellung im Augenblicke des fertiggebildeten Bades zu erreichen. Dies ist auch der gegebene Zeitpunkt, um durch Reduktion der Spannung, also z. B. durch primäre Umschaltung von Dreieck auf Stern, die Lichtbogenlänge zu reduzieren. Zu langes Weiterheizen mit langem Lichtbogen würde die Wannenausmauerung und den Deckel angreifen. Je größer der Ofen ist, um so größere Spannungen können gewählt werden. Während man z. B. bei einem 2-t-Ofen nicht über 120 V bei primärer Dreieckschaltung hinausgehen wird, wählt man die Spannung bei einem 10-t-Ofen etwa mit 180 V. Man trachtet jeweils, so hoch wie möglich mit der Spannung zu gehen, um die Maximalstromstärke und deren noch zu beschreibenden unwillkommenen Nebenwirkungen herabzusetzen.

## B. Bemessung des Transformators.

Außer der zweckmäßigen Wahl der Spannung ist auch die Bemessung des Transformators hinsichtlich Leistung von ausschlaggebender Bedeutung für das einwandfreie Funktionieren einer Ofenanlage. Es ist durchaus notwendig, sich dabei nach den Erfordernissen des Betriebes zu richten. Jedem Betriebsleiter einer Karbidfabrik ist es bekannt, daß durch Änderungen in der Qualität des aufgegebenen Rohmaterialies Un-

regelmäßigkeiten im Ofengange auftreten können, die Abstichschwierigkeiten verursachen und eine rasche Verlegung des Schmelzherdes im Ofen erforderlich machen. Da derartige Operationen nur dann helfen, wenn sie schnell durchgeführt werden, kommt es zu starken Überlastungen des Transformators. Besonders hohe Beanspruchungen treten z. B. auch bei Elektrodenbrüchen, beim ersten Anfahren des Ofens oder nach Stillständen auf. Einem für die normale Leistung des Ofens bemessenen Transformator würde in solchen Fällen, bei welchen der Betriebsleiter gezwungen ist, sich über die warnenden Angaben der Ofeninstrumente hinwegzusetzen, Gefahr drohen.

Bei der Wahl eines Transformators ist darauf Rücksicht zu nehmen, daß die Lieferfirmen die Transformatoren nach den Erwärmungsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker dimensionieren, die keinen Unterschied zwischen Ofentransformatoren und solchen für Licht- und Kraftanlagen machen. Letztere werden nach den Belastungsspitzen bemessen und haben in den weiten Abständen zwischen den Höchstbelastungen genügend Zeit zum Auskühlen, während die Ofentransformatoren oft monatelang unter Vollast arbeiten müssen, ohne jene Wartung haben zu können, welche bei den übrigen Transformatoren als selbstverständlich gilt. Es ist daher dringend zu empfehlen, die Größe der Transformatorleistung bei Ofenbetrieben nicht knapp zu wählen und der Lieferfirma die entsprechenden Vorschriften hinsichtlich Erwärmungszulässigkeit zu machen. Mit Rücksicht auf den Dauerbetrieb wird in der Regel beim Ofentransformator eine höhere Nennleistung vorzusehen sein, als bei einem Transformator für Licht- und Kraftanlagen gleicher Leistung. Dafür ist beim Ofentransformator eine bequemere Verteilung der Verluste, also größere Eisenverluste und kleinere Kupferverluste, zulässig.

Etwas anders liegen die Verhältnisse bei Stahl-, Grauguß- oder Metallschmelzöfen. Jede Charge verläuft nach einem vorher genau bekannten Schema, keine unterscheidet sich wesentlich von der anderen, es sei denn, daß durch einen gelegentlich vorkommenden Fehler in der metallurgischen Behandlung der Charge ein längeres Raffinieren erforderlich ist. Man kann also z. B. bei einem Stahlofentransformator ganz ähnlich vorgehen wie etwa bei der Bemessung eines Fördermaschinenantriebes, dessen Berechnung Diagramme eines kompletten Förderspieles, einschließlich der Pause bis zum Beginn des nächsten Spieles, zugrundegelegt werden.

Bericht Nr. 118 des Stahlwerks-Ausschusses des Vereins deutscher Eisenhüttenleute<sup>1</sup> enthält in dieser Hinsicht interessante Angaben. Es werden dort zwei Grenzfälle besprochen, jener der Erzeugung von hochwertigem Edelstahl und von Stahlformguß. Während bei Edelstahlherstellung die Raffination, die mit stark reduzierter Leistungszufuhr durchgeführt wird, im Verhältnis zur Dauer der ganzen Charge lange Zeit in Anspruch nimmt, beschränkt sich dieser Prozeß bei Stahlformguß auf eine sehr kurze Zeit. Im ersten Falle läßt sich der Transformator während des Einschmelzens beträchtlich über seine Leistung belasten (der Bericht nennt 20%), da während des Feinens und der Pause für das Abgießen genügend Zeit zum Abkühlen bleibt. Bei Stahlformguß liegen die Verhältnisse ungünstiger. Man wird nur um ein geringes über die Nennleistung hinausgehen dürfen. Der erwähnte Bericht bringt auch einiges über die zweckmäßige Wahl der Transformatorleistung in Abhängigkeit von der Ofengröße. Von den verschiedenen, in diesem Bericht untersuchten Faktoren, die auf die Wahl bzw. auf die Begrenzung der Transformatorgröße von Einfluß sind, verbleibt schließlich als wichtigster die Wärmeleitfähigkeit des Einsatzes. Im Interesse einer kurzen Schmelzdauer wäre man versucht, mit der Transformatorleistung möglichst hoch hinaufzugehen. Diesem Bestreben ist aber durch die Wärmeaufnahmefähigkeit des Materials eine Grenze gesetzt. Steigert man die Lichtbogenleistung über ein gewisses optimales Maß, so tritt unter dem Lichtbogen eine Wärmestauung auf, da das benachbarte Einsatzgut nicht genügend rasch Wärme aufnehmen kann. Das Material unter der Elektrode wird erhitzt, verdampft und gefährdet die Zustellung des Ofens. Der Bericht gibt als Faustregel für die Ein-

<sup>1</sup> Verfaßt von St. Kriz.

schmelzleistung den dreifachen Wert der Raffinierleistung an. Da die Raffinierleistung in erster Linie durch die Ausstrahlungsverluste des Ofens und damit durch die Ofengröße gegeben ist, ist mit dieser Regel auch eine gute Abhängigkeit von der Ofengröße erreicht.

In konstruktiver Hinsicht müssen an einen Ofentransformator noch zwei, für die Betriebssicherheit wichtige Forderungen gestellt werden:

1. Der Transformator muß stoßweisen Belastungsänderungen, wie sie für den Ofenbetrieb charakteristisch sind, standhalten.

2. Er muß möglichst leicht zerlegbar sein, um kleinere Wicklungsdefekte rasch beheben zu können. Fortwährende, durch Zusammenbrüche des Einsatzmaterials bewirkte Stromwegänderungen verursachen die stoßweisen Belastungsänderungen. Bei Lichtbogenstahlöfen ist besonders jener Zeitpunkt kritisch, wenn die Elektroden tief in den im Einsatzgut ausgeschmolzenen Trichtern arbeiten und das Schmelzgut allmählich zu fließen beginnt. Materialteile stürzen an die Elektroden heran und bewirken einen mehr oder minder satten Kurzschluß, zu dessen Ausregulierung die Elektrode fast ganz aus dem Trichter herausgezogen werden muß. Bei hochgehobener Elektrode erlischt meist der Lichtbogen, so daß die Leistung plötzlich wieder auf Null absinkt. Ähnliche, noch viel häufigere Stoßerscheinungen treten auf, wenn die Zusammensetzung der das Metallbad bedeckenden Schlacke hinsichtlich Leitfähigkeit nicht richtig gewählt wurde. Hat man z. B. eine elektrisch zu wenig leitfähige (basische) Schlacke aufgegeben, dann wird die automatisch regulierte Elektrode immer wieder versuchen, diese Schlackenschicht zu durchdringen, um jene Stromaufnahme zu erreichen, auf die der Regler eingestellt ist. Dies ergibt jedesmal einen Kurzschluß mit dem Bade und ein darauffolgendes Abreißen des Lichtbogens. In einem solchen Falle läßt sich durch Änderung der Schlacken-zusammensetzung oder, wenn dies aus metallurgischen Gründen nicht möglich ist, durch Wahl einer anderen Transformatoranzapfung für größere Sekundärspannung Abhilfe schaffen. Auf jeden Fall ist aber bei Ofenbetrieben immer mit derartigen Beanspruchungen zu rechnen.

Der moderne Transformatorenbau beherrscht die durch diese Beanspruchungen hervorgerufenen elektrodynamischen Erscheinungen durch Anordnung entsprechend solider Wicklungsabstützungen restlos. Ein Lockerwerden der Wicklungsspulen hätte ständige Vibrationen zur Folge, die eventuell vorhandene Spielräume zwischen den Spulen vergrößern, die Isolation durchscheuern, Kupferteile hartbiegen und schließlich zum Bruche führen würden.

In diesem Zusammenhange wäre auch noch zu überlegen, welchen Beanspruchungen ein Transformator durch einen satten Klemmenkurzschluß ausgesetzt ist. Kurzschlüsse nahe den Klemmen ergeben stets kleinere Spitzenströme, da die Ohmschen Widerstände und Reaktanzen der Verbindungsleitungen zum Ofen stark dämpfend wirken. Maßgebend für die maximal auftretende Kurzschlußstromstärke ist die sog. Kurzschlußspannung des Transformators und der Spannungsabfall in der den Transformator speisenden Fernleitung. Unter Kurzschlußspannung eines Transformators versteht man jene Spannung, welche primär aufgedrückt werden muß, um auf der Sekundärseite bei einem satten Klemmenkurzschluß den Normalstrom des Transformators zu erzielen. Man baut heute Ofentransformatoren schon im Interesse einer möglichst weitgehenden Stromstoßdämpfung für das Netz im normalen Betrieb, mit hoher Kurzschlußspannung, 8—10% der normalen Spannung bei größeren Einheiten. Nimmt man z. B. an, daß ein Transformator, dessen anspeisende Zentrale sehr nahe ist, einen Klemmenkurzschluß erleidet, dann wird er maximal den zehnfachen Strom aufnehmen. Ein zusätzlicher Spannungsabfall in der Zuleitung von nur 5%, mit dem fast immer zu rechnen ist, bewirkt eine Herabsetzung der Kurzschlußstromstärke auf etwa das 6,5fache des normalen Stromes. Die Gefahren derartiger gelegentlich vorkommender Kurzschlußströme für den Transformator sind gering.

### C. Mantel- und Kerntransformatoren.

Die Forderung nach leichter Zugänglichkeit stellt die Frage zur Diskussion, ob der sog. Manteltype oder der Kerntype der Vorzug zu geben ist. Man unterscheidet diese beiden Bauarten je nach der Form des Eisenkörpers (Blechkpaketes), welcher die magnetische Verkettung im Transformator besorgt. Abb. 25 a zeigt einen Manteltransformator für Einphasenwechselstrom, Abb. 25 b einen solchen für Drehstrom, in Abb. 25 c ist eine Einphasenwechselstrom-Kerntype, in Abb. 25 d wieder eine solche für Drehstrom dargestellt. Schon aus diesen schematischen Abbildungen ist ersichtlich, daß die Wicklungsspulen bei den Kerntypen weit besser zugänglich sind. Man wird daher in erster Linie immer trachten, Ofentransformatoren als Kerntypen zu bauen. Allerdings weisen die Manteltransformatoren einen Vorzug auf, der gerade bei Ofentransformatoren schwer wiegt. Die Verbindungsleitungen von den einzelnen Spulen zu den Sekundärausführungen werden einfach und kurz, womit auch die Kupferverluste kleiner werden. Obwohl ein Manteltransformator größere Eisenverluste gegenüber einer Kerntype gleicher Leistung aufweist, ist sein Wirkungsgrad dank seiner wesentlich kleineren Kupferverluste besser. Auch die Wicklungsabstützung läßt sich leichter durchführen, obwohl dies auch bei Kerntypen keine besonders großen Schwierigkeiten bereitet. Jedenfalls läßt sich die Frage, ob Kern- oder Manteltransformator nicht a priori eindeutig entscheiden.

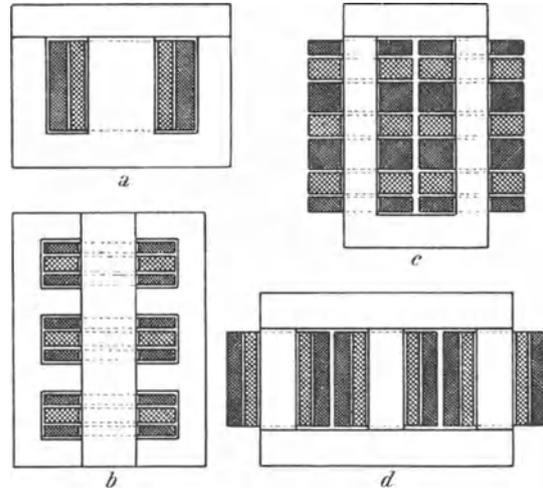


Abb. 25. Bauarten der Transformatoren.

### D. Kühlung des Transformators.

Bei Auswahl der für einen bestimmten Betrieb am besten passenden Transformator-type wird man schließlich auch noch auf Möglichkeiten der Abfuhr der Verlustwärme Rücksicht nehmen müssen. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen, und zwar luft- und ölgekühlte Transformatoren. Bei der ersten Ausführung liegen Kern und Wicklung des Transformators frei und geben die Verlustwärme direkt an die umgebende Luft ab. Beschleunigt kann die Wärmeabgabe dadurch werden, daß man die natürliche Geschwindigkeit der sich am Transformator erwärmenden und emporsteigenden Luft durch künstliche Ventilation erhöht. Diese Kühlungsart wird häufig daran scheitern, daß in der Nähe des Aufstellungsortes des Transformators die Luft zu sehr durch Staub verunreinigt ist. Die Luft aus größerer Distanz heranzubringen, erfordert kostspielige Kanalanlagen. Im Falle des Versagens der Ventilationsanlage ist der Transformator gefährdet, da er zufolge seiner geringen Wärmekapazität rasch unzulässig hohe Temperaturen annehmen würde. Man sieht daher Signaleinrichtungen vor, die ein Ausbleiben des Luftstromes sofort anzeigen. Klappen, die vom Luftstrom in Schwebelage gehalten werden, sinken bei Ausbleiben der Kühlluft herab und schließen einen Signalkontakt. Gelegentlich sind an derart gekühlten Transformatoren dadurch Störungen aufgetreten, daß im Winter Pulverschnee von der Kühlluft mitgerissen wurde, der auf die warme Transformatorwicklung geschleudert, bald Spulendefekte hervorrief. Der Lufttransformator hat den Vorteil der Übersichtlichkeit und leichten Zerlegbarkeit. Mit seiner Überlastungsfähigkeit ist es — wie schon erwähnt — schlecht bestellt, da seine Wärmekapazität zu gering ist.

Bei den ölgekühlten Transformatoren unterscheidet man die natürliche und die künstliche Ölkühlung. Bei der ersten Kategorie wird dem das Öl enthaltenden Trans-

formatorkasten eine möglichst große Oberfläche, sei es durch Kühlrippen (Taschen) oder durch zahlreiche an den Glattblechkasten angebaute Radiatoren gegeben. Bei manchen Bauarten wird die Wärmeabfuhr noch dadurch beschleunigt, daß die Kühlrippen von Ventilatoren angeblasen werden. Künstlich gekühlte Ausführungen sind solche, bei welchen das Öl entweder durch ein außerhalb des Transformators angeordnetes mit Luft oder Wasser betriebenes Kühlsystem gepumpt wird oder umgekehrt, die Kühlflüssigkeit (Wasser) durch eine dem Transformatorkasten eingebaute Kühlschlange getrieben wird. Hinsichtlich Überlastbarkeit bewährt sich der Transformator mit natürlicher Ölkühlung am besten, da dieser dank seiner großen Ölmenge eine bedeutende Wärmekapazität

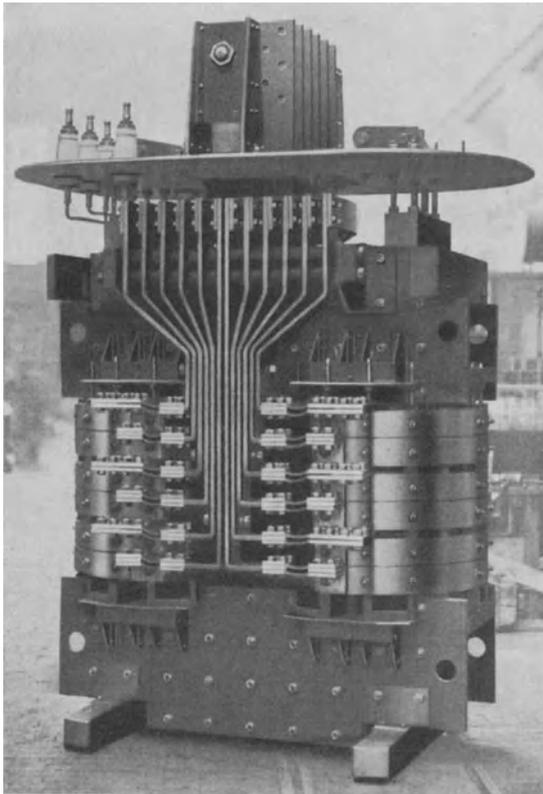


Abb. 26. Öltransformator mit Röhrenspulen für 6000 kVA.

besitzt. Leider weist diese Bauart sehr große Abmessungen auf und beansprucht daher kostspielige Baulichkeiten für seine Unterbringung. Derart gekühlte Transformatoren werden auch nur bis zu Leistungen von 3000—4000 kVA gebaut. Darüber hinaus, aber auch schon unterhalb dieser Grenze, findet man häufig künstliche Ölkühlung, die für die Großtransformatoren ausschließlich in Betracht kommt. Hierbei sollte man aus Gründen der Betriebssicherheit möglichst jene Bauart vermeiden, bei welcher mit Wasser gespeiste Kühlschlangen im Ölkessel des Transformators eingebaut sind. Kleine Undichtigkeiten des Kühlsystems haben, da das Kühlwasser unter einem gewissen Überdruck stehen muß, zur Folge, daß dem Öl unmerklich Wasser beigemischt wird. Zu empfehlen ist hingegen die Umkehrung dieses Kühlsystems, bei welcher das Öl mittels einer Pumpe aus dem Transformator heraus, durch ein wasserdurchflossenes Kühlsystem getrieben wird und gekühlt dem Transformator wieder zufließt. Da hier das Öl einen kleinen Überdruck gegenüber dem Kühlwasser aufweist, wird bei Undichtwerden der Ölrohrleitung schlimmstenfalls ein kleiner Öl-

verlust eintreten. Eine Einrichtung, die zwangsläufig mit der Einschaltung des Transformators den Kühlwasserzufluß öffnet und die Ölumlöspumpe in Betrieb setzt, ist sehr zu empfehlen. Alle nachfolgenden Abbildungen ausgeführter Transformatoren zeigen Typen mit Ölrückkühlung, eine Bezeichnung, die sich für außenliegende künstliche Ölkühlung eingebürgert hat. Abb. 26 stellt einen von der ELIN AG. für elektrische Industrie (Wien) gebauten Einphasen-Ofentransformator für eine Leistung von etwa 6000 kVA bei 50 Perioden je Sekunde, aus seinem Ölkasten gehoben, dar. Seine Sekundärstromstärke beträgt 37500 A bei Sekundärspannungen von 163, 143 und 127 V. Es handelt sich um eine Kerntype mit Röhrenspulen, bei welcher die Hochspannungswicklung innen, die Unterspannungswicklung außen angeordnet ist, eine Anordnung, die bei Ofentransformatoren schon wegen der großen Kupferquerschnitte der Sekundärwicklung und Ausführung immer beibehalten werden muß. Deutlich ist die leichte Zugänglichkeit der Wicklung zu sehen. Nach Abheben des Joches können sämtliche Spulen rasch ausgebaut werden,

so daß ein solcher Transformator, falls Reservespulen auf der Anlage vorhanden sind, nach kleineren Defekten rasch wieder betriebsfähig gemacht werden kann.

### E. Beschreibung einiger Ofentransformatoren.

Abb. 27 bringt einen Dreiphasenwechselstrom-Ofentransformator der AG. Brown Boveri & Cie (Baden, Schweiz), dessen Dauerleistung 15300 kVA beträgt. Er wird von einem 20000-V-Netz gespeist und transformiert mit 4 Anzapfungen auf 130—170 V. Die zulässige Sekundärstromstärke liegt je nach der gewählten Anzapfung zwischen 37400 und 50000 A. Es handelt sich um eine Kerntype mit Scheibenspulen. Beachtenswert sind die Wicklungsabstützungen mittels kräftiger Federn, die großen elektrodynamischen Kraftwirkungen nachgeben können, andererseits aber sofort wieder die erforderliche Pressung zwischen den Spulen herstellen. Deutlich ist auch die untermischte Hochführung der Sekundärleitungen zu konstatieren.

Die folgenden Abb. 28 und 29 zeigen in den Werkstätten der Siemens-Schuckertwerke hergestellte Einphasen-Ofentransformatoren für je 11400 kVA Dauerleistung bei 36750 V Primärspannung und 50 Per./s. Entsprechend ihrer kleinen Sekundärspannung, welche zwischen 25 und 55 V reguliert werden kann, ergibt sich auf der Unterspannungsseite eine Stromstärke von dauernd 245000 A, die bei betriebsmäßig vorkom-

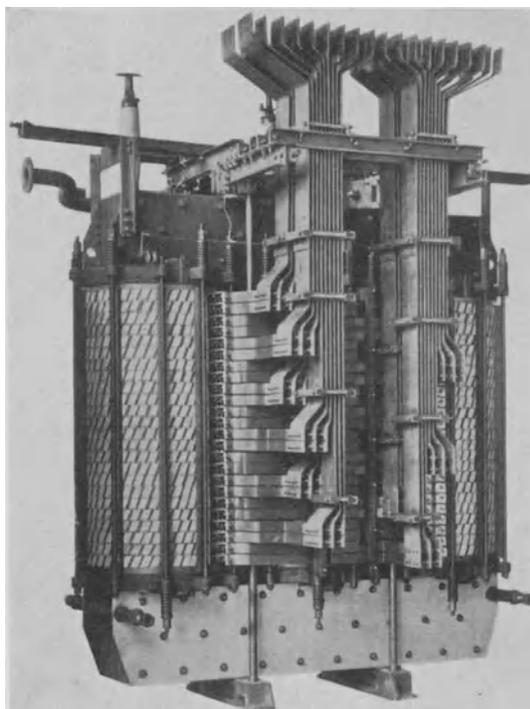


Abb. 27. Drehstrom-Ofentransformator für 15300 kVA Dauerleistung.

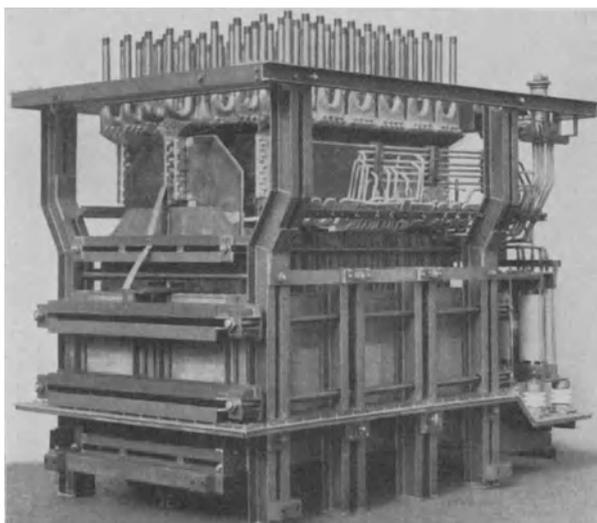


Abb. 28. Einphasentransformator für 11400 kVA Dauerleistung.

menden Überlastungen bis 270000 A gesteigert werden kann. Diese Transformatoren sind für Miguet-Öfen bestimmt und werden zentrisch unterhalb des Ofens aufgestellt. Charakteristisch ist die Anordnung der Sekundärausführungen, die fast den ganzen Transformatordeckel einnehmen. Da von diesen Ausführungen nach allen Richtungen die Sekundärleitungen zum Ofen strahlenförmig auseinandergehen, ist kein Platz für die Hochspannungsisolatoren vorhanden. Man hat daher den primären Anschluß als Kabelendverschluß, seitlich am Kessel angeordnet.

Während man bisher den Transformator auf der Hochspannungsseite bei Übergang von einer Spannungsstufe auf die nächste abschalten mußte, werden in

neuester Zeit auch Transformatoren mit Regelschaltern großer Schaltleistung gebaut. Wie aus dem Schaltbild (Abb. 30) ersichtlich ist, wird die zu- bzw. abschaltbare Regelspannung von einem mit Anzapfungen versehenen Teil der Transformatorenwicklung geliefert. Die Regelung der Spannung wird herbeigeführt, indem die Stromab-

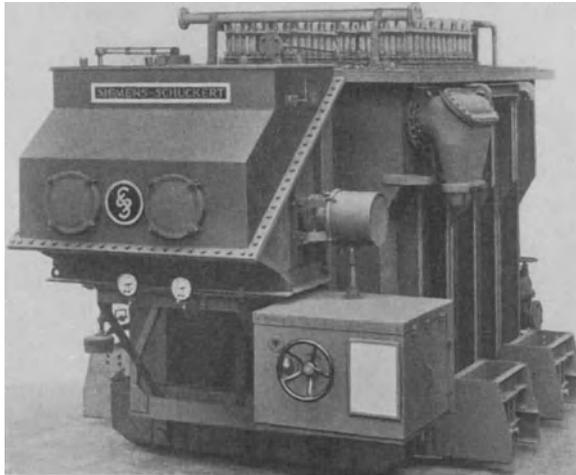


Abb. 29. Einphasentransformator in Ölkasten eingebaut.

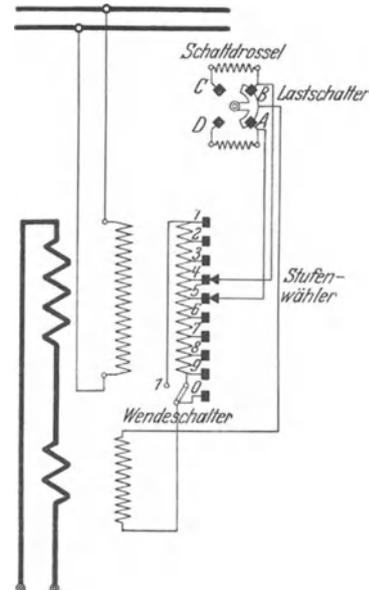


Abb. 30. Transformator mit Regelschalter (Siemens-Schuckert).

nahme wahlweise auf eine der Stufen 1—9 geschaltet wird. Zu diesem Zweck sind zwei Stufenwähler *a* und *b* und ein Lastschalter vorgesehen. Durch die wechselseitige Betätigung der beiden in parallelen Stromkreisen liegenden Stufenwähler wird der Schaltvorgang ohne Unterbrechung des Laststromes durchgeführt. Dabei hat der Lastschalter die Aufgabe, jede Lichtbogenbildung an den Stufenwählern zu verhindern, indem er denjenigen Stufenwähler, welcher um eine Anzapfung weiterbewegt werden soll, jeweils vorher stromlos macht.

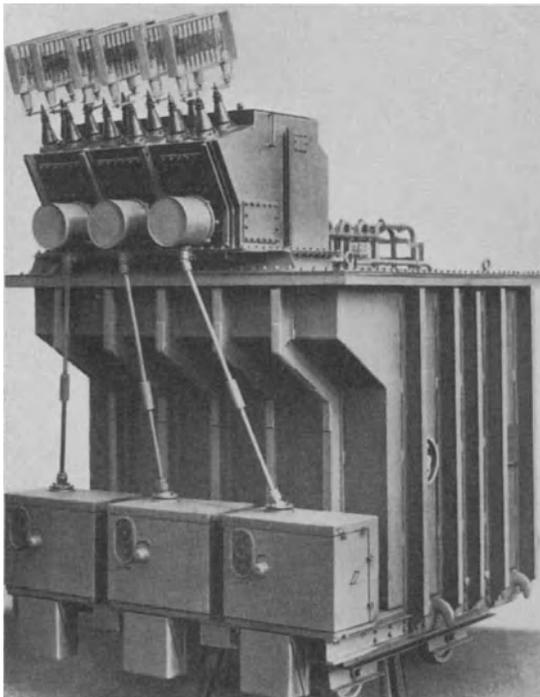


Abb. 31. Drehstromtransformator für 14 300 kVA.

Ein vollständiger Schaltvorgang, bei dem sich die beiden Stufenwähler um eine Stufe weiterbewegen, spielt sich folgendermaßen ab: In der Ausgangsstelle sollen sich beide Stufenwähler auf der Spannungsstufe 4 befinden. Der parallele Stromkreis der Stufenwähler ist über den Lastschalter, dessen Kontaktmesser auf den Kontakten *A* und *B* steht, geschlossen. Zuerst wird der Lastschalter gedreht. Sobald das Kontaktmesser den Kontakt *A* verlassen hat, wird der Stufenwähler *a* stromlos und

kann in dieser Zwischenstellung um eine Stufe auf Kontakt 5 weiterbewegt werden. Der Lastschalter wird weiter gedreht und schaltet auf der Zwischenstellung *CD* die

beiden Stufenwähler auf ungleiche Spannungsstufen parallel. Jetzt fließt im Parallelstromkreis ein Ausgleichsstrom, der durch die zwischen den Lastschalterkontakten  $AD$  und  $BC$  liegenden Drosselspulen auf die Größe des Normalstromes begrenzt wird. Die Weiterbewegung des Lastschalters macht den Stufenwähler  $b$  stromlos, der nun ebenfalls auf Kontakt 5 verschoben wird. Ist der Lastschalter wieder in der Grundstellung  $AB$  angelangt, so stehen beide Stufenwähler auf der Spannungsstufe 5 und befinden sich in der neuen Betriebsstellung.

Durch Umkehr der Stromrichtung in der Anzapfwicklung vermittelt des Wendeschalters, der zwischen der Zuleitung und den beiden Enden der Anzapfwicklung angeordnet ist, kann die Anzahl der Regelstufen durch Umkehr der Spannungsrichtung verdoppelt werden.

Die Sekundärklemmen bestehen je Phase aus 48 wassergekühlten Kupfer-

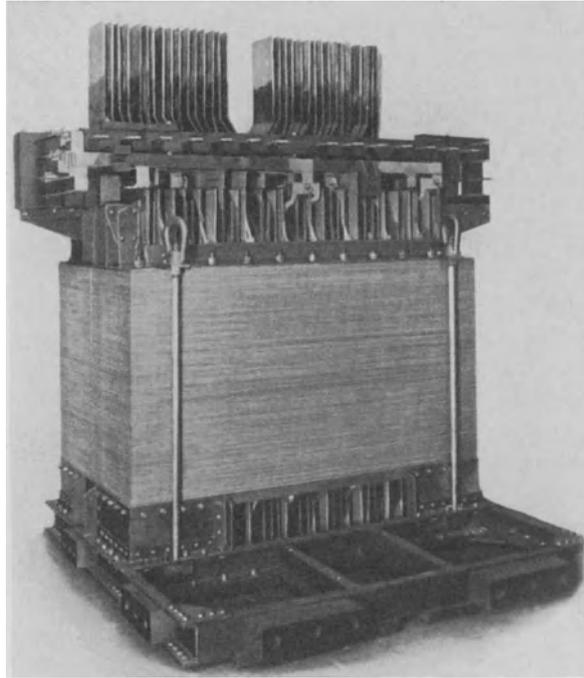


Abb. 32. Einphasentransformator für 4500 kVA eines Miguet-Ofens (Haupttransformator).

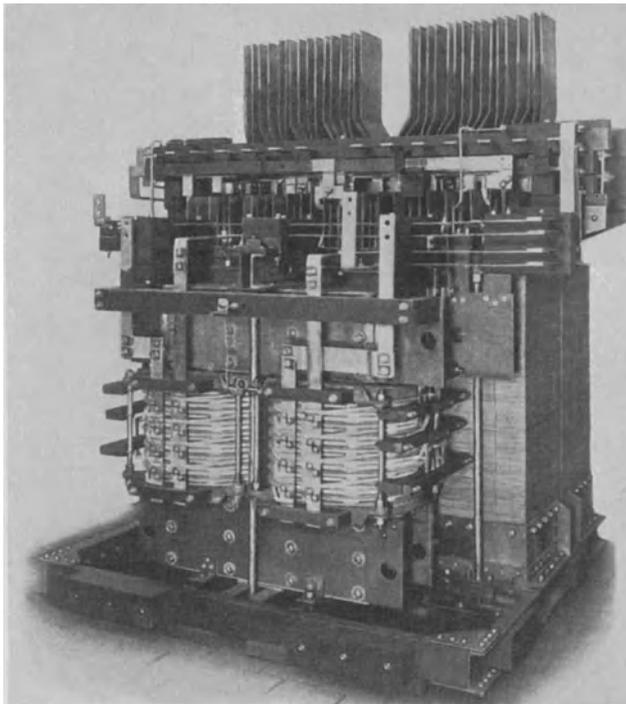


Abb. 33. Einphasentransformator für 4500 kVA eines Miguet-Ofens (Haupt- und Hilfs-Transformator zusammengebaut).

Kupferrohren, und zwar je 8 Stück je Phase. Die Ölrückkühlung erfolgt mittels einer außen liegenden Kühlschlange und Ölumlaufpumpe.

rohren von 50 mm Außendurchmesser, an welche mittels elastischer Kupferbänder die Ofenleitungen anschließen. Auch der in Abb. 31 dargestellte Transformator stammt von Siemens-Schuckertwerke AG. (Berlin) und leistet bei einer Spannung von 165 V auf der Sekundärseite 14300 kVA, bei 105 V sekundär 9150 kVA. Die Primärspannung beträgt 12500 V. Die Sekundärspannung kann in jeder Phase getrennt in 16 Stufen unter Last reguliert werden, unter Umständen auch so, daß in einer Phase die höchste, in einer anderen die niedrigste Sekundärspannung gleichzeitig eingestellt wird. Die Lastschalter haben druckknopfgesteuerten Motorantrieb, können aber auch mit Handrädern bedient werden. Die Sekundärausführungen für 50000 A bestehen auch hier aus wassergekühlten

Die drei Abb. 32, 33 und 34 stellen einen und denselben aus der Werkstätte der Sté. Savoissienne de Constructions Electriques (Aix-les-Bains) hervorgegangenen

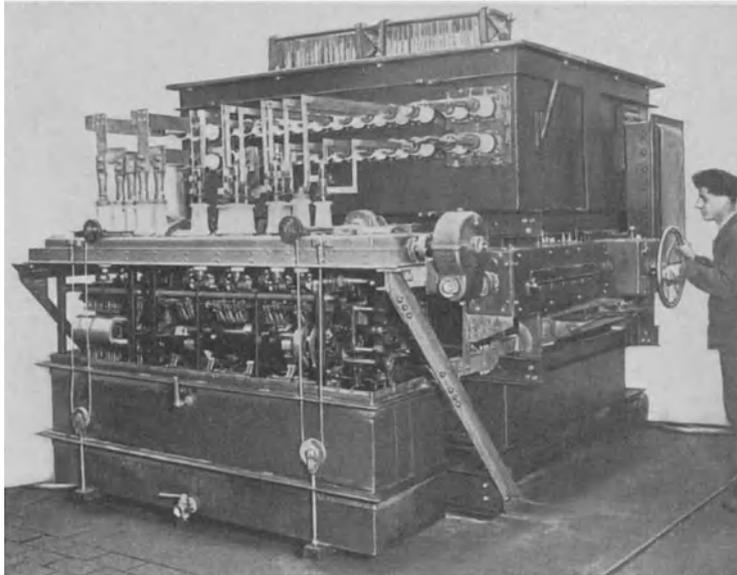


Abb. 34. Einphasentransformator für 4500 kVA eines Miguet-Ofens.

Transformator in verschiedenen Stadien des Zusammenbaues dar. Zwei Einphasentransformatoren der abgebildeten Bauart mit je 4500 kVA 50 Perioden/s, Primärspannung 5250 V, Sekundärspannung 55 bis 25 V in 55 Stufen regulierbar, bilden eine 9000 kVA-Scottgruppe zur Speisung eines Karbidofens. Abb. 32 zeigt den einphasigen Haupttransformator, als Manteltype gebaut. Man kann auf dem Bilde sowohl die Hochspannungsanschlüsse in zwei in bezug auf die Wicklung symmetrischen Gruppen von je 7 Zweigen, als auch die Sekundärausführungen unterscheiden. Um die erforderliche feinstufige Regulierung zu erzielen, wird im selben Ölfäß ein Hilfstransformator angeordnet, dessen Zusammenbau mit dem Haupttransformator Abb. 33 zeigt. Seine Aufgabe ist es, die Anzapfungsintervalle des Haupttransformators zu unterteilen, wodurch es gelingt, auf 55 Spannungsstufen zu kommen. Abb. 34 zeigt schließlich den vollendeten Transformator, mit eingebautem geöffnetem Anzapfschalter und selbsttätiger Regeleinrichtung.

Einen Einphasentransformator der gleichen Erzeugerfirma stellt Abb. 35 dar. Drei gleiche Einheiten gehören zu einer Dreiphasengruppe, sind aber so ausgeführt, daß zwei beliebige Einphaseneinheiten jederzeit zu einer Scottgruppe zusammengestellt werden können. Jeder dieser Transformatoren leistet 6500 kVA bei 50 Perioden/s und übersetzt von 45 000 auf 40—65 V. Die Sekundärstromstärke beträgt 160 000—200 000 A. Diese Transformatoren sind zur Versorgung eines Karbidofens System Miguet-Perron bestimmt. Der Konstrukteur hat sich in diesem Falle für eine Kerntype mit Scheibenwicklung entschlossen, weil offenbar eine Manteltype für die 45 000 V Wicklung nicht genügend Platz geboten hätte. Die Abfuhr der Verlustwärme erfolgt auch hier,

Transformator in verschiedenen Stadien des Zusammenbaues dar. Zwei Einphasentransformatoren der abgebildeten Bauart mit je 4500 kVA 50 Perioden/s, Primärspannung 5250 V, Sekundärspannung 55 bis 25 V in 55 Stufen regulierbar, bilden eine 9000 kVA-Scottgruppe zur Speisung eines Karbidofens. Abb. 32 zeigt den einphasigen Haupttransformator, als Manteltype gebaut. Man kann auf dem Bilde sowohl die Hochspannungsanschlüsse in zwei in bezug auf die Wicklung symmetrischen Gruppen von je

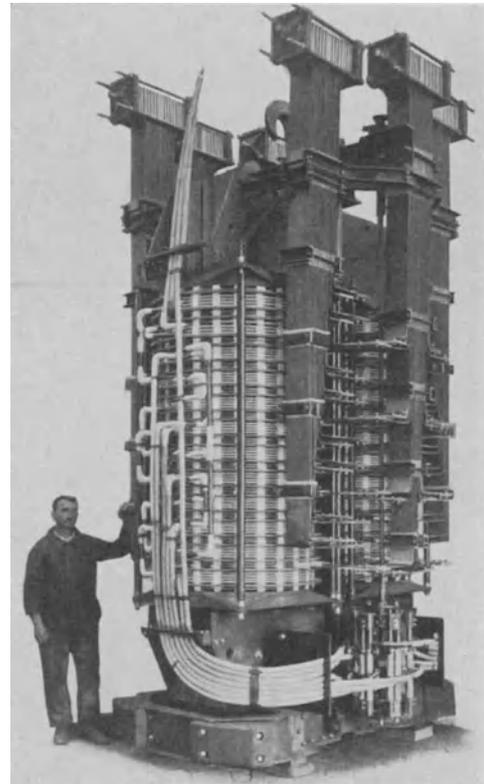


Abb. 35. Einphasentransformator für 6500 kVA eines Miguet-Perron-Ofens (vor dem Einbau in den Ölkasten).

wie es bei der enormen Leistung dieser Transformatoren auch nicht anders denkbar ist, durch Ölrückkühlung.

Wohl den größten bisher gebauten Ofentransformator stellt Abb. 36 dar. Auch er ist in den Werkstätten der „Savoisienne“ gebaut worden. Seine Leistung beträgt 15 000 kVA bei 42 Perioden/s. Zwei Einheiten gehören zu einer 32 000 kVA-Scottgruppe. Er übersetzt eine ankommende Spannung von 10 000 V auf 24—55 V in 55 Stufen. Seine Sekundärstromstärke erreicht den imposanten Wert von 340 000 bis 410 000 A. Die Scottgruppe ist ebenfalls zur Speisung eines Karbidofens System Miguet-Perron bestimmt.

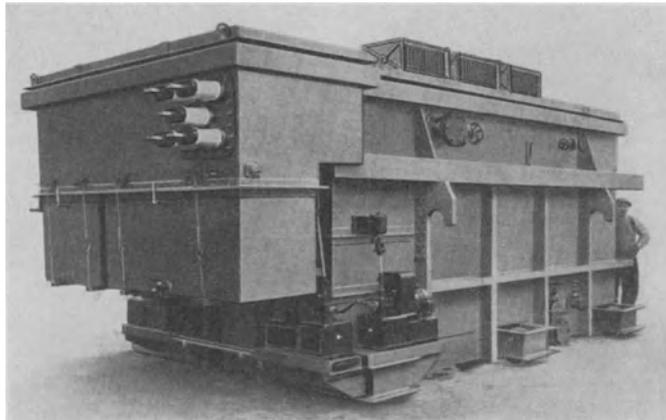


Abb. 36. Einphasentransformator für 1600 kVA eines Miguet-Perron-Ofens.

Betrachtet man diese ins Immense gewachsenen Transformatoreinheiten, dann erscheint es begreiflich, daß rotierende Umformer, obwohl sie den Vorteil der kontinuierlichen Spannungsregulierung hätten, für Lichtbogenöfen nicht am Platze sind. Unvermeidbar sind sie, wie schon erwähnt, für Induktionsöfen mit ihren meist abnormalen Frequenzen.

## F. Wartung.

Gegenüber rotierenden Umformern erfordert, wie schon erwähnt, der Transformator sehr wenig Beaufsichtigung und Wartung. Immerhin ist auch für den ruhenden Umformer ein gewisses Maß von Pflege erforderlich, wenn man überraschend auftretende Defekte vermeiden will. Vor allem die Ölfüllung eines Transformators ist ein Veränderungen unterworfenen Medium. Es neigt zur Aufnahme von Feuchtigkeit, welche den Isolationswert des Öles und in weiterer Folge auch der Isolationsmaterialien der Wicklung rasch herabsetzt und zur Ausbildung von Kriechwegen bzw. zu Überschlügen führt. Transformatoren mit Ölkonservator, deren eigentlicher Ölkessel also stets voll ist und unter einem kleinen Überdruck steht, sind, da nur die kleine Öloberfläche im Ölkonservator mit der Luft in Berührung steht, etwas besser gegen Aufnahme von Feuchtigkeit geschützt. Jährlich wenigstens einmal und unbedingt nach längerem Stillstand ist eine dem unten am Transformator befindlichen Ölablaßbahn entnommene Ölprobe auf Wassergehalt zu prüfen. Da Transformatorenöl bei etwa 5‰ Wassergehalt gesättigt ist, scheidet sich bei größerem Wassergehalt der Überschuß unten am Boden des Kessels ab. Freies Wasser läßt sich also ohne weiteres konstatieren. Öl, welches diesen Sättigungszustand noch nicht erreicht hat, wird in einem Reagenzglas auf etwa 130° C erhitzt. Schäumen des Öles und ein knisterndes Geräusch sind deutliche Zeichen für das Vorhandensein von Wasser. Vor neuerlicher Inbetriebnahme des Transformators muß das Öl und auch der Transformator sorgfältig getrocknet werden. Bei großen Ofentransformatoren sind die Ölkessel in der Regel vakuumdicht ausgeführt. An schon vorgesehene Stutzen wird eine kombinierte Öl- und Vakuumpumpe und in Serie damit ein Ölheizapparat angeschlossen. Unter äußerster Schonung des Öles bei Temperaturen von 90 bis 100° C, die weit unter der Oxydationstemperatur des Öles liegen, wird auf diese Weise das Öl praktisch vollkommen getrocknet. Hat man eine derartige Einrichtung nicht zur Verfügung, dann läßt sich das Trocknen auch durch möglichst tief in das Öl eingehängte elektrische Heizkörper durchführen, wobei der Deckel des Transformators

samt dem daran hängenden aktiven Teil etwas aufgehoben werden muß, um einen freien Austritt der Wasserdämpfe zu gewährleisten. Die Temperatur muß auf etwa  $110^{\circ}\text{C}$  gehalten werden, eine Temperatur, welche in Anbetracht des Luftzutrittes eine nicht unbeträchtliche Oxydation des Öles zur Folge hat. Man wird daher diesen Weg der Trocknung nach Möglichkeit vermeiden. Das getrennte Trocknen des aktiven Teiles des Transformators und des Öles ist nur dann zulässig, wenn die Wicklung noch nicht im Öl war, also vor der ersten Inbetriebnahme. Wollte man eine schon ölgetränkte Wicklung diesem Verfahren unterziehen, dann besteht die Gefahr der Zersetzung der Isolation und der Selbstentzündung. Man trocknet entweder mit Heißluft oder durch An-Spannunglegen des Transformators auf der Primärseite, bei gleichzeitigem Kurzschließen der Sekundärklemmen. Die primär aufgedrückte Spannung wird so nieder gehalten, daß der Sekundärstrom weit unterhalb der Normalstärke bleibt. Es ist dafür Sorge zu tragen, daß die Wicklungstemperatur nicht über  $100^{\circ}\text{C}$  steigt. Ein vorzügliches Verfahren, um Öl allein zu trocknen, ist die Verwendung einer Filterpresse. Das auf etwa  $35^{\circ}\text{C}$  erwärmte Öl wird mehrmals durch eine mehrfache Lage von Filtrierpapier gepreßt, welche alle Feuchtigkeit aufnimmt. Aber auch mechanische Verunreinigungen bleiben auf dem Filter zurück. Die in Intervallen von 2—3 Jahren vorzunehmenden Reinigungen des Öles und des sich bildenden Ölschlammes wird man auf diese Weise durchführen.

Gelegentlich jeder derartigen Ölreinigung und Trocknung wird man Nachschau halten, ob die Wicklungsabstützungen nicht locker geworden sind und wird erforderlichenfalls die entsprechenden Vorkehrungen treffen. Bei Revisionen, bei welchen der Kern aus dem Ölkessel gehoben werden muß, wird man die Temperatur vor dem Herausziehen möglichst weit absinken lassen, um Öloxydation zu vermeiden. Alle Arbeiten am aktiven Teile müssen so vorbereitet werden, daß sie nach erfolgtem Ausheben rasch durchgeführt werden können, um die Feuchtigkeitsaufnahme auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Kerne, die je nach Witterungsverhältnissen 12—36 Stunden außerhalb des Öles waren, müssen sonst nachgetrocknet werden.

Zur ständigen Wartung gehört noch das in kurzen Zeiträumen vorzunehmende Reinigen der Isolatoren, um der Ausbildung von Kriechwegen vorzubeugen und das Ersetzen etwaiger Ölverluste, wobei stets trockenes schlammfreies Transformatoröl bester Qualität zu verwenden ist.

Für die Anordnung des Ofentransformators gilt stets der Grundsatz, ihn möglichst nahe an den Ofen heranzubringen, um die Zuleitungen zum Ofen so kurz wie möglich halten zu können, ihn andererseits aber gegen direkte Einwirkungen der vom Ofen ausstrahlenden Wärme und gegen Staub zu schützen. Zwischen Ofen und Transformator wird daher auf jeden Fall eine Wand oder Decke anzuordnen sein.

Die Hochspannungsschalteneinrichtungen, wie z. B. die Trennschalter, den Ölschalter, die Strom- und Spannungswandler, wird man zweckmäßig im Transformatorraum unterbringen. Die Meßinstrumente und Betätigungsorgane sind auf einer Schalttafel oder einem Schaltpult zu vereinigen und in der Nähe des Ofens, aber immerhin geschützt gegen direkte schädliche Einwirkungen anzuordnen. Das größte Augenmerk ist bei Entwurf einer neuen Ofenanlage den Verbindungsleitungen zwischen Ofentransformator und Ofen zuzuwenden.

### **III. Richtlinien für den Entwurf der Stromleitungen.**

#### **A. Gleichstrom, Wechselstrom, Drehstrom.**

Es lohnt heute kaum mehr, sich mit den bei der Projektierung von Gleichstromleitungen auftretenden Fragen zu befassen. Wie schon im Kapitel über Transformatoren erwähnt, wird man heute wohl nicht mehr neue Öfen für Anschluß an Gleichstromnetze errichten. Man müßte die elektrische Energie in unmittelbarer Nähe des Ofens erzeugen oder umformen. Abgesehen davon, daß der Bau der Umformer oder Generatoren für

die großen Stromstärken moderner Ofenbetriebe auf Schwierigkeiten stoßen würde, werden die Zuleitungen zum Ofen enorm teuer. Wollte man z. B. einen Ofen mit nur etwa 30000 A Gleichstrom speisen, dann müßte — da 1 mm<sup>2</sup> Leitungsquerschnitt aus Kupfer mit Rücksicht auf die Abfuhr der Verlustwärme nur mit etwa 2 A belastet werden kann — für die Hin- und Rückleitung ein Querschnitt von 30000 mm<sup>2</sup> gewählt werden. Je laufendem Meter Leitungslänge entspricht dies einem Kupferquantum von etwa 270 kg. Eine Leitung von 50 m Länge, welche wohl als das äußerste Mindestmaß einer geschickt disponierten Verbindungsleitung zwischen Ofenraum und Maschine in der benachbarten Zentrale angesehen werden kann, würde demnach das sicherlich respektable Kupferquantum von 13500 kg benötigen.

Demgegenüber stehen die überragenden Vorteile des Wechselstromes, vor allem des Drehstromes. Mit fast beliebig hohen Spannungen können große Energiemengen auf weite Strecken mit kleinen Verlusten transportiert werden. Ein ruhender Umformer in unmittelbarer Nähe des Verbrauchers erteilt der Energie die für den betreffenden Betrieb erforderlichen Eigenschaften. So kurz die Distanzen zwischen Transformator und Ofen in der Regel gehalten werden können, gibt dieser Teil einer Ofenanlage doch manches Problem zu lösen. Eine schon beschriebene, dem Wechselstrom charakteristische Eigenschaft, die Induktion, bringt die Erschwernisse mit sich. Untersucht man systematisch eine einschließlich Leitungen fertiggestellte Ofenanlage unter Zuhilfenahme von Volt-, Ampere- und Wattmeter, dann wird man folgende Erfahrungen machen. Bei Messungen in nächster Nähe des Verbrauchswiderstandes wird sich das Produkt der am Volt- und Amperemeter abgelesenen Werte mit der Anzeige des Wattmeters decken. Die Scheinleistung wird also gleiche Größe wie die am Wattmeter konstatierte Wirkleistung haben. An dieser Stelle ist der Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$ . Je weiter man sich vom Ofen entfernt, je näher man also an die Transformator клемmen herankommt, um so größer wird die Scheinleistung im Verhältnis zur Wirkleistung, um so kleiner wird der Leistungsfaktor. Dies läßt auf das Vorhandensein von Reaktanzen im Zuge der Leitung schließen.

## B. Selbstinduktion, gegenseitige Induktion, Skinneffekt.

Jeder von einem Wechselstrom durchflossene Leiter erfährt zunächst eine Beeinflussung von dem durch den Wechselstrom hervorgerufenen pulsierenden Feld. Es wurde schon in einem früheren Abschnitt nachgewiesen, daß die induzierte Selbstinduktionsspannung dem Strom um 90° nacheilt, und eine gleich große Komponente der Klemmenspannung, die vektoriell dem Strom um 90° voraneilt, zu ihrer Kompensation aufgewendet werden muß. Die Größe dieses Spannungsabfalles ist durch  $e_s = i \omega L$  gegeben. Die Selbstinduktion wirkt sich also wie ein Widerstand aus, jedoch muß darauf geachtet werden, daß Ohmscher und induktiver Widerstand nicht arithmetisch, sondern vektoriell addiert werden müssen.

Es ist ohne weiteres einzusehen, daß zwei nahe aneinander parallel geführte Leiter, die von einem Wechselstrom gleicher Richtung durchflossen werden, nicht nur auf sich selbst, sondern auch wechselseitige Rückwirkungen ausüben. Man nennt diese zweite Erscheinung gegenseitige Induktion. Denkt man sich diese beiden Leiter zu einem vereint, dann wird es klar, daß sich die Wirkung der gegenseitigen Induktion mit jener der Selbstinduktion deckt. Sie bewirkt ebenfalls eine Erhöhung des Scheinwiderstandes, also eine Verschlechterung des Leistungsfaktors. Die Wirkung der gegenseitigen Induktion, sowie überhaupt alle Induktionswirkungen, sind direkt proportional der Stromstärke und der Periodenzahl und verkehrt proportional dem Logarithmus des Leiterabstandes. Die Induktionswirkungen sind also um so intensiver, je enger die induzierenden Leitungen beieinander liegen. Damit erklärt sich eine dritte Erscheinung, die unter dem Namen „Hautwirkung“ oder „Skinneffekt“ bekannt ist. Zu ihrem Verständnis denke man sich einen Leiter großen Querschnittes in viele kleine eng aneinander gefügte Leiter

kleinen Querschnittes zerlegt. Die weit vom Mittelpunkt des Leiters abliegenden Stromfäden werden wesentlich kleineren induktiven Wirkungen ausgesetzt sein wie die nahe zur Mitte angeordneten. Der Mittelteil weist einen größeren Scheinwiderstand als die Außenteile auf. Tatsächlich kann eine gesteigerte Stromdichte an den Rändern des Leitungsquerschnittes konstatiert werden.

### C. Behebung der unerwünschten Beeinflussungen.

Die Erkenntnis, daß die Größe der gegenseitigen Induktion von der Distanz der parallelen Leiter abhängig ist, gibt ein Mittel an die Hand, um die Erscheinung zu bekämpfen: Anwendung von Hohlquerschnitten und möglichst weitgehende Unterteilung des Gesamtquerschnittes.

Die Umkehrung dieser Verhältnisse ergibt sich bei 2 Leitern, z. B. einer Hin- und Rückleitungsschiene des Ofens, die von Strömen entgegengesetzter Richtung durchflossen werden. Die gegenseitige Induktion bewirkt eine Unterstützung der Klemmenspannung, dadurch eine Verringerung des Scheinwiderstandes und eine Verbesserung des Leistungsfaktors. Allerdings tritt auch hier die unangenehme Nebenwirkung der Stromverdrängung auf. Die einander zugekehrten Teile der Leiterquerschnitte werden die höhere Stromdichte aufweisen. Die Stromverteilung über den Leiterquerschnitten wird unregelmäßig. Als Folge dieser Stromverteilungsänderung stellt sich ein höherer Ohmscher Widerstand und damit ein gesteigerter Leistungsverlust ein. Es steht für den Stromdurchgang gleichsam nur mehr ein Teil des Querschnittes zur Verfügung. Wollte man z. B. bei Umbau eines Ofens von Gleichstrom auf Wechselstrom die vorhandene Zuleitung zum Ofen beibehalten, dann würde man damit schlechte Erfahrungen machen. Trotz gleicher Spannung würde bei Wechselstrom nur ein Bruchteil der früher bei Gleichstrom transportierten Leistung den Ofen erreichen.

Aus diesen Überlegungen läßt sich schon eine Reihe von Schlußfolgerungen für den zweckmäßigen Entwurf einer Ofenzuleitungsanlage ziehen. Die Auswirkungen der Selbstinduktion und der gegenseitigen Induktion solcher Leiter, die von Strömen gleicher Richtung durchflossen sind, wären zu bekämpfen. Mittel hierzu sind die Unterteilung großer Leiterquerschnitte, bei entsprechender Distanzierung. Die günstigen Folgen der gegenseitigen Induktion von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossener Leiter sind auszunutzen. Dies gelingt durch die sog. Verschachtelung oder Vermischung der Leitungen. Hin- und Rückleiter sind abwechselnd nebeneinander anzuordnen. Man wird auf diese Weise einen günstigeren Leistungsfaktor und eine vernachlässigbar kleine Hautwirkung erzielen können.

### D. Bedeutung des Leistungsfaktors.

Wie wichtig der gute Leistungsfaktor einer Ofenanlage ist, zeigen deutlich die folgenden Überlegungen. Bei einer in allen Teilen festliegenden Ofenanlage werde durch Heben und Senken der Elektroden der Ohmsche Widerstand im Ofen und damit die Stromstärke variiert. Es interessiert nun, wie sich dabei die Leistungsaufnahme des Ofens ändert. Jener Teil  $L_0$  der Gesamtleistung  $L$ , der im Ofen zur Umsetzung gelangt, ist durch die Gleichung  $L_0 = i^2 r_0$  bestimmt, worin  $r_0$  den Ohmschen Widerstand des Ofens bedeutet. Die Stromstärke  $i$  ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz für Wechselstrom zu:

$$i = \frac{e}{\sqrt{(r_0 + r_{cu})^2 + (\omega L)^2}}$$

$r_{cu}$  ist der Ohmsche Widerstand der Leitung,  $\omega L$  ihre Reaktanz. Unter Heranziehung dieses Gesetzes läßt sich die Gleichung für die Leistung auch wie folgt ansetzen:

$$L_0 = \frac{e^2 r_0}{(r_0 + r_{cu})^2 + (\omega L)^2}.$$

Von Interesse ist, wie sich  $r_0$ ,  $r_{Cu}$  und  $\omega L$  zueinander verhalten müssen, um ein Maximum für die Ofenleistung zu erhalten. Es wird daher der erste Differentialquotient  $\frac{dL_0}{dr_0}$  ermittelt.

$$\frac{dL_0}{dr_0} = e^2 \left[ \frac{1}{r_{Cu}^2 + 2 r_{Cu} r_0 + r_0^2 + \omega^2 L^2} - \frac{2 r_{Cu} r_0 + 2 r_0^2}{(r_{Cu}^2 + 2 r_{Cu} r_0 + r_0^2 + \omega^2 L^2)^2} \right]$$

für  $L_0$  max. wird

$$\frac{1}{r_{Cu}^2 + 2 r_{Cu} r_0 + r_0^2 + \omega^2 L^2} = \frac{2 r_{Cu} r_0 + 2 r_0^2}{(r_{Cu}^2 + 2 r_{Cu} r_0 + r_0^2 + \omega^2 L^2)^2}.$$

Daraus ergibt sich

$$r_0 = \sqrt{r_{Cu}^2 + (\omega L)^2}.$$

Die rechte Seite der Gleichung stellt nichts anderes dar, als den scheinbaren Widerstand der gesamten Zuleitung zum Ofen. Das Leistungsmaximum für den Ofen würde man also dann erhalten, wenn man den Ohmschen Widerstand im Ofen ebenso groß wählt wie den Scheinwiderstand der Zuleitung. Eine Steigerung der Stromstärke durch Verringerung des Widerstandes im Ofen brächte keine Leistungserhöhung des Ofens mit sich, obwohl die dem Netz entnommene Leistung noch weiter steigen würde. Das Maximum dieser Leistung  $L$  wäre dann erreicht, wenn  $r_0 + r_L$  der Größe nach  $\omega L$  gleich wird. Steigert man die Stromstärke durch weitere Verminderung des Ofenwiderstandes  $r_0$  noch weiter, dann beginnt auch die Gesamtleistung  $L$  zu sinken.

An Hand eines Zahlenbeispielles lassen sich diese Verhältnisse noch genauer verfolgen. Eine Einphasenofenanlage wird mit einer Spannung  $e = 100$  V betrieben. Der Ohmsche Widerstand der Leitung sei  $r_{Cu} = 0,01$  Ohm, ihre Reaktanz  $\omega L = 0,0173$ . In Abb. 37 ist die Ofenleistung  $L_0$  und die Gesamtleistung  $L$  als Funktion des Leistungsfaktors aufgetragen. Ein besonders charakteristischer Punkt ist mit  $I$  bzw.  $I'$  bezeichnet. Obwohl die Gesamtleistung abnehmende Tendenz zeigt, ergibt sich für den Ofen das Leistungsmaximum. Der zugehörige Wert des Leistungsfaktors ist  $\cos \varphi = 0,865$ . Dieser Punkt entspricht der Beziehung  $r_0 = \sqrt{r_{Cu}^2 + (\omega L)^2}$ . Versucht man bei höherem Leistungsfaktor zu arbeiten, dann sinkt sowohl  $L_0$  als auch  $L$ , die Ofenleistung jedoch weitaus langsamer, so daß es sich bei dem gewählten Beispiel empfehlen würde, einen Leistungsfaktor von etwas über 0,9 anzustreben. Gänzlich unzumutbar wäre es, den Ofen mit einem unter  $\cos \varphi = 0,865$  liegenden Leistungsfaktor zu betreiben, da wohl die Gesamtleistung bis zu Punkt  $II'$ , der einem  $\cos \varphi = 0,708$  entspricht, weiter ansteigt, die Ofenleistung aber schon beträchtlich absinkt. Bei Punkt  $III'$ , entsprechend  $\cos \varphi = 0,5$ , wird alle Energie im Ohmschen Widerstand der Leitung vernichtet, der Ofen geht leer aus. Dieser Punkt entspricht physikalisch einem satten Kurzschluß der Elektroden, so daß der Ofenwiderstand  $r_0$  mit Null eingesetzt werden kann.

Als einziger Vorteil einer großen Reaktanz der Leitung läßt sich die Dämpfung der Auswirkung der jedem Ofenbetrieb eigenen Stromstöße auf das Netz anführen. Der induktive Spannungsabfall gestattet kein allzu hohes Ansteigen der Stromstärke im Falle von Kurzschlüssen im Ofen. Speziell bei Stahlföfen findet man gelegentlich auf der Primärseite der Transformatoren Drosselpulen, also Reaktanzen, vorgeschaltet, deren Aufgabe es ist, die Gesamtreaktanz der Anlage zu erhöhen. Man ist zu diesem Auswege dann gezwungen, wenn die Leistung der den Ofen speisenden Zentrale gegenüber der Ofenleistung relativ klein ist, oder wenn Spannungsschwankungen von einer Überlandleitung, an der außer dem Ofen auch noch andere Verbraucher hängen, möglichst

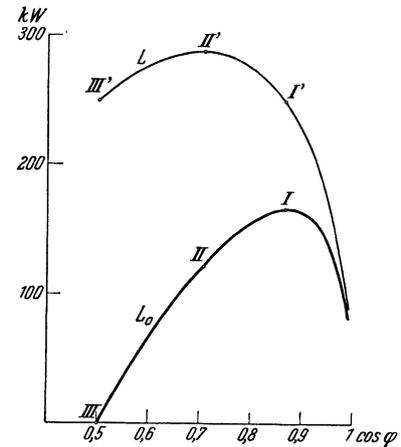


Abb. 37. Leistungsaufnahme als Funktion des Leistungsfaktors.

ferngehalten werden sollen. In einem solchen Falle wird man stets einen Überbrückungs-ölschalter für die Drosselspule vorsehen, um wenigstens während des Feinens mit einem besseren Leistungsfaktor arbeiten zu können. Im allgemeinen wird man aber trachten, einen möglichst hohen Leistungsfaktor zu erzielen.

### E. Widerstände in verschiedenen Abschnitten der Leitung.

Mit Rücksicht auf die Bewegungen, die die Elektroden eines Ofens auszuführen haben, ist es nicht möglich, die Verbindungsleitung zwischen Transformator und Ofen als homogene Einheit zu verlegen. Es ist daher interessant, den Strom auf seinem Wege vom Transformator zum Ofen zu verfolgen und den Einfluß der einzelnen Leitungsteile hinsichtlich ihres Beitrages zum Ohmschen und induktiven Gesamtwiderstand einer Ofenanlage zu untersuchen. Aus dem Transformator werden die unterteilten Enden der

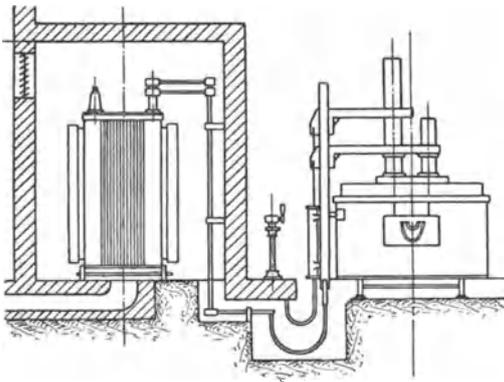


Abb. 38. Führung der Stromzuleitung bei kleinen Öfen.

Sekundärwicklung vermischt ausgeführt, so daß sich die Induktionswirkungen in weitgehendem Maße aufheben. An die Sekundärklemmen wird in der Regel eine starr verlegte Leitung angeschlossen, die durch die Trennwand zwischen Transformatorraum und Ofenhalle geführt wird. Auch diesen Leitungsteil wird man unbedingt verschachtelt verlegen, so daß seine Reaktanz gering bleibt. Zwischen den bewegten Konstruktionsteilen, welche die Elektrodenfassung tragen, und dem Ende der starr verlegten Leitung muß nun aber ein flexibles Element eingeschaltet werden, welches Bewegungen der Elektrode gestattet. Man verwendet hierzu feinflitzige Kupferseile von etwa  $300 \text{ mm}^2$

Querschnitt, deren Enden in Kabelschuhe hart eingelötet oder eingeschweißt werden. Eine untermischte Führung dieser Seile ist naturgemäß nicht möglich, da jedes Seilbündel einer Elektrode den Strom zuzuführen hat. Hier ist also die Quelle der hauptsächlichsten Induktionswirkungen zu suchen, weil die die Selbstinduktion kompensierende Wirkung der gegenseitigen Induktion durch die benachbarte Phase ausbleibt. Der im allgemeinen für die Verbindungsleitung zwischen Transformator und Ofen geltende Grundsatz möglicher Kürze wird daher für die flexible Leitungsstrecke ganz besonders zu beachten sein. Anschließend daran folgt ein zwar mit der Elektrodentragekonstruktion bewegter, relativ zu ihr aber fest verlegter Leitungsteil, der je nach der Durchbildung dieses Details sehr verschieden ausgeführt sein kann. Auf jeden Fall kann auch dieser meist sehr kurze Leitungsteil nicht mehr untermischt verlegt werden. Wie sehr auf die knappste Bemessung dieser Partie bei großen Stromstärken Rücksicht genommen werden muß, beweisen die beiden Abb. 38, 39, die in schematischer Darstellung zwei Anordnungen der Leitungsführung bei Stahlföfen zeigen. Bei kleineren Öfen mit relativ niedrigen Stromstärken kann man es sich gestatten, zugunsten einer Leitungsführung unter Hüttenflur einen Umweg in Kauf zu nehmen. Ein verhältnismäßig langer, unverschachtelter Leitungsteil ist in dem bewegten, die Elektrodenausleger tragenden vertikalen Konstruktionsteil verlegt. Im Gegensatz hierzu ist in Abb. 39 der kürzeste Weg gewählt. Die flexiblen Seile führen direkt zu den Elektrodenauslegern. Es sei hier erwähnt, daß der Konstrukteur bei Anordnung von Hochstromleitungen in Eisenkonstruktionsteilen mit äußerster Vorsicht zu Werke gehen muß. Das den Leiter umgebende pulsierende Feld hat die Tendenz, sich in den magnetisch permeablen Eisenkonstruktionsteilen zu konzentrieren. Wenn man bedenkt, daß die magnetische Permeabilität von Schmiedeeisen etwa 2500—3500fach größer ist als jene der Luft und sich dementsprechend auch der Selbstinduktionskoeffizient vervielfacht, wird man unbedingt darauf sehen müssen,

daß kein geschlossener Eisenkreis zustande kommt. Man ersetzt zu diesem Zwecke einzelne Teile durch Laschen aus magnetisch schlecht leitfähigem Material, z. B. Kupfer. Eine Außerachtlassung dieser Vorsichtsmaßregel hätte zur Folge, daß die betroffenen Eisenteile durch Ummagnetisierung und Wirbelstrombildung unzulässig hohe Temperaturen annehmen würden und sogar glühend werden könnten. Es ist aber auch dafür Sorge zu tragen, daß rund um den Leiter keine in sich geschlossenen metallischen, also elektrisch gut leitfähigen Konstruktionsteile angeordnet werden, da sie wie die Sekundärwicklung eines Transformators wirken und ebenfalls die Reaktanz der Leitungen erhöhen.

Als letztes Leitungsstück wäre noch die Elektrode selbst anzuführen, deren Anteil an der Verschlechterung des Leistungsfaktors ebenfalls beträchtlich ist. Auch der ohmsche Gesamt Widerstand ist nicht außer acht zu lassen. Wie aus den in Abb. 37 dargestellten Kurven für Ofenleistung und Gesamtleistung hervorgeht, ist der ohmsche Leitungswiderstand sehr ausschlaggebend für den Wirkungsgrad der Ofenanlage. Man hat es in der Hand, ihn durch richtige Dimensionierung der Leitungsquerschnitte und Rücksichtnahme auf Stromverdrängungserscheinungen in zulässigen Grenzen zu halten. Auch der Elektrodenquerschnitt darf nicht zu knapp gewählt werden. Man läßt gewöhnlich für amorphen Kohlenstoff 5 bis 10 A/cm<sup>2</sup>, für Graphit 15—25 A/cm<sup>2</sup> zu. Auf einwandfreie Ausbildung aller Kontaktstellen zwischen den einzelnen Leitungsteilen muß besonders geachtet werden, um so mehr, als mit häufigen Temperaturschwankungen zu rechnen ist, die Wärmebewegungen und somit die Gefahr der Kontaktverschlechterung zur Folge haben. Bei den die Kontaktstellen durchfließenden enormen Stromstärken genügt der kleinste Übergangswiderstand, um an eng begrenzter Stelle eine große Wärmemenge zu erzeugen. Es tritt rasch eine weitere Kontaktverschlechterung und nach kurzer Zeit ein Aufglühen und Abschmelzen derartiger Kontakte ein. Schließlich wäre noch die Elektrodenfassung zu erwähnen, bei welcher auf einen geringen Übergangswiderstand zur Elektrode zu achten ist.

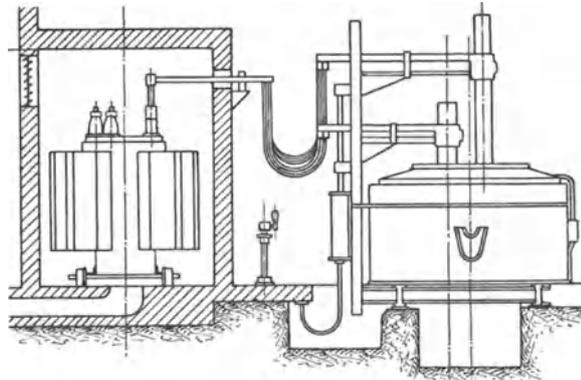


Abb. 39. Führung der Stromzuleitung bei großen Öfen.

Als letztes Leitungsstück wäre noch die Elektrode selbst anzuführen, deren Anteil an der Verschlechterung des Leistungsfaktors ebenfalls beträchtlich ist. Auch der ohmsche Gesamt Widerstand ist nicht außer acht zu lassen. Wie aus den in Abb. 37 dargestellten Kurven für Ofenleistung und Gesamtleistung hervorgeht, ist der ohmsche Leitungswiderstand sehr ausschlaggebend für den Wirkungsgrad der Ofenanlage. Man hat es in der Hand, ihn durch richtige Dimensionierung der Leitungsquerschnitte und Rücksichtnahme auf Stromverdrängungserscheinungen in zulässigen Grenzen zu halten. Auch der Elektrodenquerschnitt darf nicht zu knapp gewählt werden. Man läßt gewöhnlich für amorphen Kohlenstoff 5 bis 10 A/cm<sup>2</sup>, für Graphit 15—25 A/cm<sup>2</sup> zu. Auf einwandfreie Ausbildung aller Kontaktstellen zwischen den einzelnen Leitungsteilen muß besonders geachtet werden, um so mehr, als mit häufigen Temperaturschwankungen zu rechnen ist, die Wärmebewegungen und somit die Gefahr der Kontaktverschlechterung zur Folge haben. Bei den die Kontaktstellen durchfließenden enormen Stromstärken genügt der kleinste Übergangswiderstand, um an eng begrenzter Stelle eine große Wärmemenge zu erzeugen. Es tritt rasch eine weitere Kontaktverschlechterung und nach kurzer Zeit ein Aufglühen und Abschmelzen derartiger Kontakte ein. Schließlich wäre noch die Elektrodenfassung zu erwähnen, bei welcher auf einen geringen Übergangswiderstand zur Elektrode zu achten ist.

## IV. Die technische Anwendung der theoretischen Erwägungen.

### A. Leitungen.

Einige praktische Winke und Beschreibungen gebräuchlicher Leitungsanordnungen werden die bisher durchgeführten grundsätzlichen Betrachtungen ergänzen. Eine gelegentlich für Karbidofenbauarten, welche nur auf einer Längsseite abgestochen werden, aber auch für Stahlföfen mit Erfolg durchgebildete Leitungsführung ist dadurch gekennzeichnet, daß als Leiter Kupferrohre von 100 mm und mehr Durchmesser verwendet werden, die von Kühlwasser durchflossen sind. Die Rohre werden vom Elektrodenquerhaupt, dem die Elektrode tragenden Konstruktionsteil, horizontal über den Ofen hinaus geführt, dort nach unten abgeknickt und so tief hinunter gezogen, daß der unterste Punkt noch bei der höchsten Elektrodenstellung unterhalb der Ofenbühne liegt. An diesen untersten Punkten der wassergekühlten Rohre werden die flexiblen Verbindungsleitungen angeklemt und direkt zum Transformator geführt, der also unterhalb des Bedienungs Podiums auf jener Seite des Ofens steht, welche nicht abgestochen wird. Die flexiblen Leitungen sind so kurz, daß sie nur die durch den Elektrodenabbrand bedingte Vertikalbewegung der Elektroden ermöglichen. Das Ausmaß der erforderlichen Vertikal-

bewegung hängt von der Ausbildung der Elektrodenfassungen ab. Elektroden mit Kopffassung werden naturgemäß weitaus längere flexible Leitungen benötigen, als solche mit Rutschfassung, bei welcher von Zeit zu Zeit der Abbrand durch Nachrutschenlassen der Elektroden kompensiert werden kann. Die geschilderte Leitungsführung hat den Nachteil, daß bei Elektrodenwechsel die flexiblen Kabel abgeklemmt werden müssen. Diese Arbeit bietet aber keine besonderen Schwierigkeiten, wenn eine gut konstruierte Aufhängevorrichtung zur Verfügung steht, um so mehr da der Manipulationsraum ganz außerhalb des Bereiches der strahlenden Ofenhitze liegt. Starre, ruhende Sekundärleitungen entfallen bei dieser Anordnung überhaupt. Der im Hinblick auf die Stromverdrängung an sich günstige Rohrquerschnitt des wassergekühlten Leiters gestattet spezifische Stromstärken von 4—5 A/mm<sup>2</sup>.

Bei größeren Stromstärken, etwa von 15 000—20 000 A angefangen, ist diese Art der Leitungsverlegung unbefriedigend. Der schon konstatierte Nachteil des Lösens der flexiblen Leitungen bei Elektrodenwechsel wirkt sich mit steigender Stromstärke immer mehr aus und ergibt schließlich unerwünscht große Betriebspausen. Vor allem aber wird bei Karbidöfen mit Stromstärken über 20 000 A das Bedürfnis nach beiderseitigem Abstich unabweislich und damit die Aufstellung des Transformators unter dem Podium neben dem Ofen vollständig unmöglich.

Eine Ausführung, die man sehr häufig in Karbidfabriken findet, sieht die Stromzufuhr zum Ofen von oben her vor. Der Transformator wird über der Bedienungsfläche des Ofens im Nachbarraum aufgestellt. Die flexiblen Kabel stellen dabei die Verbindung zwischen dem starren Leitungsteil und dem Elektrodenquerhaupt her. Es wäre äußerst unzweckmäßig, bei Elektrodenwechsel jeweils das ganze Querhaupt samt Elektroden auszuwechseln. Man müßte hierzu ebensoviele Querhäupter in Reserve halten, als sich Elektroden in der Elektrodenmontage jeweils in Arbeit befinden. Ausgewechselt wird daher nur der untere Teil der Elektrode, die flexiblen Anschlüsse bleiben ständig mit dem Querhaupt in Verbindung. Im Sinne der Herabsetzung des induktiven Spannungsabfalles liegt es auch, die flexiblen Ofenanschlüsse zu teilen und jedem Elektrodenquerhaupt den Strom von beiden einander entgegengesetzten Seiten zuzuführen. Es gelingt auf diese Weise, die Reaktanz der Zuleitungen um nahezu 50% zu verkleinern. Daß man, um diese Leitungsführung zu ermöglichen, den starren Leitungsteil von der Transformatorseite auch auf die andere Seite des Ofens führen muß, beeinträchtigt kaum nennenswert die erzielte Verbesserung. Man hat es in der Hand, die starre Leitung beliebig unterteilt und phasenvermischt zu bauen.

Für den starren Teil der Sekundärleitungen zwischen Transformator клемmen und flexiblen Seilen findet man die mannigfaltigsten Konstruktionen. Vielfach verwendete man Kupferseile relativ kleinen Querschnittes, die eine gute Unterteilung, eine systematische Vermischung und vor allem eine ausgezeichnete Anpassung an die gegebene Trasse ermöglichen. Sehr wesentlich ist auch der Vorteil, daß man genügend lange Seile verwenden kann, die es gestatten, die ganze Strecke ohne Kontaktverbindungen herzustellen. Der Nachteil solcher Leitungen ist nur das unschöne Aussehen und der große Raumbedarf, weil man Mittelabstände von mindestens 100 mm zwischen je zwei benachbarten Seilen geben muß, um Berührungen infolge von Wärmedehnungen mit Sicherheit zu vermeiden. Aus demselben Grunde müssen die Leitungen auch ungefähr alle halben Meter gefaßt und unterstützt werden. Zu beachten sind auch die bei Stromstößen auftretenden elektrodynamischen Wirkungen. Leiter, die von Strömen gleicher Richtung durchflossen werden, ziehen einander an. Auch aus diesem Grunde muß die Abstützung der Leiter sorgfältig durchgeführt werden. Um den Seilen eine größere Steifheit zu verleihen, verwendete man auch aus grobem Draht hergestellte Seile. Man erhielt auf diese Weise solide Leitungen von gefälligem Aussehen, die nach der Gestalt ihres Grundrisses Ringleitungen genannt werden und sich gut bewähren. Abb. 40 zeigt den Schnitt durch die Stromabnahmestelle für die Phase I einer Ringleitung mit Seilen. Die geschnitten

dargestellten Seile werden durch Isolierrollen *a* distanziert, die auf Bolzen *b* aneinandergereiht sind. Sämtliche Bolzen *b* werden von Profilen *c* getragen, die über den Träger *l* mit den Gebäudeträgern zusammenhängen. Die den verschiedenen Phasen angehörenden Seile sind in der Abbildung deutlich gekennzeichnet, so daß sich das System der Phasenvermischung genau verfolgen läßt. An der Stromabnahmestelle einer Phase werden die zusammengehörigen phasengleichen Kabel durch geeignete Klemmstücke *d* miteinander verbunden und über Laschen *e* an kurze Kupferschienen gelegt, an welche die flexiblen Ofenkabel *h* mittels Seilschuhen *g* angeschlossen werden. Profile *i* stützen mittels Isolierrollen *k* die Kupferschienen *f* ab.

Zu weitaus eleganteren Lösungen gelangt man bei Verwendung von Kupferschienen, wobei allerdings der Nachteil in Kauf genommen werden muß, daß man sie normal nur in Fabrikationslängen von 6 m, maximal von 10 m, erhält und daher im Zuge der Leitungen einige Klemmstellen erforderlich sind. Sehr gebräuchlich sind Schienen mit  $10 \times 100$  mm Querschnitt, bei welchen die gegenseitigen lichten Abstände ohne weiteres auf Schienendicke, also auf etwa 10 mm vermindert werden können. Selbstverständlich dürfen nie zwei Schienen gleicher Phase unmittelbar nebeneinander angeordnet werden, sondern auch hier ist eine gut durchdachte Vermischung der Schienen verschiedener Phasen notwendig.

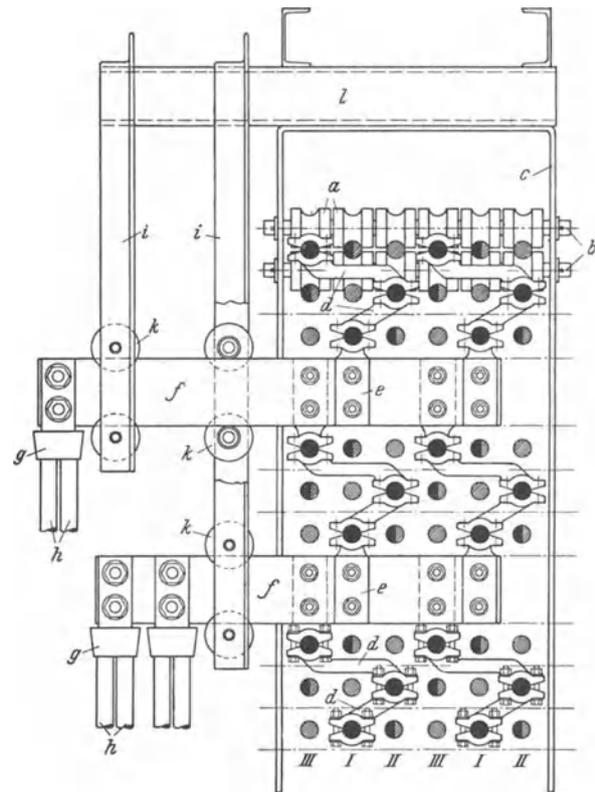


Abb. 40. Stromabnahme für eine Phase von Ringleitung mit Seilen.

## B. Transformatorschaltungen.

In Abb. 41 ist eine Ringleitung mit Kupferschienen für einen Drehstromofen gezeigt, welche aus zwölf, in zwei Gruppen zu je sechs übereinanderliegenden Schienen besteht. Immer zwei unmittelbar übereinanderliegende Schienen führen Strom gleicher Phase, weshalb im Grundriß (Abb. 41/a) nur die sechs Schienen der oberen Gruppe zu sehen sind. Die Abstände zwischen Schienen einer Gruppe sind gleich groß; nur bei der Stromabnahme  $A_I$ ,  $A_{II}$  und  $A_{III}$  rückt man aus Montagerücksichten jeweils eine Phase von der nächsten ab. In geeigneten Abständen sind Distanzierungen *B* angebracht, damit die Abstände zwischen den einzelnen Schienen der Ringleitung gleich bleiben. Diese Distanzierungen sind Isolierplatten *a*, die zwischen die Schienen gelegt werden. Die isolierten Bolzen *b* pressen mittels der Profile *c* Schienen und Isolierplatten zusammen. In der Gebäudemauer *M* befinden sich Träger *d*, welche die Profile *c* halten, oder aber diese Profile sind an bereits am Ofen vorhandene Tragkonstruktionen gehängt. In Abb. 41/b ist die Stützung der Ringleitung im Transformatorraum, in Abb. 41/c die Durchführung der Leitungen durch die Trennungsmauer *M* zwischen Transformator- und Ofenraum dargestellt. Aus Abb. 41/d, e sind die Laschen *e* und in Abb. 41/g die ganze Aufhängung *f* der Ringleitung an die Hauptträger *g* im Ofenraume *O* ersichtlich.

Im Transformatorraum *TR* stehen drei Transformatoren *Tr* (gezeichnet ist nur *Tr* für die Phasen *II* und *III*). Die Abb. 41/a, f zeigen die Verbindung zwischen Trans-

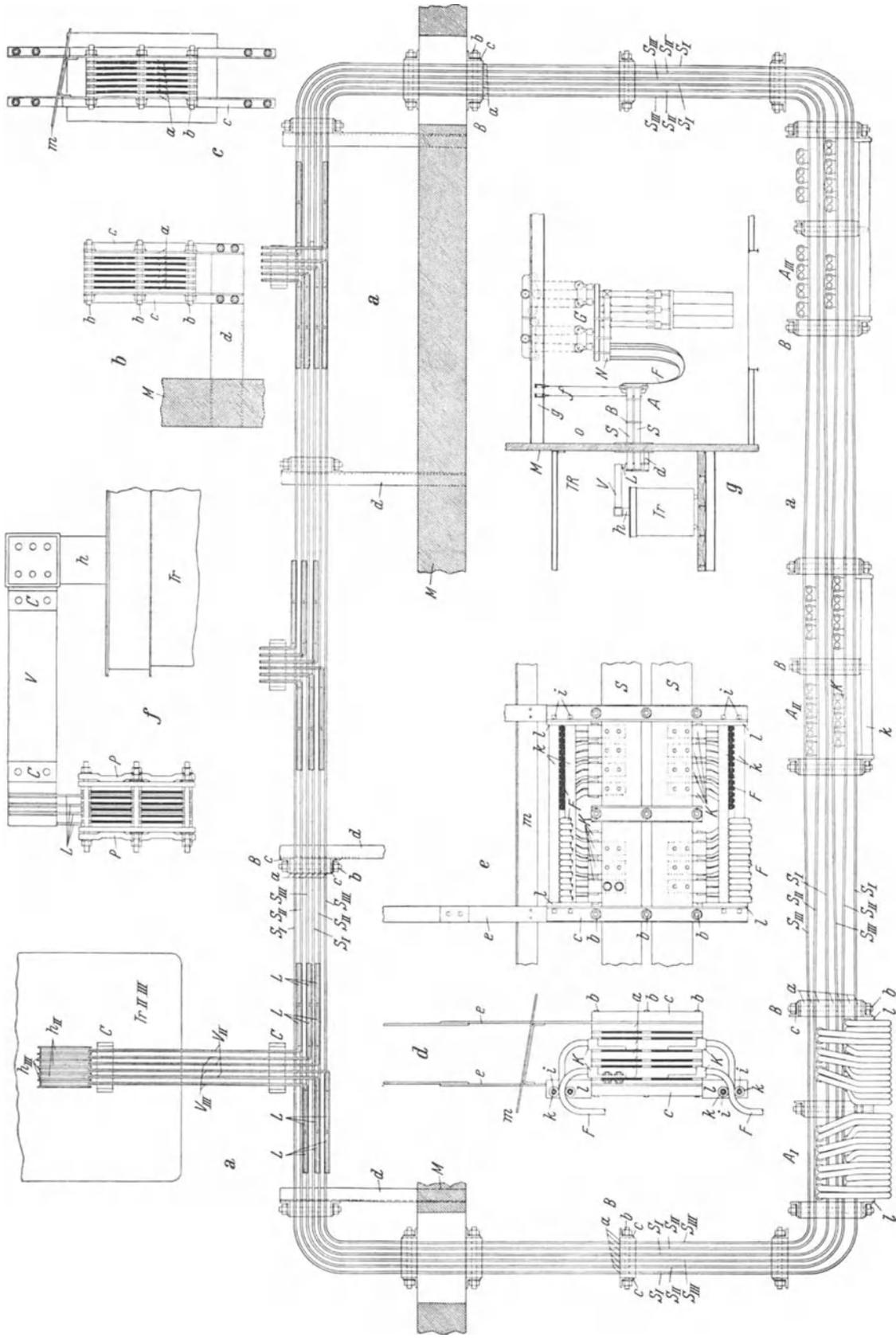


Abb. 41. Ringleitung mit Schienen für einen Drehstromofen.

formatoren und Ringleitung. Von jeder Klemmplatte  $h$  des Transformators führen zwei Verbindungsschienen  $V$  zur Ringleitung; diese Klemmplatten  $h$  sind vermischt angeordnet ( $h_{II}$ ,  $h_{III}$ ,  $h_{II}$  usw.). Klemmplatten und Verbindungsschienen werden unter Beigabe von Isoliermaterialien mittels Bolzen aneinandergedreht. Die Verbindungsschienen werden distanziert ( $C$ ) und so über die Ringleitung abgebogen, daß sie mit den Kupferlappen  $L$  verschraubt werden können. Diese Kupferlappen sind ebenfalls mit der Ringleitung verbunden. Stählerne Preßstücke  $P$  stellen den Kontakt zwischen den Lappen und Schienen der Ringleitung her.

Aus Abb. 41/a sind die Stromabnahmestellen  $A$  für die einzelnen Phasen ersichtlich. Die Abb. 41/d, e zeigen Einzelheiten für die Phase  $I$ . In den Kabelschuhen  $K$  sind die flexiblen Kupferseile  $F$  hart eingelötet. Die Kabelschuhe sind an den Schienen mittels Schrauben befestigt. Dies erfolgt in der bereits erwähnten Weise dadurch, daß die betreffende Schiene zunächst von der benachbarten abgerückt wird. Die Seile werden sodann zwischen Bolzen  $i$  geführt, die mit Isolierrohren  $k$  überzogen sind. Die Isolierplatten  $l$  trennen die Seile von den Profilen  $c$  der Distanzier- und Tragkonstruktion. Die anderen Enden der Seile werden mit den Stromschienen  $N$  des Elektrodengehänges  $G$  verbunden. Abb. 41/g zeigt eine Zusammenstellung der ganzen Anordnung.

Im Gegensatz zu den Seilringleitungen bauen sich die Schienenringleitungen sehr kompakt und haben auch keinen größeren Spannungsabfall als jene. Wie schon erwähnt, sind die zahlreichen Kontaktstellen, welche infolge der begrenzten Baulängen der Kupferschienen vorgesehen werden müssen, als Nachteile zu werten. Die Kontakte müssen turnusmäßig nachgesehen werden, um rechtzeitig eingreifen zu können, wenn sich irgendwo eine mangelhafte Kontaktstelle zeigt. Der beste Kontakt verschlechtert sich mit der Zeit durch die Einwirkung der Ofenhitze. Es empfiehlt sich daher, Schienenleitungen vor der strahlenden Hitze des Ofens abzuschirmen, was am besten durch Umhüllung mit einem aus Asbestschiefer hergestellten Kanal geschieht. Die sich bildende Verlustwärme muß abgeführt werden. Dies erreicht man durch Anordnung einer künstlichen Belüftung des Kanals, den man mit einem Ventilator in der Richtung zum Ofen durchbläst. Zumindest muß aber die Ringleitung durch ein Schutzdach  $m$  aus Asbestschiefer gegen Staubablagerung geschützt sein, wie dies auch Abb. 41/c, d, e zeigen.

Zur Vermeidung einiger der oberwähnten Nachteile hat man wieder auf wassergekühlte Kupferrohre zurückgegriffen, wobei man die Rohre, da die Verlustwärme durch das Kühlwasser abgeführt wird, nach außen durch Umkleben von mit Wasserglas getränktem Papier elektrisch isolierte. Die Stoßstellen der einzelnen Rohrstücke wurden stumpf verschweißt, Kontaktstellen also vermieden, so daß man eine für die Ewigkeit gebaute Leitung erhielt. Die spezifische Strombelastung kann hierbei gegenüber luftgekühlten Leitungen beträchtlich gesteigert werden. Es ist auch nicht erforderlich, mit dieser soliden Leitungsanordnung streng im Rechteck um den Ofen herum zu gehen, um den erwünschten zweiten Anschluß an die Elektroden von der anderen Ofenseite her vorsehen zu können. Die von der Ofenhitze nicht beeinflussbare Leitung kann ohne weiteres zwischen den Elektroden hindurch quer über den Ofen geführt werden.

Wie ein französisches Patent aus der letzten Zeit beweist, versucht man immer wieder neue Lösungen mit flexiblen Leitungen. In Heft 11 der Zeitschrift *Four Electrique*, Jahrgang 1931, ist diese Erfindung näher beschrieben. In einem biegsamen Kupferrohr, das erforderlichenfalls mit einem Asbestschlauch überzogen werden kann, wird ein Kupferseil verlegt, Seil und Rohr leiten den Strom bis zu den Kontaktplatten an den Elektroden. Das biegsame Rohr ist wassergekühlt. Diese Leitungsanordnung gestattet eine spezifische Belastung von 8—10 A/mm<sup>2</sup> und ergibt somit eine beträchtliche Kupferersparnis, der Spannungsabfall bleibt in zulässigen Grenzen und außerdem entfallen separate Kühlwasserleitungen zur Fassung.

Zur Konsolidierung und Vereinfachung der Leitung hat man auch noch andere Wege beschritten. Es wurden z. B. an Stelle eines Dreiphasentransformators drei Einphasen-

transformatoren zur Speisung eines Drehstromofens angeordnet, die so aufgestellt werden konnten, daß sich optimale Verhältnisse für die Zuleitungen zu den Elektroden ergaben. Wenn man sich entschließt, einen vierten Einphasentransformator in Reserve zu halten, erzielt man auf diese Weise auch eine beträchtlich größere Betriebssicherheit. Bei der Anwendung von drei Einphasentransformatoren ist auf den Umstand zu achten, daß die einzelnen Transformatoren magnetisch nicht miteinander verkettet sind. Wollte man also z. B. die Transformatoren in Stern schalten, muß man dafür Sorge tragen, daß der Sternpunkt der Primärseite mit dem Sternpunkt des Generators verbunden wird, also eine elektrische Verkettung stattfindet. Man zieht daher die Dreieckschaltung oder die sog. V-Schaltung, wie sie Abb. 42 zeigt, vor. Auch diese Schaltung dient zur Speisung eines Dreiphasenofens aus einem Drehstromnetz  $u, v, w$ , wobei an Stelle eines Dreiphasentransformators zwei Einphasentransformatoren  $T_1$  und  $T_2$  vorgesehen werden müssen. Zwei Endpunkte der Wicklungen  $o_1$  und  $o_2$  der Transformatoren werden miteinander verbunden und vom Netz durch die Leitung  $v$  angespeist. Die Unterspannungswicklungen  $u_1$  und  $u_2$  speisen zwei Paare von Sekundärleitungssträngen, von welchen einer zu den Elektroden 1 und 2, der andere zu 2 und 3 führt. Wäre die Elektrode 2 doppelt vorhanden, dann hätte man zwei Einphasenöfen vor sich, deren jeder von einem Einphasenwechselstrom versorgt würde. Für diesen Zweck ist aber die Schaltung unbrauchbar, da sie keine auch nur annähernd gleichmäßige Belastung des Drehstromnetzes ergibt. Verkettet man aber die Sekundärseite über die Elektrode 2, dann fließt nicht nur zu den Elektroden 1 und 2 bzw. 2 und 3 ein Strom, sondern auch zu 1 und 3, und zwar handelt es sich um Ströme verschiedener Phasen, die das Primärnetz halbwegs gleichmäßig belasten.

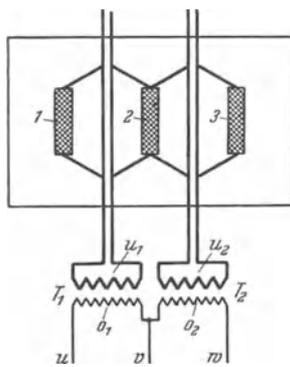


Abb. 42. V-Schaltung.

zu 1 und 3, und zwar handelt es sich um Ströme verschiedener Phasen, die das Primärnetz halbwegs gleichmäßig belasten.

### C. Anordnung der Elektroden im Ofen.

Eine absolut gleichmäßige Belastung wäre nur dann denkbar, wenn die drei Elektroden eines Drehstromofens im Grundriß ein gleichseitiges Dreieck bilden würden, der Transformator zentrisch unterhalb oder über dem Ofen aufgestellt werden könnte und sich auch die Verbindungsleitungen sinngemäß in das System des gleichseitigen Dreieckes bringen ließen. Stellt man sich drei in einer Linie nebeneinander angeordnete Elektroden vor, so wird es ohne umfangreiche mathematische Überlegungen augenscheinlich, daß sich zufolge ihrer gegenseitigen induktiven Beeinflussung Unterschiede in ihrer Wirkungsweise ergeben müssen. In der Tat ist jedem Betriebsleiter einer Elektrodenofenanlage die Erscheinung der „lebhaften“ und „toten“ Phase bekannt und wohl immer unerwünscht. Augenfällig wird diese Erscheinung zunächst durch verschieden starken Abbrand der drei Elektroden und durch ungleichmäßige Schmelzleistung im Bereiche der einzelnen Elektroden. Dr.-Ing. J. Wotschke beschäftigt sich in einer im Jahre 1925 im Verlag von Julius Springer erschienenen „Die Leistung des Drehstromofens“ betitelten Broschüre sehr eingehend mit diesem Problem. Dadurch, daß man immer mehr zu ausgesprochenen Dreieckanordnungen der Elektroden, auch bei Öfen der elektrochemischen Industrie, soweit man nicht überhaupt Einphasenöfen bevorzugt, übergeht, verliert die Frage der gleichmäßigen Belastung der einzelnen Elektroden allmählich an Bedeutung. Es liegt die Frage nahe, warum man nicht sofort die Lösung der Dreieckanordnung der Elektroden wählte. In der Tat wurden die ersten kleinen elektrochemischen Öfen so gebaut. Als jedoch mit wachsender Stromstärke die Herstellung entsprechend großer Runder Elektroden Schwierigkeiten zu machen begann und man genötigt war, zur Paketelektrode mit rechteckigem Querschnitt überzugehen, mußte man auch die Dreieckanordnung verlassen. Im gleichseitigen Dreieck gesetzte Paketelektroden werden, gleich-

gültig wie man sie stellt, an einzelnen Kanten besonders hoch beansprucht werden. Man war daher auf das Nebeneinanderstellen der Elektroden angewiesen (siehe Abb.165, S.179). Erst als es gelang, runde Elektroden genügenden Querschnittes herzustellen, kam man wieder auf die Dreieckanordnung zurück. Erste zaghafte Versuche in dieser Richtung rückten die mittlere Elektrode in elliptischen Öfen etwas aus der Achse, dann brachte man in runden Öfen die Elektroden im gleichseitigen Dreieck unter (siehe Abb.123, S.145). Bei Stahlföfen war man, da eine im Grundriß kreisförmige Ofenform stets gebräuchlich war, gar nicht versucht, eine andere Elektrodenanordnung als jene im gleichseitigen Dreieck auszubilden, um so mehr als die Fabrikation von Runden Elektroden mit der Entwicklung des Stahlofenbaues immer Schritt halten konnte. Wenn auch die Reihen-anordnung der Elektroden, die Hauptursache der Erscheinung der verschiedenen Phasenbelastungen, beseitigt wurde, verbleibt doch noch immer ein Rest, dem nicht ohne weiteres beizukommen ist. Man kann wohl den starren Teil der Verbindungsleitung zwischen Transformator und Ofen genügend untermischt verlegen und somit Unterschiede in der gegenseitigen Induktion zwischen den einzelnen Phasen praktisch ausschalten, nicht gelingt dies aber bei den flexiblen Kabeln. Es ist daher immerhin interessant, diesem Problem, wenn auch nur prinzipiell, etwas näher nachzugehen.

Betrachtet man drei nebeneinander angeordnete Elektroden, die in den zu schmelzenden Einsatz eintauchen, der gleichzeitig den Widerstand darstellt, dann ist es ohne weiteres ersichtlich, daß selbst bei voller Homogenität des Einsatzgutes hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit und vor allem gleicher Eintauchtiefe, der Ohmsche Widerstand zwischen den einzelnen Phasen nicht gleich sein kann. Von praktisch gleicher Größe werden wohl die Widerstände zwischen den einzelnen Elektroden und einer leitfähigen Ofenbodenplatte, also die sozusagen zu einem Stern zusammengeschlossenen Teile der Widerstände sein, nicht aber die der Dreieckschaltung entsprechenden Widerstände zwischen zwei benachbarten und zwischen zwei außenliegenden Elektroden. Zur Orientierung über die durch die Verschiedenheit der Ohmschen Widerstände bedingten Erscheinungen sei auf das wärmste das Studium einer von L. Fährnich veröffentlichten Arbeit empfohlen<sup>1</sup>. Anschließend an einen vom Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen (AEF) zur Diskussion gestellten Entwurf der Definition von Wechselstromgrößen<sup>2</sup> gibt L. Fährnich, ausgehend von einer Kritik der vorgeschlagenen Definitionen eine auf den Grund des Problems gehende Darstellung der Hauptbegriffe des Drehstromsystems. In allgemeiner Form, lediglich unter der Voraussetzung eines rein sinusförmigen Verlaufes von Strom und Spannung, werden auf graphischem und mathematischem Wege die Begriffe der Wirkleistung, Scheinleistung und Blindleistung festgelegt. Ein knapp vorher erschienener Artikel des gleichen Verfassers<sup>3</sup> ist in diesem Zusammenhang ebenfalls interessant. Es sei hier nur kurz auf eine wichtige Schlußfolgerung der erstgenannten Arbeit hingewiesen, die wörtlich zitiert, folgendermaßen lautet: „Aus der graphischen Entwicklung ergibt sich also, daß eine der Scheinleistung gleiche Leistung nur dann erzielbar ist, wenn die drei Ströme dieselben Phasen haben wie die drei einander gleichen Phasenspannungen  $e$ . In allen anderen Fällen ist selbst bei rein Ohmscher Belastung die Leistung kleiner als die Scheinleistung.“ Auf den Fall der drei nebeneinander angeordneten Elektroden angewendet, bedeutet dies, daß obwohl die Widerstände zwischen den einzelnen Elektroden rein Ohmscher Natur sind, die Wirkleistung doch niemals die Größe der Scheinleistung erreichen kann, außer wenn durch Anordnung der Elektroden im gleichseitigen Dreieck die Widerstände gleich groß werden. Es bedeutet ferner, daß sich die Strom- und Spannungsvektoren nicht decken, sondern Phasenwinkel miteinander einschließen. Bei Durchzeichnung des Vektordiagrammes findet man, daß die Vektoren nur in einer Phase gleiche Richtung haben, während in der zweiten eine Voreilung, in

<sup>1</sup> Elektrotechn. u. Maschinenb. 1920 S. 561 Grundbegriffe des Drehstromsystems.

<sup>2</sup> Elektrotechn. Z. 1920 S. 662.

<sup>3</sup> Elektrotechn. u. Maschinenb. 1920 S. 155 Das allgemeine Dreiphasenspannungsdiagramm.

der dritten eine Nacheilung des Stromvektors gegenüber dem Spannungsvektor konstatiert werden kann. Um die Überlegungen nicht unübersichtlich zu gestalten, sei aber von dieser Verschiedenheit der Ohmschen Widerstände abgesehen und die Annahme getroffen, daß hinsichtlich des Ohmschen Widerstandes bei gleicher Eintauchtiefe keine der drei Elektroden bevorzugt sei. Es soll also nur untersucht werden, welchen Einfluß Selbstinduktion und gegenseitige Induktion ausüben. Abb. 43 stellt schematisch drei

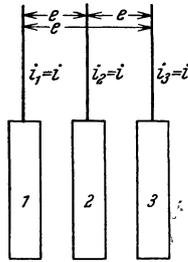


Abb. 43.  
Paket-Elektroden  
nebeneinander.

nebeneinander angeordnete Elektroden eines Drehstromofens mit den Verbindungsleitungen zu den Transformator клемmen und den Elektroden dar. Die Selbstinduktion wird bei gleichmäßiger Leitungsverlegung in allen drei Phasen ohne weiteres gleich groß angenommen werden können. Da die gegenseitige Induktion eine logarithmische Funktion der Distanz der Leiter ist, kann wohl die gegenseitige Beeinflussung der Phasen 1 und 2 und der Phasen 2 und 3 als gleich groß angenommen werden, nicht aber die gegenseitige Induktion zwischen 1 und 3, die wesentlich kleiner sein wird. In vektorieller Darstellung lassen sich die Verhältnisse übersichtlich entwickeln. In dem Vektordiagramm (Abb. 44) ist zunächst die Richtung der Ströme in den drei Elektroden gezeichnet. Wenn es sich um einen automatisch auf kon-

stanten Strom regulierten Ofen handelt, kann ohne weiteres festgelegt werden, daß die Ströme in allen drei Phasen von gleicher Größe sind. Damit ist aber auch der Winkel, den sie miteinander einschließen, gegeben. Nur dann, wenn die Ströme je zweier Phasen unter einem Winkel von  $120^\circ$  aufeinander folgen, kann bei gleich großen Strömen die

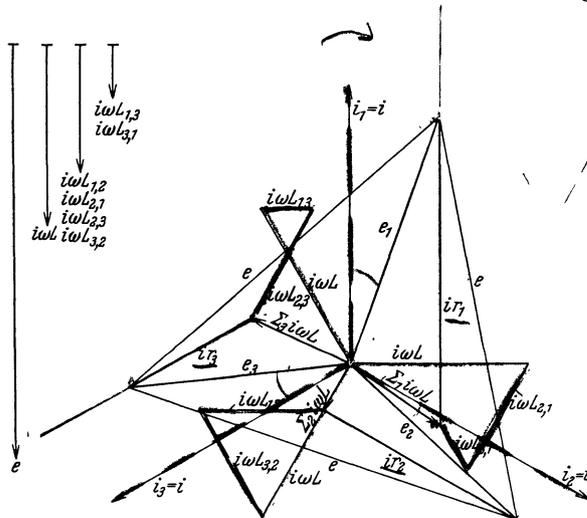


Abb. 44. Gegenseitige Beeinflussung der Phasen.

vektorielle Stromsumme Null ergeben. Dies ist aber Bedingung, wenn ein elektrisch stabiles System vorausgesetzt wird. Gegeben sind ferner die Selbstinduktionen in allen drei Phasen, die ebenfalls von gleicher Größe sind, weil gleiche Stromstärken den Überlegungen zugrunde gelegt wurden. Ihre Größe sei durch die Strecke  $i\omega L$  der Abb. 44 gegeben. Für die gegenseitige Induktion der betrachteten Ofenanlage sind zwei verschieden große Strecken anzunehmen, da sich zwei unmittelbar benachbarte Phasen intensiver beeinflussen als die beiden außenliegenden. Die größere Strecke ist mit  $i\omega L_{12}$ ,  $i\omega L_{21}$ ,  $i\omega L_{23}$  und  $i\omega L_{32}$  bezeichnet, die kleinere mit  $i\omega L_{13}$  bzw.  $i\omega L_{31}$ . Schließlich ist noch die Größe der Klemmenspannung des Transformators, in der Abbildung mit  $e$  benannt, gegeben. Betrachtet man zunächst den

Einfluß der Selbstinduktion der Phase 1, so ist der der Selbstinduktion entsprechende Spannungsabfall dem Strom  $i$  um  $90^\circ$  voreilend aufzutragen. Die Länge dieses Vektors ist durch die Strecke  $i\omega L$  gegeben. Die Phase 1 erfährt aber auch eine von der Phase 2 herrührende Einwirkung. Ihr Vektor steht senkrecht zur Richtung des Stromes  $i_2$  und ist ihrer Dimension nach, da es sich um zwei benachbarte Phasen handelt, durch die größere Strecke  $i\omega L_{21}$  gegeben. Die Rückwirkung der Phase 3 ergibt einen zu  $i_3$  senkrechten Vektor von der Größe der kürzeren Strecke  $i\omega L_{31}$ . Die Schlußlinie des Vektorzuges ist wohl ihrer Richtung, nicht aber ihrer Größe nach gegeben. Da es sich nur um den Ohmschen Spannungsabfall handeln kann, der mit dem Strom in Phase ist, muß dieser Vektor durch den bisher erreichten Endpunkt des Vektorzuges parallel zu  $i_1$

gezeichnet werden. Bei Phase 2 geht man ganz ähnlich vor. Wieder trägt man den Spannungsabfall der Selbstinduktion von der Größe  $i\omega L$   $90^\circ$  gegenüber dem Stromvektor voreilend auf. Daran schließt sich die von Phase 3 herrührende gegenseitige Induktion  $i\omega L_{32}$  und der der Beeinflussung der Phase 1 entsprechende Vektor  $i\omega L_{12}$ . Auch hier ist wieder die Schlußlinie der Richtung nach, und zwar parallel zu der Richtung von  $i_2$  gegeben. In genau gleicher Weise wird die Richtung des Ohmschen Spannungsabfalles für Phase 3 bestimmt. Nun handelt es sich noch darum, die Größe der Ohmschen Spannungsabfälle zu finden. Hierzu dient die ebenfalls gegebene verkettete Spannung an den Transformator клемmen  $e$ . Rein geometrisch betrachtet, ist jenes gleichseitige Dreieck zu konstruieren, dessen Seitenlänge  $e$  beträgt, und dessen Eckpunkte auf den Vektoren der Ohmschen Spannungsabfälle liegen. Es gibt nur ein einziges Dreieck, welches dieser Bedingung entspricht. Die Verbindungslinien des Sternpunktes mit den Eckpunkten des gleichseitigen Dreieckes ergeben Größe und Richtung der Spannungen zwischen den einzelnen Transformator клемmen und der Ofenbodenplatte. Die Ohmschen Spannungsabfälle sind nun auch ihrer Größe nach bestimmt. Vergleicht man ihre Vektorlängen in den drei Phasen, so findet man  $i r_1$  am größten,  $i r_3$  am kleinsten. Natürlich ist auch  $i^2 r_1$ , die in Wärme umgesetzte Leistung, größer als  $i^2 r_3$ . Die Phase 1 ist also die lebhafte, Phase 3 die tote Phase. Die lebhafte Phase eilt im Sinne der Drehrichtung des Dreiphasenstromes der toten Phase immer voran. Man kann also ohne weiteres durch Vertauschen der Primäranschlüsse der Phasen 1 und 3 am Transformator die lebhafte Phase zur toten machen und umgekehrt. Im Vektordiagramm ist noch beachtenswert, daß der Sternpunkt sich mit dem Mittelpunkt des Dreieckes der verketteten Spannung nicht deckt. Es sind daher auch die Phasenspannungen nicht gleich groß. Die verschiedene gegenseitige Induktion hat also auch noch eine Sternpunktverlegung zur Folge, die bei im Dreieck angeordneten Elektroden nicht zu konstatieren ist.

Es liegt nahe, diese störenden Erscheinungen schon bei Entwurf einer Anlage zu berücksichtigen, d. h. also vorbeugende Mittel anzuwenden, um sie zu vermeiden. Man wird also trachten müssen, die gegenseitige Induktion zwischen allen drei Phasen auf den gleichen Wert zu bringen. Eine den Siemens-Schuckert-Werken (Berlin) patentierte Anordnung sieht hierfür einen in die Phasen 1 und 3 geschalteten Zusatztransformator vor, welcher diese beiden Phasen induktiv koppelt. Die Phase 2 erhält außerdem eine Drosselspule zur Vergrößerung der Selbstinduktion. An Hand des Vektordiagrammes (Abb. 44) kann man sich überzeugen, daß eine Vergrößerung der Selbstinduktion der Phase 2 im Sinne der gewünschten Angleichung aller drei Phasen wirkt. Naturgemäß werden die zusätzlichen Apparate auf der Primärseite eingebaut. Vorsicht ist insofern am Platz, als zusätzliche Induktionen den Leistungsfaktor der ganzen Ofenanlage verschlechtern. Die Hilfsapparaturen stellen Fehler- und Verlustquellen dar, die man möglichst zu vermeiden trachtet. Einen weiteren Weg bietet eine entsprechende Verlegung des starren Leitungsteiles. Man hebt auf eine passende Länge die normale Untermischung der Phasen auf, und zwar derart, daß Phase 2 getrennt von Phase 1 und 3, die untermischt bleiben, geführt wird. Im Prinzip wird auch hierbei die Selbstinduktion der Phase 2 und die gegenseitige Induktion zwischen Phasen 1 und 3 erhöht. Wieder muß darauf geachtet werden, daß die Vorteile des Phasenausgleiches nicht reichlich durch die Nachteile des schlechteren Leistungsfaktors aufgewogen werden. Das beste Mittel, allen Schwierigkeiten auszuweichen, bleibt die Anordnung der Elektroden im gleichseitigen Dreieck, bei entsprechend vorsichtiger Leitungsdisposition.

Moderne Großöfen, bei welchen die ins enorme gesteigerten Stromstärken Schwierigkeiten erwarten ließen, werden nicht als Dreiphasenöfen, sondern als Einphasenöfen gebaut. Die beiden Elektroden eines solchen Ofens führen den gleichen Strom, bieten daher keinen Anlaß zu irgendwelchen Unterschieden. Hingegen treten andere, allerdings leichter überwindbare Schwierigkeiten auf. Vor allem wird sich kein Elektrizitätswerk bereit finden, ein elektrochemisches Werk aus seinem Drehstromnetz mit Einphasenstrom

in jenem Ausmaße zu beliefern, wie es für Großöfen erforderlich ist. Die schon beschriebene Scottschaltung ermöglicht es, zwei gleich große Öfen aus einem Drehstromnetz derart zu speisen, daß sich bei gleicher Leistung der beiden Öfen eine gleichmäßige Belastung für das Drehstromnetz ergibt. Öfen nach System Miguet werden ausschließlich über Scott-Transformatoren mit Energie versorgt. Ein nicht unbeträchtlicher Vorteil einer Ofenanlage in Scottscher Schaltung gegenüber einem Dreiphasenofen ergibt sich nebenbei. Setzt man bei Vergleich eines Drehstromofens mit einem Einphasenofen voraus, daß bei beiden die Spannung und Stromstärke zwischen Elektrode und Bodenplatte gleich ist, dann ergibt sich die Spannung zwischen zwei Elektroden beim Drehstromofen aus dem  $\sqrt{3}$  fachen, beim Einphasenofen aus dem doppelten Wert der Herdspannung. Man erzielt also auf diese Weise eine sehr erwünschte Spannungserhöhung und damit eine Verringerung der Stromstärke.

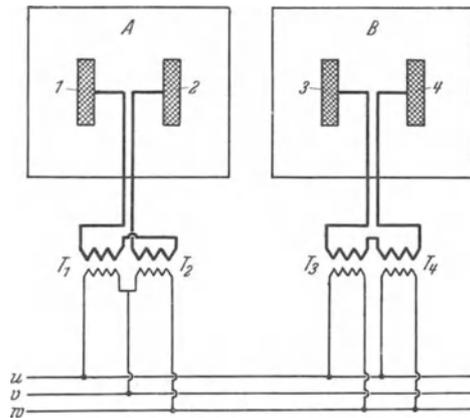


Abb. 45. Schaltung für den Betrieb zweier Einphasenöfen aus einem Drehstromnetz.

Eine weitere sehr interessante Schaltung, welche zum gleichen Ziele führt, stellt Abb. 45 dar. Wieder werden zwei Einphasenöfen aus einem Drehstromnetz gespeist. Hierzu sind vier Transformatoren  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  und  $T_4$  erforderlich, von welchen je zwei genau wie bei der V-Schaltung an die primären Sammelschienen  $u$ ,  $v$ ,  $w$  angeschlossen sind. Jedes Transformatorpaar versorgt einen Einphasenofen. Die Sekundärwicklungen jedes Paares sind in Serie geschaltet und die freien Wicklungsenden zu den Elektroden geführt. Bei der Reihenschaltung muß darauf geachtet werden, daß die Anschlüsse genau in der durch Abb. 45 dargestellten Reihenfolge liegen. Die beiden Spannungen der Transformatoren  $T_1$  und  $T_2$  addieren sich dann vektoriell unter einem Winkel von  $120^\circ$ . Die resultierende Spannung ist daher nicht in Phase mit der an den Sammelschienen  $u$ ,  $w$  liegenden Spannung, sondern um  $90^\circ$  phasenverschoben. Umgekehrt sind die beiden Spannungen der Transformatoren  $T_3$  und  $T_4$  in Phase mit der Spannung  $u - w$ . Man erhält also tatsächlich einen regulären Zweiphasenstrom und bei gleicher Leistung der beiden Öfen  $A$  und  $B$  eine symmetrische Belastung des Drehstromnetzes. Hierbei kann bei beiden Öfen mit verschiedenen Spannungen bzw. Stromstärken gearbeitet werden, was mitunter bei Erzeugung verschiedener Produkte erwünscht ist. Will man gleiche Stromstärken und Spannungen bei beiden Öfen haben, dann muß das Übersetzungsverhältnis der Transformatoren  $T_3$  und  $T_4$   $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$  mal kleiner genommen werden, als das der Transformatoren  $T_1$  und  $T_2$ . Mit Rücksicht auf die Austauschbarkeit wird man anstreben, die vier Transformatoren gleich auszuführen. Man wird dann bei jedem Transformator, außer den normalen Anzapfungen, eine solche für die Entnahme von einer 0,866 mal kleineren Sekundärspannung vorsehen, diese Anzapfung aber nur dann einschalten, wenn der betreffende Transformator für den Ofen  $B$  verwendet werden soll.

Schließlich können selbstverständlich auch drei gleiche Einphasenöfen von drei Einphasentransformatoren aus einem Drehstromnetz mit Energie versorgt werden. Wenn man die Transformatoren mit entsprechenden Anzapfungen ausrüstet, können bei Ausfall eines der drei Öfen, zwei Transformatoren auf zwei Öfen in Scottscher Schaltung weiterarbeiten.

## Bauarten der elektrischen Öfen.

Die Einteilung der elektrischen Öfen erfolgt in der Regel nach der Art der Umwandlung elektrischer Energie in Wärme. Demnach unterscheidet man Widerstandsöfen und Lichtbogenöfen. Streng genommen sind aber alle elektrischen Öfen Widerstandsöfen, gleichgültig ob die Erhitzung in einem festen oder flüssigen Medium vor sich geht, wie dies bei den in der Praxis als Widerstandsöfen bezeichneten Typen der Fall ist, oder in einem gas- bzw. dampfförmigen Medium erfolgt, wie bei den Lichtbogenöfen. Zudem gehören bloß wenige Öfen nur der einen oder der anderen dieser beiden Typen an, sondern die meisten Ofensysteme stellen eine Vereinigung derselben dar. Trotzdem ist es üblich, von Widerstandsöfen und von Lichtbogenöfen zu sprechen, je nachdem die Erhitzung ohne oder mit Lichtbogenerscheinung vor sich geht. Als reine Widerstandsöfen sind alle Induktionsöfen anzusehen und jene Elektrodenöfen, bei welchen zwischen festen Elektroden ein Hilfswiderstand oder der zu behandelnde Stoff eingeschaltet ist, welcher in diesem Falle leitend sein muß. Der einzige reine Lichtbogenofen ist der sogenannte Strahlungsöfen, in welchem der Lichtbogen zwischen Elektroden erzeugt wird, ohne daß der Strom seinen Weg durch das zu behandelnde Material nimmt.

Weniger gebräuchlich ist die Unterscheidung der Öfen nach der verwendeten Stromart. Gleichstrom kommt für größere Einheiten nur dort in Frage, wo neben der Erhitzung hauptsächlich seine elektrolytische Wirkung erforderlich ist, also in der Schmelzflußelektrolyse. Die Unmöglichkeit, den Gleichstrom in wirtschaftlicher Weise auf die jeweils benötigten Spannungen umzuwandeln, macht ihn für den Großbetrieb von Öfen ungeeignet. Der Wechselstrom hingegen findet als Einphasen- und Mehrphasenstrom, als Nieder- und Hochfrequenzstrom Verwendung.

Schließlich kann man die Elektroöfen nach der Erzeugungsstelle des Heizstromes trennen, und zwar in solche, deren Heizstrom außerhalb des Ofens (in Generatoren oder Transformatoren) erzeugt wird und mittels Elektroden direkt oder indirekt auf die Ofenbeschickung wirkt und in solche, bei denen der Heizstrom erst im Beschickungsmaterial erzeugt wird. Die einen nennt man Elektrodenöfen, die anderen Induktionsöfen. Auch hier sind Vereinigungen der beiden Typen möglich.

Bei der Besprechung der wichtigsten Ofenkonstruktionen ist es aber unmöglich, die Ofentypen nur nach einem dieser drei Gesichtspunkte zu ordnen. Hier sollen die Öfen zuerst in Elektroden- und Induktionsöfen geteilt und dann erst bei jeder der beiden Gruppen die anderen Unterscheidungsmerkmale geltend gemacht werden.

### I. Elektrodenöfen.

#### A. Reine Widerstandsöfen.

##### a) Direkte Erhitzung.

Wird die zu erhitzende Beschickung zwischen den Elektroden des Ofens eingebracht, so daß die Wärmewirkung des Stromes infolge des Widerstandes im Beschickungsmaterial selbst hervorgerufen wird, dann liegt direkte Widerstandserhitzung vor. Abb. 46 stellt das Schema eines solchen Ofens dar. *a* und *b* sind die Elektroden, zwischen ihnen die Beschickung *c*. Für die Inbetriebsetzung des Ofens ist die genügende Leitfähigkeit der Beschickung bei Einschaltung des Stromes notwendig. Dieser Umstand schränkt die Verwendbarkeit dieser Ofentype stark ein, und man findet sie daher meistens nur als kleinste Laboratoriumsöfen für besondere Zwecke vor. Einige Versuche, den Ofen für Produktionsbetrieb auszubauen, haben keinen Erfolg gehabt.

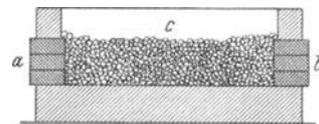


Abb. 46. Schema eines Ofens mit direkter Widerstandserhitzung.

## b) Indirekte Erhitzung.

Um auch Nichtleiter durch Widerstandserhitzung erwärmen zu können, oder um Material auf eine gewünschte Temperatur zu bringen, ohne es dem Stromdurchgang auszusetzen, verwendet man Öfen, bei welchen zwischen den Elektroden ein besonderer Widerstandskörper eingeschaltet ist. Das Schema dieses Ofens mit indirekter Widerstandserhitzung zeigt Abb. 47. Auch hier sind *a* und *b* die Elektroden, *c* der Widerstandskörper und die Beschickung kann entweder unmittelbar um diesen Körper angeordnet oder in geeigneter Entfernung von ihm eingebracht werden. Ein Vertreter der ersten Gattung ist der Acheson-Ofen, der zur Erzeugung von Karborundum

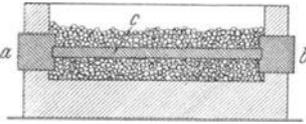


Abb. 47. Schema eines Ofens mit indirekter Widerstandserhitzung.

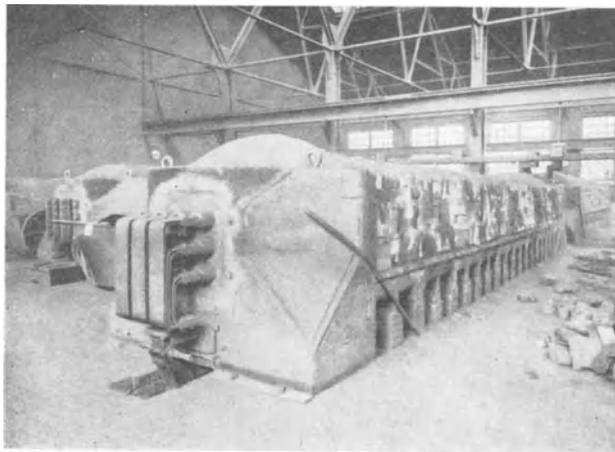


Abb. 48. Acheson-Ofen für Graphiterzeugung.

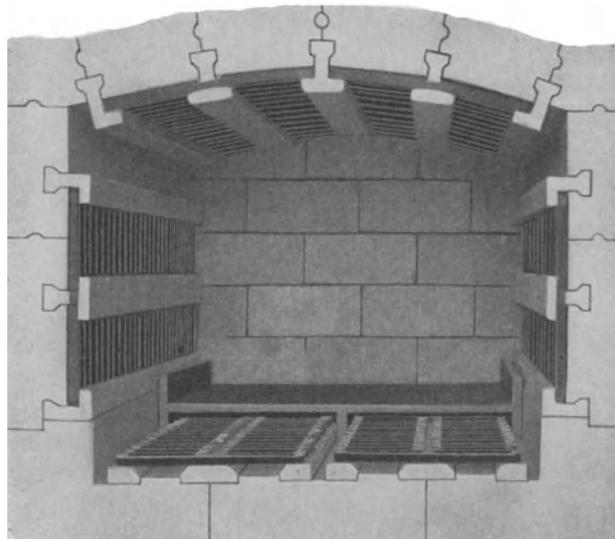


Abb. 49. Elektrischer Muffelofen.

und von künstlichem Graphit (Graphitelektroden) dient. Zwischen den aus Kohlestäben zusammengesetzten Elektroden, die in einer Entfernung von 5000 bis 7000 mm in gemauerten Ofenköpfen angeordnet sind, liegt auf einer ebenfalls gemauerten Sohle die Beschickung und ein Kern aus zerkleinertem Koks. Die Seitenwände des Ofens führt man sodann aus trocken verlegten Steinen auf. Bei Einschaltung des Stromes erhitzt sich zuerst der als Widerstandskörper dienende Koks Kern und gibt Wärme an die ihn umgebende Beschickung ab. Der Strom erwärmt sie also indirekt. Da aber alle Nichtleiter bei genügend hoher Temperatur leitend werden, fließt alsbald der Strom auch durch die Beschickung, wodurch sie direkt erhitzt wird. Den Acheson-Ofen zeigt Abb. 48, welche die Ofenköpfe, die Ofensohle und die Seitenwände erkennen läßt. Im vorderen Ofenkopf bemerkt man das Elektrodenpaket und die mit den einzelnen Kohlestäben verbundenen Kupferbleche für die Stromzuführung. Solche Öfen nehmen 700—800 kW auf.

Die zweite Gattung der Öfen mit indirekter Widerstandserhitzung besitzt Widerstandskörper in Form von Pulver, Drähten, Stäben oder Bändern, die im oder um den Heizraum angebracht sind. Diese Art der Erhitzung findet in den mannigfaltigsten Formen Anwendung, bei kleinen Geräten, wie Heizplatten, Kochern, Laboratoriumsöfen und dergleichen, aber auch bei Öfen, die

der Wärmebehandlung von Metallen dienen, z. B. Temper-, Glüh- und Härteöfen und bei großen Einheiten, wie es die Tunnelöfen in keramischen Betrieben, sowie jene für die

Erzeugung von Kalkstickstoff sind. Das Innere eines elektrischen Muffelofens (Bauart Ruß, Köln), der zum Glühen und Vergüten von Metallen, aber auch zum Emaillieren und Brennen Verwendung findet, ist in

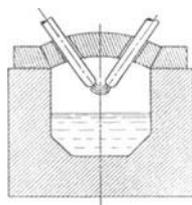


Abb. 50. Schema eines Ofens mit reiner Lichtbogenerhitzung (Strahlungsöfen).

Abb. 49 zu sehen. Dort erkennt man auch die Anbringung der Heizbänder an allen Wänden und den Schutz der Bodenbeheizung.

Bei den vorerwähnten Tunnelöfen sind an der Decke des Heizraumes über die Tunnelbreite Kohlenstäbe als Heizwiderstände angebracht, unter denen die Rollwagen mit dem zu behandelnden Gut fortbewegt werden.

## B. Reine Lichtbogenöfen.

Die reine Lichtbogenerhitzung ist eine indirekte Erhitzungsart, weil der zwischen Elektroden erzeugte Lichtbogen das zu erwärmende Material nicht berührt. Die Erwärmung geht ausschließlich durch Leitung und Strahlung vor sich. Das Schema dieses Ofens, der Strahlungsöfen genannt wird, ist in Abb. 50 wiedergegeben. Ein wirklich brauchbarer Ofen dieser Type wurde zuerst von Stassano gebaut. Besonders die Ausführungsformen der Bonner Maschinenfabrik Mönkemöller und der Rheinischen Elektrostahlwerke (Bonn) haben technische Bedeutung erlangt. Die von diesen Firmen gebauten

Öfen besaßen Elektroden, die in einer horizontalen Ebene angeordnet waren. Genau genommen, ragten die Elektroden durch den zylindrischen Ofenmantel unter einem

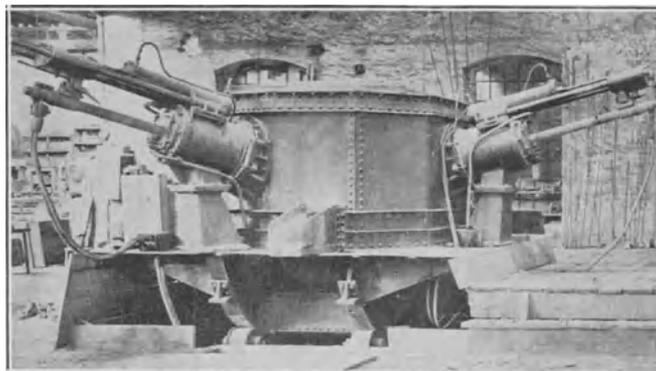


Abb. 51. 3-t-Bonner-Ofen.

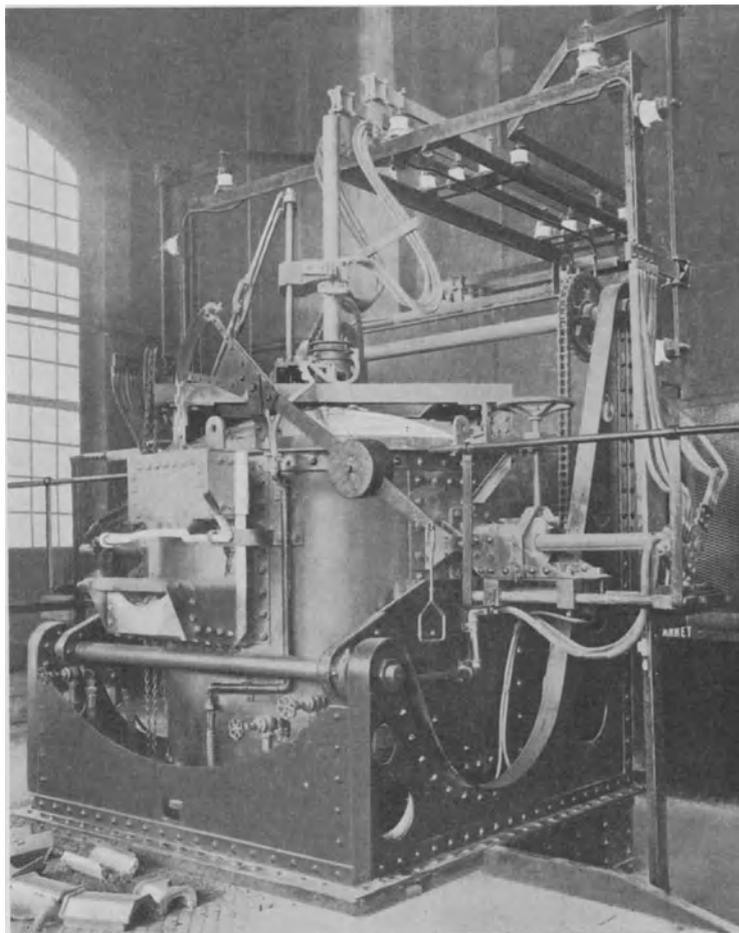


Abb. 52. Rennerfeldt-Ofen, neuere Bauart.

geringen Neigungswinkel in den Herd. Je nachdem Ein- oder Mehrphasenstrom zur Anwendung gelangte, waren zwei oder drei Elektroden vorgesehen. Meistens benutzte man Drehstrom und die drei zur Herdmitte gerichteten Elektroden bildeten einen Stern mit je  $120^\circ$  Strahlenwinkel.

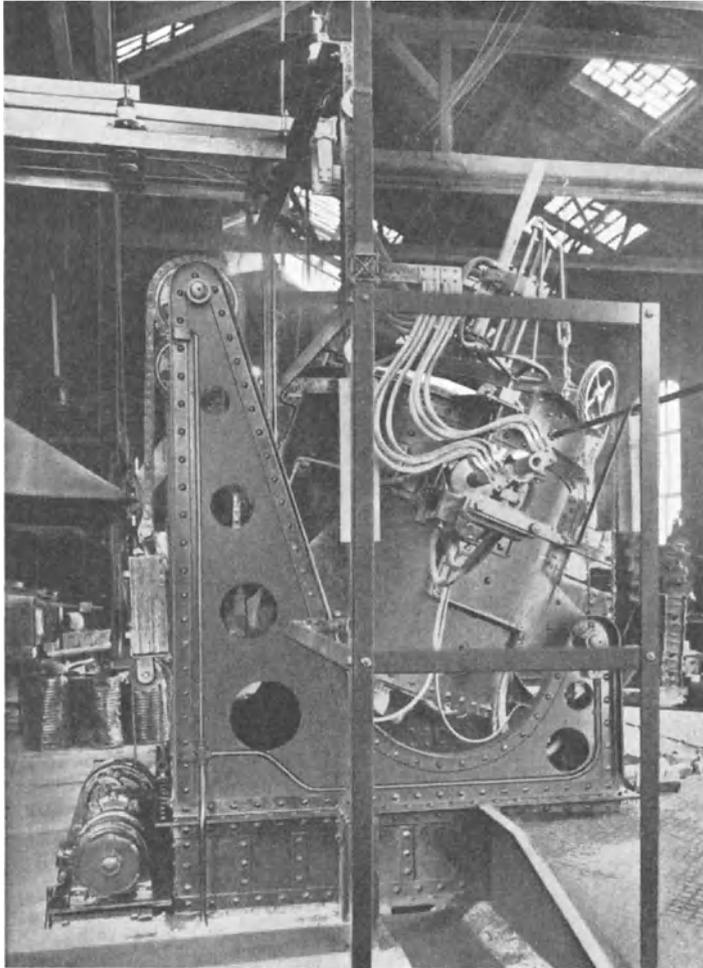


Abb. 53. Rennerfeldt-Ofen in Kippstellung.

Die Öfen werden größtenteils als Schmelzöfen in Stahlgießereien verwendet. Abb. 51 zeigt einen 3-t-Bonner-Ofen für Drehstrom. Eine weitere Abart der reinen Lichtbogenöfen stellt der Rennerfeldt-Ofen dar, der für Zweiphasen-Wechselstrom und für Drehstrom gebaut wird. Von den drei Elektroden liegen zwei auf einer Geraden, während die dritte dazu senkrecht steht. Durch diese Anordnung entsteht ein Lichtbogen, der abwärts gegen das Schmelzbad gerichtet ist. Er kann auch nötigenfalls dem Bade genähert werden, indem man die beiden horizontalen Elektroden etwas neigt. Die Neigung der Elektroden kann so weit vergrößert werden, daß der Lichtbogen zur Schmelze übergeht. Da der Strom dann von den Seitenelektroden durch die Schmelze zur Mittelelektrode fließt, hat man es nun mit einer kombinierten Lichtbogenwiderstandserhitzung zu tun. Bei hohen Spannungen um 150 V ist die Anwendung von Drehstrom nicht vorteilhaft, weil bei hohen Temperaturen die leitend werdende Ofenauskleidung Kurzschlüsse verursachen kann. Um aber trotzdem Drehstrom benutzen zu können, verwandelt ihn Ivar Rennerfeldt mittels Transformatoren in Scottschaltung in verketteten Zweiphasenstrom. Die Mittelelektrode wird in diesem Falle mit dem Vereinigungspunkt der Phasen verbunden. Der Ofen wird von der

Abwärts gegen das Schmelzbad gerichtet ist. Er kann auch nötigenfalls dem Bade genähert werden, indem man die beiden horizontalen Elektroden etwas neigt. Die Neigung der Elektroden kann so weit vergrößert werden, daß der Lichtbogen zur Schmelze übergeht. Da der Strom dann von den Seitenelektroden

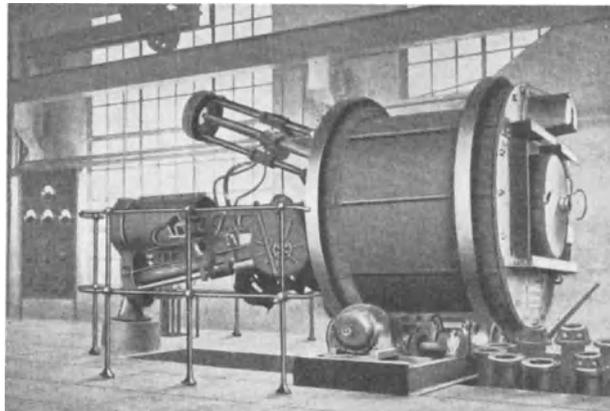


Abb. 54. 0,5-t-Rheinmetallofen.

Aktiebolaget Elektriska Ugnar (Stockholm) gebaut; ein solcher neuerer Konstruktion, kippbar um die Abstichschnauze ist in den Abb. 52 und 53 dargestellt. Der Ofen ruht auf einem Profileisengerüst. Der vordere Teil des Ofens ist durch Vermittlung einer reichlich berechneten Welle, der hintere Teil mittels Kette und Gegengewichten auf dem Gerüst befestigt. Der Ofen ist durch einen Bedienungsmotor elektrisch manövriert und mittels Druckknöpfen (an dem Vorderteil des Ofens) geregelt. Um das Kippen des Ofens zu begrenzen, sind zwei Grenzscharter an die Stützen des Gerüsts montiert, zwecks Unterbrechung der Kontakte des Manöverstroms des Motors, sobald der Ofen eine der Grenzstellungen erreicht. Von den Elektroden (gewöhnlich Graphit) gehen die vertikalen durch den Deckel, die horizontalen durch die Seitenwände. Der Lichtbogen entsteht durch das Annähern der horizontalen Elektroden an die vertikale. Die Entfernung der Elektroden voneinander ist ein ausgiebiges Mittel zur Regulierung der Stromstärke, welche entweder von Hand durch selbsttätige Regler erfolgt. Die Rheinischen Metallwerke und Maschinenfabrik „Rheinmetall“ (Düsseldorf) entwickelte einen Lichtbogenofen für Drehstrom, dessen Elektroden durch eine vertikale Ofenwand in den Herd ragten. Der zylindrische Ofen ist auf Rollen gelagert und rotiert um seine horizontale Achse, wodurch die Schmelze auch mit allen Teilen der Ofenzustellung in Berührung kommt, diese daher an keiner Stelle überhitzt werden kann. Die durch eine der beiden Vertikalwände eintretenden Elektroden stehen zueinander in spitzem Winkel, so daß der Lichtbogen in der Mitte des Herdes entsteht. In Abb. 54 ist der Ofen während des Betriebes aufgenommen, die Gießschnauze befindet sich gerade oben.

### C. Kombinierte Widerstandlichtbogenöfen.

Die überwiegende Mehrzahl aller elektrischen Schmelzöfen gehört dieser Type an, in der man zwei Gruppen unterscheiden kann. Bei der einen bildet die Beschickung einen Pol, der Strom fließt von einer Elektrode, die meist beweglich angeordnet ist, durch Lichtbogen und Beschickung zu einer unbeweglichen, gewöhnlich im Ofenboden befindlichen Elektrode. Bei der anderen Gruppe geht der Strom von der einen Elektrode durch den Lichtbogen, durch die Beschickung, dann durch den zweiten Lichtbogen zur zweiten Elektrode. Beide Elektroden sind bei diesen „Serienöfen“ beweglich.

Die Bodenelektrode, besonders aber der dazugehörige Stromanschluß bildete, namentlich in den Anfängen des Elektroofenbaues, die empfindlichste Stelle des Ofens. Die ersten Öfen waren durchwegs Tiegelöfen. Nach Beendigung des Schmelzens zog man die bewegliche Elektrode aus dem Herd, klemmte den zweiten Pol vom Tiegel ab, entfernte diesen und setzte einen frischen Tiegel ein. Beim Wilson-Ofen nach Abb. 55, in welchem Kalziumkarbid erzeugt wurde, löste man zu diesem Zwecke die an einem Fortsatze des Tiegels angreifende Zangenklemme. Beim alten Nürnberger Ofen der Abb. 56 ist der Tiegelanschluß noch komplizierter durchgeführt. Der Tiegel *T*, der einen Aufsatz *A* trug, war mit 4 kegelförmigen Hülsen *K* aus Kupfer versehen, in die 4 Kupferkegel hineinpaßten. Die Kegel wurden durch ein Hebelsystem gehoben oder gesenkt und dadurch der Tiegel an- oder abgeschaltet. Es gelang aber nur durch kurze Zeit, diese Tiegelanschlüsse rein zu halten, denn sobald Staub oder Deformationen den Kontakt verschlechterten, traten Lichtbögen auf, die schließlich die Anschlüsse zerstörten. Als man bei den Karbidöfen vom Blockbetrieb mit auswechselbaren Tiegeln zum kontinuierlichen

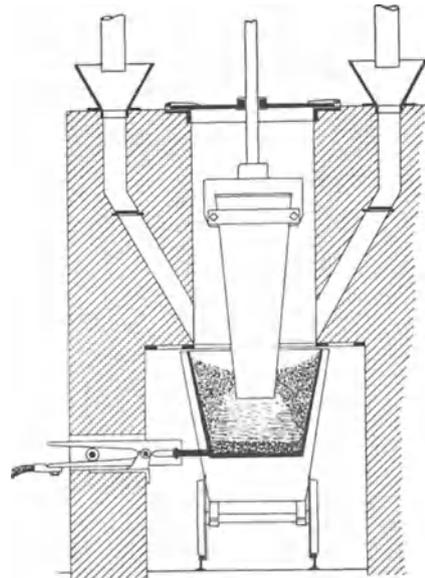


Abb. 55. Wilson-Ofen.

Abstichbetrieb übergang, entfiel der lösbare Bodenanschluß. Die gewöhnlich aus mehreren Böden zusammengesetzte Bodenelektrode wurde durch eine Schicht Stampfmasse

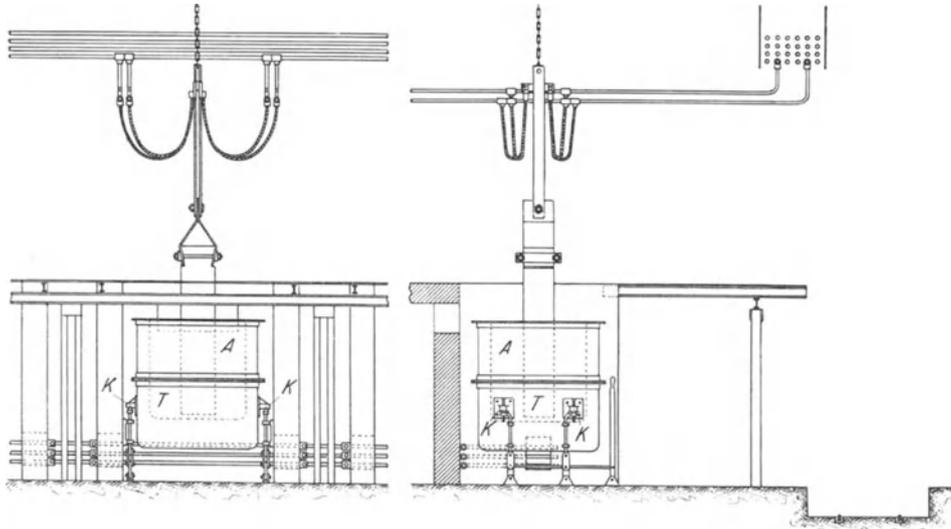


Abb. 56. Alter Nürnberger Ofen.

mit einer gußeisernen Grundplatte verbunden und die Stromanklemmung erfolgte an der Grundplatte. In Abb. 57 des Rathenau-Ofens der AEG. sieht man diese Ausführung.

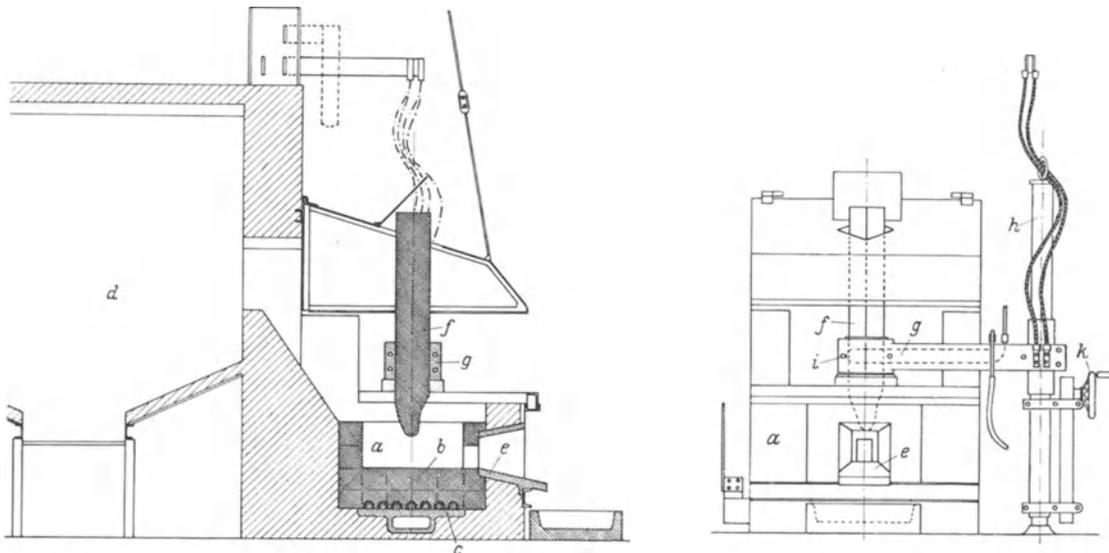


Abb. 57. Rathenau-Ofen.

Der aus Kohleblöcken *b* gebildete Boden des Herdes *a* liegt auf einer gußeisernen, wassergekühlten Grundplatte *c*. Im Grund- und Aufriß ist auch der Anschluß der Stromleitungen an einen Lappen der Grundplatte ersichtlich. Infolge der Wärmedehnungen der verschiedenen Baumaterialien entstanden bald Undichtigkeiten zwischen der Grundplatte und dem Ofenmauerwerk, so daß die eindringende Luft zur heißen Bodenelektrode gelangte, die allmählich abbrannte. Erst in letzter Zeit brachten

Konstruktionen eine befriedigende Lösung der Bodenanklemmung. Es sind dies die auf S. 188 eingehend beschriebenen Einphasenöfen des Franzosen Paul Miguet.

Zu den Öfen mit Bodenelektroden gehören auch die herdbeheizten Öfen für metallurgische Zwecke. Alle Elektrodenöfen dieser Betriebe können, insofern sie nicht reine Lichtbogenöfen sind, in eine der beiden Gruppen mit vereinigter Widerstand-Lichtbogen-erhitzung eingereiht werden, weil das Metallbad bzw. die Schlackendecke, als Widerstand im Stromkreis eingeschaltet ist. Die herdbeheizten Öfen, deren wichtigste Typen in Abb. 58 schematisch veranschaulicht sind, verlieren allmählich an Bedeutung. Moderne Öfen besitzen zwar die Vorzüge dieser Bauart, vermeiden aber den Nachteil der Bodenelektrode. Der Herdboden der metallurgischen Öfen besteht aus nichtleitenden Materialien, so daß besondere Elektroden, meistens aus Eisen oder Kupfer, eingelegt werden müssen. Bei genügend hoher Temperatur während des Betriebes wird auch die Herdzustellung leitend; davon macht man Gebrauch, indem man auf die Berührung des Einsatzes mit den Bodenelektroden verzichtet und diese durch eine Schichte feuerfester Materialien schützt.

Der Girod-Ofen (1), der hauptsächlich für Einphasen-Wechselstrom Verwendung fand, besaß eine oder mehrere gleichpolige bewegliche Elektroden. Der andere Pol war mit einer Anzahl Bodenelektroden (etwa 6—20) verbunden. Als Bodenelektroden dienten Eisenzylinder, deren obere Fläche bis zur Herdsohle reichte und deren unterer Teil wassergekühlt war. Beim Keller-Ofen (2) verwendete man als Bodenelektrode

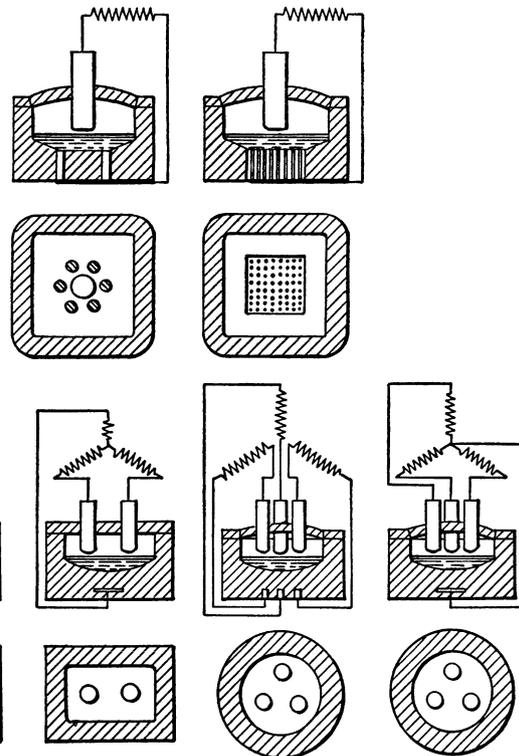


Abb. 58. Typen herdbeheizter Öfen (nach Sisko-Kriz).

statt der Eisenzylinder eine große Anzahl dünner Eisenstäbe auf gemeinsamer Grundplatte. Sowohl beim Girod-Ofen als auch beim Keller-Ofen, die beide übrigens in dieser Form nicht gebaut werden, müssen die Bodenelektroden bis zur Herdsohle reichen, da sonst mit einphasigem Wechselstrom beim Anfahren des Ofens kein Lichtbogen entstehen könnte. Während des Betriebes ist infolge der hohen Temperatur im Herd die Gefahr einer Stromunterbrechung nicht groß. Beim Anfahren jedoch können die Bodenelektroden durch Schlackenreste oder abgebröckelte Teile der Zustellung überdeckt werden, und dann ergeben sich Schwierigkeiten. Aus diesem Grunde zieht man Öfen mit mehrphasigem Wechselstrom vor, da bei diesen, unabhängig von den Bodenelektroden, zwischen den beweglichen Elektroden ein Lichtbogen entstehen kann. Der Electro-Metals-Ofen (3) für zweiphasigen Wechselstrom ist ein Beispiel hierfür. Die aus Kohle oder Kupferplatten bestehende Bodenelektrode ist in der Herdzustellung eingebettet und mit dem Knotenpunkt der beiden Phasen verbunden. Der Lichtbogen kann sich also zwischen den beiden beweglichen Elektroden bilden, auch wenn die Zustellung kalt und nicht leitend ist. Erst nachdem der Herdboden heiß und genügend leitfähig geworden ist, fließt der Strom auch durch die Bodenelektrode und zwar  $\sqrt{2}$  mal soviel als durch jede bewegliche Elektrode. Der Greaves-Etchells-Ofen (4) ist für Drehstrom gebaut, zwei Phasen sind mit den beiden beweglichen Elektroden verbunden, die dritte mit einer Bodenelektrode, die meistens

aus einer Kupferplatte besteht, welche zuerst mit einer leitenden Teer-Kohle-Mischung und dann mit einer üblichen Zustellungsschicht überstampft ist. Bei großen Energiemengen erhält jede Phase mehrere Elektroden. Ein Ofen dieser Bauart für 60 t Stahl,

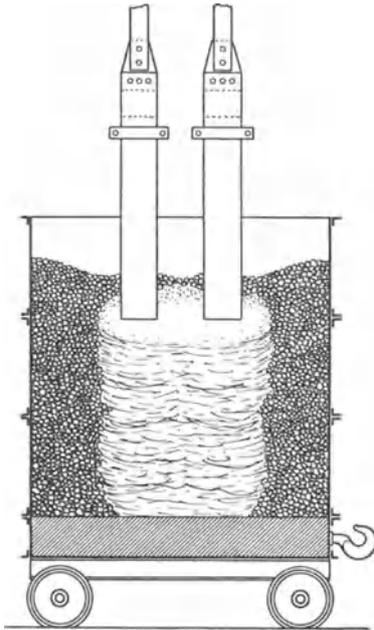


Abb. 59. Serienofen.

der größte bisher gebaute Stahlofen, ist mit acht beweglichen Elektroden, je vier für eine Phase, ausgerüstet. Der Nathusius-Ofen (5) besitzt drei bewegliche Elektroden und in der Zustellung des Bodens drei bzw. sechs eiserne Elektroden. Jede Phase des Drehstromtransformators ist mit einem Pol an eine bewegliche, mit dem anderen Pol an eine bzw. zwei Bodenelektroden angeschlossen. Dadurch erreicht man, daß der Strom sowohl zwischen den beweglichen Elektroden als auch zwischen den Bodenelektroden und überdies noch zwischen den beweglichen Elektroden und den Bodenelektroden fließt. Beim Fiat-Ofen (6) ist endlich die kupferne Bodenelektrode nur mehr mit dem Sternpunkt des Transformators verbunden, so daß im Boden bloß die Ausgleichströme wirksam sind, die bei verschiedener Belastung der einzelnen Phasen auftreten. Hiermit ist schon der Übergang zu den Öfen ohne Bodenelektroden gegeben.

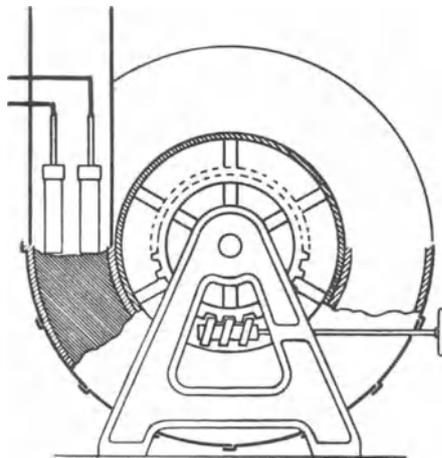


Abb. 60. Horry-Ofen.

In den Öfen der chemischen Industrie, namentlich aber bei der Karbiderzeugung, bereite die Bodenanklemmung und die hohe Spannung im Lichtbogen des Einphasenofens Betriebsschwierigkeiten. Der „Serienofen“ beseitigte diese Nachteile, benötigte aber statt einer beweglichen Elektrode deren zwei. Der Bodenanschluß entfällt, und die Lichtbogen Spannung wird auf die Hälfte herabgesetzt. Das Schema des Serienofens zeigt Abb. 59. Zu Beginn des Jahrhunderts findet man diese Ofentype sowohl in der Karbidindustrie als auch in der Elektrometallurgie des Eisens. Hier soll auch der in Amerika lange zur Karbiderzeugung in Verwendung gestandene Horry-Ofen, wegen seiner originellen Bauart erwähnt werden. Er war ein Blockofen und besaß einen sozusagen „endlosen Tiegel“. Als Tiegel diente ein Radkranz, dessen äußere Zylinderfläche aus abnehmbaren Platten bestand. Der Raddurchmesser dieses Ofens, der in Abb. 60 dargestellt ist, betrug etwa 3500 mm, die Breite und Tiefe je 1000 mm. Da der Ofen langsam rotierte (er vollführte eine Umdrehung in 72 Stunden), entfernte sich das erschmolzene Karbid allmählich von den Elektroden und kühlte aus. Der Drehung entsprechend schraubte man auf der Elektrodenseite Platten an und warf in den entstandenen Herd frisches Beschickungsmaterial ein, während auf der entgegengesetzten Radhälfte die Platten abgenommen wurden und das inzwischen abgekühlte Karbid, das von Beschickungsresten umgeben war, ausgebrochen wurde. Um die gleiche Zeit löste Héroult das Problem der Eisenraffination im elektrischen Ofen. Auch er verwendete einen Serienofen. Den ersten in Deutschland aufgestellten Ofen dieser Art baute die Demag-Elektrostahl G. m. b. H. (Düsseldorf) für das Stahlwerk R. Lindenberg (Remscheid). Abb. 61 zeigt diese Anlage mit zwei Héroult-Öfen; der erste stammt aus dem Jahre 1906. Die rechteckige Wanne besitzt einen zylindrischen Boden und kann wiegenartig gekippt werden. Auf der Vorderseite bemerkt man die Ausgußöffnung, die hier auch zur Chargierung benutzt wird,

weil man mit flüssigem Einsatz arbeitet, der zweckmäßig zwischen den beiden Elektroden eingefüllt wird. Die eigentliche Chargiertür befindet sich an der Stirnseite der Wanne. Durch den abnehmbaren Deckel ragen die beiden quadratischen Elektroden in den Herd. Ihre Bewegung erfolgt noch von Hand aus. Es sei hier ausdrücklich betont, daß der Erfolg des Héroult-Ofens nicht auf seine konstruktive Durchbildung zurückzuführen ist, sondern auf die Verwendung des Serienofens und einer das Bad schützenden Schlackenschichte, wodurch die Berührung der Kohlenelektroden mit dem Bade vermieden wurde.

Die großen Schmelzöfen der Praxis verwenden fast durchwegs Drehstrom. Eine Ausnahme bilden die Mignet-Öfen, die Einphasenöfen sind, doch werden davon je zwei mittels Scottschaltung an das Drehstromnetz angeschlossen. Bei den Großöfen trifft auch die Bezeichnung Lichtbogen-Widerstandsöfen nicht immer ganz zu. Der Anteil der Lichtbogenerhitzung ist gegenüber der Widerstandserhitzung mitunter gering, wie sich dies aus Oszillogrammen, also aus der Form von Strom- und Spannungskurven ergibt.

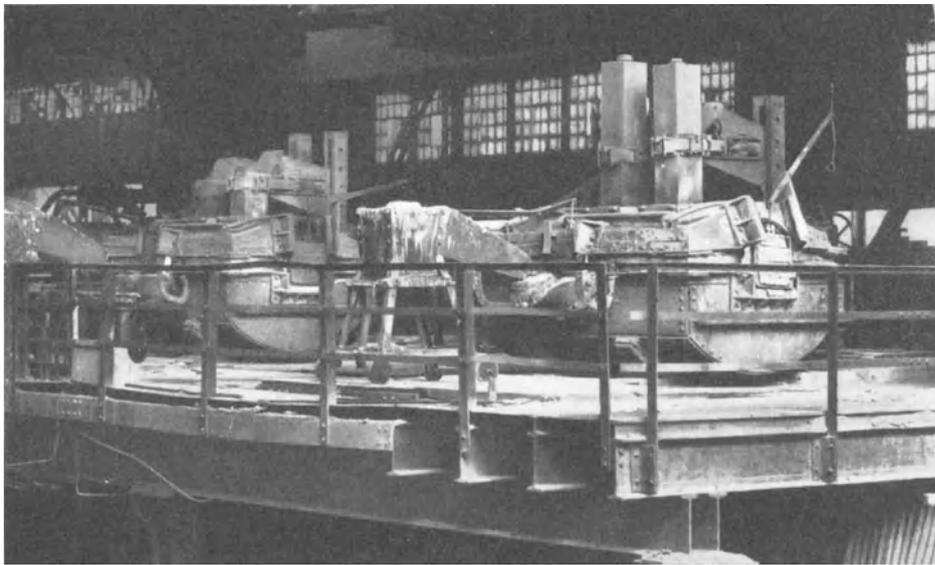


Abb. 61. Die beiden ersten Héroult-Öfen in Deutschland, gebaut von Demag-Elektrostahl G. m. b. H.

In der Beschreibung einzelner Öfen sollen hauptsächlich große Einheiten Berücksichtigung finden, also weniger Typenöfen, wie sie von den Konstruktionsfirmen für bestimmte Leistungen normalisiert werden. Es herrscht natürlich bei jeder Ofenbauart das Bestreben, für geeignete Leistungsintervalle Normaltypen zu entwickeln. Dies ist schon mit Rücksicht auf die Herstellungskosten der Bestandteile notwendig, die nicht für jede Anlage neu entworfen werden können. Man weicht auch nur ungern von bewährten Ausführungsformen ab, so daß die elektrischen Großöfen im allgemeinen keine so großen Unterschiede in ihren Konstruktionselementen aufweisen, als man auf Grund der 30jährigen Entwicklungszeit erwarten sollte. Wirklich umwälzende Neuerungen auf dem Gebiete des Ofenbaues sind selten. Daher ist es notwendig, die einzelnen Bestandteile des Elektroofens kennenzulernen, und in der Folge sollen diese in ihren wichtigsten Ausführungsformen beschrieben werden.

## Herdform und Ofenkörper.

Der Herd ist jener Teil des Ofens, in welchem der elektrische Strom seine Heizwirkung ausübt. Die bei dieser Erhitzungsart auftretenden hohen Temperaturen beschränken sich bei zweckmäßiger Anordnung auf Gebiete in der Nähe der Elektroden. Dort, wo der Lichtbogen jedoch frei brennt, liegen die Verhältnisse anders; beim Niederschmelzen von

Eisenschrott im Stahlofen wird durch Strahlung der ganze Herd hoch erhitzt, wodurch namentlich das Gewölbe des Ofendeckels leidet. Bei den großen Schmelzöfen, etwa Öfen für Ferrolegierungen oder für Karbid, wirkt der Heizstrom auf die Beschickung um die Elektrode. Die weiter abseits liegende Beschickung bildet in diesem Falle das Ofenfutter, während der Ofenmauerung die Aufgabe zufällt, die mechanische Festigkeit für den Beschickungsherd zu geben. Trotzdem ist die Beanspruchung des Ofenkörpers durch Wärmeinflüsse beträchtlich; daher muß bei seinem Bau mit besonderer Sorgfalt vorgegangen werden.

Den mechanischen Beanspruchungen bietet bekanntlich die kreisrunde Form den meisten Widerstand. Man war daher seit Beginn des Ofenbaues bestrebt, dem Ofen einen runden Grundriß zu geben. Die Ofenform hängt aber von der Gestalt der Elektroden ab. Bei Steigerung der zugeführten elektrischen Energie vergrößerte man den Elektrodenquerschnitt, indem man aus prismatischen Einzelelektroden Pakete bildete. Diese Elektrodenform ermöglichte eine bequeme Fassung und schien beim Serienofen und später beim Drehstromofen besonders zweckmäßig. Die Anordnung prismatischer Elektrodenpakete nebeneinander im Ofen führte zum rechteckigen Grundriß, der aber die geringste mechanische Festigkeit aufweist. Die ebenen Ofenwandungen bedürfen sorgfältigster Versteifung, um den mechanischen Beanspruchungen standzuhalten. Abb. 62 zeigt den Körper eines rechteckigen offenen Karbidofens für 3500 kW Drehstrom. Der Ofenboden besteht aus zwei Lagen Elektrodenkohlen *a*. Man verwendet hierzu meist Ausschußelektroden und Elektrodenstümpfe und verlegt sie auf eine Schicht *b* aus Stampfmasse. Diese ist ein Gemisch aus Elektrodenmehl und Teer, das warm aufgestampft wird. Mit der gleichen Masse werden die Fugen zwischen den einzelnen Elektrodenkohlen des Bodens ausgefüllt und auch über diesen trägt man eine dünne Schicht *c* auf, um eine glatte und dichte Herdsohle zu erhalten. Als Träger für den Ofenboden dient eine gußeiserne Bodenplatte *d*. Sie wird in Anbetracht ihrer Größe aus Teilplatten zusammengesetzt, die miteinander verschraubt sind. Die einzelnen Platten macht man mindestens 50 mm stark und versieht sie mit entsprechend verteilten Versteifungsrippen. Die Stoßkanten der Platten müssen bearbeitet sein, um Fugen zu vermeiden, durch welche Luft eindringen könnte. Die Grundplatte soll jedoch derart verlegt sein, daß sie ohne Schwierigkeiten kontrolliert werden kann. Dies ist notwendig, weil bei Schadhafwerden des Bodens die Schmelze bis auf die Grundplatte durchsickert, diese zum Glühen und schließlich zum Durchschmelzen bringt. Ofendurchbrüche dieser Art sind zu vermeiden, wenn für leichte Kontrolle und genügende Kühlung der Grundplatte gesorgt ist. Man verlegt schon aus Festigkeitsgründen die Grundplatte nicht direkt auf das Fundament, sondern auf Walzprofile *e*. Das Ofenfundament *f* bildet man sodann als Pfeiler aus, und zwar sieht man meistens zwei Rand- und einen Mittelpfeiler vor. Dadurch entstehen unter dem Ofen Gänge, die der Kontrolle des Ofenbodens dienen und durch die kühlende Luft streichen kann. Die Grundplatte trägt aber auch das Mauerwerk *g* des Ofens, das, je nach seiner Größe, 300—600 mm stark gehalten wird. Es ist beim Entwurf des Ofengrundrisses darauf zu achten, daß die Wände 800—1000 mm von den Elektroden entfernt angeordnet werden, also außerhalb der Zone höchster Temperatur. Die Ofenmauerung umgibt man mit einem Mantel *h* aus 6—10 mm starkem Eisenblech und stützt sie durch kräftige Träger *i*. Das untere Ende dieser Vertikalträger läßt man gewöhnlich in Ausnehmungen des Betonfundamentes ein und macht sie dort mittels Holzkeilen fest. Die oberen Enden verbindet man durch Horizontalträger *k*. Meistens werden die Horizontalträger der Lang- und Schmalseiten miteinander verbunden und so kräftig gewählt, daß der entstandene Gürtel für die Stützung der Vertikalprofile hinreicht. In der vorliegenden Ausführung dienen die Horizontalträger bloß zur Verbindung der Enden der Vertikalprofile. Ihre Abstützung erfolgt jedoch gegen das Fundament mittels schrägstehender Pfeiler *l* aus Eisenkonstruktion. Diese Lösung der Abstützung beansprucht aber sehr viel Grundfläche und macht namentlich die Abstichöffnungen schwer zugänglich. Dies

ist auch aus der Abb. 63 ersichtlich, die den Ofenkörper in axonometrischer Darstellung veranschaulicht. Zur Entfernung der Schmelze aus dem Ofen sind in den Wandungen Abstichöffnungen *m* (Abb. 62) vorgesehen. Bei kleineren Öfen genügt die Anbringung

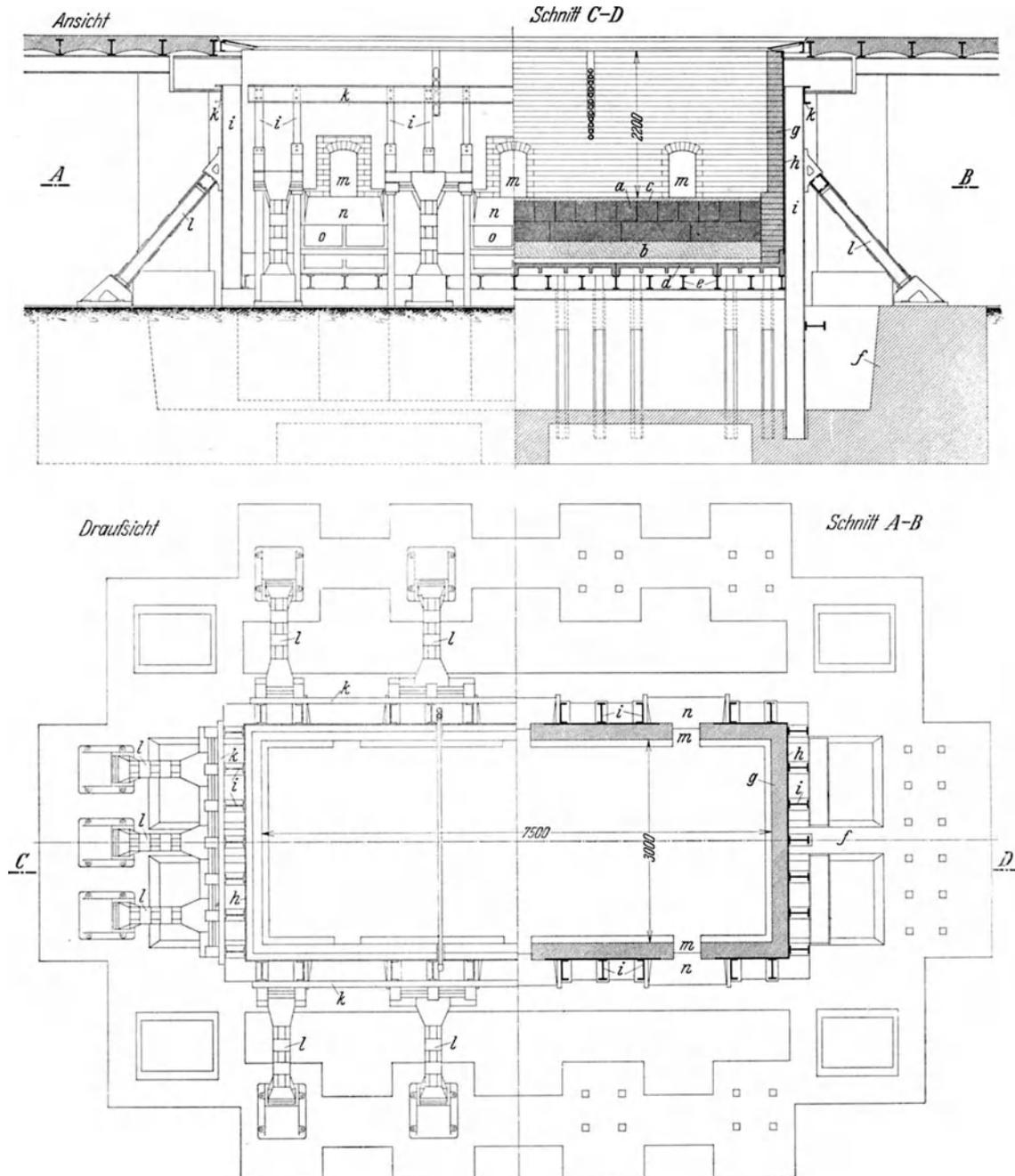


Abb. 62. Rechteckiger Körper eines offenen Ofens für 3500 kW-Drehstrom.

von Abstichöffnungen in bloß einer der Stirnwände, bei größeren Einheiten sind mit Rücksicht auf die Herdbreite Abstichöffnungen in beiden Stirnwänden zweckmäßig. Die Abstichöffnungen ordnet man derart an, daß sie bei Elektrodenpaketen in der Längsrichtung des Paketes liegen, also derart, daß die Öffnungen dem Sumpfe unter den Elek-

troden am nächsten gelegen sind. Um Abstichöffnungen zu sparen, welche die Ofenwandungen schwächen, hat man bei Drehstromöfen mit drei Elektroden versucht, die Abstichöffnungen zwischen den Phasen anzubringen, doch ist man von dieser Anordnung alsbald wieder abgekommen, da die Abstiche Schwierigkeiten verursachten. Die ausfließende Schmelze leitet man über kräftige gußeiserne Schnauzen *n*, die mitunter wassergekühlt ausgeführt werden. Die Oberkante der Abstichschnauze liegt in der Höhe der Ofensohle, die Unterkante versieht man mit einem Abtropfrand. Seitliche Leitflächen verhindern ein Verspritzen der Schmelze bei Verlegung der Abstichöffnung durch

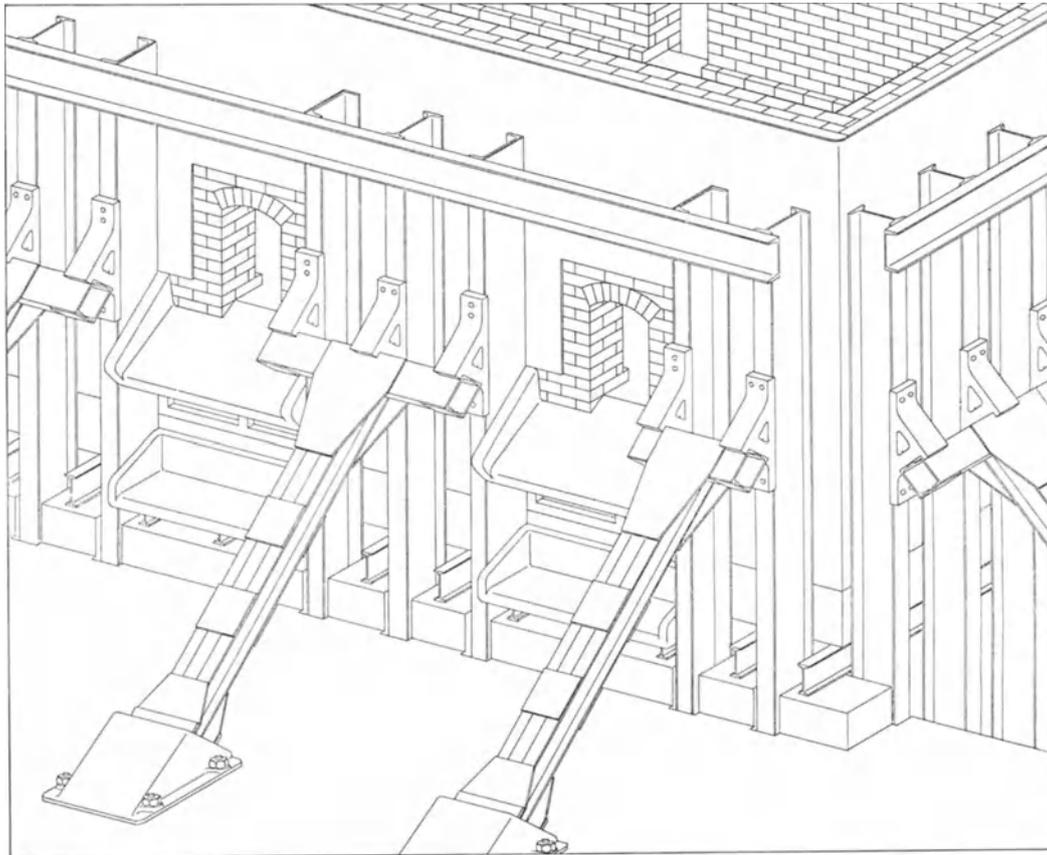


Abb. 63. Verspannung eines rechteckigen Ofenkörpers mittels Schrägstützen.

Schlackenteile und dergleichen. Alle Konstruktionsteile des Ofens in der Nähe der Abstichöffnung sind der Hitze der ausfließenden Schmelze ausgesetzt und müssen dementsprechend kräftig gehalten oder entsprechend geschützt werden. Die Vertikalträger der Ofenverspannung sind genügend weit von den Abstichöffnungen auszuteilen oder mit gußeisernen Schutzstücken zu versehen. Als Verkleidung für die Mauerung unter den Abstichschnauzen genügt der gewöhnliche Blechmantel nicht mehr, da diese Teile außer der Hitze des Abstiches noch mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, etwa durch unvorsichtige Führung der Abstichwagen und Abstichwerkzeuge. Man sieht daher dort gußeiserne Platten *o* vor, wie sie bei Ofenkonstruktionen verwendet werden, um den unteren Teil des Ofens ganz zu umschließen. Einen solchen Ofenpanzer *h* sieht man beispielsweise in Abb.183 (S.194). Dieser 2200-kW-Ofen ist außerdem noch interessant, einesteils, weil er eine Ausführungsform eines Drehstromofens mit „unterer Anklemmung“ darstellt, anderenteils, weil es sich hier um einen „gedeckten“ Ofen handelt. Beim Ofen mit unterer Anklemmung übernimmt der Boden die Rolle der dritten Elektrode, so daß

nur zwei bewegliche Elektroden vorzusehen sind. Die Stromzufuhr für den Boden gestaltet sich sehr schwierig. Hier erfolgt die Anklemmung der Stromschienen  $q$  an die Grundplatte, die entsprechende Lappen  $r$  erhält. Die Verbindung der Grundplatte  $f$  mit der Stampfmasse  $B$  der Bodenelektrode muß besonders sorgfältig durchgeführt werden. Um einen guten Kontakt zu sichern, gießt man oft schmiedeeiserne Bügel in die Grundplatte ein, die in die Stampfschicht ragen. Außerdem muß der stromführende Elektrodenboden vor Lufteintritt geschützt sein, da er sonst besonders leicht ausbrennt. Bei diesen und ähnlichen Konstruktionen bildet die untere Anklemmung stets die schwächste Stelle des Ofens. Während beim offenen Ofen die Abgase frei entweichen, sollen diese beim „gedeckten“ und beim „geschlossenen“ Ofen gesammelt und einer Verwertung zugeführt werden. Der gedeckte Ofen wird zum Unterschied vom geschlossenen Ofen durch die Decke nicht gasdicht geschlossen. Die große Spannweite der Decke und die hohe Temperatur, der sie ausgesetzt ist, machen eine eigene Bauart notwendig. Die Hautträger  $k$ , Barrieren genannt, bestehen aus eisernen wasserdurchflossenen Rohren, die durch Formsteine gegen direkte Wärmeeinwirkung geschützt sind. Um ein entsprechendes Trägheitsmoment zu erhalten, sind zwei übereinanderliegende Rohre mit Laschen verschweißt. Die Barrieren ordnet man an beiden Seiten der Elektrodenpakete an, doch so, daß genügend Raum zur Aufgabe der Beschickung freibleibt. Die Beschickung füllt diese Spalten aus und böschet sich um die Elektroden an. Dadurch erreicht man sowohl einen genügend dichten Abschluß der Öffnung um die Elektrode als auch freie Sammelräume für die Ofengase. Abb. 64 zeigt das Schema eines „offenen“ und Abb. 65 eines „gedeckten“ Ofens.

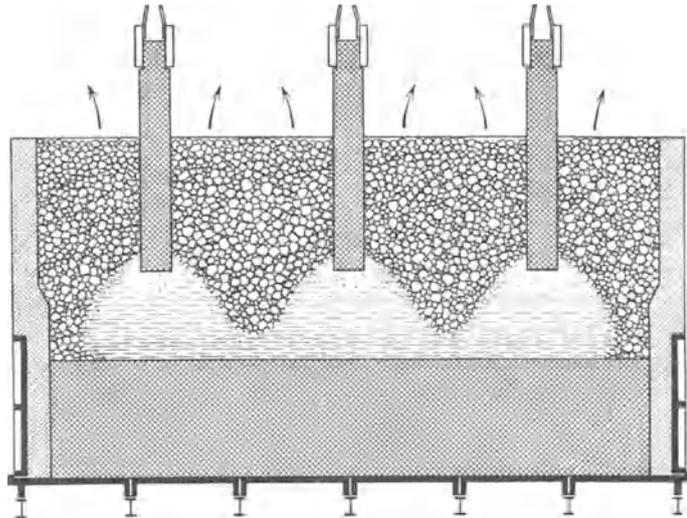


Abb. 64. Schema eines offenen Drehstromofens.

Im Schutze der Barrieren  $a$  liegen die Abzugsrohre  $d$  für die Abgase. Zur Beobachtung der Beschickung sind für die „Stochung“, das ist ein Durchstoßen der Beschickung mittels Stochstangen zum Zwecke, entstandene Brücken zu zerstören und Gassäcke aufzureißen, in der Decke verschließbare Öffnungen  $c$  vorgesehen. In Abb. 183 (S. 194) sind die „Schlitze“ genannten Öffnungen mit  $m$ , die Gasabzugsöffnungen mit  $n$  bezeichnet. Das Gasabzugsrohr für den 2200-kW-Ofen ist aus Abb. 66 zu entnehmen. Die Stützen  $b$  sind mit den Abzugs-

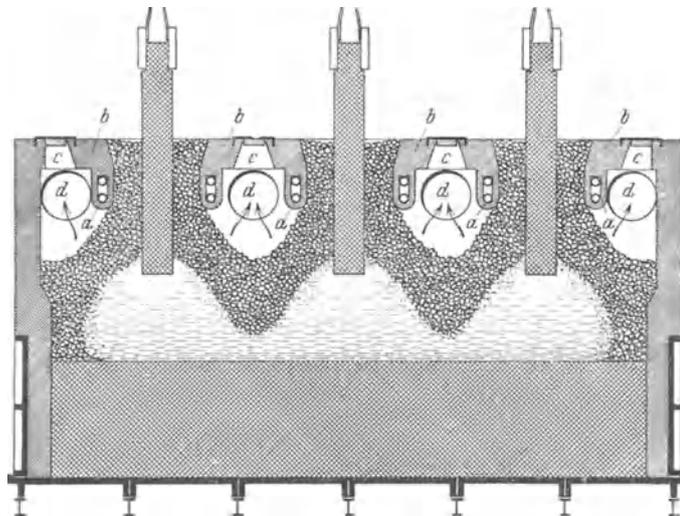


Abb. 65. Schema eines gedeckten Drehstromofens.

öffnungen des Ofens verbunden und führen zum Hauptrohr *a*. Sowohl das Hauptrohr als auch die Stutzen werden mit feuerfestem Material ausgekleidet. Das Fallrohr *f* verbindet das Hauptabzugsrohr mit einem Gassammelkanal. Um Ansammlungen von Flugstaub, Beschickungsteilen und dergleichen in den Verbindungsstutzen mit dem Ofen und im Abzugskanal beobachten zu können und Verstopfungen derselben vorzubeugen, bringt man Beobachtungsöffnungen an. In den Deckeln *d* der Stutzen *c* und im Deckel *e* des Hauptrohres befinden sich daher Schiebetüren.

Bei den gedeckten Öfen, die, wie bereits erwähnt, nicht dicht schließen, geht stets ein Teil der Gase verloren, weil man den Druck im Ofen erhöhen und derart regeln muß, daß nur kleine Flammen über der Beschickung brennen. Dieser geringe Überdruck muß eingehalten werden, denn eine weitere Erhöhung würde mit großen Gasverlusten verbunden sein, auch würde das verbrennende Gas unmittelbar an der Elektrode und deren

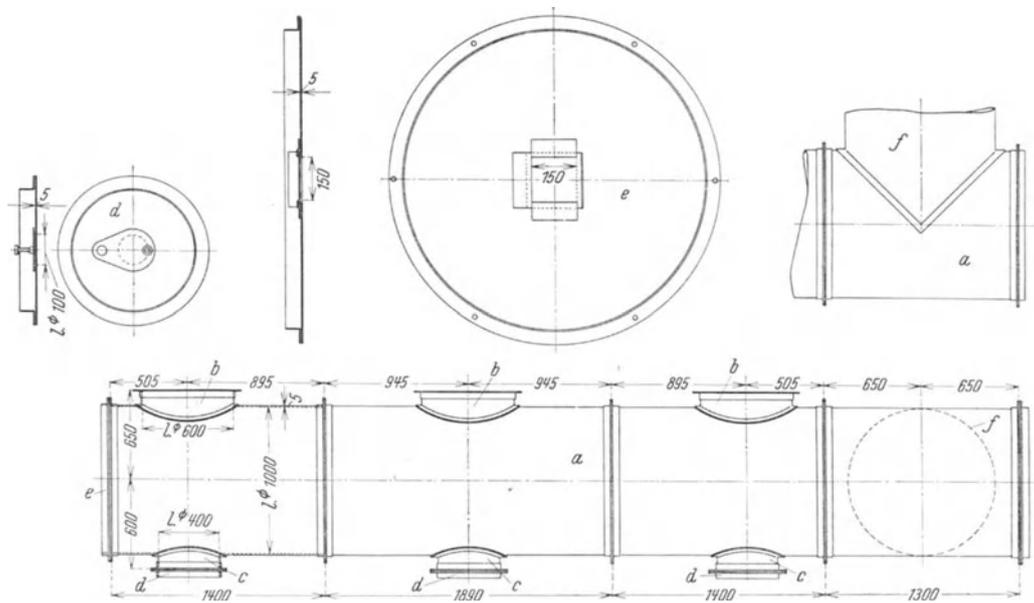


Abb. 66. Gasabzugsrohr für den gedeckten 2200 kW-Drehstromofen nach Abb. 183.

Fassung unzulässig hohe Temperaturen erzeugen. Tritt aber im Ofen ein Unterdruck auf, so dringt die Außenluft längs der Elektrode in den Ofen. Die glühenden Teile der Elektrode brennen ab und erzeugen Einschnürungen, die zu Elektrodenbrüchen Veranlassung geben. Außerdem entstehen Gasgemische, die schwere Explosionen verursachen können. Man war daher bestrebt, den Elektroofen hermetisch zu schließen und solche Konstruktionen bezeichnet man als „geschlossene“ Öfen. Ein Ofen dieser Type ist in Abb. 185 (S. 196) wiedergegeben und wird dort näher beschrieben.

Die Öfen mit rechteckigem Grundriß bedürfen nach dem vorher Gesagten besonders kräftiger und daher kostspieliger Versteifungen, um dem „Wachsen“ des Ofens entgegenzuwirken. Außerdem entstehen in den Ecken des Herdes leicht Ablagerungen von Beschickung und Schlacken, die schwer zu entfernen sind. Aus diesen Gründen ging man zum Bau elliptischer Öfen über. Diese Ofenform ermöglicht außer einer einfacheren Versteifung und Vermeidung toter Räume, eine günstigere Elektrodenstellung bei den Drehstromöfen mit drei Elektrodenpaketen. Diese waren bisher in einer Reihe angeordnet, wodurch sich verschiedene Beanspruchungen der drei Phasen ergeben. Um den Unterschied zwischen „lebhafter“ und „toter“ Phase zu verringern, verschiebt man das mittlere Elektrodenpaket aus der Reihe und erhält so ein gleichschenkeliges Dreieck. Die ideale Anordnung wäre natürlich das gleichseitige Dreieck, doch war diese bei den diskonti-

nuierlichen Elektroden, mit Rücksicht auf die Aufhängung, Verfahrbarkeit usw. nicht durchführbar. Man hat auch im rechteckigen Ofen vereinzelt die Elektrodenpakete aus der Reihe gerückt, doch müßte der Ofen entsprechend breit gebaut sein, weil sonst die Elektroden den Wänden zu nahe kommen. Der elliptische Ofen hingegen paßt sich der Dreieckanordnung besser an. Der in Abb. 67 gezeigte Ofen für 10000 kW Drehstrom ist allerdings bereits für runde Dauerelektroden entworfen. Hier wurde auf die übliche gußeiserne Grundplatte ganz verzichtet, weil die günstige Versteifungsmöglichkeit ein unzulässiges Wachsen des Ofens und damit Lockerungen des Bodengefüges ausschließt. Allerdings ist der Boden bei dieser Ausführung etwas stärker gehalten. An Stelle der

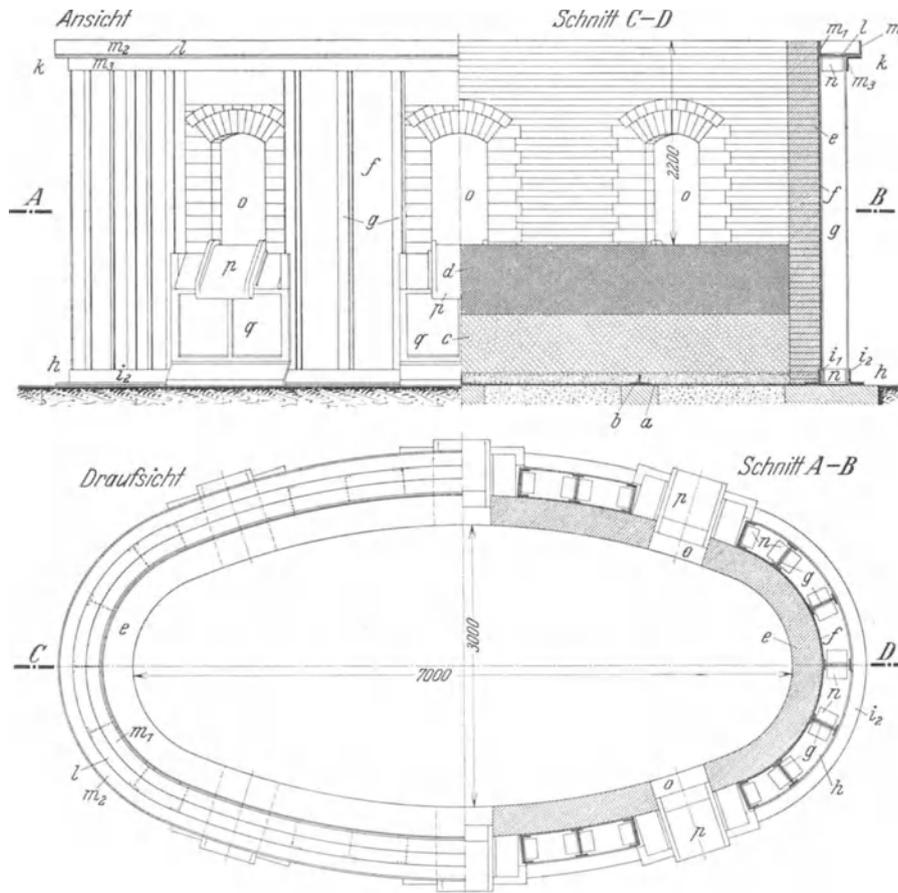


Abb. 67. Elliptischer Körper eines offenen Ofens für 1000—3000 kW Drehstrom.

Grundplatte tritt hier eine 10 mm starke Blechplatte  $a$ , die durch Winkel  $b$  entsprechend versteift ist. Diese Bodenplatte liegt direkt auf dem Ofenfundament auf, erhält also keine Kühlung durch Schächte. Der Boden selbst besteht aus einer Stampfschichte  $c$ , auf der bloß eine Lage Kohleblöcke  $d$  liegt. Diese Formkohlen sind aber eigens für den Boden hergestellt und ihre Stoßflächen sorgfältig geschliffen, so daß der zusammengesetzte Boden praktisch keine Fugen aufweist. Das Mauerwerk  $e$  erhält einen Mantel  $f$  aus 7 mm starkem Blech, der durch Vertikalträger  $g$  versteift ist. An Stelle der Horizontalträger des ebenwandigen Ofens treten nun zwei Gürtel. Der untere Gürtel  $h$  besteht aus dem Randteile der Bodenplatte und den beiden aufgenieteten Winkeln  $i_1$  und  $i_2$ . Der obere Gürtel  $k$  ist aus dem Blech  $l$  und den drei Winkeln  $m_{1-3}$  zusammengesetzt. Überdies sind die Vertikalträger durch Laschen  $n$  sowohl mit dem oberen als auch mit dem unteren Gürtel fest verbunden. Die sonstige Armierung gleicht jener des rechteckigen Ofens.

Auch hier sind drei Paare Abstichöffnungen  $o$  vorgesehen. Unter den Abstichschnauzen  $p$  wird zum Schutze der Wandungen ein gußeiserner Panzer  $q$  angebracht. Wenn auch die Herstellung des elliptisch gebogenen Blechmantels und der beiden Gürtel teurer ist als jene gerader Teile, so werden die Mehrkosten durch Materialersparnisse und Vereinfachung der Abstützung wettgemacht. Besonders wichtig aber ist es, daß der Ofen nun von allen Seiten leicht zugänglich wird und auch im Inneren tote Räume vermieden sind.

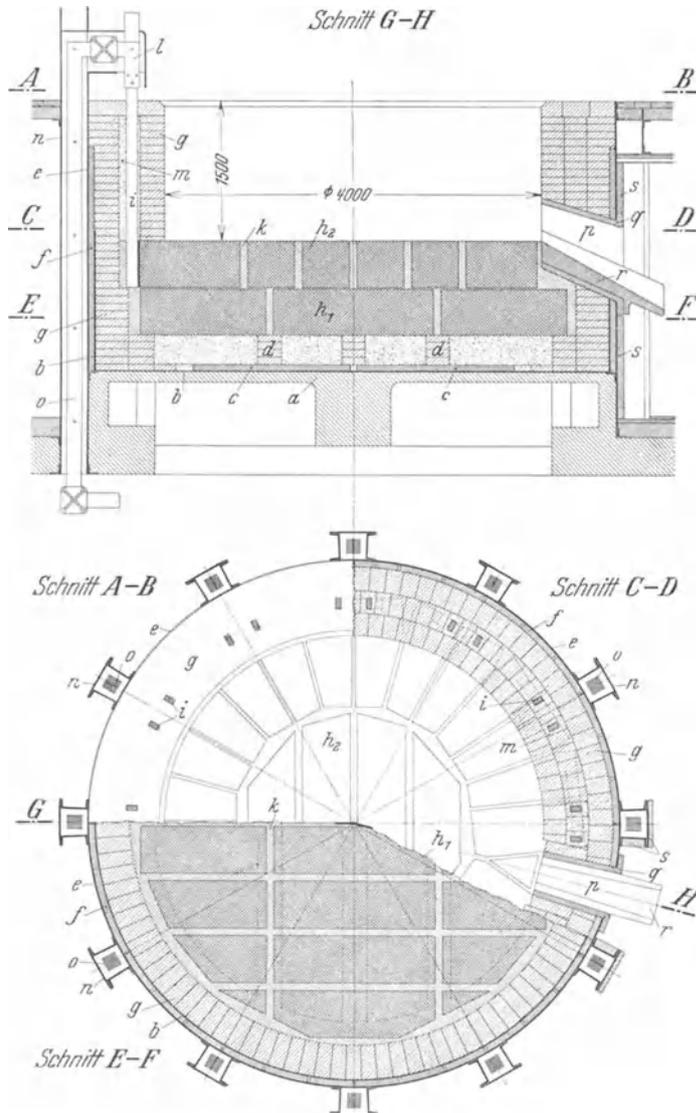


Abb. 68. Runder Körper eines Miguet-Einphasenofens für 2000—6000 kW.

der Herdsohle. Der Boden der Bleischale liegt auf dem Betonfundament und wird dort aus Platten zusammengeschweißt. Die wassergekühlten Gußeisenplatten  $c$  dienen einerseits den Pfeilern  $d$  als Unterlage, andererseits kühlen sie die Bleischale in der Mitte des Ofenbodens. Der ganze Ofen ist von einem Blechmantel  $e$  umgeben, an dessen Innenseite die wassergekühlten Gußplatten  $f$  einen kräftigen Panzer bilden. Der Mantel der Bleischale liegt zwischen diesem Panzer und dem Mauerwerk  $g$  aus feuerfesten Ziegeln. Die Räume zwischen den Pfeilern  $d$  füllt man mit trockenem Quarzsand aus. Die beiden Lagen Elektrodenkohlen  $h_{1-2}$  verlegt man derart, daß in der

Seit Einführung der runden Dauerelektrode ist der Bau von kreisrunden Öfen möglich geworden. Trotzdem behielt man den elliptischen Grundriß noch bei, und erst neueste Konstruktionen machen von der Austeilung der Elektroden im gleichseitigen Dreieck bei Verwendung eines kreisrunden Ofenquerschnittes Gebrauch. Interessante moderne runde Öfen wurden in Frankreich gebaut; sie waren allerdings Einphasenöfen mit einer beweglichen Elektrode und einer Bodenelektrode. Diese besonders sorgfältig durchgebildete Type ist in Abb. 68 wiedergegeben. Bei diesem Ofen fanden mehrere Probleme eine eigenartige und technisch vollkommene Lösung, auf die erst bei Besprechung des ganzen Ofens eingegangen werden soll. Als Fundament des Ofenkörpers dient die Decke  $a$  eines Raumes, in welchem der Ofentransformator, also zentrisch unterhalb des Ofens, untergebracht ist. Die Kühlung des Transformatorraumes bewirkt gleichzeitig eine hinreichende Kühlung der durch den Ofenboden dringenden Wärme. Um den Ofenboden, welcher hier Elektrode ist, vor dem Zutritt von Außenluft verlässlich zu schützen, umschließt eine luftdichte Schale  $b$  aus 3 mm starkem Bleiblech die ganze Ofenmauerung bis etwa über die Höhe

unteren Lage  $h_1$  die Kohlenblöcke parallel zueinander liegen, während in der oberen  $h_2$  die Elektroden der Herdmitte senkrecht zur unteren Lage angeordnet werden. Die Kohleblöcke am Rande des Herdes führen bei dieser Ofenkonstruktion die Hauptmenge des Stromes, und jeder Block ist mit einer eigenen Stromzuführung  $i$  versehen. Die Fugen zwischen den Blöcken sind hier absichtlich breit gehalten, um sie verlässlich zur Gänze mit Stampfmasse  $k$  ausfüllen zu können. Der auf diese Weise hergestellte Boden ist vollständig luftdicht. Es muß aber auch verhütet werden, daß Außenluft längs der Stromzuführungen zur Bodenelektrode gelangen kann, wie dies bei den alten Öfen mit unterer Anklemmung der Fall war. Der Gedanke, eine eigentliche Anklemmung zu vermeiden, indem die Stromzuleitungen für die Bodenelektrode von oben in den Ofen zu einem flüssigen Metallkontakt des Bodens geführt werden, ist schon bei einem Ofen zur Gewinnung von Zink und Blei nach Snyder und bei einem Stahlofen nach Chaplet

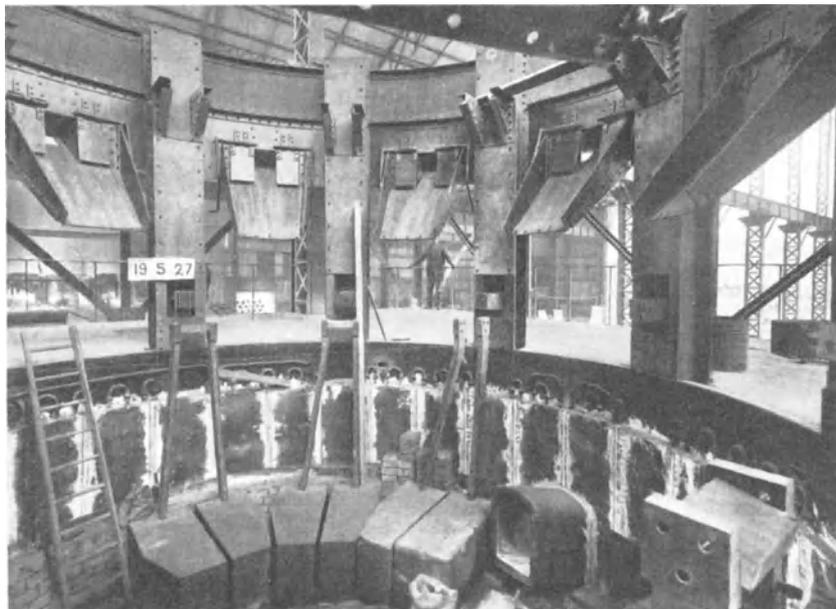


Abb. 69. Herd eines Miguet-Ofens während des Baues.

verwirklicht worden. Snyder läßt eine Hilfelektrode außerhalb des Herdes in einen Bleisumpf tauchen und Chaplet sieht an der Herdsohle eine Stahlplatte vor, die mit Eisenplatten verbunden ist, welche in der Rückwand des Ofens untergebracht sind und oben aus dem Ofen ragen, wo sie mit der Stromzuleitung verbunden werden. Die Stahlplatte am Boden des Chaplet-Ofens wird im Betriebe glühend oder flüssig. Beim Miguet-Ofen erhält jeder Kohleblock des Bodenrandes eine eigene kupferne Stromschiene  $i$ , die im Block mittels flüssigen Kupfers vergossen wird. Die Schienen liegen in den Schächten  $m$  der Ofenmauerung und führen zu den Abzweigungen  $l$  der phasenvermischten Leitungen, welche sich über dem Ofenrande befinden. Auch diese Schächte stampft man mit Quarzsand aus und erhält auf diese Weise eine praktisch vollkommene Abdichtung der Bodenanschlüsse. Als Vertikalversteifung sind am Ofenumfange in gleichen Abständen verteilte Säulen  $n$  vorgesehen. Die aus Profilen und Blech zusammengenieteten Säulen enthalten die phasenvermischten Bündel  $o$  der Stromzuführungen, welche aus dem Transformatorraum unterhalb des Ofens kommen. Die unteren Säulenenden sind im Beton des Fundamentes verankert, die oberen Enden tragen den ganzen Ofenaufbau, der aus Abb. 177 (S. 189) zu entnehmen ist. Dieser Ofen erhält bloß eine Abstichöffnung  $p$ , die verhältnismäßig klein gehalten, aber mit einem gußeisernen Rahmen  $q$  versehen ist,

der die volle Mauerbreite besitzt. In diesem mitunter wassergekühlten Rahmen sitzt die eigentliche Abstichschnauze  $r$ . In ihrer Umgebung ist der Ofenmantel durch gekühlte Gußplatten  $s$  geschützt. Die Abb. 69 gewährt Einblick in den Herd eines runden Miguët-Ofens während des Baues. Man sieht die Kohleblöcke des Bodenrandes mit den Einzelstromzuführungen, die bis zur Höhe des Austrittes der phasenvermischten Leitungsbündel aus den Säulen reichen. Hinter den Blöcken erkennt man einen Teil der Mauerung, hinter dieser den oberen Rand der Bleischale, ferner die gußeisernen Platten der Panzerung und die Verbindungen ihrer eingegossenen Kühlrohre.

Man sieht auch, daß alle Fugen zwischen den Platten sorgfältig verkittet sind. Rechts unten ragt der Rahmen der Abstichöffnung in den Herd. Es sei auch hier bemerkt, daß man neuerdings die Böden dieser Öfen aus geschliffenen Formkohlen baut, wobei die Haltbarkeit durch Vermeidung der breiten Fugen wesentlich erhöht wird.

Auch die Dimensionierung der Ofenkörper metallurgischer Elektrodenöfen richtet sich nach der Herdgröße, die wieder vom Einsatzvolumen abhängig ist. Für die Form des Herdes hingegen ist der durchzuführende Prozeß ausschlaggebend. Öfen, die bloß zum Einschmelzen des Einsatzes dienen, erhalten zweckmäßig einen tiefen becherförmigen Herd, weil dadurch die Hauptmenge des Einsatzes im Bereich der Elektroden liegt und rasch niedergeschmolzen werden kann. Wird aber im Ofen auch eine chemische Einwirkung der Schlacken auf das Metallbad angestrebt, dann eignen sich hierfür im allgemeinen flache muldenförmige Herde besser, weil die Badoberfläche eine größere Reaktionsfläche bietet. Das erforderliche Badvolumen rechnet man aus dem Gewicht und dem spezifischen Volumen des Einsatzes und eventueller Schlacken. Jedoch ist hierbei zu berücksichtigen, daß der Herd im Laufe der Benutzung allmählich kleiner wird, da bei den Flickarbeiten an den Wänden Material in den Herd gleitet und dort festbrennt. Für die Wahl der Herdauskleidung ist die im Ofen zu erzielende Temperatur und die chemischen Einflüsse maßgebend. Naturgemäß können für die Zustellung bei Öfen für niedrigschmelzende Metalle bei guter Haltbarkeit billigere Baustoffe verwendet werden. Die sogenannten „feuerfesten Materialien“ sollen hohen Temperaturen widerstehen und müssen einen hohen Schmelzpunkt bei möglichst hoher Erweichungstemperatur unter Belastung besitzen, ferner Widerstandsfähigkeit gegen

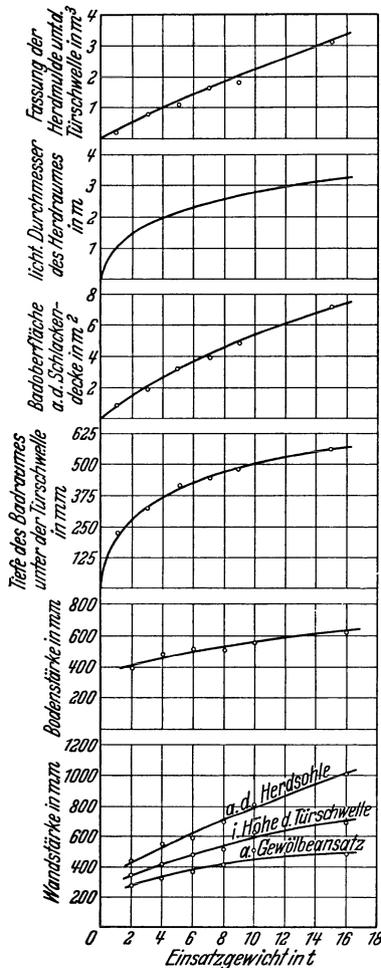


Abb. 70. Schaulinien der Ofendimensionen in Abhängigkeit vom Einsatzgewicht (nach Sisco-Kriz).

chemische Einflüsse, geeigneten elektrischen Widerstand und geringe Wärmeleitfähigkeit, schließlich dürfen die Steine keine dauernde Volumveränderung durch die Hitzeeinwirkung erfahren und bei Temperaturschwankungen nicht abplatzen. Durch die Größe des Herdes und die Stärke der Auskleidung, welche von den zulässigen Wärmeverlusten bestimmt wird, sind die äußeren Dimensionen des Ofens gegeben. Für den Elektrostahlofen können die wichtigsten Abmessungen der Abb. 70 entnommen werden. Um dem Ofen die notwendige mechanische Festigkeit zu verleihen, versieht man ihn mit einem Mantel und einer entsprechenden Bodenplatte aus Schmiedeeisen. Mantel und Bodenplatte bilden das Ofengefäß, welches für größere Öfen aus etwa 20 mm starken Blechen besteht, die durch Nietung oder Schweißung miteinander verbunden sind. Die für Beschickungstüren und Abstichschnauzen notwendigen Öffnungen im Ofengefäß werden durch kräftige Stahlgußrahmen

eingefaßt. Neben der runden Ofenform findet man auch kofferförmige Öfen mit rechteckigem Grundriß. Das Ofengefaß, das gekippt wird, muß möglichst starr sein und erhält daher zweckmäßige Versteifungen, wie Randwinkel, Rippen und dergleichen. Der Mantel des Gefäßes soll keinen äußeren mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sein, daher sind die Elektrodenständer nicht am Mantel, sondern an der genügend versteiften Bodenplatte zu befestigen. Bei kleinen Öfen weicht man von diesem Grundsatz ab und stellt die Elektrodenständer auf Brücken, die entweder mit dem Ofengefaß oder mit dem Randwinkel des Deckels verschraubt sind. Vereinzelt findet man auch große Öfen mit ähnlichen Aufbauten, so z.B. der Fiat-Ofen (Abb. 100, S. 129), dessen schwere Brücke auf dem besonders kräftigen Randwinkel des Ofengefaßes aufgesetzt ist. Das Gewicht des Aufbaues wird hier allerdings vom Randwinkel direkt auf die Kippvorrichtung übertragen, ohne das Gefäß zu beanspruchen. An der Bodenplatte sind in der Regel auch die Kippwiegen befestigt.

Der Herd wird im Ofengefaß eingemauert, eingestampft oder eingebrannt. Auch bei den eingestampften oder eingebrannten Herden findet man oft aus Steinen gemauerte Schichten (Abb. 71). Diese Maßnahme hat den Zweck, entweder die Wärmeverluste des Ofens durch Einbau von Material geringerer Leitfähigkeit zu vermindern oder die Kosten der Zustellung durch Verwendung billigerer Baustoffe an weniger beanspruchten Stellen herabzusetzen; schließlich können auch beide Vorteile gleichzeitig angestrebt werden. Das Einstampfen der Zustellung erfolgt in der Regel schichtenweise. Bei den Herden der Stahlföfen mit basischem Futter stampft man auf eine Lage flachgelegter Chamotteziegel eine Masse aus Teerdolomit oder Teermagnesit. Die Stampfmasse wird heiß aufgetragen und

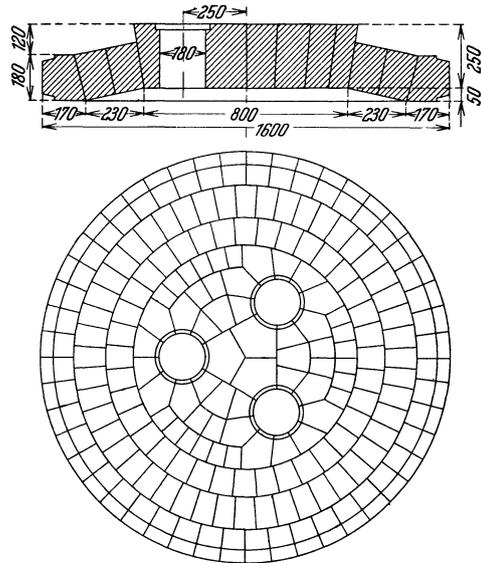
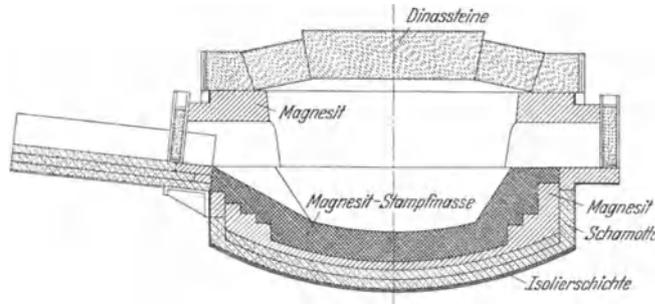


Abb. 71. Steinplan für den Deckel eines Héroult-Ofens.

besteht aus Sinterdolomit in Haselnußgröße mit etwa 8% wasserfreiem Stahlwerksteer bzw. aus Sintermagnesit mit 10—12% Teer. Die einzelnen, ungefähr 80 mm starken Lagen klopft man mit heißen Stampfern fest und rauht nachträglich die Oberfläche mit Meißeln auf, um die Verbindung mit der nächsten Lage zu sichern. Bei Öfen mit Magnesitfutter mauert man gewöhnlich die unteren Schichten des Herdes aus Magnesitziegeln und stellt erst den oberen Teil (bei großen Öfen etwa 200 mm stark) aus Stampfmasse her. Zur Herstellung von saurem Ofenfutter verwendet man ein Gemisch von Quarzsand und Ton oder Sand und Teer, das auf einer gemauerten Bodenlage aufgetragen und festgestampft wird. Um den Zerfall des Futters vor dem Brennen zu verhindern, streicht man den Herd mit Wasserglas und trocknet ihn mittels eines schwachen Holzfeuers. Sodann wird Koks oder Elektrodenbruchstücke eingeworfen und mit dem Strom vorsichtig geheizt, bis die oberste Schicht hartgebrannt ist. Langwieriger ist das Einbrennen eines Herdes. Auf die vorgetrocknete Bodenmauerung bringt man eine etwa 15—20 mm starke Schicht der Stampfmasse, die bei basischem Futter aus einem Gemenge von gestampftem Dolomit oder Magnesit und Teer oder Melasse, sowie einem Zusatz von basischer Martin-Ofenschlacke, bei saurem Futter hingegen aus Quarzsand und Ton besteht. Darauf legt man Koks oder Elektrodenbruch und heizt mit dem Strom langsam bis zur Weißglut, wobei die ganze Schicht zusammensintert. Nach Entfernung des Kokses bzw. des Elektrodenbruches trägt man eine zweite Schicht des Sandgemisches auf und brennt sie fest. Diesen Vorgang wiederholt man, bis die gewünschte Bodenstärke erreicht ist. Die Herstellung eines 400 mm starken Bodens erfordert derart ungefähr 24 Stunden.

Die Seitenwände des Ofenfutters können ebenfalls entweder gemauert oder gestampft werden. Für die Mauerung verwendet man bei billigem Baustoff gleichartige Steine für die ganze Mauerstärke, bei teurem Material, z. B. Magnesitsteinen, stellt man die äußere Schicht aus Schamotteziegeln her. Auch begnügt man sich mitunter, für die Wände bloß bis zur Höhe der Schlackentürschwelle hochwertiges Material zu verwenden. Dort, wo



Ab. 72. Schnitt durch die Zustellung eines Héroult-Ofens.

ein starkes Wachsen der Mauerung zu erwarten ist, läßt man zwischen ihr und dem Ofengefäß einen Raum von etwa 10—20 mm frei, der nachträglich mit lockerem Sand oder Asbest ausgefüllt wird. Für das Stampfen der Seitenwände ist eine Blechform erforderlich, welche den Innenabmessungen des Ofens entspricht. Die Form wird eingesetzt und der Raum zwischen ihr und dem Ofengefäß schichtenweise mit Masse gefüllt und ausgestampft. Für die Türpfeiler ist es aber empfehlenswert, stets Steine zu verwenden.

Die metallurgischen Elektroöfen sind durchwegs geschlossene Öfen, bedürfen also eines Deckels, dem sogenannten Ofengewölbe. Das Gewölbe ist sowohl der Hitze des Lichtbogens, als auch der chemischen Einwirkung der Ofengase ausgesetzt, wird demnach stark beansprucht. Der Deckel muß rasch auswechselbar sein, daher baut man das Gewölbe in einem Deckelrahmen oder Deckelring ein, der aus Stahlguß oder Winkelprofilen

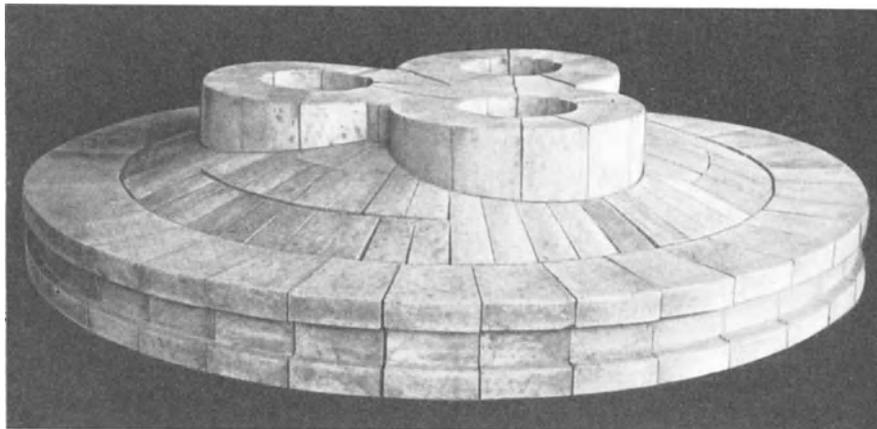


Abb. 73. Deckel eines Héroult-Ofens (ohne Deckelring).

hergestellt ist. Der Rahmen nimmt die seitlichen Kräfte des flachen Gewölbes auf und alle mechanischen Beanspruchungen beim Transport und bei der Befestigung am Ofen. Für den Transport sieht man entsprechende Ösen vor, die Befestigung am Ofen erfolgt meistens mittels Schrauben, welche den Deckel auch bei gekipptem Ofen in seiner Lage festhalten. Zwischen Ofenmauerwerk und Deckel legt man zweckmäßig eine Lage Material, welche das Anbrennen des Deckels am Ofen und Beschädigungen beim Abnehmen verhüten sollen. Das Deckelgewölbe setzt man aus konzentrischen Lagen feuerfester Formsteine zusammen, wie dies aus Abb. 72 hervorgeht. Man verlegt die Steine entweder trocken oder mit Hilfe eines geeigneten Mörtels. Bei Baustoffen, die sich bei der Hitze stark ausdehnen und dabei durch den auftretenden Druck zerstört werden könnten, legt man sowohl zwischen einigen konzentrischen Lagen als auch in radialer Richtung

Material ein (Holz oder Pappe), das in der Hitze verkohlt und den Steinen sodann genügende Ausdehnungsmöglichkeit gibt. Die Öffnungen für den Durchtritt der Elektroden sind sorgfältig mit Formsteinen einzufassen, oft werden diese Stellen als Ringe ausgebildet (Abb. 73), die gleichfalls aus Steinen zusammengesetzt sind. Zwischen dem Gewölbering und der Elektrode soll ein Ringspalt von etwa 15—20 mm bei Graphitelektroden und 25—30 mm bei Kohlenelektroden freibleiben. Die Elektrode muß in der Deckelöffnung gut zentrierbar sein und darf keinesfalls scheuern, weil dadurch sowohl das Gewölbe als auch die Elektrode beschädigt würden. Zur Abdichtung des Ringspaltes um die Elektrode verwendet man in der Regel Kühlringe, welche den gemauerten Gewölbering und die austretenden Gase kühlen. Die heißen Gase würden sonst die Elektrode oberhalb des Deckels zum Erglühen bringen, die dann durch den Luft-sauerstoff angegriffen würde. Die Ausführung dieser Kühlringe ist sehr mannigfaltig. Oft begnügt man sich mit einfachen Konstruktionen, bei kleinen Öfen etwa

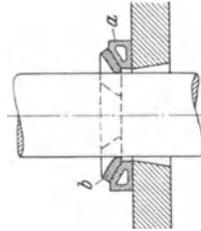


Abb. 74. Elektrodenabdichtung mittels Ringplatten.

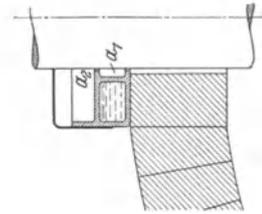


Abb. 75. Elektrodenabdichtung durch Entspannungskammern.

mit einem wasserdurchflossenen Gußring laut Abb. 74, der am Ofendeckel aufsitzt und die Elektrode mit etwa 5 mm Spiel umschließt. Die obere Fläche des Ringes *a* ist konisch nach innen geneigt und auf diese legt man lose sektorförmige Platten *b*, die vermöge ihres Gewichtes auf der Konusfläche des Ringes gegen die Elektrode gleiten und den Spalt überdecken. Eine andere Bauart des Kühlringes nach Abb. 75 besitzt keine beweglichen Teile und ist als Labyrinth mit zwei oder mehreren Kühl- und Entspannungskammern  $a_{1-2}$  für die Ofengase ausgebildet. Komplizierter ist bereits die Siemens-Abdichtung, die in Abb. 76 gezeigt ist. Sie besteht aus zwei übereinander angeordneten wasserdurchflossenen Kühlmanschetten. Der obere lange Kühlzylinder *a* wird von einer Brücke *b* getragen und ist mittels einer Stopfbüchse *c* an seinem oberen Ende gegen die Elektrode *d* abgedichtet. Der untere kurze Kühlring *e* ist am Gewölbe *f* angebracht. Da bei der großen Baulänge dieser Abdichtung durch Deformation des Gewölbes oder anderer Teile infolge der Ofenhitze, Biegungsbeanspruchungen auf die Elektrode ausgeübt werden könnten, sind die beiden Kühlmanschetten durch einen Sandverschluß *g* miteinander verbunden, der eine geringe Beweglichkeit der Teile zuläßt. Besonders kompliziert ist die bekannte Fiat-Abdichtung, die aus einem System von teleskopartig verschieblichen Rohren besteht. Abb. 101 (S. 130) zeigt diese Abdichtung. Der innere wasserdurchflossene Kühlzylinder *a* ist durch Ringe  $b_{1-4}$  von der Elektrode distanziert, wobei drei Entspannungskammern  $c_{1-3}$  für die Gase entstehen. Das Rohr *d*, das am Gußstück *e* befestigt ist und mittels der Dichtung *f*, sowie des Ringes *g* gegen das Rohr *a* gedichtet und geführt wird, dient als Gleitbahn für die Dichtung *h* eines Rohres *i*, welches durch die Platte *k* oben abgeschlossen und mit der Elektrodenfassung *p* verbunden ist. Die Elektrode ist somit vom Ofengewölbe bis zur Fassung der Einwirkung der Außenluft entzogen, wobei trotz der großen Baulänge dieser Abdichtung keine Biegungsbeanspruchungen in die Elektrode gelangen können, weil der wassergekühlte, mit dem Ofengewölbe verbundene Zylinder *a* infolge der Dichtung *f* und der Führung *g* eine gewisse Nachgiebigkeit gegenüber den anderen Teilen der Abdichtung besitzt, die an der Brücke *l* befestigt sind. Selbstverständlich müssen die Ab-

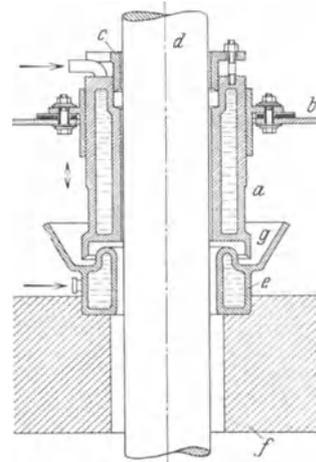


Abb. 76. Elektrodenabdichtung nach Siemens.

dichtungen und die Kühlwasserleitungen jeder Elektrode sorgfältig gegenüber jenen der anderen Phasen isoliert sein.

Zum Beschicken und Entleeren des Ofens sind Öffnungen vorgesehen, die den Erfordernissen des Betriebes angepaßt werden. Die Beschickung des Ofens und die Überwachung des Ofenganges erfolgt durch eine oder zwei Arbeitstüren, deren Abmessungen genügend groß sein müssen, um gegebenenfalls abgebrochene Elektrodenstücke durch sie entfernen zu können, also größer als der Elektrodendurchmesser. Ferner ist für ihre Dimensionierung auch die Stückgröße des Einsatzes maßgebend. Je nach der Kipprichtung in bezug auf die Elektrodenständer können außer der Abstichschnauze eine oder zwei Arbeitstüren vorgesehen werden. Ist die Kipprichtung senkrecht zu den Elektrodenauslegern, dann ist die der Abstichschnauze gegenüberliegende Ofenwand frei, und man bringt dort die Arbeitstür an. Wird aber der Ofen in der Richtung der Ausleger gekippt, so stehen die Elektrodenständer der Abstichöffnung gegenüber, und man sieht senkrecht zur Kipprichtung zwei einander gegenüberliegende Arbeitstüren vor. Wie bereits erwähnt, faßt man die Arbeitsöffnungen in der Zustellung mit gemauerten Pfeilern, im Ofengefäß mit kräftigen Rahmen aus Stahlguß ein. Der Türrahmen erhält unten eine Arbeitsplatte und wird seitlich meistens mit Auflagehaken versehen. Die gleichfalls aus Stahlguß oder Profileisen mit entsprechend feuerfester Füllung ausgestattete Tür kann bei kleinen Öfen als Klapptür ausgebildet sein, bei großen Einheiten aber zieht man Schiebetüren vor, die durch das eigene Gewicht gegen schiefe Leisten des Türrahmens abdichten. Die Handhabung der schweren Türen wird durch Gegengewichte erleichtert. Die Abstichöffnung ist entweder als Abstichtür oder als Abstichloch ausgebildet. Die Abstichtür ist gewöhnlich ebenso hoch wie die Arbeitstür, jedoch wesentlich schmaler. Auch sie wird durch eine Schiebetür verschlossen. Der Verschluß des Abstichloches hingegen erfolgt fallweise nur durch einen Pfropfen aus feuerfestem Material. Um das ausfließende Metall bequem der Gießpfanne zuzuführen, erhält sowohl die Abstichtür als auch das Abstichloch eine Gießschnauze von zweckmäßiger Länge. Zur Kippung des Ofens sind jetzt in der Regel Kippwiegen vorgesehen, die entweder glatt oder gezahnt sein können. Um bei den glatten Kufen ein Gleiten des Ofens zu verhindern, verbindet man die Enden der Kufen durch Stahlseile mit der Kippbahn bzw. mit dem Ofenfundament. Die Seile, die an den Kufen anliegen, wälzen sich beim Kippen des Ofens auf der Bahn ab und nehmen jene Komponenten der Kippkraft auf, die das Gleiten des Ofens verursachen könnten. Die Krümmung der Kufen ist derart zu wählen, daß die Abstichschnauze beim Kippen fast nur abwärts bewegt wird. Bei der bloß noch für kleine Öfen gebräuchlichen Zapfenlagerung, namentlich aber bei den veralteten Rollenbahnen, beschreibt die Schnauze während des Kippens eine rückläufige Bewegung, welche mit Rücksicht auf die Gießpfanne vermieden werden muß. Der Kippantrieb ist entweder elektrisch oder hydraulisch betätigt, nur bei ganz kleinen Öfen erfolgt er mittels einer Übersetzung von Hand aus.

### Elektroden.

Der wichtigste Bestandteil des Elektroofens sind die Elektroden, da sich die angestrebten Reaktionen gewöhnlich in ihrer unmittelbaren Nähe abspielen. Die großen Strommengen, welche den Elektroden zugeführt werden und die hohen Temperaturen, denen sie ausgesetzt sind, stellen an sie bedeutende Anforderungen. Als Baustoff kommt ausschließlich der Kohlenstoff in Betracht, weil er diesen Beanspruchungen am besten widersteht. Während bei metallischen Leitern der Widerstand mit zunehmender Temperatur steigt, wird die Kohle in der Hitze besser leitend. Der Kohlenstoff kann entweder als amorpher Kohlenstoff oder als Graphit für Elektrodenzwecke Verwendung finden. Man spricht in einem Falle von Kohlenelektroden, wenn man solche aus amorphem Kohlenstoff meint, im anderen Falle von Graphitelektroden. Letztere haben hauptsächlich bei metallurgischen Prozessen Eingang gefunden.

### A. Amorphe Kohlenelektroden.

Die Elektrodenerzeugung ist ein Spezialgebiet für sich, doch ist für die richtige Führung eines Ofenbetriebes die Kenntnis der Eigenschaften der Elektroden, ihrer Zusammensetzung und des Herstellungsvorganges von größter Bedeutung. Die Einführung der Dauerelektrode von Söderberg hat die Elektrodenherstellung zu einem Teil des Ofenbetriebes gemacht und die Erfahrungen, die bei der Entwicklung dieser Elektrodentypen zu Gebote standen, stammten eben aus der Fabrikation der Stückelektroden. Neuerdings macht sich das Bestreben bemerkbar, wieder zur Stückelektrode zurückzugreifen, da man in der Zwischenzeit gelernt hat, durch geeignete Auswahl der Ausgangsstoffe ein Elektrodenmaterial zu erzeugen, das auch die Herstellung größter Elektroden ermöglicht und deren einwandfreie Bearbeitung gestattet. Die Güte jeder Elektrode hängt von der Qualität der Rohmaterialien und der Sorgfalt bei der Verarbeitung sowie während des Brennprozesses ab.

Die Rohstoffe für die Elektrodenerzeugung sind Gemische von natürlichen Kohlen, künstlichen Kohlen und Teer. Von den natürlichen Kohlen kommen hauptsächlich Anthrazit und Backkohle in Betracht, von den künstlichen, Steinkohlen-, Retorten- und Petrolkoks sowie Ruß, in neuester Zeit auch aus Erdgas sowie Bruchfertiggebrannter Elektroden. Der Teer, welchem die Rolle des Bindemittels zufällt, ist

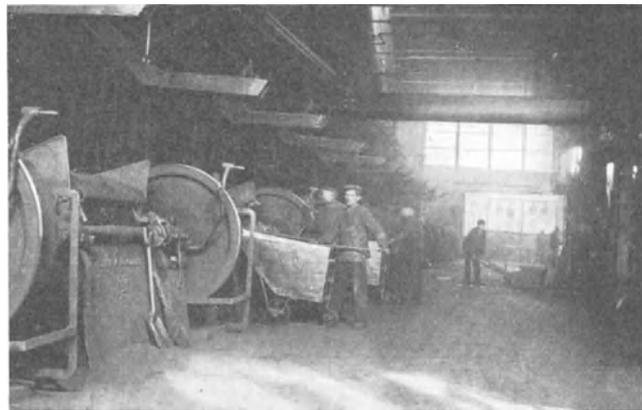


Abb. 77. Mischanlage zur Herstellung der Elektrodenmasse.

in der Regel gründlich entwässertes Steinkohlenteer. Bei der Wahl der Kohlsorten muß auf ihre Reinheit streng geachtet werden; der Asche- und Gasgehalt sind an bestimmte Grenzen gebunden. Gasreiche Kohlen werden vor der Verarbeitung unter Luftabschluß geblüht und auf diese Art entgast. Die Reinigung der Kohlen erfolgt bei der Elektrodenfabrikation gewöhnlich auf mechanischem Wege in Setz- und Schlemmwerken. Vorher wird sie aber mit Hilfe von Steinbrechern zerkleinert. Man findet auch für die Vorzerkleinerung Stachelwalzwerke und Stampfwerke. Die Feinmahlung nimmt man in Walzmühlen mit Hartgußwalzen, in Kollergängen oder Rohrmühlen vor. Die Korngrößen trennt man mittels Sieben. Für das Gefüge der Elektrode ist eine zweckmäßige Mischung verschiedener Korngrößen erforderlich, wobei auf die Ausdehnungskoeffizienten der Materialien Rücksicht genommen werden muß. Man hat daher für die Beurteilung der Ausgangsmaterialien neue Untersuchungsmethoden ausgearbeitet, die nicht nur die chemischen, sondern auch die physikalischen Eigenschaften, in erster Linie den Ausdehnungskoeffizienten, genau feststellen, denn nur Materialien, deren Ausdehnungskoeffizienten einander möglichst nahekommen, werden große Temperaturerhöhungen der Elektroden zulassen, ohne Sprünge zu verursachen. Auch die Größe der herzustellenden Elektrode ist für die Wahl der Ausgangsstoffe und deren Körnung maßgebend. Dem Korngemisch setzt man in Knetmaschinen die notwendige Menge Teer zu. Abb. 77 zeigt eine Mischanlage der Siemens-Planiawerke (Ratibor) mit einer Reihe Werner-Pfleiderer-Knetmaschinen. Es muß getrachtet werden, mit möglichst geringen Teermengen das Auslangen zu finden, weil sonst während des Brennprozesses die flüchtigen Bestandteile des Teeres unzulässig starke Porenbildung verursachen. Das gründlich durchgeknetete Material erhält sodann in hydraulischen Pressen die gewünschte Form, wobei Drucke bis zu 300 at angewendet

werden. Aus Abb. 78 entnimmt man die gewaltigen Dimensionen einer solchen Elektrodenpresse. Nach dem Pressen unterzieht man die Elektroden einem Glühprozeß, bei dem der Teer verkocht und die flüchtigen Bestandteile ausgetrieben werden. Hierzu verwendet man meist Ringöfen, in welchen die Elektroden langsam bis zur Höchsttemperatur von 1400—1600° angewärmt werden und hierauf ebenso langsam abkühlen. Die Elektroden verbleiben etwa drei Wochen im Brennofen, der meistens als Tiefofen gebaut ist. Die Elektrodenbrennöfen der Firma F. Meiser (Nürnberg) besitzen bis zu 32 Kammern, die mittels abhebbarer Deckel verschlossen werden. Der Brennprozeß wird dem Wesen

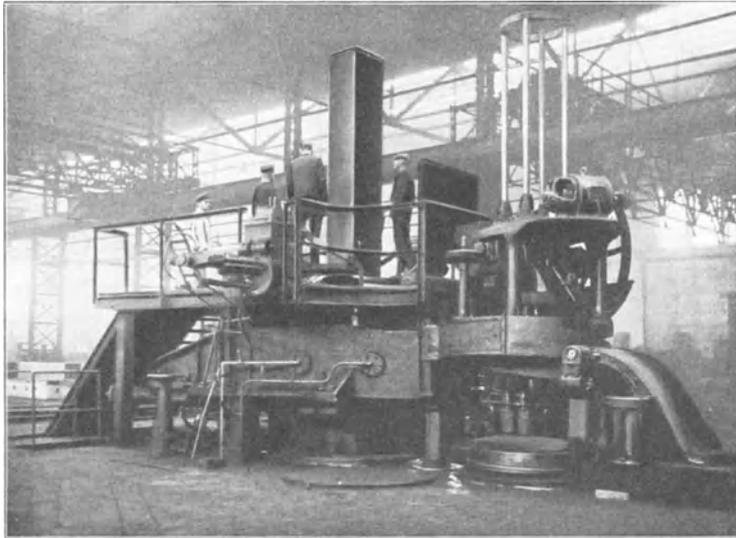


Abb. 78. Hydraulische Elektrodenpresse.

des Ringofens entsprechend im Kreise geleitet; es befinden sich jeweils einige Kammern auf Höchsttemperatur, die voranliegenden sind fertiggebrannt und kühlen aus. Ihre Abwärme dient zum Vorwärmen der noch ungebrannten Kammern. Endlich werden einige Kammern entleert und frisch beschickt. Der Ofen arbeitet mit Gasfeuerung und vermag etwa 20 t Elektroden im Tag zu leisten.

Gut gebrannte Elektroden sollen eine graue Farbe und metallischen Klang besitzen. Ihr Gefüge muß dicht und rißfrei

sein. Die Siemens-Planiawerke geben für ihre Elektroden folgende Konstanten an.

Scheinbares spezifisches Gewicht . . . . .	1,55—1,60
Wirkliches spezifisches Gewicht . . . . .	1,95—2,05
Spezifischer Widerstand von Elektroden bis zu 400 mm Durchmesser . . . . .	40—55 Ohm
400—700 mm Durchmesser . . . . .	45—60 Ohm
700—1000 mm Durchmesser . . . . .	55—70 Ohm
Linearer Ausdehnungskoeffizient zwischen 20 und 1000° C . . . . .	0,0000052—0,0000055
Spezifische Wärme bei 100° C . . . . .	etwa 0,20 Wärmeinheiten
Biegungsfestigkeit . . . . .	„ 60—80 kg/cm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit . . . . .	„ 500 kg/cm <sup>2</sup>
Wärmeausdehnung von 0—100° C . . . . .	„ 0,25 %
Phosphorgehalt . . . . .	„ 0,012 %
Gesamt-Schwefelgehalt <sup>1</sup> . . . . .	„ 1,2 % u. weniger
Aschegehalt der Elektroden . . . . .	„ 5 %
Aschegehalt der Bodenkohlen . . . . .	„ 6—7 %

Den verschiedenen Anwendungsgebieten entsprechend, werden natürlich auch an die Elektroden verschiedene Ansprüche gestellt. Schon aus wirtschaftlichen Gründen müssen daher Elektroden erzeugt werden, die den Anforderungen der einzelnen Ofenprozesse angepaßt sind und die jeweils die zweckmäßigsten chemischen und mechanischen Eigenschaften aufweisen. Von größter Wichtigkeit für die Lebensdauer der Elektroden und für den richtigen Ofengang ist die Wahl der geeigneten Strombelastung. Die zulässige spezifische Belastung hängt, abgesehen von der Qualität der Elektrode, von deren Quer-

<sup>1</sup> Der größte Teil des Schwefelgehaltes der Elektrode ist in Form der bei der Temperatur des elektrischen Lichtbogens leicht zerfallenden Sulfidverbindungen enthalten und daher unschädlich. Der in der Asche verbleibende Schwefelgehalt beträgt auf die Elektrode umgerechnet etwa 0,02 %.

schnitt ab und von der Art des Ofenbetriebes, ob dieser kontinuierlich oder periodisch ist. Im allgemeinen kann die spezifische Belastung bei kleinen Querschnitten und bei periodischem Betrieb höher gewählt werden. Für große Öfen und Vierkantelektroden liegt die maximale Belastung bei  $7 \text{ A/cm}^2$ , während Rundelektroden wesentlich höhere Belastungen ( $10\text{--}12 \text{ A/cm}^2$ ) zulassen.

Die Herstellungslänge der Elektroden ist mit Rücksicht auf die hierbei verwendeten Maschinen und Brennöfen begrenzt. Man geht nicht gerne über Stücke von 2000 mm hinaus, nur ausnahmsweise stellt man kleinere Querschnitte bis zu 3000 mm Länge her.

#### a) Stückelektroden und Formkohlen.

In den seltensten Fällen sind die Elektroden so verwendbar, wie sie den Brennofen verlassen. Sie müssen daher entsprechend bearbeitet werden, besonders jene Stellen, die vollkommen eben sein müssen, also die Teile, welche mit der Fassung in Berührung kommen und bei Paketelektroden, das sind Bündel von Stückelektroden, die Stoßflächen benachbarter Elektroden. Abb. 79 zeigt das Schleifen der Stoßfläche einer Paketelektrode, während die Bearbeitung des Kopfes für die Fassung bereits vollendet ist. Um möglichst große Genauigkeit zu erreichen, erfolgt die Bearbeitung tunlichst mittels Maschinen. Das moderne Elektrodenmaterial ist derart widerstandsfähig, daß es gehobelt, gedreht, gebohrt und geschliffen werden kann. Die Formkohlen, aus denen große Kohlenkörper zusammengesetzt werden, wie z. B. Ofenböden, Ofenauskleidungen und dergleichen, bearbeitet man ebenfalls sehr sorgfältig, um praktisch fugenlose Körper zu erhalten. Ein vollständiges Ofenfutter, aus Formkohlen zusammengesetzt, ist der Abb. 80 zu entnehmen. Die Abmessungen der Formkohlen müssen mit Rücksicht auf den Herstellungsvorgang innerhalb gewisser Grenzen liegen. So z. B. geben die Plania-Werke als Maximalgrößen solcher Kohlen  $750 \times 750 \times 2500 \text{ mm}$  mit etwa 2200 kg bzw.  $500 \times 900 \times 2500 \text{ mm}$  mit etwa 1750 kg an. Innerhalb dieser Dimensionen läßt sich aber die Formgebung den jeweiligen Ofenverhältnissen genau anpassen.

Über die gebräuchlichsten Querschnitte von Rund- und Vierkantelektroden sowie deren Gewicht je laufenden Meter, gibt die Tabelle (S. 114) Aufschluß.

#### b) Dauerelektroden.

Bei den Elektroöfen mit Paketelektroden stellt der Elektrodenabfall in Form von Stumpfen einen beträchtlichen Teil des Elektrodenverbrauches dar. Die Fassungen können, ohne einem übermäßigen Verschleiß zu unterliegen, der Schmelzzone des Herdes nur bis auf eine von ihrer Bauart und Kühlung abhängigen Entfernung genähert werden.

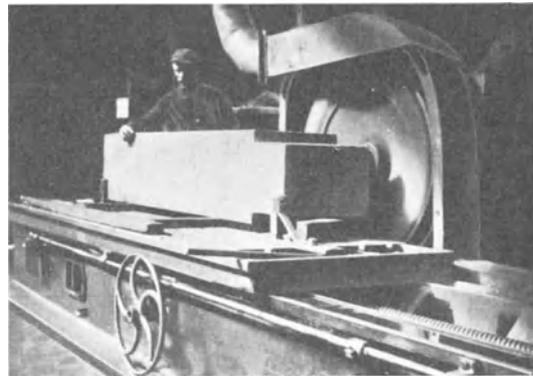


Abb. 79. Planschleifen der Paßflächen einer Paketelektrode.

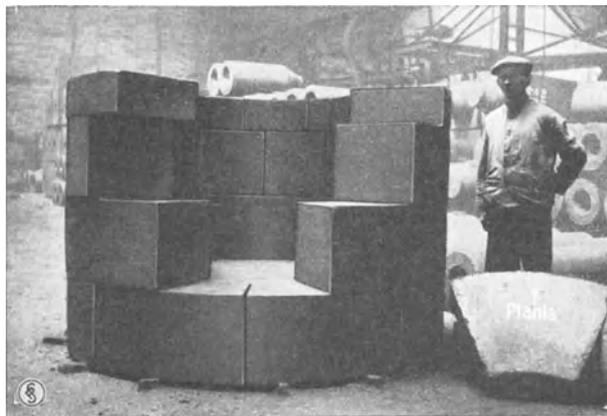


Abb. 80. Ofenfutter aus Formkohlen.

Rundelektroden				Vierkantelektroden			
Durchmesser mm	kg je m	Durchmesser mm	kg je m	Querschnitt mm × mm	kg je m	Querschnitt mm × mm	kg je m
100	12,2	360	158	90 × 90	12,6	110 × 135	23
110	14,7	400	195	100 × 100	15,5	150 × 200	46
125	19,0	420	215	110 × 110	18,8	150 × 300	70
150	27,5	430	225	120 × 120	22	250 × 300	116
155	29,0	450	246	150 × 150	35	250 × 320	124
165	33,0	485	286	180 × 180	50	250 × 350	135
170	35,0	500	304	200 × 200	62	250 × 400	155
175	37,0	550	368	250 × 250	97	250 × 500	194
185	41,6	560	382	270 × 270	113	300 × 350	163
200	48,5	575	402	280 × 280	121	320 × 400	198
210	54	600	438	300 × 300	139	350 × 400	217
225	62	650	514	320 × 320	159	350 × 500	217
250	76	675	554	330 × 330	169	400 × 410	254
260	82	700	596	350 × 350	190	400 × 500	310
285	99	750	684	370 × 370	212	400 × 600	372
300	110	800	779	400 × 400	248	450 × 500	349
310	117	850	879	450 × 450	314	500 × 600	465
325	129	900	986	500 × 500	387	500 × 750	581
350	149	1000	1217	600 × 600	558	600 × 750	697
				700 × 700	759	500 × 900	697
				750 × 750	872		

Diese Entfernung und das für den Kontakt mit der Fassung erforderliche Stück der Elektrode ergeben die Länge des unvermeidlichen Abfallstückes. Überdies macht sich die Auswechslung der Elektrode im Betriebe sehr lästig fühlbar, weil der Ofen während dieser Zeit mit verminderter Belastung arbeiten muß. Auch sind die Arbeiten zur Abschaltung des heißen verbrauchten Paketes oft schwierig und stets unangenehm. Die zuletzt tief in den Herd reichenden Fassungen bedürfen einer besonders starken Kühlung, wodurch dem Ofen große Wärmemengen entzogen werden. Auch bei Öfen mit Einzel­elektroden, z. B. bei Stahlofen, war der Verlust durch Stumpen, deren Länge der ganzen Ofentiefe, vermehrt um das Fassungsstück, entsprach, sehr empfindlich. Bei diesen Öfen mit Elektroden von verhältnismäßig geringem Querschnitt hat man zuerst versucht, die Elektroden so zu gestalten, daß sie während des Betriebes verlängert und gänzlich im Ofen aufgebraucht werden können. Hierbei ist zwischen prismatischen und runden Elektroden zu unterscheiden. Für letztere ist die Verwendung von Gewinden nahe­liegend. Nun weist aber selbst die beste Verbindungsstelle gegenüber dem einheitlichen Elektrodenmaterial einen wesentlich höheren elektrischen Widerstand auf, der überdies

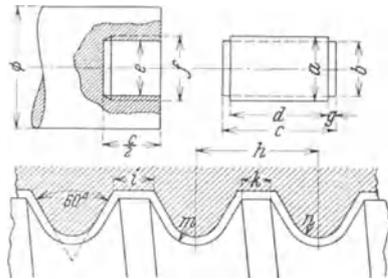


Abb. 81. Dimensionierung loser zylindrischer Nippel.

an verschiedenen Stellen der Verbindung voneinander sehr abweichende Werte erreicht. Die Stellen guten Kontaktes würden demnach überlastet werden, und man versuchte, sie für die Aufnahme größerer Strom­mengen geeignet zu machen. Aus diesem Bestreben entstanden die Verbindungen mit metallischen Gewin­den. Die Metallbolzen konnten natürlich weit höher belastet werden als das Kohlenmaterial und ihnen fiel die Aufgabe zu, den Widerstand der Verbindung infolge ungenügenden Kohlenkontaktes, auszugleichen. Die Metallbolzen besitzen jedoch einen größeren Ausdehnungs­koeffizienten als die Elektrodenkohle und sprengen daher oft die Elektrode. Als später die Elektrodenfabrikation wesentliche Fort­schritte aufweisen konnte und man gelernt hatte, durch sorgfältigste Wahl der Rohmaterialien sowie durch zweckmäßige Führung des Brennprozesses gleichmäßige Elektroden zu erzeugen, wurde die Schraubenverbindung gleichfalls aus Kohle her­gestellt. Anfangs bildete man ein Elektrodenende als Schraubenmutter aus und versah

das andere mit einem entsprechenden Bolzen. Der Bolzen aber erleidet beim Transport leicht Beschädigungen, weshalb beide Elektrodenenden als Muttern gestaltet werden. Als Verbindungsstück dient ein Schraubennippel, der erst bei Vornahme der Elektrodenverbindung eingeschraubt wird. Bei dieser Verbindung darf nicht die Hauptmenge des Stromes durch den Nippel gehen, sondern die Endflächen der Elektroden müssen entsprechend plan sein und einen guten Kontakt gewährleisten. Diese Art der Verbindung verwendet man hauptsächlich für Rundelektroden, vereinzelt aber auch für Quadrat-elektroden. Die Gestalt der losen zylindrischen Nippel und ihrer Gewinde geht aus Abb. 81 hervor, die Dimensionen können der darauffolgenden Tabelle entnommen werden.

Elektrodenquerschnitt		Nippel- und Muttergewinde mm											
Kreis mm	Quadrat mm	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m
200—225	180—200	115	95	290	240	99	119	25	30	11	7,4	9,5	5,5
250	—	140	120	310	260	124	144	25	30	11	7,4	9,5	5,5
285	250	150	130	310	260	134	154	25	30	11	7,4	9,5	5,5
300	270—280	160	140	310	260	144	164	25	30	11	7,4	9,5	5,5
325—350	300	170	150	310	260	154	174	25	30	11	7,4	9,5	5,5
360	—	190	160	370	320	165	195	25	40	13	9,5	11,5	7,5
400—450	350	210	180	370	320	185	215	25	40	13	9,5	11,5	7,5
485—500	400—450	240	210	410	360	215	245	25	40	13	9,5	11,5	7,5
550—600	500	297	257	570	520	263	303	25	55	18	15	14,5	11,5
650—700	600	350	310	670	620	316	356	25	55	18	15	14,5	11,5
—	650	400	360	760	700	366	406	30	55	18	15	14,5	11,5
800	700	450	410	760	700	416	456	30	55	18	15	14,5	11,5
900	750	500	460	800	740	466	506	30	55	18	15	14,5	11,5

Zwischen Nippel- und Muttergewinde ist etwas Spiel gelassen, das zur Aufnahme von Elektrodenkitt dient. Vor dem Anstückeln reinigt man sowohl Mutter- als auch Nippelgewinde möglichst mittels Preßluft. Sodann wird der Boden des Muttergewindes sowie die Gänge, mit Elektrodenkitt bestrichen. Hierauf schraubt man den Nippel ein und bestreicht die Stirnflächen der Elektroden gleichfalls mit Kitt, der so reichlich verwendet werden muß, daß er beim Zusammenschrauben aus der Stoßfuge tritt. Bei der sorgfältig durchgeführten Verbindung muß der Kitt alle Zwischenräume und Poren der Elektroden gänzlich ausfüllen. Das Anstückeln der Elektroden mittels zylindrischer Nippel ist aber zeitraubend, weil die Ergänzungselektrode über die halbe Nippellänge eingeschraubt werden muß. Bei größeren Stücken hängt die Ergänzungselektrode am Kran und wird mittels einer Schelle laut Abb. 82 eingeschraubt. Für Elektroden mit großen Durchmessern ist diese Verbindungsart zu langwierig, außerdem wird das Verhältnis zwischen Elektrodengewicht und Nippelquerschnitt ungünstig und die mechanische Beanspruchung des letzteren unzulässig. Die Siemens-Planierwerke haben eine Verbindung mittels konischer Schraubengewinde ausgearbeitet, welche diese Nachteile ausschaltet und die sich auch bei größten Rundelektroden sehr gut bewährt. Nippel und Muttergewinde werden aus der Elektrode gedreht, wie dies aus Abb. 83 und 84



Abb. 82. Zusammenschrauben von Elektroden mit losem zylindrischem Nippel.

zu sehen ist. Durch die präzise Arbeit auf der Drehbank und infolge der vorzüglichen Eigenschaften des Elektrodenmaterials ist es möglich, Gewindezapfen, Muttergewinde und die ebenen Stirnflächen genau passend herzustellen. Abb. 85 und die anschließende Tabelle gibt die Normung der üblichen konischen Gewindeverbindungen.

$\varnothing$ mm	a	b	c	d	e	f	g	$\varnothing$ mm	a	b	c	d	e	f	g
200	70	150	110	25	16	3	4	500, 550	179	375	270	40	25	4	4
225	75	170	130	25	16	3	4	600, 650	205	435	315	50	32	5	4
250	81	190	150	30	19	3	4	700, 750	290	500	288	50	32	5	4
285, 300	92	220	175	30	19	3	4	800, 850	317	550	320	50	32	5	4
325, 350, 360	110	245	185	30	19	3	4	900, 950	343	590	340	50	32	5	4
400	136	300	225	40	25	4	4	1000	368	630	360	50	32	5	4
450	149	320	235	40	25	4	4								

Die hauptsächlichsten Vorzüge der konischen Gewindeverbindung sind die große Breite des Gewindezapfens, wodurch die Verbindungsstelle gegen mechanische Beanspruchungen widerstandsfähiger wird und die Geschwindigkeit, mit der die Anstückung erfolgt, weil der Konus tief in die Mutter gesenkt wird und erst dann eingeschraubt werden muß.

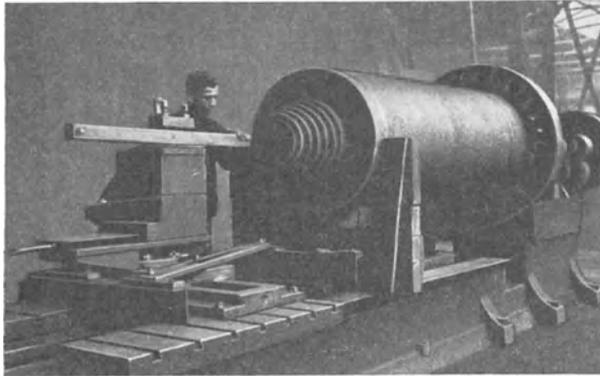


Abb. 83. Anschneiden des Gewindekonus an einer Rundelektrode.

Bei zylindrischen Nippeln muß die Verlängerungselektrode über die halbe Nippelhöhe geschraubt werden, beim konischen Gewinde sind bloß etwa zwei Ganghöhen erforderlich. Außerdem hat Siemens-Plania eine handliche Vorrichtung zum Verlängern größerer Konuselektroden gebaut. Dieser Tragnippel dient sowohl zum bequemen Transport der Elektrode vom Stapelplatz zum Ofen als auch zur einfachen Herstellung der Verbindung mit der verbrauchten Elektrode. Die Bestandteile der Vorrichtung gehen aus Abb. 86 hervor.

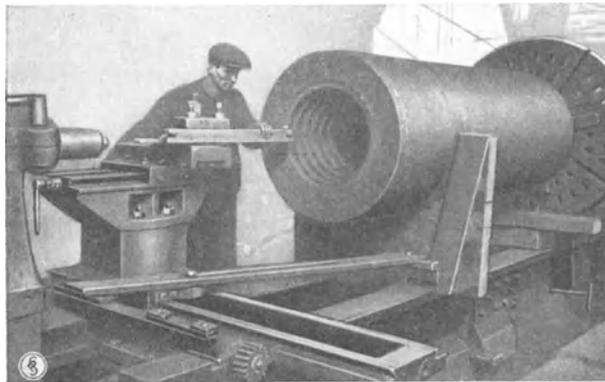


Abb. 84. Anschneiden des Muttergewindes.

Darin ist *a* ein gußeiserner konischer Nippel, dessen Abmessungen jenen des Elektrodenkonus entsprechen. Der Gußnippel *a* dreht sich auf einem Gewindebolzen, der am oberen Ende mit der Tragöse *d* versehen ist. Gewindebolzen und das konische Gewinde des Gußnippels haben beide die gleiche

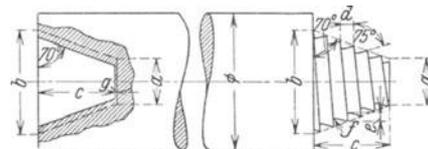


Abb. 85. Dimensionierung konischer Gewinde.

Ganghöhe. Der Gußnippel trägt vier Griffstangen, mittels welcher er in das oder aus dem Elektrodenmuttergewinde geschraubt wird. Zur Vermeidung einer selbständigen Verstellung des Nippels ist eine Sperrvorrichtung *c* am Haltearm *b* vorgesehen. Der Vorgang beim Anstückeln einer Elektrode ist folgender: Die Tragvorrichtung wird mittels Kranhakens bei der Öse *d* gefaßt und über die neue Elektrode gebracht. Dort schraubt man zunächst den Gußnippel *a* im Bolzen hoch und senkt mit dem Kran die Vorrichtung in die Elektrode,

entsprechend dem ersten Bild der Abb. 86. Sodann wird der Bolzen mittels der Arme *b* am Verdrehen gehindert und der Nippel mittels der Griffstangen in das Muttergewinde der Elektrode eingeschraubt, bis er festsetzt (viertes Bild der Abb. 86). Nun dreht man entweder den Bolzen in den Nippel hinein, wobei der Kranhaken gesenkt werden muß, oder man dreht den Nippel samt der Elektrode am Bolzen hoch. Nachdem Nippel und Bolzen durch *c* miteinander verriegelt wurden, fährt der Kran die Elektrode über die Restelektrode, und man verfährt hier mit der ganzen Elektrode samt Gußnippel genau so wie vorhin mit dem Nippel allein. Natürlich muß zuerst das Gewinde gereinigt und ebenso wie der Boden und die Stirnflächen der Elektrode reichlich mit Elektrodenkitt bestrichen werden. Man senkt also mit dem Kran den Konus der neuen Elektrode in die Mutter

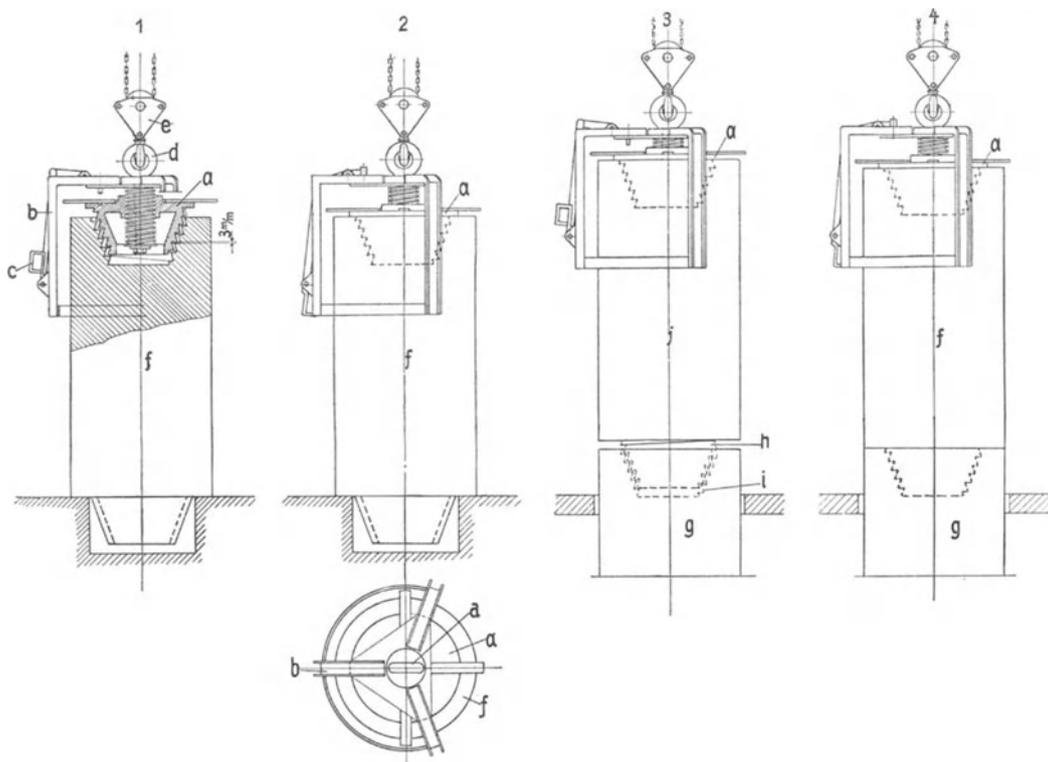


Abb. 86. Trag- und Anstücklungsrippel mit Gewindekonus.

der Restelektrode (drittes Bild der Abb. 86) und schraubt endlich die Elektrode samt dem Gußnippel herunter, bis die Verbindung festsetzt (zweites Bild der Abb. 86). Der Gußeisennippel wird jetzt allein am Bolzen hochgeschraubt, wodurch er sich und die ganze Anstückelvorrichtung von der Elektrode löst. Abb. 87 zeigt das Ausschrauben der Anstückelvorrichtung nach erfolgter Verlängerung einer Elektrode. Große Elektroden mit Durchmessern von 500 mm und darüber sollen vorteilhaft mit dem Gewindezapfen nach oben verwendet werden, weil sich der restliche Zapfen, wenn die Verbindungsstelle im Herde verbrannt wird, nicht aus dem Muttergewinde der oberen Elektrode löst. Bei abwärtsgerichtetem Zapfen hingegen bleibt schließlich von der Elektrode nur ein ringförmiger Teil mit dem Muttergewinde übrig, der sich vom Zapfen der oberen Elektrode lösen und im Herde Störungen hervorrufen könnte. Zum Anstückeln der Elektroden mit aufwärtsgerichtetem Gewindezapfen ist natürlich die vorbeschriebene Vorrichtung nicht verwendbar. Die Plania-Werke haben daher einen neuen Behelf ausgearbeitet, der auf dem gleichen Prinzip beruht, der aber sowohl für Elektroden mit nach oben als auch nach unten gerichteten Zapfen gleich gut verwendbar ist. Abb. 88 zeigt das Schema

der neuen Anstückelvorrichtung. Auch hier hängt an einer Öse  $b$  ein Bolzen mit einem Gewinde, das die gleiche Steigung wie das Elektrodengewinde besitzt. Die Traverse  $d$



Abb. 87. Anschrauben des Tragnippels.

enthält das entsprechende Muttergewinde und kann durch Drehung am festgehaltenen Bolzen hoch- oder niedergeschraubt werden. Um die neue Elektrode legt man die Tragschelle  $a$  und zieht sie mittels der Spannschraube mit Rechts- und Linksgewinde fest. Mit der Traverse  $d$  gelenkig verbunden sind die beiden Zugstangen  $e$ , in deren Ösen die Zapfen der Tragschelle eingehängt werden. Um zu verhindern, daß sich bei der Schraubbewegung der Elektrode die Kranflasche mitdreht, ist unterhalb der Öse  $b$  des Gewindebolzens ein Querstück mit den beiden Stangen  $f$  und  $f_1$  vorgesehen. An diesen Stangen hält man den Bolzen der Anstückelvorrichtung fest, während die Traverse mit der daranhängenden Elektrode gedreht wird. Die eine der beiden Stangen  $f$  ist ausschwenkbar und löst dabei eine Verriegelung aus, welche verhindert, daß sich die Traverse unbeabsichtigt bewegt. Die hochgeschraubte Traverse verriegelt sich selbsttätig, und in dieser Stellung soll auch der Elektrodentransport vom Lager zum Verbrauchsort erfolgen. Da die Tragschelle  $a$  um ihre Zapfen

in den Ösen der Zugstangen  $e$  drehbar ist, kann die Vorrichtung bei horizontaler Lagerung auch zum Anheben der Elektrode verwendet werden, wie dies aus Abb. 88 (Fig. 1) hervorgeht. Der Vorgang beim Anstückeln unterscheidet sich wenig von dem bereits beschriebenen. Die Restelektrode muß während der Anstückelung durch eine Klemmvor-

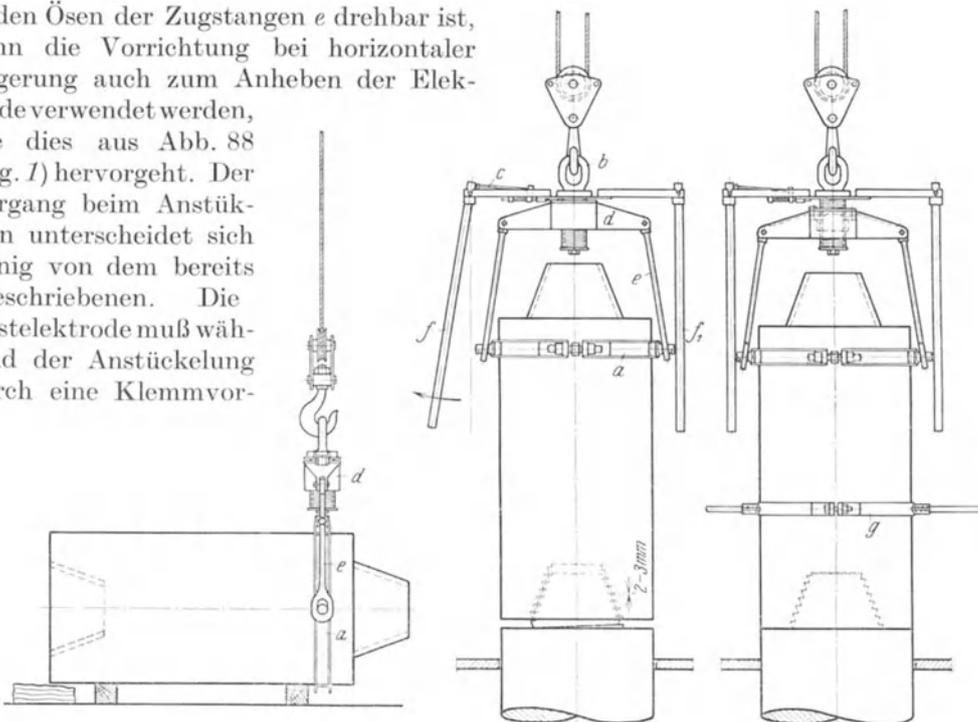


Abb. 88. Trag- und Anstückelnippel mit Schelle.

richtung gegen Verdrehung gesichert werden. Die sorgfältig gereinigten Gewinde werden mit Elektrodenkitt bestrichen, und zwar zuerst das Muttergewinde der neuen Elektrode,

dann der Zapfen der alten, weil diese bereits warm ist und sonst der Kitt darauf eintrocknen könnte. Nun senkt man mittels des Kranes die neue Elektrode über die Restelektrode, soweit es das konische Gewinde erlaubt. Hierauf löst man die Verriegelung der Anstückelvorrichtung, hält den Bolzen an den Stangen *f* fest und schraubt die Elektrode mit Hilfe der Spannschelle *g* herunter. Sobald die Stirnflächen aufeinandertreffen,

dreht man die neue Elektrode um etwa  $90^\circ$  zurück und zieht sodann dieses Stück mit kurzem kräftigem Ruck fest. Wenn die Verbindung richtig erfolgt ist, darf ein „Spion“, d. i. ein Blech von 0,4 mm Stärke und 15—20 mm Breite, nicht mehr in die Stoßfuge eindringen können. Der aus der Stoßfuge austretende Kitt ist sorgfältig zu entfernen, damit die Stoßstelle später ungehindert durch die Fassung hindurch kann. In Abb. 89 ist die neue Anstückelvorrichtung an einer 960-mm-Elektrode gezeigt. Die Abb. 90 wurde im Elektrodenverlängerungsraum



Abb. 89. Anstückeln über dem Ofen.

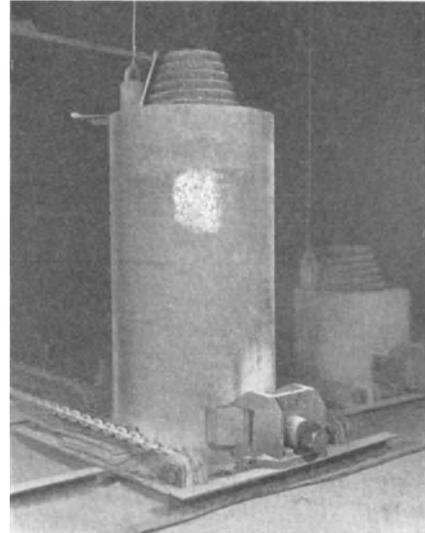


Abb. 90. Anstückeln über dem Ofen.

an einer 960-mm-Elektrode gezeigt. Die Abb. 90 wurde im Elektrodenverlängerungsraum



Abb. 91. Schnitt durch eine Konusverbindung.

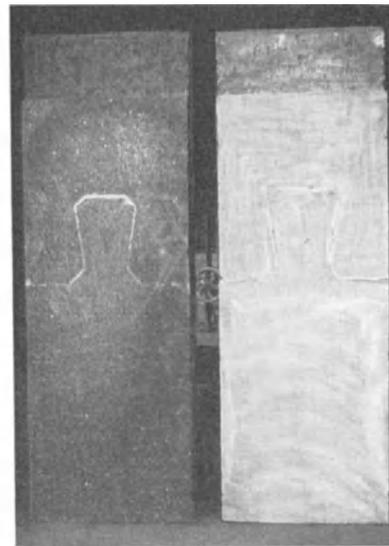


Abb. 92. Verbindung von Vierkantelektroden.

über einem Ofen aufgenommen. Man sieht hier die Klemmvorrichtung zum Fixieren der Elektroden während des Anstückelvorganges. Auf den Elektroden liegen Zuggewichte von Pegeln, die es ermöglichen, im Abstichraum den Elektrodenverbrauch und die Lage der Verbindungsstelle abzulesen. Die erreichte Präzision der Elektrodenverbindung mittels konischer Gewinde veranschaulicht Abb. 91 durch ein Schnittbild.

Die Anstückelung prismatischer Elektroden gestaltet sich bedeutend schwieriger. Wohl wendet man vereinzelt auch hier Nippelverbindungen an, wie dies bereits aus der Tabelle auf S.115 hervorgeht, doch gelingt die Verschraubung nur bei kleinen Elektrodenquerschnitten in befriedigender Weise. Man hat daher versucht, die Schwalbenschwanzverbindung einzuführen, deren Güte aber von der genauen Bearbeitungsmöglichkeit der Elektroden abhängt. Die alten Elektroden aus sprödem, ungleichmäßigem Material ergaben trotz Kittbeigaben keine verlässlichen Kontakte, und auch die Festigkeit des Materiales war der Keilwirkung des Schwalbenschwanzes nicht gewachsen. Auf Grund der Fortschritte bei der Elektrodenherstellung hat man nun die bereits aufgegebenen Versuche wieder aufgenommen. Abb.92 zeigt zwei Versuchselektroden mit Schwalbenschwanzanstückelung, und man sieht aus dem Bilde, mit welcher Genauigkeit die Paßstücke ausgearbeitet sind, und daß überall einspringende Winkel vermieden wurden die Anlaß zu Rißbildungen geben könnten.

### c) Selbstbackende Dauerelektroden.

Die gewöhnliche Dauerelektrode, welche aus Einzelelektroden zusammengeschaubt wird, setzt das Vorhandensein fertiggebrannter, gegebenenfalls bearbeiteter Elektrodenkohlen voraus. Daher ist man von der Lieferung der Elektrodenfabriken abhängig, die in normalen Zeiten allerdings hochwertige Erzeugnisse herstellen. Bei Knappheit oder Mangel an geeigneten Ausgangsstoffen, wie etwa während des Krieges, verschlechtert sich jedoch die Qualität der Elektroden. Dies macht sich durch erhöhten Verbrauch und häufige Brüche sehr störend bemerkbar. Wegen der Elektrodennot und dem Bestreben, von Lieferungen unabhängig zu werden, entstand während des Krieges eine Dauerelektrode<sup>1</sup>, die am Verwendungsorte hergestellt und gebacken wird. Die Vorteile der Neuerung bestanden in der Möglichkeit, die Zusammensetzung der Kohlenmasse kontrollieren zu können, ferner wurde ein großes Elektrodenlager überflüssig, das sonst angelegt werden mußte, um den Betrieb auch bei verspäteten Lieferungen aufrechtzuerhalten. Die Herstellung der Elektrode am Ofen bedeutet allerdings eine Komplizierung des Betriebes, doch wurde dieser Nachteil durch die erheblichen Vorteile mehr als ausgeglichen. Der selbstbackenden Elektrode scheint ein ganz bestimmtes Gebiet zugewiesen zu sein, das sich auf Elektroden mittlerer Durchmesser beschränkt. Für kleine Elektroden dürfte die Herstellung im Betriebe zu umständlich sein, zumal man jetzt geeignetes Elektrodenmaterial erhält, das durch seine hohe Qualität und genaue Bearbeitung verlässliche Verbindungen und somit volle Ausnutzung der Elektrodenlänge und Dauerbetrieb gewährleistet. Elektroden größter Durchmesser (2000—6000 mm) erfordern verschiedene Zusammensetzung der peripherischen Partien, welche die Hauptmenge des Stromes führen, und des Kernes, der nur eine meist belanglose Füllung darstellt. Auch müssen die großen Elektroden eine bestimmte mechanische Festigkeit besitzen, welche die selbstbackende Dauerelektrode kaum im gebrannten, keinesfalls aber im ungebrannten Teil besitzen kann. Im erwähnten Verwendungsgebiet erfreut sich jedoch die selbstbackende Elektrode, deren einzige wirklich betriebssichere Konstruktion von Söderberg herrührt, großer Beliebtheit und steigender Verwendung, die auch durch die Wirtschaftskrise nur wenig getroffen wurde, zumal die Inhaberin der Patente, die Norske Aktieselskab for Elektrokemisk Industri (Oslo) an der Vervollkommnung ihrer bedeutenden Erfindung stets weiterarbeitet. Nachfolgend der jährliche Verbrauch an Söderberg-Elektroden:

1922	700 t	1924	3000 t	1926	9300 t	1928	20000 t	1930	27900 t
1923	1300 t	1925	6300 t	1927	12800 t	1929	26300 t	1931	23000 t

Das Wesen der Söderberg-Elektrode besteht aus einer plastischen Kohlenmasse, die in einem als Form dienenden Blechmantel eingestampft wird. Dem Verbrauche ent-

<sup>1</sup> DRP. 317690 (1918) der Norske Aktieselskab for Elektrokemisk Industri (Oslo).

sprechend, gleitet die Elektrode innerhalb einer stromführenden Fassung in den Ofen, wobei die Kohlenmasse durch die Joulesche Wärme des Stromes und durch die Hitze des Herdes gebacken wird. Dieser Herstellungsvorgang eignet sich natürlich am besten für runde Elektroden, doch werden vereinzelt auch rechteckige bzw. flache Elektroden (plane Hauptflächen mit zylindrischen Endflächen) erzeugt. Für die Zusammenstellung der Stampfmasse wurden ursprünglich sehr genaue Vorschriften gegeben, doch erwies sich die Elektrode im Betrieb, entgegen der Erwartung, als viel unempfindlicher. Wie bei der Herstellung der gewöhnlichen amorphen Kohlenelektroden dienen auch bei der Söderberg-Elektrode Anthrazit, Koks und Teer sowie Pech als Ausgangsstoffe. Der Anthrazit wird entgast und ein Teil im Kollergang feingemahlen. Grobkörniger Anthrazit, feingemahlener Anthrazit und feingemahlener Koks werden mit einem erwärmten Gemisch von Teer und Pech in eine Knetmaschine gebracht und innig vermengt. Die entstandene Kohlenmasse wird noch warm zu Ziegeln geformt, um bequem aufgestapelt werden zu können. Fertige Elektrodenmasse kann übrigens auch von der Gesellschaft bezogen werden, die sie in Blöcken zu 62 kg, im Formate  $520 \times 350 \times 210$  mm liefert.

Dem Blechmantel fällt außer der Formgebung der Elektrode noch die Aufgabe zu, den Strom in das Innere zu leiten, da die ungebäckene Stampfmasse geringe Leitfähigkeit besitzt. Zu diesem Zwecke erhält der Mantel Rippen, die noch entsprechend eingeschnitten und umgebogen sind, um den Strom möglichst gleichmäßig über den Elektrodenquerschnitt zu verteilen. Abb. 93 zeigt Blechmäntel verschiedener Durchmesser und die Art, wie die Rippen geteilt und umgebogen werden. Die Norske Aktieselskab for Elektrokemisk Industri stellt die Elektrodenmäntel samt Rippen dadurch her, daß ein Mantelschuß aus mehreren Blechen zusammengeschweißt wird. Die entsprechend zylindrisch geformten Bleche sind an einer Längskante nach innen abgebogen, so daß das zylindrische Stück einen Teil des Mantels bildet, während der kurze, etwa im rechten Winkel abgebogene Lappen als Rippe dient. Die Schweißung des nächsten, ebenso geformten Mantelbleches erfolgt an der erwähnten Buglinie des vorangehenden Bleches. Aus Sparungsgründen wird aber mitunter, namentlich in amerikanischen Betrieben, der Mantelschuß aus einem oder zwei Blechen hergestellt, so daß bloß eine bzw. zwei Längsnähte zu schweißen sind. Als Rippen verwendet man U-förmig gebogene Blechstreifen. Diese Streifen verschweißt man alle 100—150 mm mit der Innenseite des Mantels; auch hier schneidet man die freien Lappen ein und biegt sie ab. Die Verlängerung des Blechmantels erfolgt, indem ein neuer Mantelschuß aufgesetzt und angeschweißt wird. Angeschweißte Rippen ordnet man zweckmäßig derart an, daß ihre Enden verschieden hoch stehen, damit sich bei der Verlängerung stets nur eine Rippenverbindung in gleicher Höhe befindet. Vereinzelt hat man die Rippenstreifen bloß an ihren Enden angeschweißt und sie im übrigen lose belassen.

Die Einbringung der Elektrodenmasse kann nach zwei verschiedenen Methoden vorgenommen werden. Ursprünglich und jetzt hauptsächlich bei Elektroden kleinerer Durchmesser wird die bei Selbstbereitung in handliche Ziegelform gebrachte Masse, bei Fertigbezug die gelieferten Blöcke vorgewärmt. Hierzu verwendet man vorteilhaft elektrische Heizkästen, welche 1000 oder 1500 kg Masse aufzunehmen vermögen und diese in 3 bis

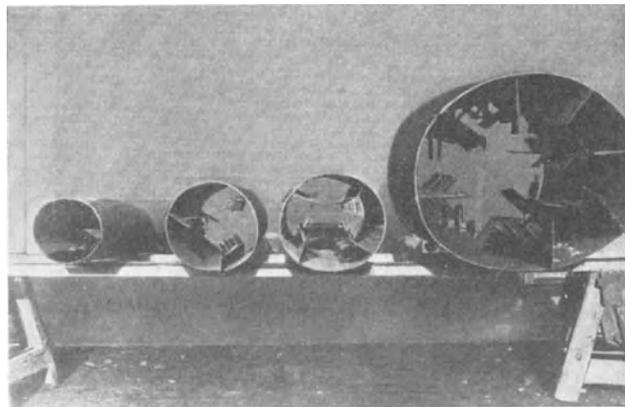


Abb. 93. Blechmäntel für Söderberg-Elektroden.

4 Stunden auf 130—140° erwärmen. Ein Eisenkasten mit entsprechenden Tragwinkeln für Blechkassetten, die je einen Normalblock Masse zu 62 kg aufnehmen, wird mit Wärmeisolation und Mauerung umgeben. Die Heizwicklung ist am Boden des Kastens geschützt untergebracht. Um auch kleinere Massemengen wirtschaftlich erwärmen zu können, teilt man den Kasten in zwei Hälften, wobei jede eine Heizwicklung und eine Tür erhält. Die Kästen für 1000 kg Masse nehmen 16 Kassetten auf und benötigen etwa 14 kW, jene für 1500 kg besitzen 24 Kassetten und verbrauchen etwa 20 kW. Die erwärmte Masse wird in den Blechmantel eingebracht und festgestampft. Um den beim Backen der Elektrode entstehenden Gasen eine Abzugsmöglichkeit zu schaffen, versah man den Mantel mit Löchern, die z. B. in Abb. 116 (S. 141) gut zu sehen sind. Neuerdings und namentlich bei großen Elektroden, sieht man von der Vorwärmung der Masse ab. Man füllt die kalte Masse in den Mantel, wobei man vorteilhaft etwas weichere Masse verwendet und überläßt der aus dem Ofen abgeleiteten Wärme das Schmelzen der eingeworfenen Stücke. Durch Regulierung der zwischen Elektrodenmantel und Aufhängezylinder eingeblasenen Kühlluft ist man in der Lage, die Schmelztemperatur richtig einzustellen, die hier bei 80° und darüber liegt. Die Massestücke fließen allmählich zusammen und bilden in der Folge, meist ohne Stampfarbeit, eine Elektrode, die in der Qualität der gestampften nicht nachsteht. Für die Aufnahme der kalten Masse eignen sich gelochte Mantelbleche nicht, da beim Flüssigwerden der Masse das Bindemittel austreten, die Außenseite des Mantels verunreinigen und später in der Fassung schlechte Kontakte ergeben würde. Die beim Backen entstehenden Gase, die nun nicht seitlich aus dem Mantel entweichen können, dringen durch den glühenden Teil der Elektrode abwärts, wobei sich die Kohlenwasserstoffe spalten, der entstehende Kohlenstoff in den Poren der Elektrode abgelagert wird und sie verdichtet. In einigen Betrieben wird, um den Gasen doch eine Abzugsmöglichkeit zu schaffen, in der Mitte der Elektrode ein Holzpflöck eingesetzt, der im glühenden Teil der Elektrode verkohlt und die Gase austreten läßt.

Bei größeren Elektroden wird die Verlängerung während des Ofenbetriebes, also über dem Ofen vorgenommen. Zu diesem Zwecke ragen die Elektroden durch den Boden eines geschlossenen Arbeitsraumes, der Stampfhaus genannt wird. Dort kann man die Verlängerungsarbeiten durchführen, ohne daß die Arbeiter durch die Hitze und die Abgase des darunterliegenden Ofens belästigt werden. Bei kleinen Elektroden, wie sie beispielsweise für Stahlöfen verwendet werden, sieht man von der Elektrodenverlängerung über dem Ofen ab und nimmt diese auf einer Stampfbühne vor. Man baut zu diesem Zwecke die abgenutzte Elektrode während einer Betriebspause aus dem Ofen aus und ersetzt sie gegebenenfalls durch eine bereits verlängerte.

Beim Anfahren einer neuen Söderberg-Elektrode ist besondere Vorsicht am Platze, weil die ganze Elektrode ungebrannt, daher schlecht leitend ist. Die Elektrode darf anfangs nur niedrig belastet werden, um auch eine zu starke Gasentwicklung zu vermeiden. Im normalen Betrieb gelangen jene Teile der Elektrode zum Abbrand, die vor 2—3 Wochen in der Fassung waren. Schon oberhalb derselben findet ein Vorbacken statt, das Fertigbacken erfolgt hauptsächlich in der Fassung (etwa im unteren Drittel der Kontaktbacken) und dann am Wege in den Herd.

#### d) Kombination zwischen angestückelten und selbstbackenden Dauerelektroden.

Das Bedürfnis nach Elektroden mit besonders großem Durchmesser, wie sie bei modernen Einphasenöfen benötigt werden, führte zu einer Konstruktion, welche die Herstellung von Elektroden jeder Größe gestatten. Es sind zwar Söderberg-Elektroden bis zu einem Durchmesser von 2200 mm bekannt; von den kombinierten Elektroden, die von P. Miguet entwickelt wurden, sind solche mit mehr als 3000 mm seit Jahren im Betrieb, und man plant den Bau von Elektroden bis zu 6000 mm Durchmesser. Die Dauerelektrode nach Miguet, deren Zusammenstellung aus Abb. 135 (S. 154) entnommen

werden kann, ist ihrem Wesen nach eine Paketelektrode, bei der die Einzelelektroden nicht geradlinig nebeneinander angeordnet sind, sondern am Umfange eines Kreises. Dementsprechend erhalten die Einzelelektroden statt des rechteckigen einen sektorähnlichen Querschnitt. Um eine runde Elektrode zu erhalten, müssen die Sektoren auf der Außenseite mit einer zylindrischen Fläche versehen werden, die anderen Seiten bleiben eben. Wie auf S.153 hervorgehoben, bezweckt die Bauart dieser Dauerelektrode, den Strom nur durch den Mantel aus Einzelelektroden zu leiten, während der im Innern der Elektrode verbleibende und mit einer Stampfmasse ausgefüllte Raum nicht für die Stromzufuhr verwendet wird. Die begrenzte Erzeugungslänge der Einzelelektroden (Sektoren) aus amorphem Kohlenstoff bedingt die allmähliche Ergänzung der abgenutzten Elektrode.

Zu diesem Zwecke ist jeder Sektor mit einem schwalbenschwanzartigen Fortsatz versehen, der zu einem entsprechenden Fortsatz des daraufgestellten Sektors paßt. Zur Aufnahme des Elektrodengewichtes ist im Innern der Dauerelektrode ein Gerüst aus Walzprofilen und Quadeisenringen vorgesehen. Bei älteren Bauarten der Miguet-Elektrode wurden bloß je zwei übereinanderstehende Sektoren miteinander durch Blechlaschen verbunden, doch hatte diese Konstruktion den Nachteil, daß die Sektoren Zugbeanspruchungen ausgesetzt waren, wodurch eine unnötige mechanische Beanspruchung des Elektrodenmaterials entstand. Zur Verbindung benachbarter Sektoren dienten hier Flacheisenringe. In der weiteren Entwicklung ersetzte man die Flacheisenringe durch kräftigere aus Vierkanteisen und verband sie miteinander durch Rundeisen. Diese Bauart zeigt Abb. 94, doch wies sie noch nicht die gewünschte Starrheit auf. Erst als die Rundeisen durch Walzprofile ersetzt wurden, erhielt man ein Gerüst, das genügende Festigkeit besitzt und auch alle Zugbeanspruchungen aufnimmt, da die Sektoren lediglich darauf festgeschraubt sind. Abb. 95 gibt einen Blick in das Innere dieser Elektrode wieder. Für jede Gruppe übereinanderstehender Sektoren ist ein senkrechtstehendes I-Profil vorgesehen, und die Profileisen der einzelnen Gruppen sind an innenliegenden Ringen aus Quadeisen festgeschraubt. Das Eisengerüst soll sich nicht an der Stromzufuhr beteiligen; daher legt man zwischen Kohlesektor und Walzprofil einen Asbeststreifen ein, und auch die Schraubenbolzen, welche die Sektoren untereinander verbinden und an dem Gerüst befestigen, sind derart angeordnet, daß ihre Muttern auf eiserne Unterlagscheiben, diese aber auf Asbestscheiben pressen. Da ferner die Bohrungen in den Kohlesektoren genügend Spiel um die Schraubenbolzen lassen, so daß sie keinen Kontakt geben, gelangt der Strom von der Fassung in die Kohlesektoren, nicht aber in das Traggerüst und in den schlechtleitenden Kern der Elektrode. Die Anordnung benachbarter Sektoren erfolgt mit Rücksicht auf Festigkeit, Verteilung der Stoßstellen und Genauigkeit der Montage, um ein Drittel ihrer Höhe versetzt zueinander, dementsprechend weist das obere Elektrodenende drei verschieden hohe Stufen von Sektoren auf. Die Walzprofile müssen auch entsprechend verlängert werden; dies erfolgt unter Zuhilfenahme von Laschen, und zwar nimmt man die Verlängerung gleichzeitig bei jedem zweiten Träger vor. Den Raum innerhalb des Mantels aus Sektoren füllt man mit Stampfmasse

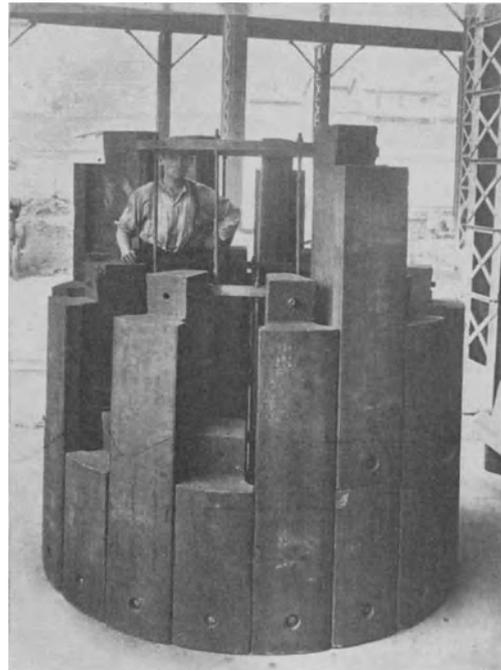


Abb. 94. Alte Miguet-Dauerelektrode.

Abb. 95 gibt einen Blick in das Innere dieser Elektrode wieder. Für jede Gruppe übereinanderstehender Sektoren ist ein senkrechtstehendes I-Profil vorgesehen, und die Profileisen der einzelnen Gruppen sind an innenliegenden Ringen aus Quadeisen festgeschraubt. Das Eisengerüst soll sich nicht an der Stromzufuhr beteiligen; daher legt man zwischen Kohlesektor und Walzprofil einen Asbeststreifen ein, und auch die Schraubenbolzen, welche die Sektoren untereinander verbinden und an dem Gerüst befestigen, sind derart angeordnet, daß ihre Muttern auf eiserne Unterlagscheiben, diese aber auf Asbestscheiben pressen. Da ferner die Bohrungen in den Kohlesektoren genügend Spiel um die Schraubenbolzen lassen, so daß sie keinen Kontakt geben, gelangt der Strom von der Fassung in die Kohlesektoren, nicht aber in das Traggerüst und in den schlechtleitenden Kern der Elektrode. Die Anordnung benachbarter Sektoren erfolgt mit Rücksicht auf Festigkeit, Verteilung der Stoßstellen und Genauigkeit der Montage, um ein Drittel ihrer Höhe versetzt zueinander, dementsprechend weist das obere Elektrodenende drei verschieden hohe Stufen von Sektoren auf. Die Walzprofile müssen auch entsprechend verlängert werden; dies erfolgt unter Zuhilfenahme von Laschen, und zwar nimmt man die Verlängerung gleichzeitig bei jedem zweiten Träger vor. Den Raum innerhalb des Mantels aus Sektoren füllt man mit Stampfmasse

aus und verwendet hierzu entweder eine gewöhnliche Kohlenmasse oder setzt ihr Abfälle aus dem Schmelzbetriebe zu, bei der Karbiderzeugung beispielsweise unterlitriges Karbid, das auf diese Weise wieder in den Prozeß gelangt und aufgearbeitet wird.

Aus obigem geht hervor, daß die Miguet-Dauerelektrode mit beliebig großem Durchmesser hergestellt werden kann, da das Kohlenmaterial der einzelnen Sektoren praktisch keiner mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist. Mit wachsendem Durchmesser vermehrt sich lediglich die Sektorenanzahl des Querschnittes und damit auch der dazugehörigen Vertikalprofile der Tragkonstruktion sowie der entsprechenden Spindeln der Aufhängung. Die Bearbeitung der Sektoren, namentlich der zylindrischen Fläche und der schwalbenschwanzartigen Fortsätze, muß allerdings

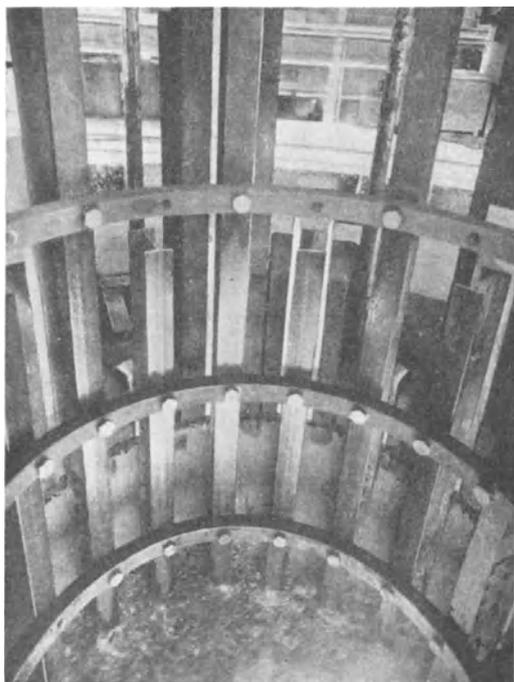


Abb. 95. Innenansicht einer Miguet-Dauerelektrode.

sehr sorgfältig erfolgen, um gute Kontakte zu ergeben. Große, modern eingerichtete Elektrodenfabriken liefern die Sektoren fertigtbearbeitet, doch kann man, falls nur Rohlektroden geliefert werden können, die Sektoren an Ort und Stelle mittels automatischer Spezialmaschinen bearbeiten, die bloß das Einspannen der Sektoren erfordern. Bei der Montage einer ganz neuen Elektrode sind gewisse Vorkehrungen nötig. Entsprechend der Höhenversetzung benachbarter Sektoren setzt man den untersten Teil der Elektrode aus Sektoren von drei verschiedenen Längen zusammen. Um nun die Stampfmasse des Kernes einbringen zu können, schraubt man an den untersten Vierkantring, der die Vertikalprofile verbindet, einen Holzboden, der in den Sektorenring genau hineinpaßt. Der Holzboden erhält nach außen, also auf der Unterseite der Elektrode, eine Blechscheibe, die etwas größer ist als der Holzboden und somit ungefähr 100 mm den Sektorenring überdeckt.

Bei der Elektrode mit einem Durchmesser von 2500 mm für einen Ofen mit 2000—6000 kW rechnet man mit folgenden Gewichten je Meter betriebsfertiger Elektrode:

Sektoren aus amorphem Kohlenstoff . . . . .	5000 kg
Kern aus Stampfmasse . . . . .	2750 kg
Gerüst aus Eisen . . . . .	600 kg
	<hr/>
	8350 kg

Über die Anordnung der Sektoren und über den Bau des Traggerüstes der Miguet-Elektrode, sowie deren Aufhängung, gibt die Abb.136 (S.155) Aufschluß. Dort bemerkt man verschiedene Höhenanordnung benachbarter Sektoren, die dazugehörigen Vertikalprofile und deren Verbindungsringe aus Vierkanteisen.

Zur Verbilligung der Elektrode und um unabhängig von der Lieferung der Sektoren aus amorphem Kohlenstoff zu werden, entstand der Vorschlag, auch die Sektoren aus Stampfmasse, nach Art der selbstbackenden Elektroden, herzustellen<sup>1</sup>. Statt der fertigtgebrannten Sektoren würden in diesem Falle entsprechend geformte Blechmäntel an den Vertikalprofilen befestigt und zwecks Erhöhung der Festigkeit noch miteinander vernietet werden. Die Sektormäntel wären hierauf in der üblichen Weise mit Stampfmasse auszufüllen.

<sup>1</sup> F. P. Nr. 642216.

## B. Graphitelektroden.

Die Elektroden aus amorphem Kohlenstoff besitzen eine von der Leitfähigkeit und vom Querschnitt abhängige Belastbarkeit, die ohne Gefährdung des Betriebes nicht dauernd überschritten werden darf. Dort, wo eine starke Wärmekonzentration erwünscht ist, muß man zu Graphitelektroden greifen, die aus besser leitendem Material hergestellt sind und größere Stromdichten zulassen. Die Belastbarkeit der Graphitelektrode ist 2,5—3 mal so groß als bei der Elektrode aus amorphem Kohlenstoff, und die elektrische Leitfähigkeit ist bis 2000° nahezu konstant. Ein weiterer Vorteil ist der 2,5 mal geringere Verbrauch infolge der höheren Oxydationstemperatur des Graphites und die leichte Bearbeitbarkeit. Dagegen ist die Wärmeleitfähigkeit der Graphitelektrode 10 mal größer, entführt also dem Ofen unter Umständen beträchtliche Wärmemengen. Auch der Preis stellt sich etwa 2,4 mal höher als bei der amorphen Kohlenelektrode, wobei nicht das Verhältnis der Kilopreise, sondern der Verbrauch je kWh zugrunde gelegt ist. Eine von W. Bliemeister<sup>1</sup> zusammengestellte Tabelle gibt eine Gegenüberstellung der wichtigsten Daten:

	Amorpher Kohlenstoff	Graphit
Spezifisches Gewicht . . . . .	2	2,25
Spezifischer Widerstand in Ohm je mm <sup>2</sup> und mehr . . . . .	30—60	8—15
Zulässige Stromdichte in Ampere je cm <sup>2</sup> (nach Querschnitt) . . . . .	5—10	15—25
Mittlere relative Wärmeleitfähigkeit . . . . .	1	10
Oxydationstemperatur in Luft °C . . . . .	435	660
Zugfestigkeit kg je cm <sup>2</sup> . . . . .	70—100	60—75
Mittlerer Verbrauch in kg je 1000 kWh . . . . .	20	8
Preis in Mark je 100 kg . . . . .	33	200

Die Herstellung der Graphitelektroden zerfällt in zwei getrennte Arbeitsprozesse. Der erste entspricht dem der Erzeugung von amorphen Kohlenelektroden, mit dem Unterschiede, daß die Ausgangsstoffe besonders sorgfältig ausgewählt und der Mischung als Katalysatoren wirkende Metalloxyde beigegeben werden. Die Umwandlung des amorphen Kohlenstoffes in Graphit geht im zweiten Prozeß vor sich, der im Ausglühen der Elektroden in einem elektrischen Widerstandsofen besteht, wobei die Beimengungen verflüchtigt werden. Ein Elektrodenglühofen der Firma Acheson Ltd. wurde bereits in Abb. 48 gezeigt. Die Graphitelektroden weisen einen Aschegehalt von 0,5—1,5% gegenüber den amorphen Kohlenelektroden mit 5—10% auf. Namentlich in der Eisen- und Stahlindustrie haben sie Verwendung gefunden, doch auch als Abstichelektroden bei Karbid- und ähnlichen Öfen leisten sie gute Dienste, da beim Abstich mit der Aufbrennelektrode große Strommengen auf einen kleinen Raum einwirken sollen.

Natürlicherweise verlängert man auch die Graphitelektrode mittels Nippelverbindungen. Die Bearbeitung des Graphits bietet keine Schwierigkeiten, und die Gewinde fallen sehr sauber aus. Die nebenstehende Tabelle gibt die Masse für zylindrische Nippel zur Verbindung von Rundelektroden, der gangbarsten Durchmesser zwischen 3" und 16" (also 76—406 mm).

Elektroden ∅ in Zoll	Nippel		Gewinde- gänge je Zoll
	∅ in Zoll	Länge in Zoll	
3	1 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	5	4
4	2 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	7	4
5 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	8	4
6	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	9	3
7	4	9	3
8	4 <sup>13</sup> / <sub>16</sub>	10	3
9	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	11	2
10	6	12	2
12	7 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	12	2
14	8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	14	2
16	9 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	14	2

## Elektrodenfassungen und Tragkonstruktionen.

Die elektrische Energie muß den Elektroden in verlässlicher Weise zugeführt werden, auch sind Haltevorrichtungen vorzusehen, um die Elektrode ihrem Abbrande entsprechend

<sup>1</sup> Zbl. Hütten- u. Walzwerke Nr. 33 (1926) S. 33. Bliemeister, W.: Über Graphitelektroden und amorphe Kohlenelektroden in der Eisen- und Stahlindustrie.

allmählich in den Herd senken zu können. Hierfür gibt es zwei prinzipiell verschiedene Lösungen: entweder man ordnet die Organe der Stromübertragung und jene der Tragkonstruktion gesondert an, oder man vereinigt beide zu einer einzigen Vorrichtung. Diese Ausführung ist allgemein üblich, ausgenommen bei ganz schweren Elektroden, deren Gewicht durch eigene Tragkonstruktionen aufgenommen werden muß. Unter „Fassung“ einer Elektrode versteht man aber trotzdem nur jene Teile der Tragkonstruktion, die auch die Stromzufuhr vermitteln, also sich in unmittelbarer Nähe der Elektrode oder in Berührung mit ihr befinden. Die Kontaktstücke müssen an den Berührungsflächen sorgfältig bearbeitet sein, um ein vollständiges Anliegen an die Elektrode zu gewährleisten. Als Konstruktionsmaterial kommt hier Gußeisen, Stahlguß, Messing, Bronze und Kupfer in Betracht. Die Berührungsflächen sind jedoch selbstverständlich nach dem Material geringerer Leitfähigkeit, also nach der Elektrode, zu dimensionieren. Hierbei soll man nicht über  $3 \text{ A/cm}^2$  gehen, wenn auch die Elektrodenbelastung stets höher als dieser Wert ist. Die Kontaktstücke sind überdies oft der Herdhitze und den heißen Ofenabgasen ausgesetzt; in solchen Fällen versieht man sie mit Wasserkühlungen. Entweder bildet man die Kontaktstücke als Hohlkörper aus, oder man gießt entsprechend geformte Schmiedeeisenrohre ein, deren Oberfläche aber blank sein muß, um eine vollkommene Verbindung mit dem Gußmaterial und einen dementsprechend guten Wärmeübergang zu sichern. Je nach der Anordnung der Kontaktstücke und ihrer Anpressung unterscheidet man Kopffassungen, Zangenfassungen und Ringfassungen. Die Zangenfassungen sind die älteste und naheliegendste Form. Sie gestattet ein Nachstellen der Elektrode innerhalb der Fassung und ist ihrer Einfachheit und Anpassungsfähigkeit wegen bei Runden Elektroden und namentlich bei kippbaren Schmelz- und Raffinieröfen beliebt. Die Kopffassungen entstanden für große, nicht anstückelbare Elektroden und für Pakete aus Einzelelektroden. Ihr Zweck war die möglichst weitgehende Ausnutzung der Elektrodenlänge, also Herabminderung des Elektrodenabfalles. Die Ringfassungen wurden durch die stets wachsenden Durchmesser der Elektroden für die Großöfen der chemischen Industrie bedingt. Sie stellen die vollkommenste Lösung der Elektrodenfassung dar und sind stets bei Dauerelektroden in Gebrauch. Natürlich haben sich auch Fassungstypen entwickelt, die scheinbar keiner dieser drei Gruppen angehören, so z. B. die Fassungen mit seitlichen Kontaktplatten für nichtanstückelbare Einzelelektroden oder Elektrodenpakete. Tatsächlich sind aber diese aus Zangenfassungen hervorgegangen, wie dies später gezeigt werden soll.

Die Tragkonstruktion der Elektroden kann entweder mit dem Ofen dauernd verbunden sein, wie dies bei den meisten kippbaren Schmelzöfen der Fall ist, oder man ordnet die Tragvorrichtung gänzlich unabhängig vom Ofen an, wie bei einzelnen Kippöfen und bei allen Großöfen der chemischen Industrie.

### A. Zangenfassungen.

Das typische Beispiel einer Zangenfassung in ihrer primitivsten Form zeigt Abb. 57 (S. 94) beim Rathenau-Ofen aus dem Jahre 1898. Die Elektrode  $f$  wird durch zwei Kontaktbacken  $g$  gefaßt, die gleichzeitig den Ausleger der Tragvorrichtung bilden. Die eingegossenen Rohrschleifen ermöglichen eine wirksame Wasserkühlung. Die beiden Schrauben  $i$  erzeugen den erforderlichen Anpreßdruck. Die Bewegung der Elektrode erfolgt durch Verschiebung des Auslegers längs der Säule  $h$  mittels des Handantriebes  $k$ . Die zweiteilige Zange, namentlich bei Runden Elektroden, sichert nicht einen verlässlichen Kontakt über die ganze Fassungsfläche. Man hat daher bald die heute allgemein übliche drei- und mehrteilige Zangenfassung eingeführt. Die Backen sind gelenkig miteinander verbunden und werden durch Schrauben festgezogen. Die Stromzufuhr zu den einzelnen Backen wird unabhängig vom Tragarm ausgebildet. Jede Kontaktbacke erhält eine Fahne, zu der biegsame Kupferseile oder Kupferblechbündel führen. In Abb. 96 sieht man eine gut durchgebildete Elektrodenfassung der Bauart Brown-Boveri für Schmelz-

öfen, die allseitig verstellbar ist und somit eine Zentrierung der Elektrode in der Deckelöffnung ermöglicht. Die dreiteilige Fassung ist als Ganzes auch gegenüber dem Tragarm verstellbar. Besonders gut sind hier die Stromzuführungen zu den Kontaktbacken zu sehen. Die Kupferblechbündel, welche mit den Anschlußfahnen verschraubt sind, gestatten sowohl die Bewegung der Backen, als auch jene der ganzen Fassung. Bei größeren Elektrodendurchmessern bildet man die Kontaktbacken getrennt von der Spannvorrichtung aus. Die Backen müssen in erster Linie eine gute Leitfähigkeit aufweisen, während die Spannvorrichtung Festigkeit besitzen soll. Eine von der Demag-Elektrostahl-G. m. b. H. (Düsseldorf) sehr sorgfältig konstruierte Fassung dieser Art für eine 300 mm-Elektrode soll an Hand der Abb. 97 besprochen werden.

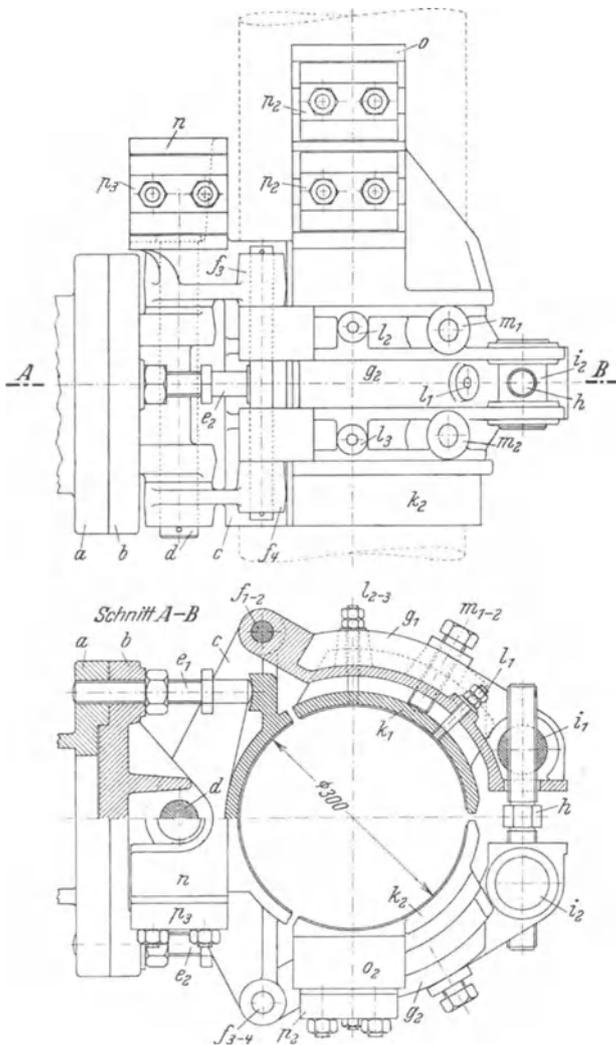


Abb. 97. Zangenfassung für 300 mm Elektroden, Bauart Demag.

Kontaktbacke mit der dazugehörigen Preßbacke lose verbunden. Der Preßdruck wird durch die beiden einstellbaren Schrauben  $m_1$  und  $m_2$  übertragen. Die Stromzufüh-

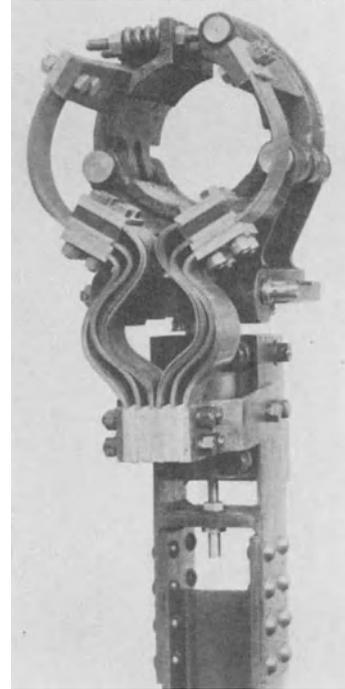


Abb. 96. Zangenfassung für Elektroden, Bauart Brown Boveri.

Mit der Kopfplatte  $a$  des Tragarmes ist ein Gelenkstück  $b$  fest verschraubt. Die Kontaktbacke  $c$  ist mit dem Gelenkstück  $b$  durch den Bolzen  $d$  verbunden, so daß die Fassung und somit die Elektrode um den Bolzen schwingen kann. Diese zur Zentrierung der Elektrode dienende Bewegung ist durch die beiden Stellschrauben  $e_1$  und  $e_2$  regulierbar. Die Kontaktbacke  $c$  besitzt zwei weitere Gelenkpaare  $f_{1-2}$  und  $f_{3-4}$  zur Verbindung mit den Preßbacken  $g_1$  und  $g_2$ , die aus Stahlguß hergestellt sind. Die Spindel  $h$  mit Gegengewinden greift in Gelenkmuttern  $i_1$  und  $i_2$  der Preßbacken ein und erzeugt den notwendigen Anpreßdruck. Die Kontaktbacken  $k_1$  und  $k_2$  sind aus Spezialmessingguß hergestellt. Mittels der Schrauben  $l_{1-3}$  ist jede

zung erfolgt durch Kupferseile, zu deren Befestigung in der Kontaktbacke  $c$  die Doppelfahne  $n$  und in den Kontaktbacken  $k_1$  und  $k_2$  die Fahnen  $o_1$  und  $o_2$  dienen. Die Seile werden in Rillen der Fahnen eingelegt und mittels der Druckstücke  $p_{1-3}$  festgeklemmt. Die Kontaktbacken bedürfen, namentlich bei Verwendung von Graphit-elektroden oder von selbstbackenden Dauerelektroden, einer wirksamen Kühlung; in solchen Fällen gießt man in die Backen Kühlrohre ein. Eine Fassung mit Wasserkühlung dieser Art und eine gut durchgebildete Elektrodentragkonstruktion für einen 20-t-Stahlschmelzofen ist in Abb. 98 zu sehen. Die Fassung ist gelenkig mit dem Ausleger verbunden. Die Stromzuführungsschienen sind über dem Tragarm angeordnet, gegen den

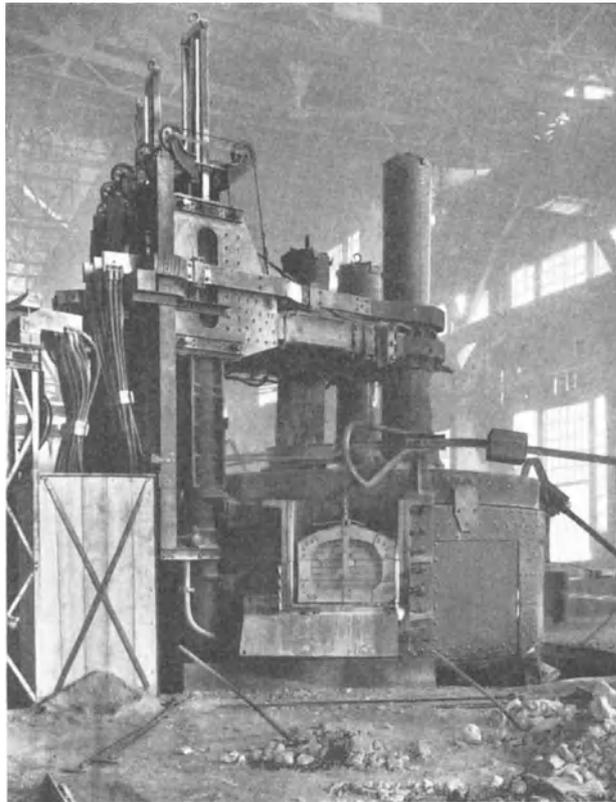


Abb. 98. 20-t-Ofen mit Soderbergelektroden.

Am Ende der Stromschienen sind die biegsamen Kupferseile angeklemt, die zu den Transformatoranschlüssen führen. Der Ausleger ist mit einem kräftigen Wagen vernietet, der längs einer Hohlsäule auf Rollen gleitet. Die Hohlsäule ist als Druckzylinder der hydraulischen Elektrodenverstellung ausgebildet. Die Kolbenstange ragt aus dem oberen Säulenende hervor und ist mittels eines Querbügels und zweier Zugstangen mit dem Auslegerwagen verbunden. Das Gewicht der Elektrode und der beweglichen Teile der Tragkonstruktion ist durch ein Gegengewicht annähernd ausgeglichen. Das Gegengewicht läuft in einer Führung, die hinter der Tragsäule zu sehen ist; die Stahlseile greifen vorn am Wagen an und sind über Rollen geführt, die mittels Tragarmen am oberen Ende der Tragsäule angebracht sind. Die Verbindung der Elektrodentragvorrichtung mit dem Ofen sollte zweckmäßig an der Bodenplatte des Ofengefäßes und nicht am Mantel erfolgen, um zu vermeiden, daß durch Verziehen

der Wandungen die Säulen und damit die Elektroden aus ihrer richtigen Lage geraten. Die elektrische Isolation der Elektroden gegeneinander und gegen den Ofen ist in die Laufrollen des Auslegerwagens verlegt. Nach einem Patent der Brown-Boveri-Werke ist zwischen Rollenkranz und Nabe eine Glimmerlage vorgesehen<sup>1</sup>. Die Unterbringung der Isolation am Ausleger unmittelbar hinter der Fassung ist ungünstig, weil sie dort der Hitze ausgesetzt ist und bald zerstört wird.

Die Tragkonstruktion für die drei Elektroden eines modernen 4000 kW-Heroult-Ofens der Demag-Elektrostahl G. m. b. H. ist in Abb. 99 gezeigt. Hier ist der Ausleger fest mit der Tragsäule verbunden, die zwischen Rollen bewegt wird. Die Rollen sind an einem für alle drei Säulen gemeinsamen Rahmen angebracht, der mit Walzprofilen vernietet ist, die an der Bodenplatte des Ofengefäßes befestigt sind. Die Tragkonstruktion steht somit in keinerlei Verbindung mit dem Ofenmantel und wird von eventuellen Deformationen desselben nicht beeinflusst.

<sup>1</sup> DRP. 516397.

Eine Sonderbauart der Elektrodenkonstruktion ist der Abb. 100 zu entnehmen. Der sog. Fiat-Ofen ist mit einer Brücke ausgerüstet, die über den ganzen Ofen reicht und sich gegen den kräftig versteiften Ofenrand abstützt. Die Brücke ist im Betriebe unbequem,

weil sie beim Deckelwechsel abgehoben werden muß. Sie ist aber durch die besondere Abdichtungsvorrichtung der Elektroden in den Deckelöffnungen (siehe S. 130) bedingt und trägt auch die Vorrichtung für die Bewegung der Elektroden. Die Abb. 101 zeigt sowohl die Abdichtung als auch die Tragkonstruktion für die Elektroden eines Fiat-Ofens. Für jede Elektrode ist auf der Ofenbrücke  $l$  ein Säulenpaar  $m_{1-2}$  angeordnet, das am oberen Ende durch einen Bügel  $n$ , am

unteren Ende durch das Gußstück  $e$  verbunden ist. Längs der Säulen  $m$  bewegt sich das Gleitstück  $o$ , das die Fassung  $p$  der Elektrode trägt. Die Bewegung des Gleitstückes erfolgt mittels der Schraubenspindel  $q$  und der dazugehörigen Mutter  $r$ . Die Spindel wird durch den Motor  $s$  und das Schnecken-

getriebe  $t$  gedreht. Durch die Drehung der Spindel wird die Mutter  $r$  gehoben oder gesenkt und nimmt durch das Rohr  $u$  und die beiden Stangen  $v_{1-2}$  das Gleitstück bzw. die Elektrode mit. Die Abschaltung des Motors bei Höchststellung der Elektrode erfolgt durch einen normalen Endschalter, der mittels des Hebels  $w$  betätigt wird. Für den Fall aber, daß die Elektrode während der Abwärtsbewegung auf

Schrott oder sonst auf ein Hindernis auftrifft, wobei Brüche unvermeidlich wären, ist eine selbsttätige Auslösung vorgesehen. Das Schneckenrad  $x$  des Spindeltriebes ist als Reibungskupplung ausgebildet. Sobald die Elektrode in ihrer Abwärtsbewegung gehemmt wird, erfährt die Spindel durch die Gegenkraft eine Aufwärtsbewegung, entspannt dadurch die Feder  $y$ , wobei die Anpressung der Kupplungsscheibe  $z$  vermindert wird und das Schneckenrad leer laufen kann. Bei Umkehr des Drehsinnes faßt die Kupplung aber sofort wieder.

Taussig, Elektr. Schmelzöfen.

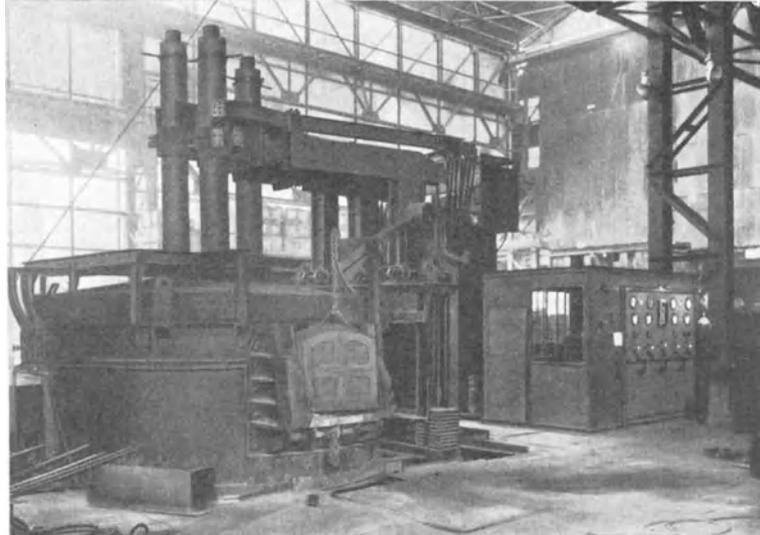


Abb. 99. 4000-kW-Héroult-Ofen, Bauart Demag-Elektrostahl.

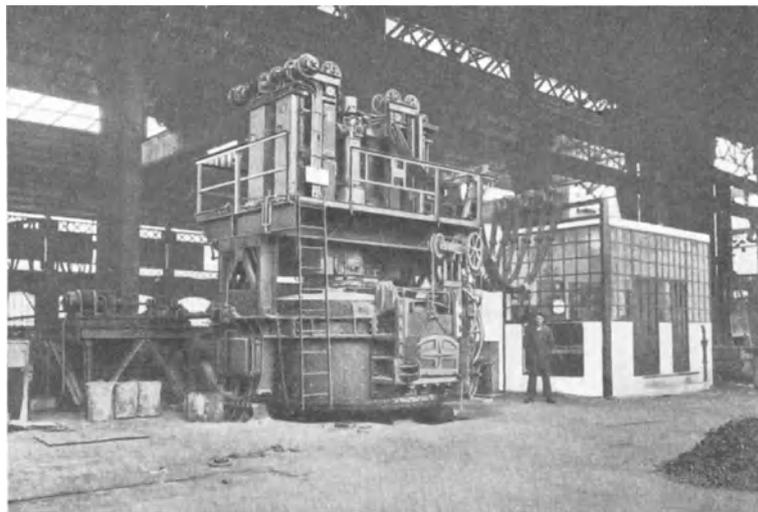


Abb. 100. Fiat-Ofen.

Vereinzelt findet man bei kippbaren Schmelzöfen auch Elektrodenträgerkonstruktionen, die gänzlich unabhängig vom Ofen sind. Nathusius hat diese Bauart, die bei den Öfen für chemische Prozesse allgemein üblich ist, bei seinem Ofen zuerst angewendet. Ein 12-t-Nathusius-Ofen mit freihängenden Elektroden ist in Abb.102 zu sehen. Die Fassung ist statt mit einem Ausleger mit einem Bügel verbunden, der eine Rolle trägt. Der Bügel muß genügend hoch sein, um das Einsetzen der Verlängerungselektrode zu erlauben. Die Seile der Aufhängung führen zu Rollen, die entweder in der Dachkonstruktion oder in einem eigenen Trägergerüst untergebracht sind. Statt der sonst üblichen Kupferseile für die Stromzuführung sieht man hier Bündel von Kupferblechstreifen. Sie sind in diesem Falle zulässig, weil die Elektroden bloß in vertikaler Richtung verschoben werden; bei Elektroden, die aber mit dem Ofen gekippt werden sollen, bieten die Blechbündel einen erheblichen Widerstand gegen die Verwindung. Die freihängenden Elektroden haben den Vorteil, daß der Ofen von allen Seiten zugänglich ist. Dagegen besitzt diese Anordnung den bedeutenden Nachteil, daß beim Kippen des Ofens die glühenden Elektroden dem Angriff des Luftsauerstoffes ausgesetzt sind. Außerdem müssen beim Kippen des Ofens die Deckelöffnungen verschlossen werden, weil sonst im Ofen eine Zugwirkung entsteht, die starke Abkühlung zur Folge hat. Man verwendet daher freihängende Elektroden meistens nur mehr bei Doppelföfenanlagen, wo eine Elektrodengarnitur abwechselnd in

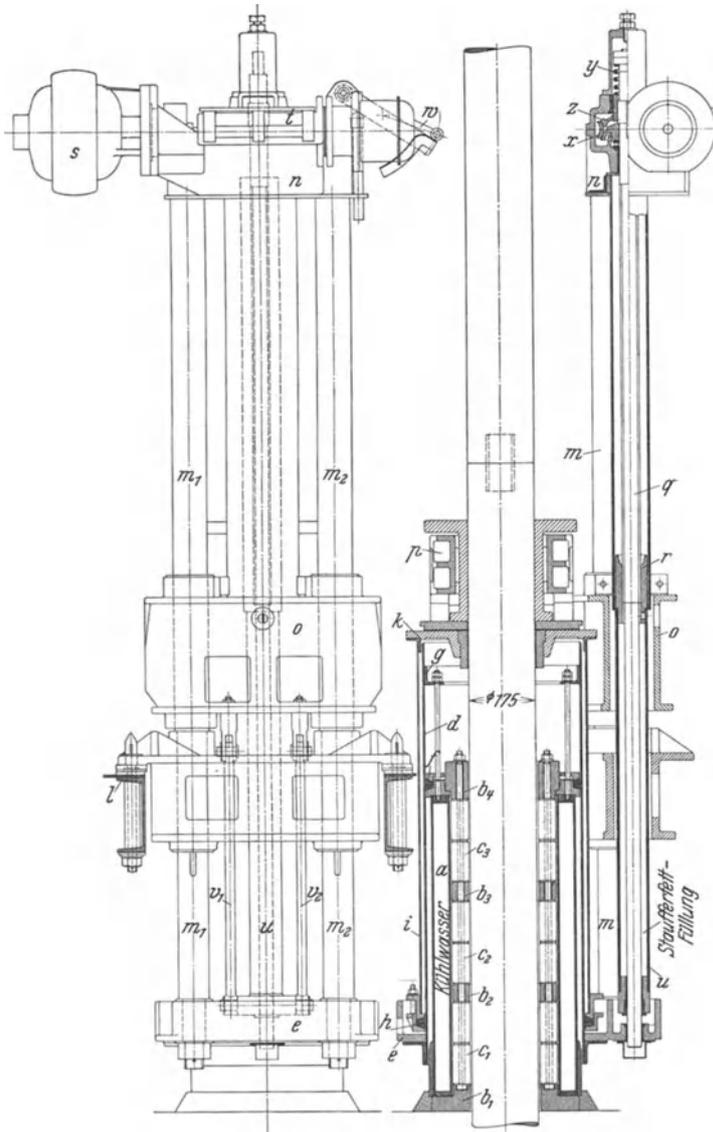


Abb. 101. Elektrodenabdichtung, Bauart Fiat.

zwei Öfen benutzt wird, die zweckmäßig auf einer Drehscheibe montiert sind. Die Wirtschaftlichkeit dieser Anordnung ist aber nicht immer gewährleistet.

Die Zangenfassungen wurden stets für Einzel- und Paketelektroden mit Vierkantquerschnitt verwendet. Diese Pakete führen meist mehrere tausend kW. Ihre Fassungen greifen oft bis tief in den Ofen hinein und sind den heißen, chemisch wirksamen Ofengasen ausgesetzt. Sie dürfen daher keinerlei empfindliche Teile besitzen, müssen billig und rasch ersetzbar sein. Eine solche Fassung ist in Abb.103 gezeigt. Ähnliche Zangen wurden bereits in den ersten Entwicklungsstadien des Elektroofens benutzt, doch war

damals das Elektrodenmaterial schwer bearbeitbar, und gerade bei dieser Fassung muß der Elektrodenkopf genau zur Zangenbacke passen, sonst bewirkt der Anpreßdruck bei ungleichmäßiger Auflage ein Abreißen des abgesetzten Elektrodenkopfes. Man hat aus diesem Grunde seinerzeit diese Bauart verlassen und erst neuerdings auf sie zurückgegriffen. Für die beiden kräftigen Kontaktbacken *b* verwendet man feuerbeständigen Guß mit eingegossenem Kühlrohr *c*. Der Anpreßdruck wird mittels der Schrauben *d* erzeugt, die in den Kontaktbacken versenkt angeordnet sind. Das Zwischenstück *e* bildet das Gelenk der Zange, um welches die Backen beweglich sind. Sowohl die Kontaktflächen der Backen als auch jene der Elektrode *a* sind sorgfältig zu bearbeiten. Besonders zu achten ist auf die gleiche Neigung dieser Flächen, denn sonst tritt, außer schlechten Kontakten,

beim Anziehen der Schrauben ein unzulässig hoher Druck unter den aufliegenden Kanten auf, der, wie schon erwähnt, ein Abreißen der Elektrode bewirken kann. Die Verbindung der Kühlwasserleitung mit den Kontaktbacken und bei Paketen jene der Kühlrohre benachbarter Backen wird mittels Kegelstutzen *f* hergestellt, deren Kegel ganz schwache Neigung (1 bis 1,5%) besitzen, und die in entsprechende Bohrungen der Backen eingepreßt werden. Die Verbindungsrohre *g* sind mit den Kegelstutzen *f* verschraubt. Auch bei den

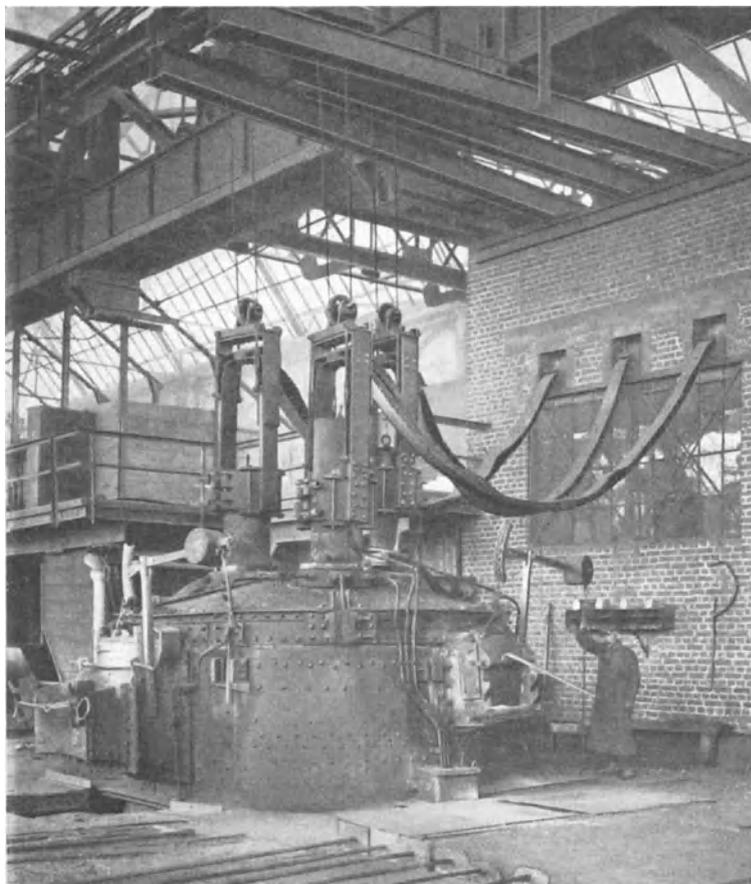


Abb. 102. 12-t-Nathusius-Ofen mit freihängenden Elektroden.

Organen der Stromzuleitung muß für wirksame Kühlung gesorgt werden. Daher verwendet man an Stelle von Kupferschienen nunmehr wasserdurchflossene Kupferrohre *h*, doch werden diese nicht zu den Kontaktbacken selbst, sondern zu Anschlußschuhen *i* geführt. Diese Anschlußschuhe sind als Hohlkörper ausgebildet und erhalten je zwei Stromzuleitungsrohre, von denen das eine als Kühlwasserzulauf, das andere als Ablauf dient. Auch hier sieht man für den Anschluß der Kupferrohre Kegelstutzen *k* vor, welche in den Anschlußschuhen eingepreßt werden. Da aber die Verbindung zwischen Stutzen und Stromzuführungsrohr nicht nur dicht wegen des Kühlwassers sein soll, sondern auch einen verlässlichen Kontakt wegen des Stromüberganges haben muß, genügt eine einfache Verschraubung nicht mehr. Um aber doch in der Lage zu sein, die Teile gelegentlich zu trennen, verwendet man hier einen Metallverschluß *l*, dessen Einzelheiten der Abb. 104 zu entnehmen sind. Dort ist *a* der Kegelstutzen, der im Anschlußschuh eingetrieben wird. Der Stutzen erhält eine mittels Gewinde aufgeschraubte

Manschette *b*. In den Raum zwischen Manschette und Stutzenrohr ragt von oben das ausgeweitete Ende des Stromzuleitungsrohres *c* hinein. Beim Zusammenbau werden die

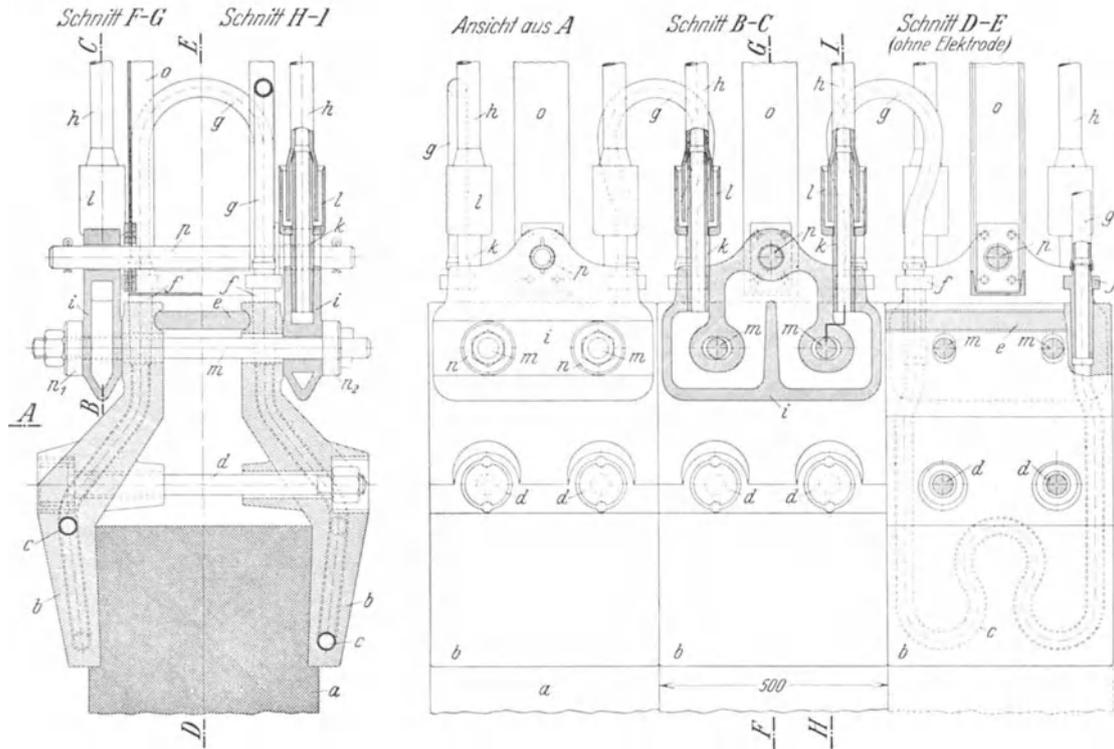


Abb. 103. Zangenfassung für Paketelektroden.

angewärmten Teile, wie beschrieben, ineinandergesteckt und der Zwischenraum mit Zinn *d* ausgegossen. Der obere Rand des Kegelrohres muß stets höher sein als jener der Manschette, um einen Übertritt von Zinn in das Rohrinne zu verhüten. Nach dem Erstarren des Zinns ist diese Verbindung ebenso verlässlich in bezug auf Stromübergang als auch auf Dichtigkeit. Außerdem besitzt sie den Vorzug rascher Lösbarkeit, da mittels einer Lötlampe das Zinn leicht geschmolzen und die Verbindung gelöst werden kann. Die Schraube *e* dient zum bequemen Ablassen des geschmolzenen Zinns, weil die Kegelstutzen im schweren Anschlußschuh sitzen, der auf diese Art nicht erst gestürzt zu werden braucht. Die Kontaktfläche zwischen Anschlußschuh *i* und Kontaktbacke *b* (Abb. 103) ist natürlich sorgfältig bearbeitet. Die Schraube *m* preßt mittels kräftiger Unterlagsscheiben *n*<sub>1</sub> und *n*<sub>2</sub> Anschlußschuhe und Kontaktbacken zusammen. Die Verbindung mit der Tragkonstruktion *o* des Elektrodenpaketes erfolgt hier in einfacher Weise durch den Bolzen *p*. Abb. 111 (S. 137) zeigt diese Fassung im Betriebe. Als Tragkonstruktion dient hier ein sog. „Querhaupt“, welches auf S. 136 näher beschrieben ist. Die schlechten Erfahrungen, welche man früher mit dieser Art von Zangenfassungen gemacht hatte,

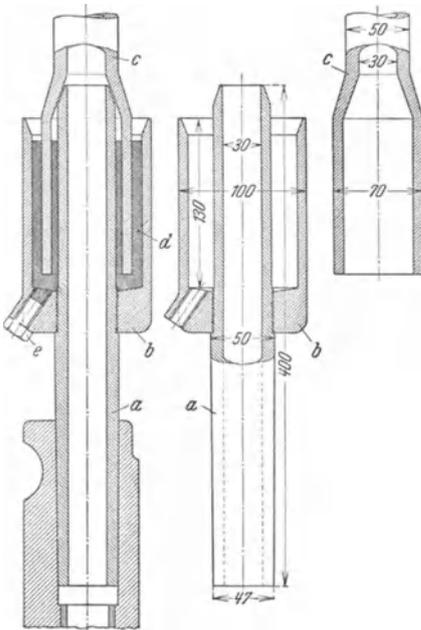


Abb. 104. Verbindung des Stromzuführungsrohres mit dem Stutzen des Anschlußschuhs (Detail zu Abb. 103).



trodenpaketes geht aus Abb. 106 hervor. Darin sind *Q* die Elektroden, *P* die Kontaktplatten, *O* die Laschenplatten und *N* die Anschlußschuhe, wie sie eben beschrieben wurden. Das Gewicht des „armierten“ Elektrodenpaketes, also der Elektroden samt

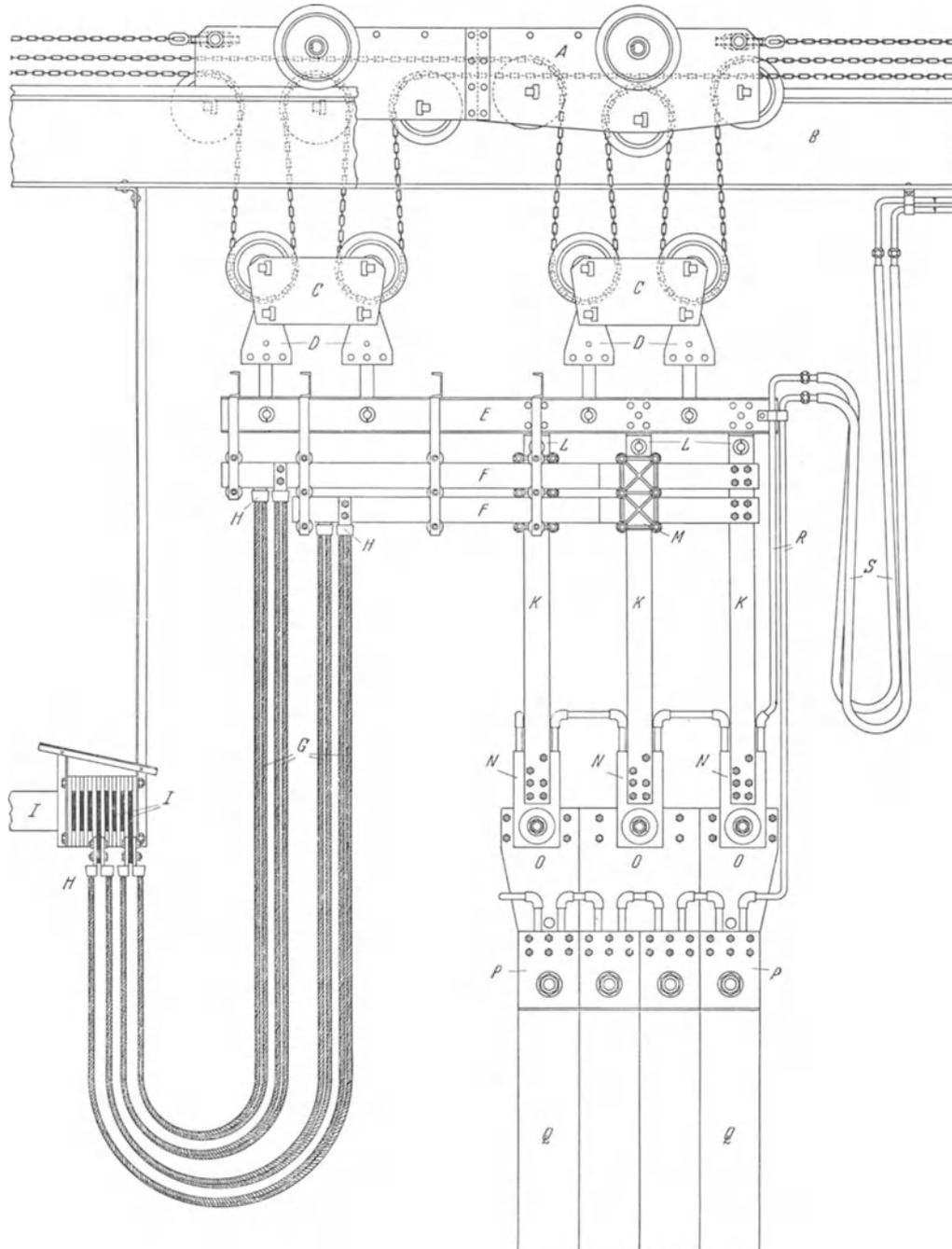


Abb. 106. Elektrodenaufhängung und Stromzuführung.

Fassungsteilen, wird durch die Kupferschienen *K*, die gleichzeitig als Stromzuleitungen dienen, und die Laschen *L* auf den Hauptträger *E* übertragen. Der Hauptträger besteht aus Walzprofilen, an ihm hängen auch die horizontalen Kupferschienen *F*, die zu den vertikalen Schienen *K* führen, und an deren Enden die Kabelschuhe *H* der Kupferseile *G*

befestigt sind. Die stählernen Druckplatten *M* sichern die Verbindung der horizontalen mit den vertikalen Stromschienen. Mittels der Kupferseile *G* ist das Elektrodenpaket an eine Phase der Ringleitung *I* geschlossen. Die Rohre *R* der Kühlwasserleitung für die Fassung führt man auch bis zum Hauptträger, wo erst die Schläuche *S* angeschlossen werden, welche die Verbindung mit den im Ofenraum festverlegten Rohrleitungen des Zu- und Abflusses herstellen. Nun muß aber das Paket und die Tragkonstruktion verlässlich gegen die Teile der Hubvorrichtung und der Kranbahn isoliert werden. Hierzu dienen die Isolierstücke *D*, welche zwischen den Kranflaschen *C* und dem Hauptträger *E* angeordnet werden. Ein Ausführungsbeispiel für ein Isolierstück ist in Abb.107 wiedergegeben. Durch das Auge des Bolzens *a* wird der Verbindungsbolzen mit dem Hauptträger gesteckt. Die Schraubenmutter, die durch einen Splint gesichert ist, stützt sich gegen eine große kräftige Unterlagsscheibe *b*, welche das Gewicht des Paketes auf den Isolierkörper *c* verteilt. Als Isoliermaterial nimmt man gewöhnlich Clematélite, Vitrit, Rocaten oder Pierrit. Der Isolierkörper wird in der Lasche *d* durch Winkeleisen und Stellschrauben festgehalten, so daß der Bolzen in der Laschenbohrung *e* zentriert ist und nicht durch Berührung einen Schluß herbeiführen kann. Außerdem wird noch zwischen Lasche und Isolierkörper eine Lage Glimmer *f* eingelegt. Bei Verwendung von Metallschläuchen für die Kühlwasserleitungen muß ein entsprechendes Stück Gummischlauch eingeschaltet werden. Da der Wechsel der Elektrodenpakete nicht über dem Ofen erfolgen kann, muß die Hubvorrichtung auch ein seitliches Verfahren des ganzen Elektrodengehänges gestatten. Zu diesem Zwecke ist eine Laufkatze *A* (in Abb.106) vorgesehen, die sich auf dem Kranbahnträger *B* bewegt. Abb.108 zeigt ein Elektrodengehänge dieser Bauart, doch ist hier das Paket mit einer Kopffassung versehen, die an vier vertikalen Schienenbündeln hängt.

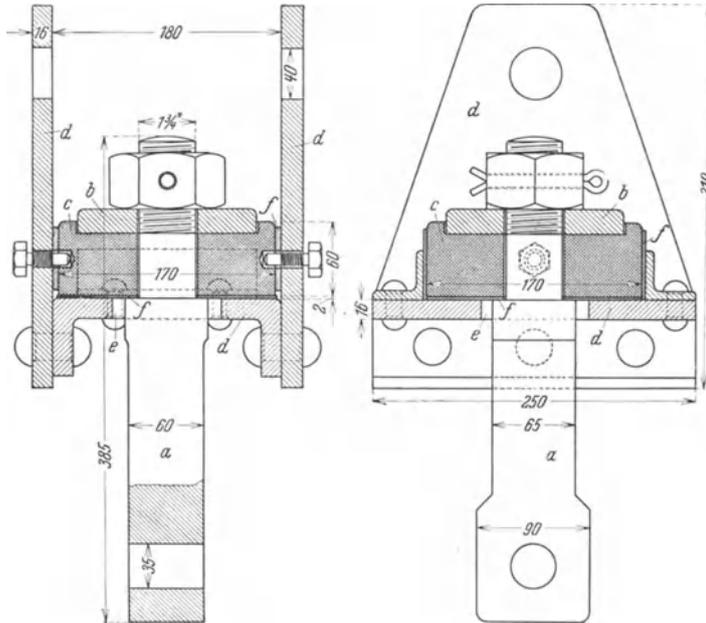


Abb. 107. Isolierstück.

Die Schraubenmutter, die durch einen Splint gesichert ist, stützt sich gegen eine große kräftige Unterlagsscheibe *b*, welche das Gewicht des Paketes auf den Isolierkörper *c* verteilt. Als Isoliermaterial nimmt man gewöhnlich Clematélite, Vitrit, Rocaten oder Pierrit. Der Isolierkörper wird in der Lasche *d* durch Winkeleisen und Stellschrauben festgehalten, so daß der Bolzen in der Laschenbohrung *e* zentriert ist und nicht durch Berührung einen Schluß herbeiführen kann. Außerdem wird noch zwischen Lasche und Isolierkörper eine Lage Glimmer *f* eingelegt. Bei Verwendung von Metallschläuchen für die Kühlwasserleitungen muß ein entsprechendes Stück Gummischlauch eingeschaltet werden. Da der Wechsel der Elektrodenpakete nicht über dem Ofen erfolgen kann, muß die Hubvorrichtung auch ein seitliches Verfahren des ganzen Elektrodengehänges gestatten. Zu diesem Zwecke ist eine Laufkatze *A* (in Abb.106) vorgesehen, die sich auf dem Kranbahnträger *B* bewegt. Abb.108 zeigt ein Elektrodengehänge dieser Bauart, doch ist hier das Paket mit einer Kopffassung versehen, die an vier vertikalen Schienenbündeln hängt.

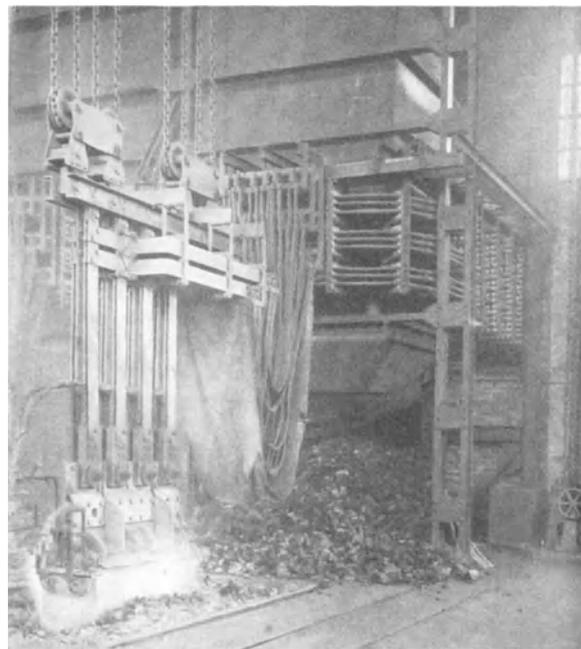


Abb. 108. Aufhängung eines Elektrodenpaketes.

Bei Fassungen, die tief in die heiße Beschickung hineinreichen oder bei geschlossenen Öfen nach Abb.185 (S.196), genügt nicht mehr die Ausführung mit bloß gekühlten Kontaktplatten und Anschlußschuhen. Alle Teile, die mit der Beschickung in Berührung kommen

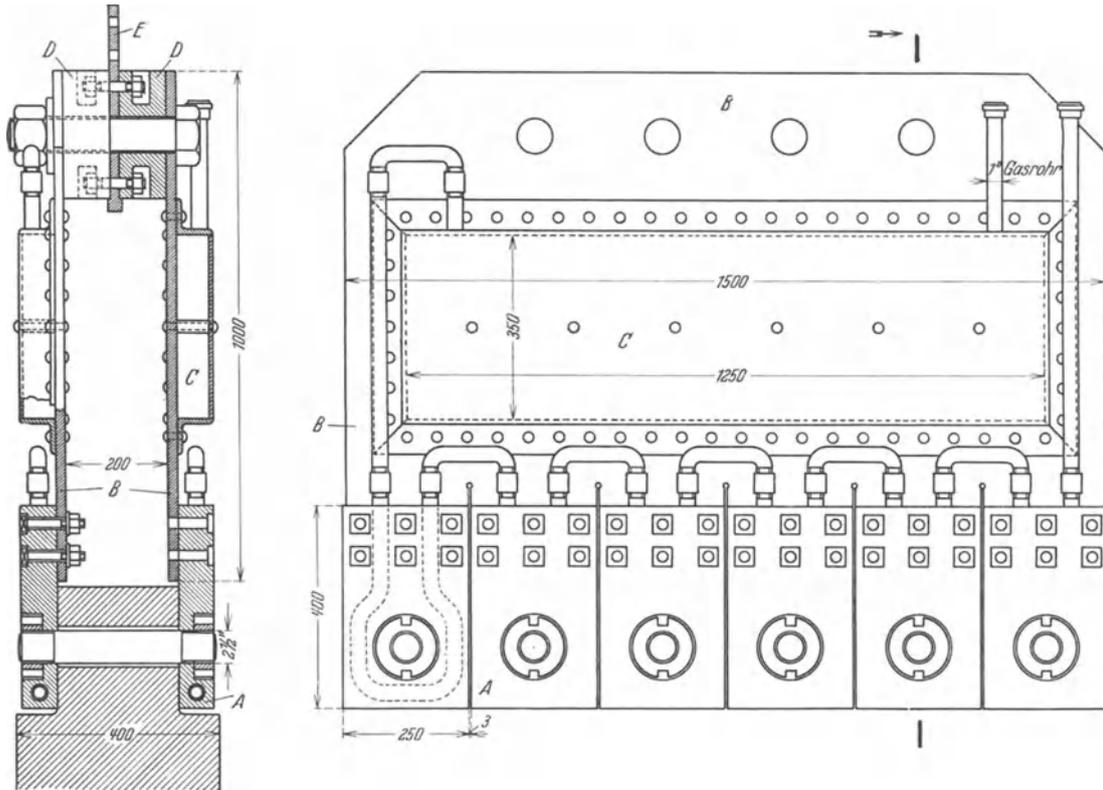


Abb.109. Fassung mit seitlichen Kontaktplatten und gemeinsamen Laschenplatten für ein Sechselektrodenpaket.

könnten, müssen Wasserkühlungen erhalten, außerdem soll das ganze Elektrodenpaket samt Fassung einen möglichst gleichmäßigen prismatischen Körper bilden und keinerlei vorspringende Kanten und Schrauben besitzen, die bei der Bewegung des Paketes un-

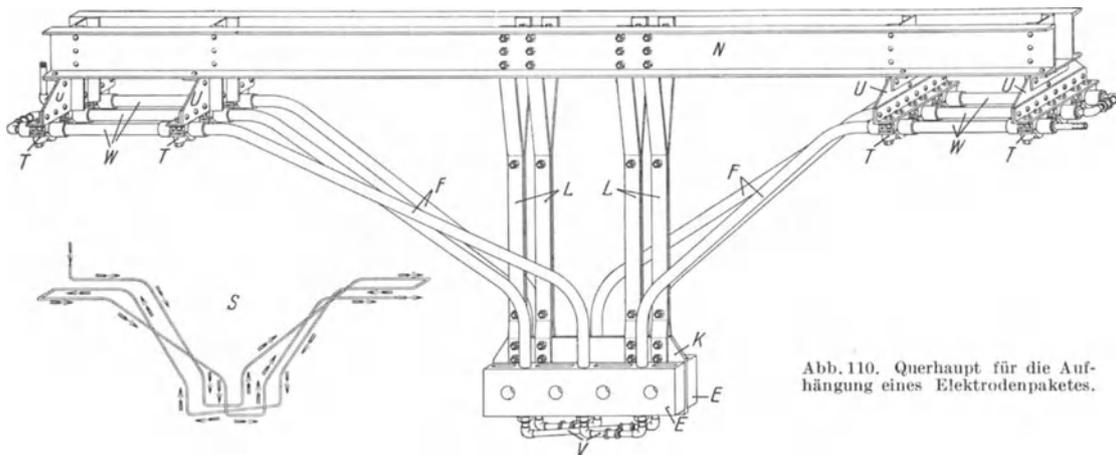


Abb.110. Querhaupt für die Aufhängung eines Elektrodenpaketes.

zulässige Reibung oder gar ein Hängenbleiben verursachen könnten. Außerdem bewirken vorspringende Konstruktionsteile eine Schlotwirkung, welche die Stichflammen zu den Elektroden und zur Fassung ziehen. Abb.109 zeigt ein Sechselektrodenpaket dieser

Bauart. Die Elektrodenköpfe sind stark abgesetzt, so daß die Kontaktplatten *A* nicht über die Seitenfläche der Elektrode vorspringen. Auch die Preßschrauben und die Verbindungsschrauben mit der Laschenplatte sind versenkt in den Kontaktplatten angeordnet. Die gußeisernen Kontaktplatten erhalten die üblichen eingegossenen Kühlrohre. Für das ganze Paket wurden aber hier durchlaufende Laschenplatten *B* verwendet, deren unterer Rand entsprechend der Anzahl Kontaktplatten geschlitzt ist, um Ausbiegungen durch Wärmedehnungen zu vermeiden. Die Hauptflächen der Laschenplatten sind mit Kühltaschen *C* versehen, deren Gestalt sich auch der Paketform anpaßt. Die Anschlußschuhe *D* sind bei dieser Ausführung zwischen die Laschenplatten verlegt und aus Kupfer hergestellt. Sie nehmen die wasserdurchflossenen Stromzuführungsrohre auf und sind durch Schrauben mit dem schmiedeeisernen Zwischenstück *E* verbunden, welches der Tragkonstruktion ange-

hört. Der Ein- und Ausbau des Paketes erfolgt mittels der vier kräftigen Schrauben, welche die Laschenplatten, die Anschlußschuhe und das Zwischenstück zusammenpressen. Der Weg des Kühlwassers ist ohne weiteres der Zeichnung zu entnehmen; es fließt zuerst durch die Kontaktplatten und sodann durch die Kühltasche der Laschenplatte. Jede Seite des Paketes erhält hier eine eigene Kühlung. Die Anschlußschuhe, das Zwischenstück, die Tragkonstruktion und die

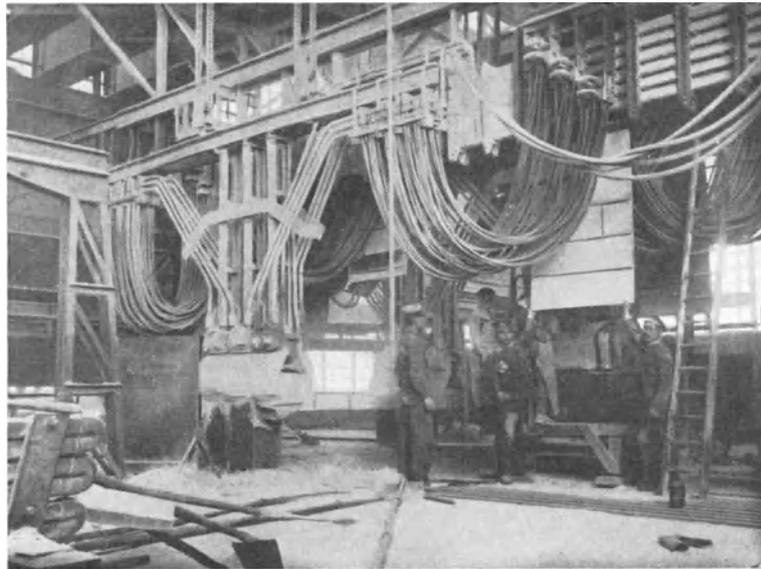


Abb. 111. Querhaupt für einen 12 000-kW-Drehstromofen.

Stromzuleitungen gehen aus Abb. 110 deutlicher hervor. Der Hauptträger *N* ist als „Querhaupt“ ausgebildet, das über die ganze Ofenbreite reicht und an beiden Enden Stromanschlüsse trägt. Die Stromzuführungen zum Paket sind hier unabhängig von seiner Aufhängung, da das Gewicht durch die Flacheisen *L* auf das Querhaupt übertragen wird. Die Flacheisen sind mit dem schmiedeeisernen Zwischenstück *K* verschraubt, das in der beschriebenen Weise mit den beiden kupfernen Anschlußschuhen verbunden ist. Als Stromzuführungen dienen hier wasserdurchflossene Kupferrohre *F*, die einerseits durch Querträger *U* und Schellen *T* am Hauptträger *N* befestigt sind, andererseits mittels steiler Konusse durch Spannmuttern in den Anschlußschuhen eingepreßt werden. Zur Überleitung des Kühlwassers aus einem zum anderen Rohrstrang sind unter den Anschlußschuhen Verbindungsleitungen *V* vorgesehen. Das Schema zeigt den Weg des Kühlwassers in den Stromzuführungsrohren. Der Anschluß an den Transformator bzw. an die Ringleitung erfolgt durch Kupferseile, deren Kabelschuhe als Schellen ausgebildet sind. Die Schellen werden auf den horizontalen Teilen *W* der Kupferrohre zwischen den Querträgern *U* befestigt. Eine ähnliche Querhauptkonstruktion ist in Abb. 111 zu sehen. Auch hier müssen zwischen Querhaupt und Kranflaschen die beschriebenen Isolierstücke eingeschaltet werden.

## B. Kopffassungen.

Vielfach werden auch die bereits beschriebenen Fassungen mit seitlichen Kontaktplatten zu den Kopffassungen gezählt, weil die Bezeichnung Elektrodenkopf verschieden angewendet wird, indem man einmal den ganzen Oberteil der Elektrode, das andere Mal bloß ihre obere Fläche darunter versteht. In die Gruppe der Kopffassungen gehören einwandfrei alle jene Fassungen, die auf dieser oberen Fläche aufliegen. Die beste Konstruktion dieser Art war die sog. „italienische Fassung“, der nur mehr historische Bedeutung zukommt. Ihr Grundgedanke war, die Fassungsteile möglichst hoch über dem Herd derart anzuordnen, daß sie auch von den heißen, längs der Elektrode aufsteigenden Abgasen nicht getroffen werden. Auch sollte durch die Fassung eine möglichst vollständige Ausnutzung der Elektrodenlänge ermöglicht werden. Eine sorgfältig durchgebildete

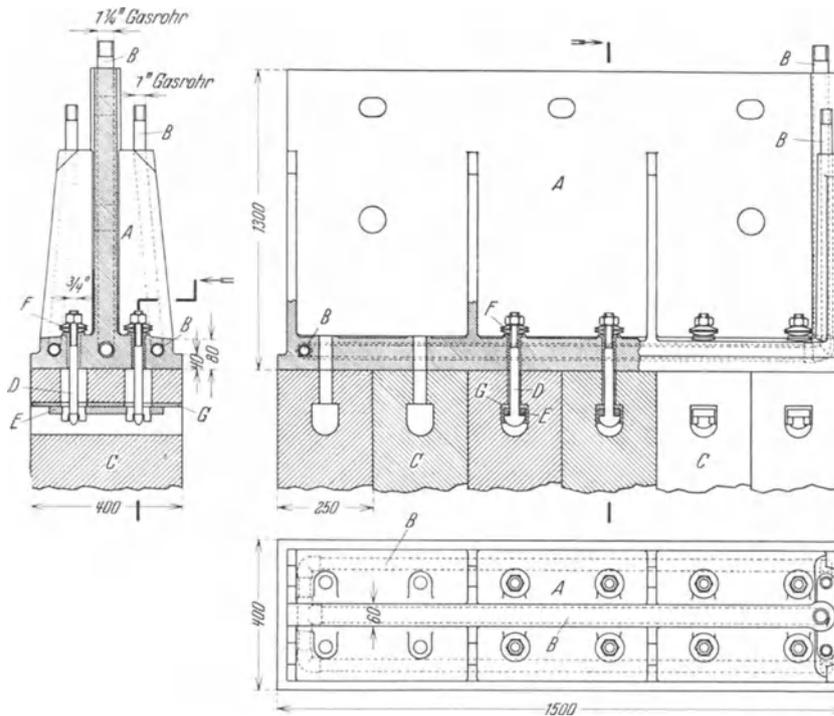


Abb. 112. Kopffassung für ein Sechselektrodenpaket.

Fassung dieser Type ist in Abb. 112 dargestellt. Die gußeiserne Kopfplatte *A* reicht über das ganze aus sechs Elektroden *C* bestehende Paket. Die horizontale kräftige Gußplatte besitzt eingegossene Kühlrohre *B*. Die Unterseite ist als Kontaktfläche plan bearbeitet; die Kopfflächen der Elektroden müssen gleichfalls vollständig eben sein. Die Anpressung erfolgt mittels Hammerschrauben *D*, für deren Einbringung in der Elektrode entsprechende Ausnehmungen vorzusehen sind. Der Druck der Hammerschrauben wird durch die gußeiserne Unterlagsplatte *E* auf eine entsprechend größere Fläche verteilt, doch ruht die Unterlagsplatte nicht direkt auf dem Elektrodematerial auf, sondern auf einer Zwischenlage *G* aus Glimmer, welche auch verhindert, daß der Hammer seitlich den Elektrodenschlitz berührt. Der Bolzen der Schrauben ist gleichfalls mittels eines Glimmerrohres vor der Berührung mit der Kopfplatte geschützt. Es soll dadurch vermieden werden, daß der Strom durch die Schrauben fließt und diese erhitzt, wodurch der Kontakt an der Kopffläche gefährdet würde. Die unvermeidlichen Wärmedehnungen der Schraubenbolzen werden durch die federnden Unterlagsscheiben *F* ausgeglichen. Die Stromzufuhr und die Aufhängung erfolgt mittels der angegossenen Fahne, die durch Rippen gegen die Kopfplatte versteift ist. Eine Laschenplatte entfällt daher, und die Anschlußschuhe werden direkt mit der Fahne verschraubt. Eine Kopffassung ähnlicher Bauart ist in Abb. 113 wiedergegeben. Statt der Hammerschrauben sind hier Ösenschrauben verwendet, wobei durch sämtliche Ösen des Paketes ein U-förmiges, wasserdurchflossenes Rohr geschoben wird, dessen Enden links an den Paketen zu sehen sind. Diese Pakete sind zum Schutz gegen Abbrand durch den Luftsauerstoff „gemantelt“, d. h. ihr oberer Teil, der aus der Beschickung ragt, ist mit Asbest und einem Blechmantel

umhüllt. Die Tragkonstruktion für Kopffassungen entspricht der auf S.134 beschriebenen Bauart, wie sie auch in Abb.106 wiedergegeben ist. Kennzeichnend für die Kopffassungen ist der Nachteil, daß Elektrodengewicht und Anpreßdruck entgegengesetzt wirken, die Elektrode also das Bestreben hat, sich von der Fassung abzulösen und den wichtigen Kontakt zu verschlechtern. Dieser Nachteil wurde besonders fühlbar, als man in der Folge durch längere, also auch schwerere Elektroden, die Häufigkeit des Elektrodenwechsels zu verringern suchte. Gegenwärtig ist die Kopffassung kaum mehr anzutreffen.

Ebenso eigenartig wie der Gedanke, ein Elektrodenpaket als Rundelektrode auszubilden, ist die Lösung für die dazugehörige Kopffassung, welche P. Miguet fand. Die in Abb.114 gezeigten Elektroden sind Pakete aus je vier sektorförmigen Einzelelektroden. Einen dieser Sektoren sieht man in der Mitte des Bildes und erkennt daran den Einschnitt, in welchem eine Pratze der Fassung Platz finden soll. Die Kopffassung besitzt keine eigentliche Kopfplatte, sondern besteht aus vier wassergekühlten Pratzen, die miteinander verschraubt sind. Die Fassung selbst ist neben dem Elektroden-sektor im Bilde zu sehen. Die Verbindung der Fassung mit den Sektoren ist jedoch nicht löslich. Die Sektoren werden zusammengestellt, die Zwischenräume zwischen ihnen, ferner zwischen Sektoren

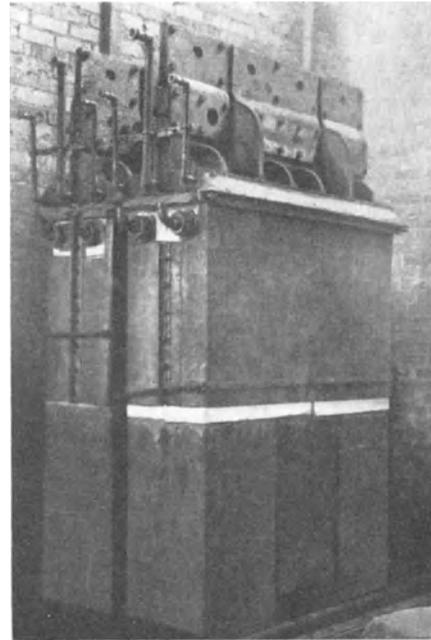


Abb. 113. Pakete mit Kopffassungen, zum Einbau bereit.

und einem Blechmantel sowie der sohmale Kern werden mit Stampfmasse ausgefüllt. Hierauf setzt man die Fassung in die Schlitze der Sektoren ein und vergießt dann die Pratzen mit Kupfer. Der Blechmantel ist im Bilde rechts zu sehen, während links eine betriebsfertig montierte Elektrode steht. Die Stromzuführung erfolgt hier mittels Bündeln von Kupferblechstreifen, welche auf die oberen horizontal liegenden Kontaktflächen der Fassung geschraubt werden. Da die Kupferbleche über den Herd geführt werden müssen, sind sie an der Unterseite durch wassergekühlte Schilde geschützt. Die Aufhängung erfolgt mittels einer Öse, die in der Mitte der Fassung eingeschraubt ist. Eine Tragkonstruktion im engeren Sinne ist hier überflüssig, weil der Haken der Kranflasche direkt in die Öse eingreift.

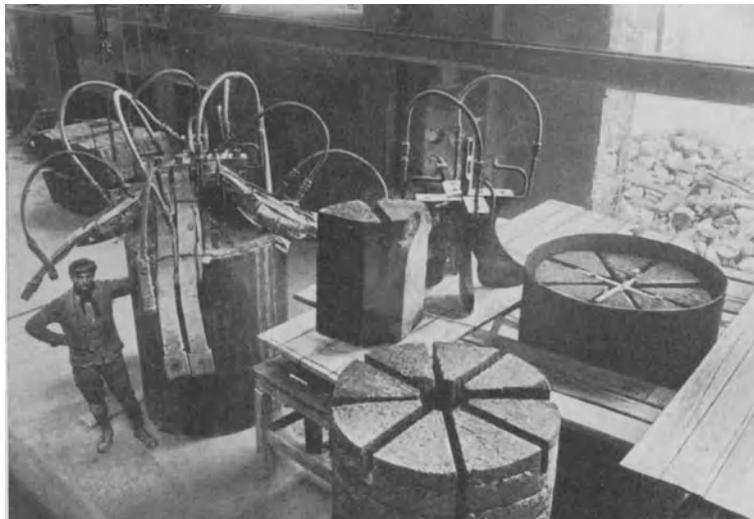


Abb. 114. Fassung für alte diskontinuierliche Miguet-Elektrode (Rundpakete).

Alle Kopffassungen sind Fassungen für diskontinuierliche Elektroden.

### C. Ringfassungen.

Die Nachteile der diskontinuierlichen Elektrode, also der Produktionsausfall während des Elektrodenwechsels, die Unannehmlichkeit und Gefahr dieser Arbeit und nicht zuletzt

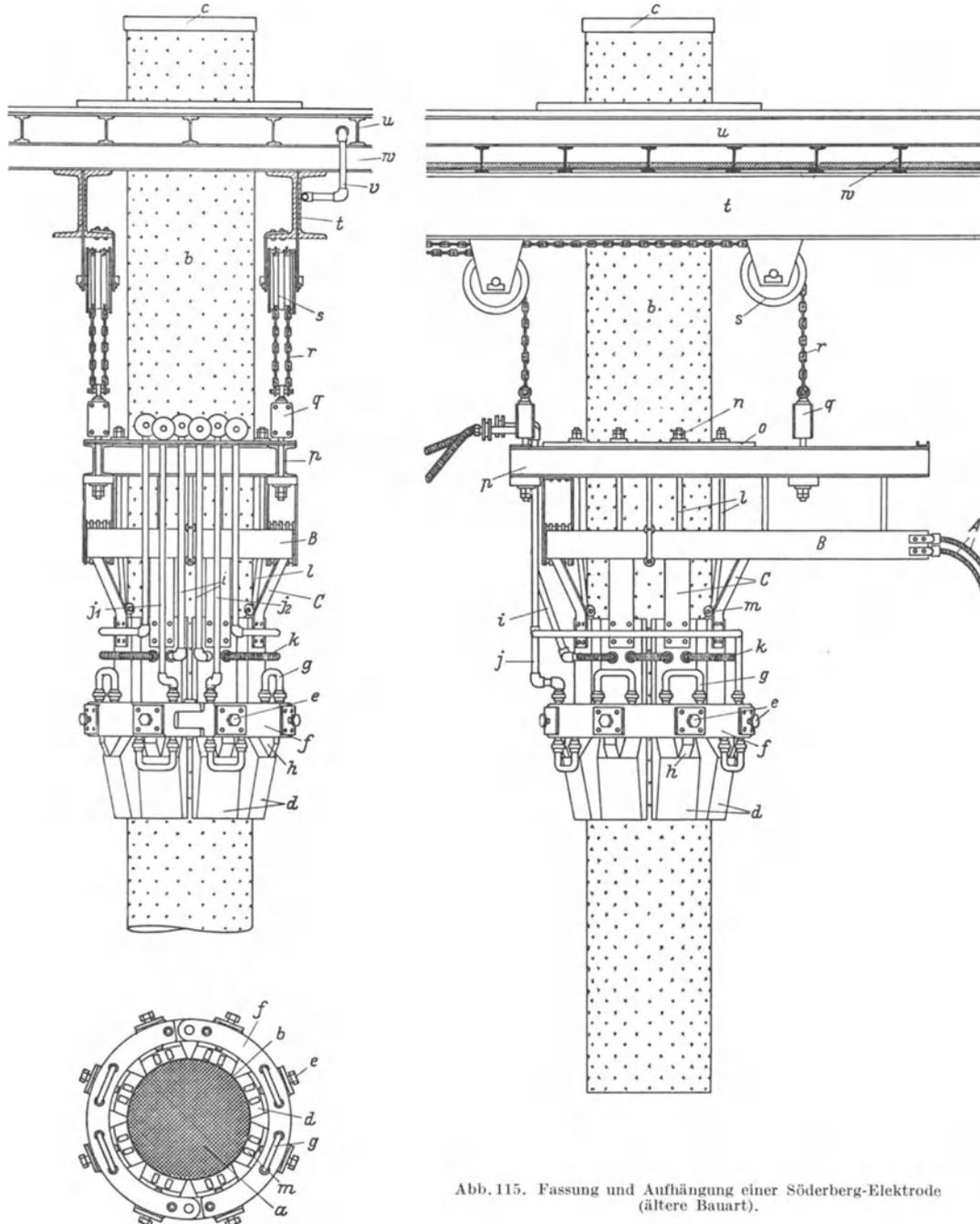


Abb. 115. Fassung und Aufhängung einer Söderberg-Elektrode (ältere Bauart).

die erheblichen Materialverluste durch Elektrodenstummel haben zur Entwicklung der Dauerelektrode geführt, die mit Ausnahme ganz seltener Einzelfälle eine Rundenlektrode ist. Bei kleineren Durchmessern ist für Rundenlektroden die bereits beschriebene Zangenfassung verwendbar. Für die mächtigen Elektroden der Großöfen sind jedoch eigene

Ringfassungen entstanden. Söderberg konstruierte für seine selbstbackende Dauer-  
elektrode die in Abb. 115 gezeigte Ringfassung, die später vielfach verbessert wurde.  
Im Prinzip besteht sie aus den Kontaktplatten  $d$ , die mittels des sie umgebenden Ringes  $f$   
gegen die Elektrode gepreßt werden. Da die Backzone der Elektrode im Bereiche der Kontaktplatten  
liegt, müssen diese genügend lang sein, um eine zweckmäßige Strom-  
verteilung zu sichern. Die Platten stellt man fast ausnahmslos als  
Hohlgußkörper her und verwendet hierzu Reinkupfer oder Kupfer-  
legierungen mit 15—30 % Zink. Die Herstellung der Platten aus  
Reinkupfer ist schwierig und kann wohl nur durch Spezialfirmen er-  
folgen; demgemäß ist diese Aus-  
führung in der Anschaffung teuer. Aus Gründen der Haltbarkeit ist  
aber die Verwendung von wenn möglich elektrolytisch gewonnenem  
Reinkupfer zu empfehlen. Vereinzelt verwendet man auch Platten  
mit eingegossenen Kühlrohren. Das Kühlwasser leitet man mittels biegsamer  
Verbindungen  $k$  von einer Platte zur anderen. Die Stromzu-  
führung erfolgt durch ein Bündel Kupferschienen  $B$ , das um die  
ganze Elektrode geführt ist. Von dem Bündel gehen einzelne Kupfer-  
blechstreifen  $C$  zu den Kontaktplatten, an denen sie festgeschraubt sind. Der Preßring  $f$   
wird gleichfalls als Hohlguß hergestellt. Gewöhnlich verwendet man hierzu Stahlguß,  
seltener Bronze. Der leichteren Auswechselbarkeit wegen besteht er aus zwei gleichen  
Teilen, die mittels Scharnieren und Bolzen miteinander verbunden werden. Den für die Kon-  
taktplatten erforderlichen Anpreßdruck erzeugen Preßschrauben  $e$ , deren Muttern im Ring  
eingesetzt sind. Die Stellen des Preßringes, welche die Preßschrauben aufnehmen, müssen  
verstärkt sein, so daß bei gleichbleibendem Ringquerschnitt diese Teile voll ausgeführt  
werden. In diesem Falle muß das Kühlwasser mittels der Umföhrungsrohre  $g$  von einer Ring-  
kammer zur nächsten geleitet werden. Um zu vermeiden, daß bei Lockerung der Druck-  
schrauben gelegentlich der Nachstellung der Fassung der Ring abgleite, sind die Kon-  
taktplatten mit Nasen  $h$  versehen, auf welchen der Ring ruht.

Die Tragvorrichtung der Söderberg-Elektrode bestand ursprünglich aus einem Walz-  
profilrahmen  $p$ , der mitunter als wassergekühlter Hohlrahmen ausgeführt wurde. An

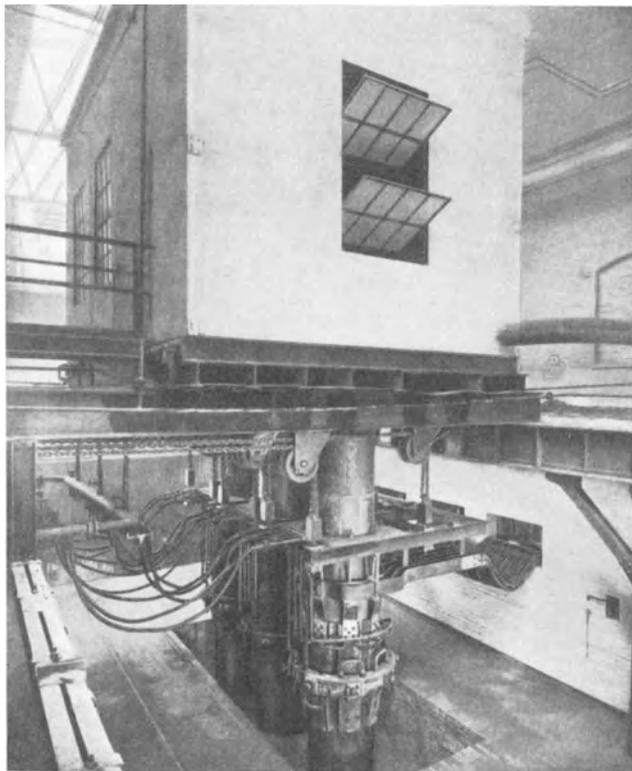


Abb. 116. 10000-kW-Drehstromofen mit Söderberg-Elektrode und Stampfhaus.

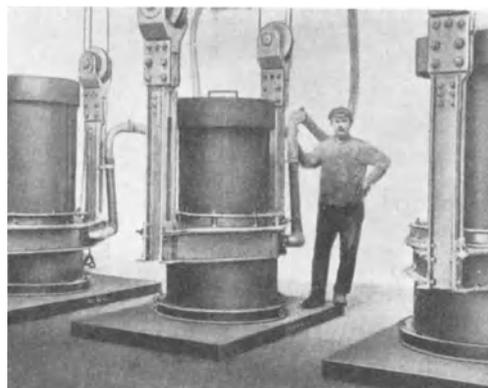


Abb. 117. Söderberg-Elektrode mit Tragzylinder.

einem schmiedeeisernen Ring *o* waren mittels der Muttern *n* die Zugstangen *l* befestigt, deren untere als Ösen ausgebildeten Enden *m* durch Bolzen mit den Kontaktplatten *d* verbunden werden. Am Rahmen waren außerdem die Stromzuführungsschienen *B* und die Sammelrohre *i* und *j* für das Kühlwasser der Kontaktplatten und des Preßringes angebracht. Die übrige Aufhängung ist bei dieser Elektrode vereinfacht, weil sie nicht

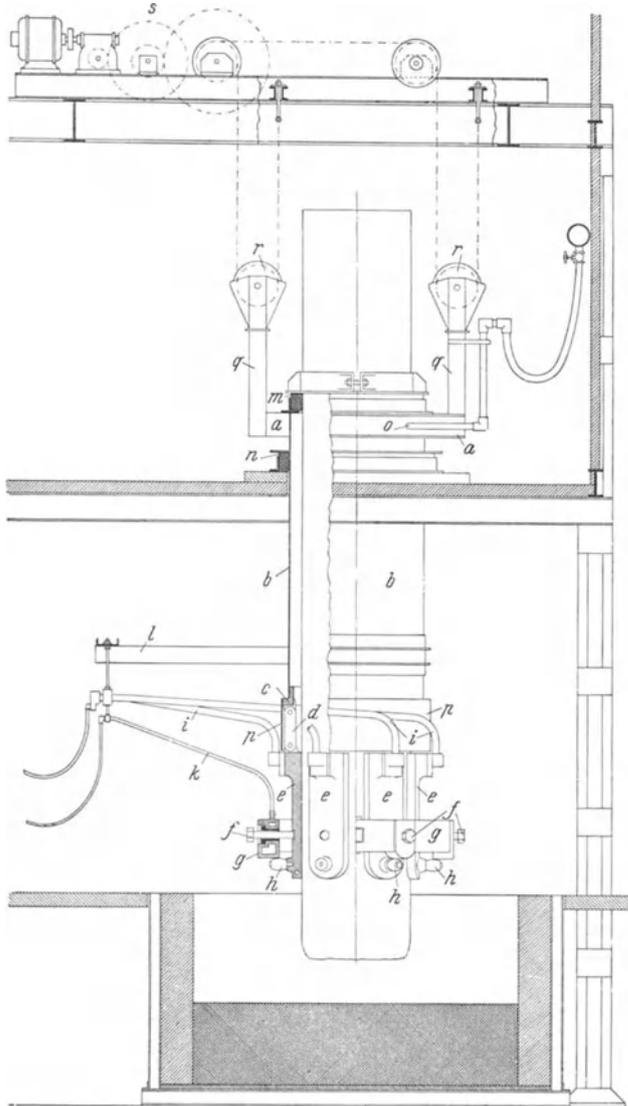


Abb. 118. Aufhängung einer Söderberg-Elektrode moderner Bauart mittels Tragzylinder.

mehr seitlich verfahren zu werden braucht. Daher sind feste Rollen *s* am Hauptträger *t* befestigt, über welche die Ketten *r* des Windwerkes laufen und die den Rahmen unter Zwischenschaltung der Isolierstücke *q* tragen. Diese Ausführungsform der Fassung und Aufhängung von Söderberg-Elektroden, wie sie auch in Abb. 116 zu sehen ist, wurde in der Folge mehrfach abgeändert und verbessert. Die alte Bauart hat den Nachteil, daß sowohl die Aufhängung als auch die Stromzuführung der Hitzeeinwirkung über dem Ofen ausgesetzt sind, und daß namentlich bei hohen Belastungen eine wirksame Kühlung der Stromzuführung aus Flachkupfer überhaupt nicht möglich ist. Zudem geben alle Teile reichlich Gelegenheit zur Staubablagerung, die sich am Elektrodemantel und an den Oberkanten der Kontaktplatten sehr unangenehm bemerkbar macht, da beim Hinabgleiten der Elektrode infolge der Staubschicht schlechte Kontakte in der Fassung entstehen. Diesen Übelständen begegnen neue Konstruktionen der Aufhängung, indem die Elektrode durch einen zweiten Mantel geschützt und der Rahmen sowie die Ketten der Aufhängung in das Stampfhaus verlegt werden, wie dies aus Abb. 117 und 118 ersichtlich ist. Der Stampfraum ist kühl und staubfrei, weil er allseitig geschlossen ist und mitunter sogar einen wassergekühlten Boden besitzt.

Der Tragrahmen *a* erhält die Form einer Brille, die am oberen Ende eines Blechzylinders *b* genietet ist. Am unteren Ende ist er mit einem Stahlgußring *c* verbunden, an dem mittels Laschen *d* die Kontaktplatten *e* hängen. Diese werden in üblicher Weise durch die Schrauben *f* des Preßringes *g* angedrückt. Der Ring wird um die Preßschrauben ausgeweitet, so daß die Umföhrungsröhre für das Kühlwasser entfallen. Statt auf angegossenen Nasen der Kontaktplatten ruht er auf eingeschraubten Rollen *h*. An Stelle der Stromzuführungen aus Flachkupfer treten wasserdurchflossene Kupferrohre *i*, die gleich der Kühlleitung *k* für den Preßring an einem Ausleger *l* befestigt sind, der am Aufhängezylinder *b* angebracht

ist. Der Ausleger führt die Leitungen aus dem Bereiche der Ofenhitze zu den Anschlüssen der biegsamen Stromzuführungen und zu den Kühlwasserschläuchen. Der Zylinder *b* ist am oberen Ende durch die Packung *m* gegen die Elektrode und durch die Packung *n* gegen das Stampfhaus abgedichtet. Zum Zwecke der Kühlung des Aufhängezylinders und der Laschen wird durch einen Stutzen *o* in die Brille Preßluft eingeblasen, die abwärts streicht und durch den Blechschirm *p* bis zum Oberrande der Kontaktplatten geführt wird, so daß sich dort und auch am Elektrodenmantel kein Staub ablagern kann. Die Kühlluft hat überdies den Zweck, die Temperatur des oberen Teiles der Elektrode zu regeln. Die Elektrodenmasse wird bekanntlich nicht mehr eingestampft, sondern bloß eingeworfen und schmilzt durch die abgeleitete Wärme der Elektrode zusammen. Die geeignetste Temperatur hierfür kann durch Regelung der Kühlluftmenge eingestellt werden. Die Dichtung zwischen Aufhängezylinder und Boden des Stampfhauses soll das Eindringen heißer Abgase und Staub vermeiden. Die Tragbrille ist mit kräftigen Ständern *q* versehen, die Rollen *r* für die Tragseile oder Kettenräder für Gallsche Ketten besitzen. Das Windwerk *s* ist über dem Stampfhaus angeordnet. Bei sehr heißgehenden Öfen empfiehlt es sich, Rollen oder Nasen an den Kontaktplatten gänzlich zu vermeiden und den Preßring auch aufzuhängen. Abb. 119 zeigt diese Lösung.

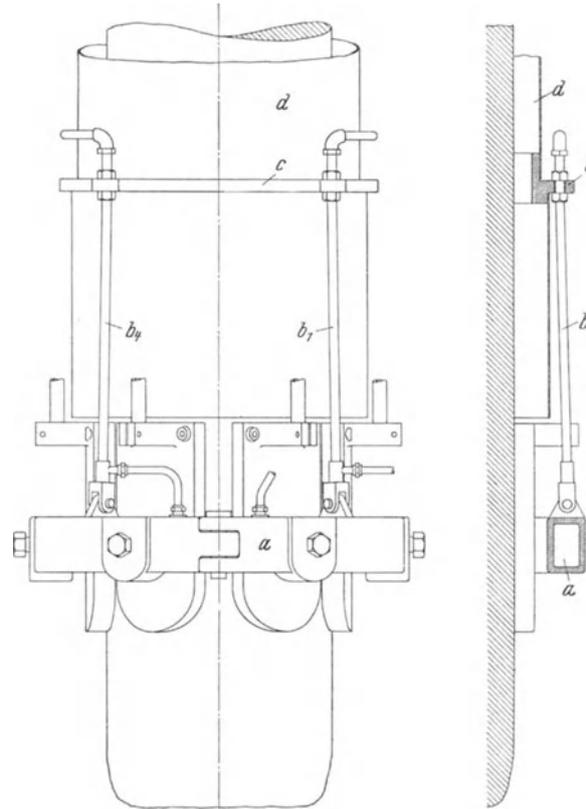


Abb. 119. Aufhängung des Preßringes bei Söderberg-Elektroden für heißgehende Öfen.

Der Preßring *a* hängt mittels der Rohre  $b_{1-4}$  am Stahlgußring *c* des Aufhängemantels *d*. Für die Rohre  $b_{1-4}$  verwendet man Stahlrohre, wie sie für hydraulische Pressen gebraucht werden. Sie dienen gleichzeitig auch als Zu- und Ableitung für das Kühlwasser des Preßringes. Die Führung des Wassers ist der Abb. 120 zu entnehmen. Ganz vereinzelt findet man auch einteilige Preßringe ohne Wasserkühlung, so beispielsweise bei dem nicht sehr warmgehenden Ofen nach Abb. 121. Dort sieht man auch Kontaktplatten mit zwei Stromzuführungsrohren. Das Kühlwasser, welches diese durchfließt, wird durch die Kontaktplatte geleitet, wobei das eine Rohr als Zuleitung, das andere als Ableitung dient. Kontaktplatten mit nur einem Stromzuleitungsrohr werden paarweise durch ein biegsames Rohr miteinander verbunden, wie in Abb. 122. Es fließt demnach das Wasser durch ein Stromzuleitungsrohr in die dazugehörige Kontaktplatte, von dort durch das Verbindungsrohr in die nächste Platte und durch ihr Stromrohr wieder zurück. In dieser Abbildung erkennt man auch deutlich den Stahlgußring am unteren Ende des

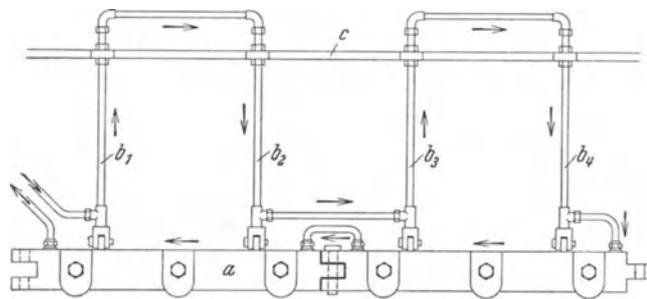


Abb. 120. Führung des Kühlwassers im Preßring.

Aufhängezylinders und seine Verlaschung mit den Kontaktplatten. Die zweckmäßigste Gestalt der Kontaktplatten ist wie hier eine rechteckige Form mit gut abgerundeten Kanten oder mit halbkreisförmigen unteren Enden wie in Abb. 119. Man hat zwar ver-

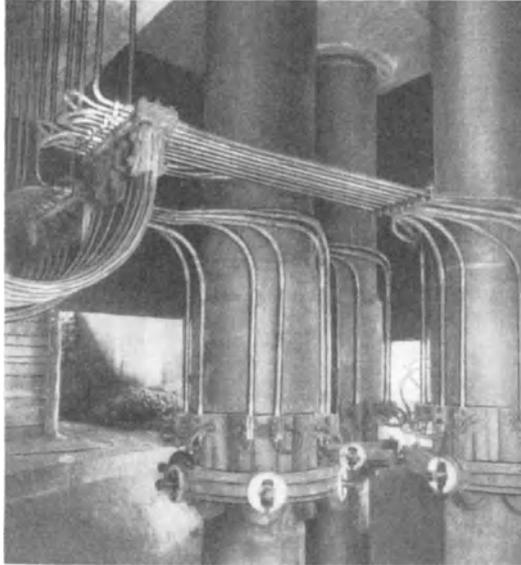


Abb. 121. 2600-kW-Drehstromofen mit 750 mm Söderberg-Elektrode für Erzeugung von Ferromangan.

sucht, durch besondere Formgebung der Platten die Backzone, die meist im unteren Drittel ihrer Länge liegt, aufwärts zu verlegen, um innerhalb der Fassung einen möglichst großen Teil der mechanisch widerstandsfähigen fertiggebrannten Elektrode zu bekommen. Dies glaubte man durch Verwendung trapezförmiger Kontaktplatten erreichen zu können, die mehr Strom in die oberen Teile leiten sollten, doch hat diese Maßnahme den Erwartungen nicht entsprochen. Durch den Brennprozeß zieht sich die Elektrode um etwa 0,5% zusammen.

Bei fix eingestellten Fassungen gleitet die Elektrode während der Schrumpfung von selbst nach und die dadurch bewirkte selbsttätige Nachstellung kann 60—90% der sonst erforderlichen Nachstellung durch Lösung der Fassung betragen. Dabei muß jedoch der Mantel rein und vollständig eben sein.

Beim Nachstellen der Söderberg-Elektrode, namentlich bei Verwendung der beschriebenen Preßschraubenfassung ist ein jähes Hinabgleiten der schweren Elektrode nicht immer zu verhüten, weil entweder die Kontaktplatten ungleichmäßig gelockert werden oder eine derselben festgebrannt ist und plötzlich nachgibt. Man hat daher

versucht, die Abwärtsbewegung der Elektrode durch einen Bremsring zu begrenzen, der im Stampfhaus um den freiragenden Elektrodenmantel festgeschraubt und jeweils in einer Höhe über dem Dichtungsring angelegt wurde, die dem nachzustellenden Elektrodenstück entsprach. Wenn in diesem Falle die Elektrode in der Fassung durchrutschte, blieb sie mit dem Bremsring am Dichtungsring des Aufhängungsmantels hängen. Die Vorkehrung erwies sich trotzdem als nicht ganz verläßlich, weil infolge der plötzlichen Belastung der Mantel, welcher an der kritischen Stelle entweder ganz leer oder nur mit ungebrannter Elektrodenmasse gefüllt war, nach innen nachgab und der Bremsring absprang. Auch Bremsringe, die einen mit Nägeln versehenen Lederbelag trugen, oder solche, die mit dem Mantel sogar verschraubt waren, entsprachen nicht. Daher baute der Amerikaner Wisdom (Shawinigan Chemicals Ltd.) eine Bremsvorrichtung, welche die

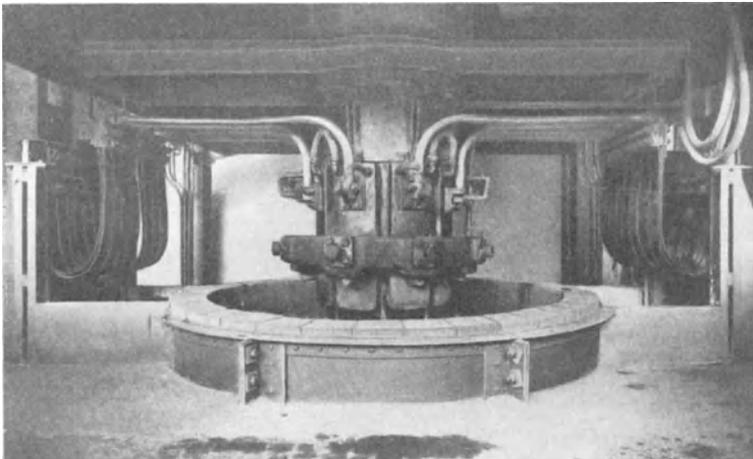


Abb. 122. Einphasenofen mit Söderberg-Elektrode.

erwies sich trotzdem als nicht ganz verläßlich, weil infolge der plötzlichen Belastung der Mantel, welcher an der kritischen Stelle entweder ganz leer oder nur mit ungebrannter Elektrodenmasse gefüllt war, nach innen nachgab und der Bremsring absprang. Auch Bremsringe, die einen mit Nägeln versehenen Lederbelag trugen, oder solche, die mit dem Mantel sogar verschraubt waren, entsprachen nicht. Daher baute der Amerikaner Wisdom (Shawinigan Chemicals Ltd.) eine Bremsvorrichtung, welche die

Aufhängung zwar etwas kompliziert, aber verlässlich arbeitet. Sie besteht aus stählernen Bremsbändern, die an dem Elektrodenmantel angeschweißt und zwischen Bremsbacken geführt werden. Das Band wandert mit der Elektrode in den Ofen und bei Verlängerung des Elektrodenmantels schweißt man in entsprechender Höhe das Band neuerdings fest. Die Ausführung dieser Bremsvorrichtung ist aus Abb. 123 und Abb. 124 ersichtlich. An den beiden Ständern *a* der Tragbrille *b* ist je eine Rolle Bremsband *c* angebracht. Das Band läuft sodann durch eine Backenbremse *d*, deren Druck mittels eines Handrades *e* verändert werden kann. Schließlich ist das Band noch über zwei Reibungsklötze  $f_{1-2}$  geführt und am Elektrodenmantel *g* angeschweißt. Beim Senken der Elektrode mittels des Wisdom-Bandes lockert man zuerst die Kontaktplatten der Fassung und läßt hierauf durch vorsichtige Betätigung der Handräder der Backenbremsen die Bremsbänder nach, wobei sich die Elektrode langsam senkt. Nach beendeter Nachstellung ist darauf zu sehen, daß die Kontaktplatten der Fassung wieder fest angepreßt werden, sowohl um

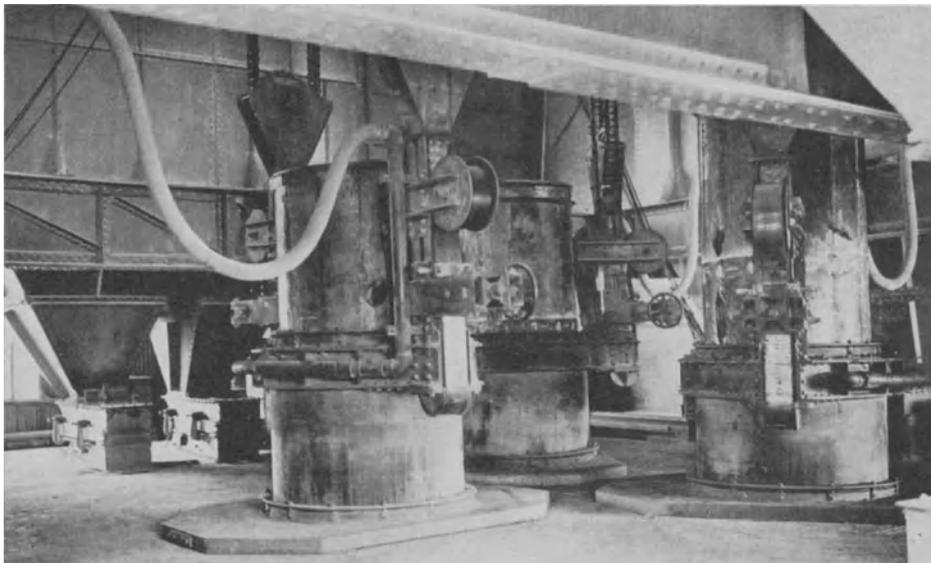


Abb. 123. Verlängerungsraum über modernem Karbidofen für 15000 kW; Söderberg-Elektroden (1250 mm  $\varnothing$  mit Wisdombremsung) im Dreieck angeordnet.

zu vermeiden, daß ein Teil des Elektrodengewichtes dauernd von den Wisdom-Bändern getragen werden muß, als auch um schlechte Kontakte und damit Überlastungen der Platten zu verhüten. Bei einer Abart dieser Senkvorrichtung nach Abb. 125 ist die Bremsbandrolle und die Backenbremse durch eine Trommel mit Schneckenantrieb ersetzt. Das Band läuft von der Trommel direkt zum Elektrodenmantel und das Senken erfolgt mittels der Schnecke, die selbsthemmend sein muß. Für eine Elektrode sind in der Regel zwei Bänder vorgesehen. Während die vorerwähnte Bremsvorrichtung mit Backenbremse und Reibungsklötzen elastischer arbeitet, wobei sich kleine Differenzen zwischen dem Ablauf der beiden Bänder selbst ausgleichen, muß bei den Schneckenradantrieben für gleiche Geschwindigkeiten Sorge getragen werden. In bezug auf zuverlässiges Senken der Elektrode ist die Nachstellvorrichtung mit Wisdom-Bändern der folgenden Federfassung mit pneumatischer Auslösung ebenbürtig.

Beim Nachstellen der Elektrode müssen die Preßschrauben während des Ofenbetriebes gelöst und angezogen werden, eine Arbeit, die infolge der Hitze über dem Herde peinlich ist. Zu ihrer Beseitigung hat die AG. für Stickstoffdünger (Knapsack bei Köln) eine neue Fassung entwickelt, die in Abb. 126 gezeigt wird. Die sonst üblichen Druckschrauben sind durch Hohlkolben *a* ersetzt, die mit einem Bolzen *b* versehen sind. Die Kolben

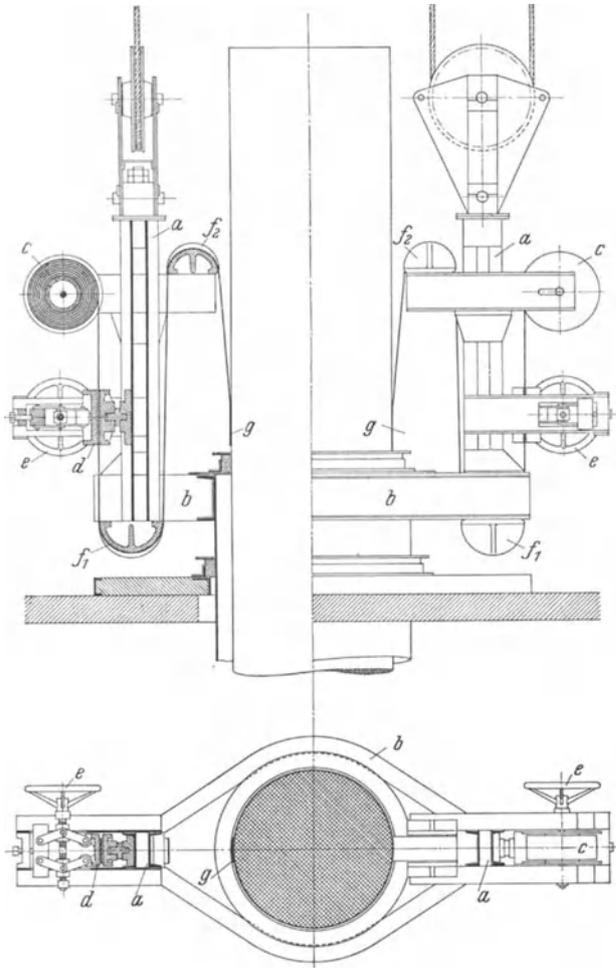


Abb. 124. Aufhängung mit Wisdombändern.

Nachstellen über die ganze Länge des täglichen Elektrodenverbrauches auf ungenügend vorgebackene Teile zu liegen kommen. Solche automatische Fassungen, die auch „Rutschfassungen“ genannt werden, sind natürlich teurer, erfordern einen Kompressor und Leitungsmaterial, auch nimmt der Ring mit den eingebauten Preßorganen mehr Raum ein, als die gewöhnliche Ausführung; trotzdem sind die Vorteile der bequemen Bedienung und der präzisen Arbeitsweise, namentlich für größere Elektroden (etwa ab 800 mm Durchmesser) ausschlaggebend. Um die Verwendung von Preßluft u. dgl. zu vermeiden, wurde auch die Federfassung abgeändert, indem man die Federn derart dimensionierte, daß die durch sie erzeugte Reibung zwischen Kontaktplatten und Elektrodenmantel gerade hinreicht, um das Elektrodengewicht sicher zu tragen. Zur

sind in entsprechenden, als Zylinder ausgebildeten Räumen des Druckringes *c* untergebracht, während die Bolzen auf der Innenseite des Ringes herausragen und auf die Kontaktplatten *d* pressen. Der Preßdruck wird durch Kegelstumpfflachfedern *e* erzeugt, die in den Hohlkolben eingelegt sind und sich gegen einen wassergekühlten Deckel *f* stützen. Zum Lösen der Fassung dient Preßluft oder Druckflüssigkeit, die zwischen Kolben und Zylinderboden gedrückt wird. Die Betätigung dieser „federnden Fassung mit pneumatischer Auslösung“ erfolgt von einem Orte aus, der eine gute Beobachtung der Elektrode zuläßt, ohne der Hitze des Ofens ausgesetzt zu sein. Der Vorgang ist sehr einfach und besteht bloß in der Betätigung eines Ventils für die Preßluft. Während man früher wegen der beschwerlichen Arbeit über dem Ofen die Elektrode nur einmal im Tage nachstellte, kann man jetzt mühelos beliebig oft das Tiefergleiten selbst um wenige Zentimeter bewerkstelligen. Dadurch wird die ganze Fassung sehr geschont, denn sie muß nicht mehr tief in den Herd gesenkt werden. Aber auch der Backvorgang verläuft nun günstiger, da nicht mehr wie früher die Kontaktplatten beim

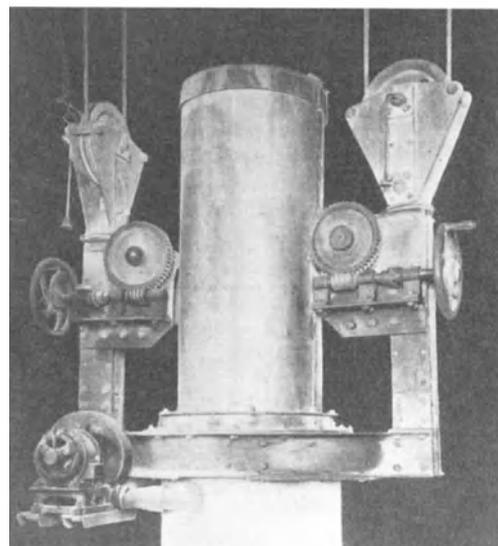


Abb. 125. Wisdombänder mit Schneckenradnachstellung.

Nachstellung klemmt man das obere Elektrodenende fest und zieht sodann die ganze Fassung unter vollem Federdruck und voller Belastung mittels einer Winde längs der Elektrode hoch. Bei jeder Fassung ist die möglichst vollkommene Auflage der Kontaktplatten am Elektrodenmantel von besonderer Wichtigkeit. Falls eine Platte mangelhaften Kontakt aufweist, kann nur ein Teil des ihr zugeführten Stromes zur Elektrode übertreten, der andere Teil würde trachten, den Druckring als Ausgleichsleitung zu benutzen und zu den benachbarten Platten zu gelangen. Dadurch könnte der Ring eine unvorhergesehene Beanspruchung durch Erwärmung erleiden. Hauptsächlich aber die Druckschrauben oder Bolzen würden ihre Beweglichkeit verlieren, da ihre starke Erhitzung Stauungen herbeiführen würde. Um dies zu vermeiden, legt man jetzt zwischen Kontaktplatte und Preßschraube bzw. Bolzen ein Isolierstück, das den Stromübergang zum Ring verhindert.

An dieser Stelle sollen auch die Fassungen für prismatische und flache Söderberg-Elektroden beschrieben werden, da ihre Bauart aus der sonst üblichen Ringfassung hervorgegangen ist. Abb. 127 zeigt eine prismatische Elektrode, deren Fassung mit jener der Rundelektrode übereinstimmt. Statt des Preßringes ist hier ein Gußrahmen vorgesehen, der die Preßschrauben für die Kontaktplatten aufnimmt. Auf den Längsseiten der Elektrode liegen je drei Kontaktplatten, auf den Schmalseiten je eine. Sie sind wassergekühlt und hängen mittels Laschen an einer Tragkonstruktion, die im Bilde nicht sichtbar ist, weil ihr unterer Rand von den breiten horizontalen Kupferschienen der Stromzuführung überdeckt wird. Die Verbindung zwischen Horizontalschienen und Platten erfolgt gleichfalls durch kupferne Flachschielen. Über dem Preßrahmen sind auch die Verbindungsrohre für das Kühlwasser der Kontaktplatten zu sehen. Die ebenen Wandungen des Elektrodenmantels neigen aber leicht zu Ausbauchungen, infolge des Druckes der im ungebackenen Teil der Elektrode noch weichen Masse. Daraus ergaben sich Schwierigkeiten beim Nachstellen der Fassung, da die Kontaktplatten an den Beulen des Mantelbleches hängen blieben und selbst, wenn sie mit Gewalt darüber gezogen werden konnten, war ein guter Kontakt infolge mangelhafter Auflage nicht zu erreichen.

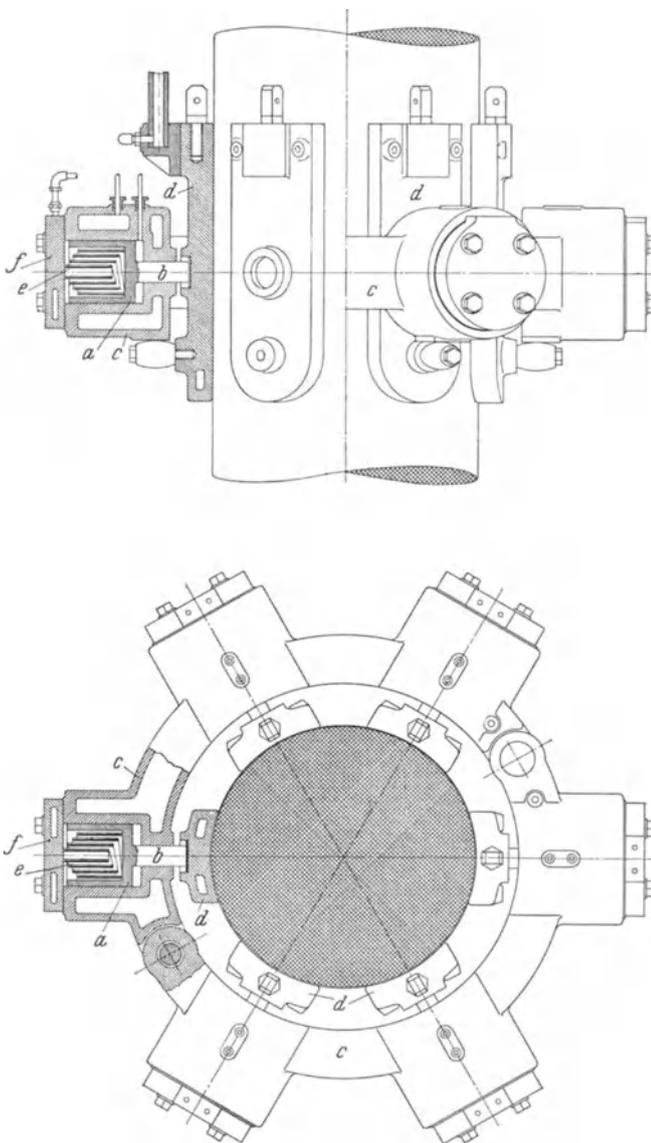


Abb. 126. Federfassung für Rundelektrode mit Fernsteuerung.

Die Verbindung zwischen Horizontalschienen und Platten erfolgt gleichfalls durch kupferne Flachschielen. Über dem Preßrahmen sind auch die Verbindungsrohre für das Kühlwasser der Kontaktplatten zu sehen. Die ebenen Wandungen des Elektrodenmantels neigen aber leicht zu Ausbauchungen, infolge des Druckes der im ungebackenen Teil der Elektrode noch weichen Masse. Daraus ergaben sich Schwierigkeiten beim Nachstellen der Fassung, da die Kontaktplatten an den Beulen des Mantelbleches hängen blieben und selbst, wenn sie mit Gewalt darüber gezogen werden konnten, war ein guter Kontakt infolge mangelhafter Auflage nicht zu erreichen.

Die flache Elektrode nach Abb. 128 beseitigt diese Nachteile. Die zylindrisch geformten Schmalseiten besitzen selbst genügend Festigkeit. An den Längsseiten des Blechmantels *c*

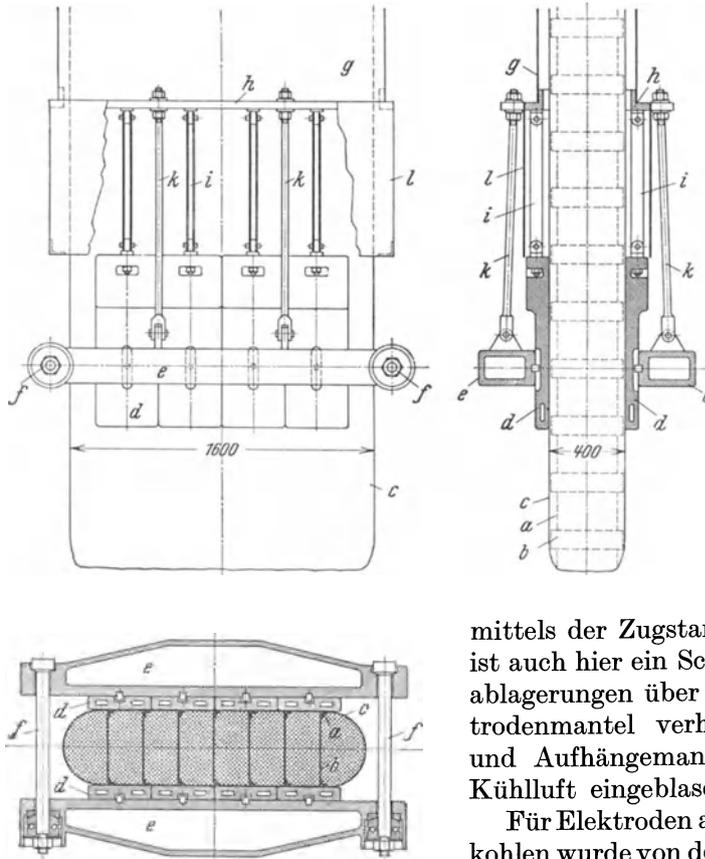


Abb. 128. Moderne Söderberg-Flachelektrode.

kann man ihre Einzelstücke entnehmen. Statt der Federn sind im wassergekühlten Preßringe *i* Dehnungsbuchsen eingebaut. Die Buchse, deren Ausführung der Abb. 130 entnommen werden kann, ist ein wellrohrähnlicher, vollkommen geschlossener Körper. Zwischen der Bodenplatte *a*, die mit dem Anschluß *b* für die Druckölleitung versehen ist und dem Druckstempel *c*, sind die dehnbaren Elemente *d* angeordnet. Letztere sind aus 1,5—2 mm starkem Stahlblech geformt und verschweißt. Das unter einem Druck von 80—100 at zugeführte Öl bewirkt eine Längenänderung der Buchse und preßt den Druckstempel *c* gegen die Druckscheibe *e* und die Kontaktplatte *f*, somit diese gegen die Elektrode *g*. Um zu verhüten, daß Staub und Schmutz in die Buchsenkammer *h* des wassergekühlten Preßringes *i* eindringen kann, ist die Druckscheibe *e* mit einem Rand versehen, der über den Hals *j* der Buchsenkammer greift. Die als wassergekühlte Hohlkörper geformten Kontaktplatten *f* sind kürzer gehalten als bei der Söderberg-Elektrode, weil hier der Backprozeß entfällt. Nicht alle Kontaktplatten

sind innen Winkel *a* angeschweißt und miteinander durch Blechstreifen *b* verbunden, so daß die ebenen Mantelflächen distanziert und Ausbauchungen des Blechmantels vermieden werden. Die Kontaktplatten *d* sind nur auf der Längsseite angeordnet. Den Preßdruck erzeugen zwei kräftige Bügel *e*, die mittels der Spannschrauben *f* festgezogen werden. Die Aufhängung entspricht jener der neueren Rundelektrode. An einem Tragrahmen ist der hier prismatische Aufhängemantel *g* befestigt, der einen Randwinkel *h* aus Gußstahl besitzt. An diesem hängen mittels der Laschen *i* die Kontaktplatten und

mittels der Zugstangen *k* die Preßbügel. Schließlich ist auch hier ein Schirmblech *l* vorgesehen, das Staubablagerungen über den Kontaktplatten und am Elektrodenmantel verhindern soll. Zwischen Elektrode und Aufhängemantel wird, wie auch sonst üblich, Kühlluft eingeblasen.

Für Elektroden aus angestückelten amorphen Rundkohlen wurde von der Siemens-Plania AG. eine Rutschfassung entwickelt, die einige Ähnlichkeit mit der vorherbeschriebenen Federfassung besitzt. Der Abb. 129

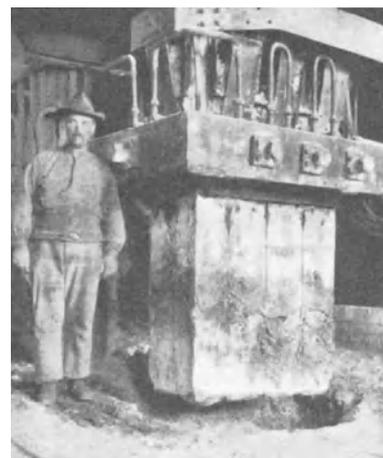


Abb. 127. Prismatische Söderberg-Elektrode (ältere Bauart).

der Fassung erhalten eine Dehnungsbuchse; im vorliegenden Falle sind sechs Platten vorgesehen, wovon nur vier Buchsen besitzen, während die beiden anderen mit gewöhn-

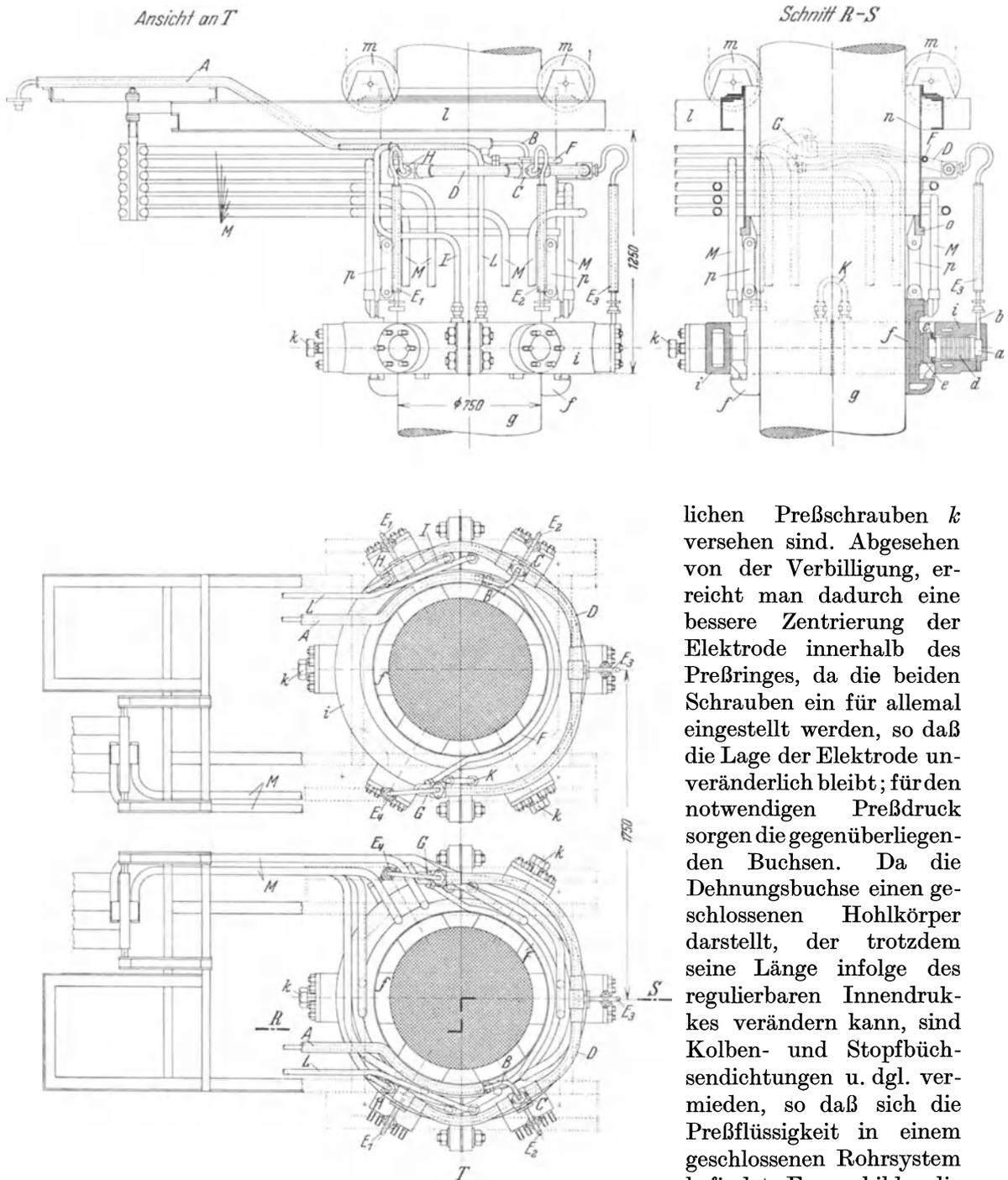


Abb. 129. Fassung mit ferngesteuerten Dehnungsbuchsen, Bauart Siemens-Plania.

Glied in der Fassung, da bei konstantem Flüssigkeitsdruck die Wärmedehnungen der Elektrode und des Preßringes selbsttätig ausgeglichen werden. Der Druck wird mittels eines Gewichtsakkumulators konstant erhalten. Um zu verhindern, daß bei Undichtwerden

lichen Preßschrauben *k* versehen sind. Abgesehen von der Verbilligung, erreicht man dadurch eine bessere Zentrierung der Elektrode innerhalb des Preßringes, da die beiden Schrauben ein für allemal eingestellt werden, so daß die Lage der Elektrode unveränderlich bleibt; für den notwendigen Preßdruck sorgen die gegenüberliegenden Buchsen. Da die Dehnungsbuchse einen geschlossenen Hohlkörper darstellt, der trotzdem seine Länge infolge des regulierbaren Innendruckes verändern kann, sind Kolben- und Stopfbüchsendichtungen u. dgl. vermieden, so daß sich die Preßflüssigkeit in einem geschlossenen Rohrsystem befindet. Ferner bilden die Buchsen ein federndes

der Preßrohrleitung oder durch Reißen eines Druckschlauches die Elektrode in den Ofen fällt, ist eine automatische Fangvorrichtung vorgesehen, welche die Elektrode in ihrer Lage festhält. Bei sehr heißgehenden Öfen umgibt man die Druckleitung der Fassung mit einer Wasserkühlung, um Zersetzungen der Preßflüssigkeit infolge des dauernd hohen Druckes und der hohen Temperatur zu vermeiden. In der Abb. 129 kann der Weg der Preßflüssigkeit und des Kühlwassers verfolgt werden. Das Rohr *A* ist ein Doppelrohr, innen befindet sich die Preßflüssigkeit, außen das Kühlwasser. Während die Preßflüssigkeit durch das Leitungsstück *B* bei *C* in das Doppelrohr *D* eintritt und von dort durch die Rohre  $F_{1-4}$ , die teilweise auch als Doppelrohre ausgebildet sind, zu den Dehnungsbuchsen gelangt, wird das Kühlwasser mittels der Umführungsleitung *F* zum Ende *G* des Doppelrohres *D* geführt und verläßt dieses beim Ende *H*. Dieses Ende ist durch das Rohr *I* mit der einen Hälfte des Preßringes *i* verbunden, durchfließt diese sowie die Umführung *K* zur zweiten Ringhälfte und verläßt sie durch die Leitung *L*. Die Kühlung der hohlen Kontaktplatten erfolgt mittels der wasserdurchflossenen Stromzuführungsrohre *M*. Die Aufhängung ähnelt der beschriebenen Ausführung (S. 149). Der Ausleger *l* trägt die Rollen *m* für die Windwerksseile und den Aufhängezylinder *n*, dessen unteres Ende mit dem Stahlgußring *o* vernietet ist. An diesem Ringe hängen schließlich mittels der Laschen *p* die Kontaktplatten *f*.

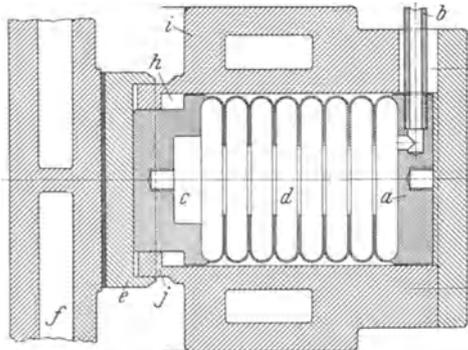


Abb. 130. Dehnungsbuchse.

Gleichfalls für anstückelbare Dauerelektroden baut die Firma J. L. Hütten G. m. b. H. (Düsseldorf) eine Ring-Zangenfassung, welche die Siemens-Halske AG. für die Rundelektroden ihrer großen Öfen verwendet. Auch diese Siemens-Hütten-Rutschfassung ist mittels Preßflüssigkeit gesteuert. Die ungewöhnlich kräftige Bauart macht die Fassung selbst für den größten Betrieb geeignet. Abb. 131 zeigt die drei Fassungen für die 900-mm-Elektroden eines Drehstromofens. Die Angaben dieser Zeichnung werden durch die Abb. 132 und Abb. 133 ergänzt, während Abb. 134 eine Fassung für eine 1000-mm-Elektrode mit geringfügigen Abweichungen im Tragrahmen und in der Aufhängung darstellt.

Der Fassungsring ist als schwerer Gußrahmen *a* ausgebildet. Durch seine Pratten *b* gehen Bolzen *c*, an denen mittels der Isolierstücke *d* die Kranflaschen *e* des Elektrodengewindwerkes angreifen. Am unteren Rande des Gußrahmens sind Laschen *f* befestigt, an welchen die wassergekühlten Kontaktplatten *g* hängen. Je nach Größe der Elektrode sind 6 bzw. 8 Platten vorgesehen. Für die halbe Anzahl der Kontaktplatten wird der Anpreßdruck hydraulisch erzeugt, die zweite Hälfte ist mechanisch einstellbar. Zu jeder hydraulisch angepreßten Kontaktplatte gehört auf dem Gußrahmen ein Lagerbock *h* mit dem Getriebe und zwei Hochdruckzylindern  $i_{1-2}$ . Der Druck wird mittels der Hebel *k*, die bei *l* im Rahmen drehbar gelagert sind, auf die Platten übertragen. Die Lage der übrigen Hebel stellt man mit Hilfe der Getriebe dauernd ein. Die Wirkungsweise dieser Fassung ist nun leicht verständlich. Durch die Druckflüssigkeit werden die Getriebe derart betätigt, daß die oberen Hebelarme nach außen gedrückt werden, wodurch die unteren Hebelarme die Kontaktplatten gegen die Elektrode pressen. Da bloß die Hälfte der Platten hydraulisch gesteuert ist, kann bei einmaliger Einstellung der übrigen Hebel eine genaue Zentrierung der Elektrode in der Fassung erreicht werden. Die Preßvorrichtung ist selbsthemmend gebaut, so daß auch beim Abstellen des Druckes die Elektrode weiter gehalten wird. Zum Nachstellen der Elektrode muß daher erst ein Ventil geöffnet werden. Die kupfernen Stromzuführungsrohre *m* dienen gleichzeitig als Leitungen für das Kühlwasser der Kontaktplatten, die Verbindung je zweier benachbarter Platten

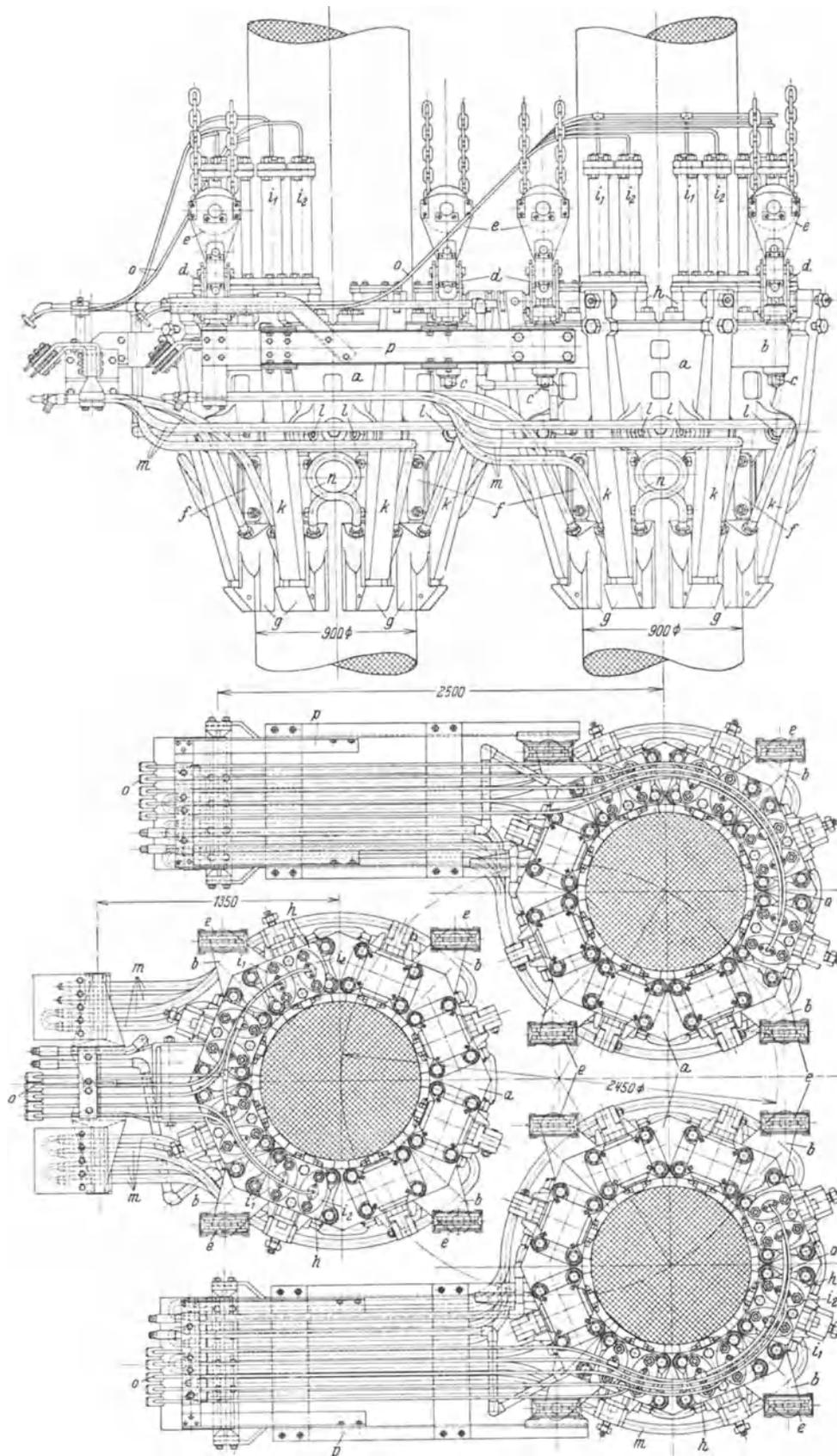


Abb. 131. Hydraulisch gesteuerte Fassungen, Bauart Siemens-Hütten, für einen Drehstromofen.

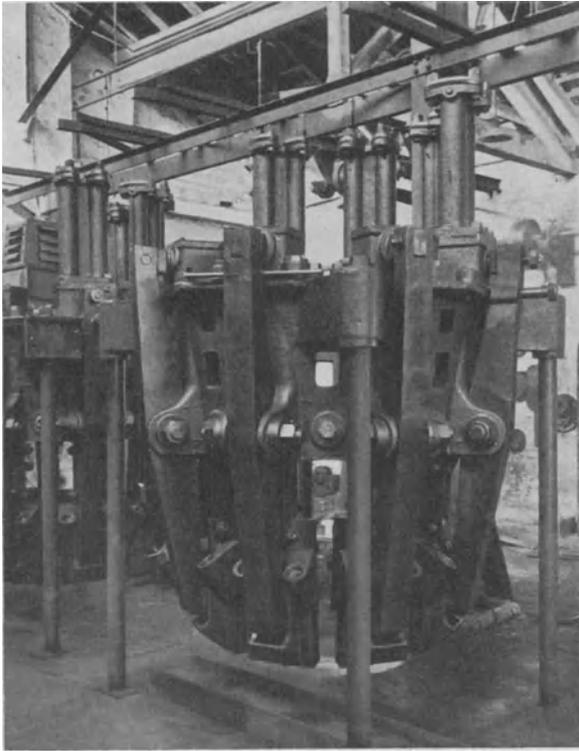


Abb. 132. Siemens-Hütten-Fassung.

die Aufgabe zu, den Strom zur Elektrode überzuleiten als auch durch den Anpreßdruck das Elektrodengewicht auf die Aufhängung zu übertragen. Vereinzelt findet man auch bei den bereits erwähnten Konstruktionen noch Hilfsfassungen, die aber bloß den Zweck haben, während der Verminderung des Anpreßdruckes beim Nachstellen der Fassung die Elektrode in ihrer Lage festzuhalten. Solche Hilfsfassungen sollen also, wie die Wisdom-Bänder bei der Söderberg-Elektrode, nur verhüten, daß die Elektrode bei der Nachstellung in den Ofen gleitet. Alle diese Fassungen halten die Elektrode durch die mittels des Anpreßdruckes erzeugte Reibung. Für die großen Elektroden mit 2500 mm und mehr Durchmesser, wie sie Miguet in seinen Einphasenöfen verwendet, wäre diese Art der Aufhängung nicht mehr genügend verläßlich, auch müßte der erforderliche Anpreßdruck für die Kontaktplatten sehr hoch sein und die Fassung dementsprechend schwer ausfallen. Daher trennt man bei dieser Elektrode die Aufhängevorrichtung gänzlich von der Fassung und erreicht dadurch, daß einerseits die Fassung bloß für den Stromübergang dimensio-

erfolgt durch eine elastische Rohrschleife  $n$ . Die Stromzuführungsrohre und die Leitungen  $o$  für die Preßflüssigkeit werden von einem Ausleger  $p$  getragen, der am Gußrahmen angeschraubt ist. Die Abb. 132 zeigt die Fassung ohne Elektrode, und zwar befinden sich vorn drei mechanisch einstellbare Hebel und ganz rechts ein hydraulisch gesteuerter. Die vier Hochdruckzylinderpaare und die Getriebekästen sind auf dem Gußrahmen gut sichtbar. An Stelle der Aufhängebolzen sind zum Zwecke der Lichtbildaufnahme in den Prätzen Ständer eingeschraubt. In Abb. 133 ist die Elektrode eingesetzt. In Abb. 134 ist die hydraulisch gesteuerte Seite der Fassung dem Beschauer zugekehrt, auch sind hier versuchsweise einige Stromzuleitungsrohre und Verbindungsrohre angebracht.

Bei den bisher behandelten Fassungen fiel den Kontaktplatten sowohl

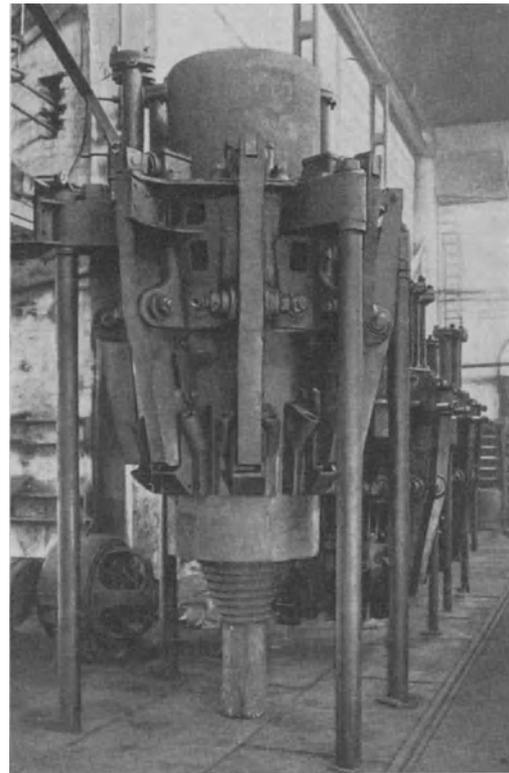


Abb. 133. Siemens-Hütten-Fassung mit 1000 mm Runderlektrode.

niert zu werden braucht, andererseits, daß die Aufhängung frei zugänglich außerhalb des Hitzebereiches des Ofens liegt. Die Miguet-Dauerelektrode besitzt einen äußeren Mantel aus amorphen Formkohlen *a*, die an einem Eisengerüst befestigt sind, und einen Kern *b* aus Stampfmasse (Abb. 135). Das Eisengerüst übernimmt alle mechanischen Beanspruchungen und vermeidet, daß namentlich Zugbeanspruchungen in den Kohle-sektoren auftreten. Die Vertikalprofile *c* des Gerüsts ragen oben aus der Elektrode hervor und werden durch Laschen mit den Gewindespindeln *e* der Aufhängung verbunden. Nun müssen aber, entsprechend dem Elektrodenabbrande, sowohl die Kohle-sektoren als auch die Traggerüstteile angestückelt werden. Die Aufhängung erhält ebensoviel Gewindespindeln, als die Elektrode Vertikalprofile besitzt, doch sind die Spindeln derart dimensioniert, daß jeweils die Hälfte dieser Anzahl das ganze Elektrodengewicht zu tragen vermag. Man verbindet daher nur jedes zweite Vertikalprofil mit der dazugehörigen Spindel; die übrigen Spindeln hängen frei, und die entsprechenden Profile können verlängert werden. Sodann verlascht man die neuen Profile mit den Spindeln und macht die andere Hälfte für die Verlängerung frei. Dadurch bilden die geradzahigen und ungeradzahigen Spindeln je eine Gruppe, die gemeinsam in Tätigkeit tritt. Demzufolge erhält auch jede Gruppe einen eigenen Antrieb *j*. Die Hub- und Senkbewegung der Spindeln wird durch Kettenradmutter *f* bewirkt, die sich gegen die Tragkonsolen *g* abstützen. Die Muttern der gleichen Gruppe liegen in gleicher Höhe und sind durch eine Gallsche Kette *i* miteinander verbunden. Die ganze Tragvorrichtung ist auf einem Hauptträger *h* untergebracht. Die Abb. 136 zeigt die Aufhängung der Miguet-Elektrode; hier sind die beiden Spindelgruppen deutlich zu sehen, ebenso die Verlängerungsstadien der Sektoren und des Traggerüsts. Die aufgesetzten Holzkappen schützen die Sektoren vor Beschädigung und vor Staubablagerung. Unterhalb des Hauptträgers läuft um die Spindeln die Fahrbahn eines Flaschenzuges, der zum Aufsetzen der Verlängerungsstücke für die Elektrode dient. Schließlich bemerkt man im Elektrodenschacht die Öldruckzylinder für die Fassung, deren Zweck erst erläutert werden wird. Für die Stromzufuhr ist eine Ringfassung vorgesehen (Abb. 135), die aus bronzenen wassergekühlten Kontaktplatten *m* und einem Preßring *n* besteht. Die Platten tragen außen, der Ring innen Keilflächen *o*. Durch die Schrauben *p* mit Gegengewinden können die Kontaktplatten in den Ring und infolge der Keilwirkung gegen die Elektrode gepreßt werden. Die als Drehbolzen ausgebildeten Muttern der Preßschrauben sind im Ring und in den Pratzen der Kontaktplatten gelagert. Zum Anziehen und Lockern der Schrauben bedient man sich langer Steckschlüssel. Die Fassung würde aber bei Verminderung des Anpreßdruckes gelegentlich der Elektrodennachstellung in den Herd rutschen, falls ihr Gewicht nicht durch eine entsprechende Vorrichtung ausgeglichen würde. Diese Vorrichtung muß aber auch den Regulierbewegungen der Elektrode folgen und beim Nachstellen die Fassung an der Elektrode hochziehen können. Hierzu dienen Öldruckzylinder *q*, die am Oberbau des Ofens angebracht sind. Die Zugstangen ihrer Druckkolben greifen mittels Bügel und Laschen an Pratzen des Fassungsrings an. Der Druck der Preßflüssigkeit wird

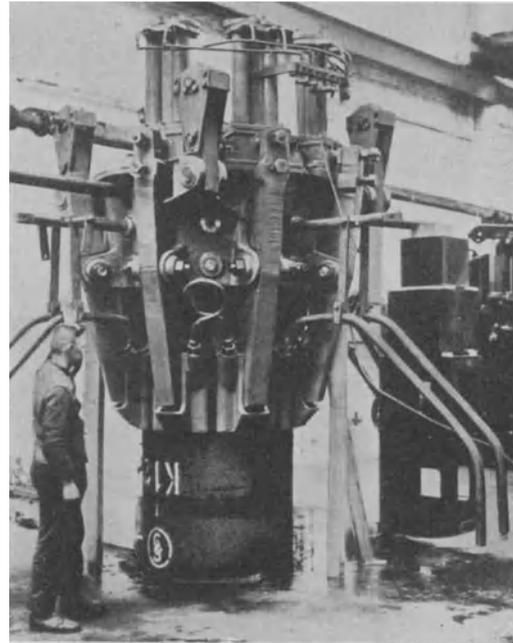


Abb. 134. Siemens-Hütten-Fassung mit 1000 mm Rundelektrode.

mittels Pumpe, Windkessel und Ausgleichsventil konstant erhalten. Beim Heben der Elektrode drückt die Pumpe Öl in die Zylinder nach, beim Senken fließt Öl aus den Zylindern durch das Ausgleichsventil ab. Soll aber die Fassung, nachdem die Preß-

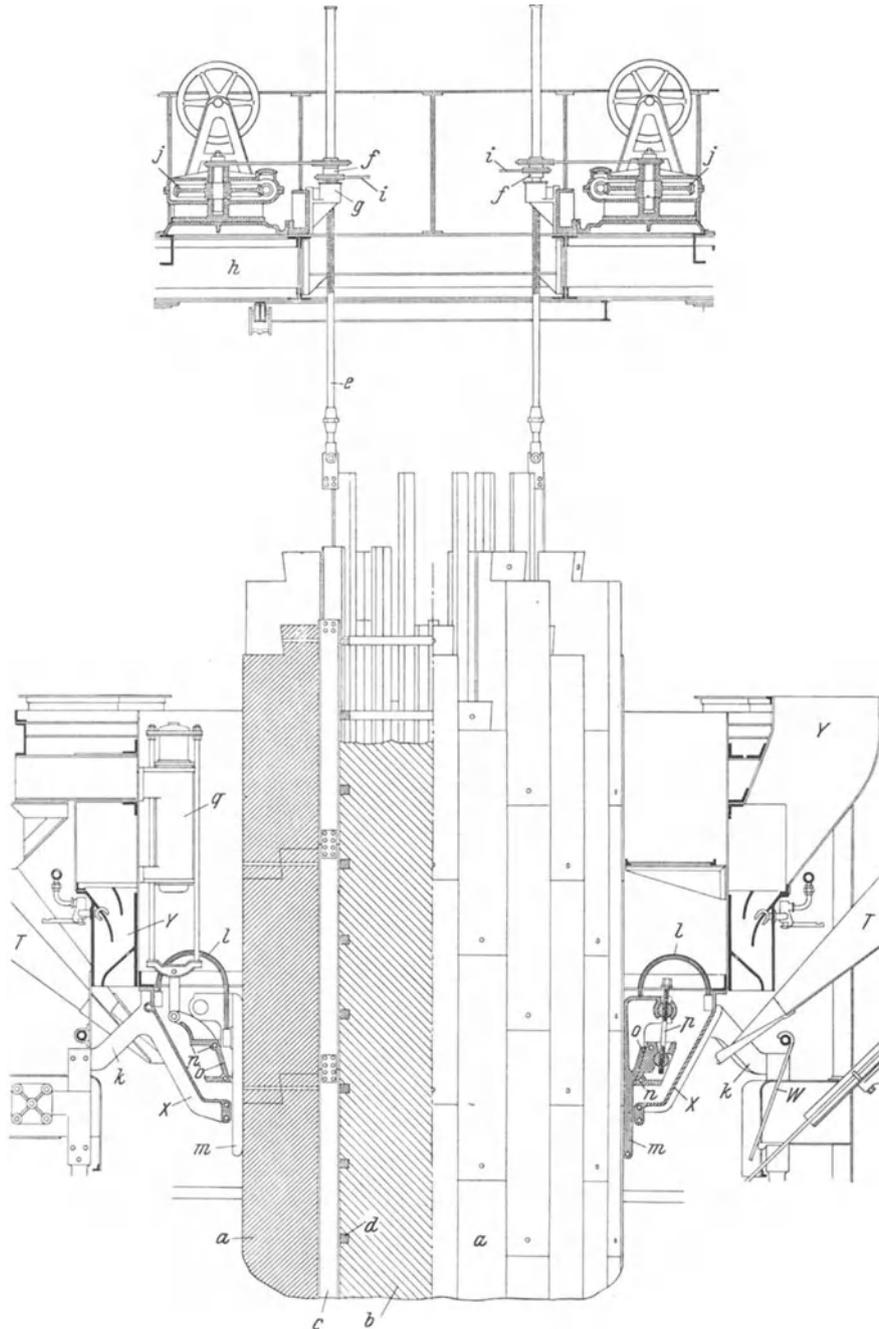


Abb. 135. Mignet-Dauerelektrode.

schrauben gelockert wurden, zwecks Nachstellung gehoben werden, so sperrt man das Ausgleichsventil und preßt mittels der Pumpe Öl in die Druckzylinder, welche den Ring und somit die ganze Fassung längs der Elektrode hochziehen. Zum Schutze der Fassung gegen die Herdhitze, die Abgase und den Staub, ist sie von einem Schutzkonus *X* um-

geben. Der Konus ist wassergekühlt und zur Vermeidung von Induktionsströmen anti-magnetisch zusammengesetzt. Er ist fest mit dem Ofenaufbau verbunden, und seine Pratten  $k$  dienen sowohl der Zu- und Ableitung des Kühlwassers als auch der Stromzuführung. Die Verbindung des Konus mit den Kontaktplatten erfolgt durch die kurzen Kupferseile  $l$ . Die Kontaktplatten müssen unten genügend weit aus dem Konus herausragen, weil sonst die an der Durchtrittsstelle ungenügend gekühlte Elektrode innerhalb des Konus erglühen und die Fassung zerstören könnte.

### Elektrodenbewegung und -regulierung.

Die Bewegung der Elektroden während des Betriebes erfolgt fast ausschließlich in der Richtung ihrer Achse und bezweckt die Einstellung eines gewünschten elektrischen Widerstandes im Ofen oder die Nachstellung der verbrauchten Elektroden. Vereinzelt, z. B. beim Rennerfelt-Ofen, tritt noch eine Schwenkbewegung der Horizontalelektroden um einen geringen Winkel hinzu, wodurch die Entfernung des Lichtbogens vom Bade verändert wird. Diskontinuierliche Elektroden, die fallweise ersetzt werden müssen, bedürfen einer Bewegungsmöglichkeit, die den Elektrodenwechsel außerhalb des Herdes gestattet. Da alle Paketelektroden vertikal hängen und in dieser Richtung einreguliert werden, ist eine zweite Vorrichtung zum Verfahren der Elektroden in horizontaler Richtung notwendig. Die Bewegung der Elektroden kann erfolgen: entweder ganz von Hand aus oder durch Handsteuerung einer motorischen Antriebsvorrichtung oder schließlich vollkommen selbsttätig. Zu Beginn ihrer Entwicklung und auch jetzt noch bei ganz kleinen Elektrodenöfen finden sich für die naturgemäß nur leichten Elektroden einfache Handantriebe. So war der Rathenau-Ofen (Abb. 57, S. 94) mit Handrad und Getriebe für die Elektrodenverstellung versehen; auch der kleine Schmelzofen nach Abb. 137 zeigt, allerdings neben dem motorischen Antrieb, den Handantrieb mittels Rad und Schraubenspindel. Jeder motorische Antrieb, gleichgültig ob handgesteuert oder automatisch betätigt, soll auf reinen Handantrieb umstellbar sein, um bei Störungen oder Reparaturen des motorischen Antriebes den Betrieb aufrechterhalten zu können.

Die Frage, ob handgesteuerter oder automatisch gesteuerter Motorantrieb zweckmäßiger ist, muß fallweise entschieden werden. Bei Stahlföfen wird man beispielsweise während der Periode des Feinens unbedenklich mit automatischer Regulierung arbeiten können, während zu Beginn des Niederschmelzens von festem Einsatz die Handsteuerung, die starke Stromstöße leichter ausgleicht, vorteilhafter sein kann. Bei den Öfen einiger chemischer Betriebe bietet die Handsteuerung vielfach Vorteile gegenüber der automatischen Elektrodenregulierung. Die großen offenen Drehstromöfen müssen, um entsprechend wirtschaftlich zu arbeiten, „ruhig gehen“ und deshalb stets gut „gedeckt“ bleiben. Die obere Beschickungsschicht soll nicht glühen, namentlich ist das Auftreten



Abb. 136. Aufhängung der Miguet-Dauerelektrode.

von Stichflammen zu verhindern. Tritt dies aber trotzdem ein, dann müssen die Stellen

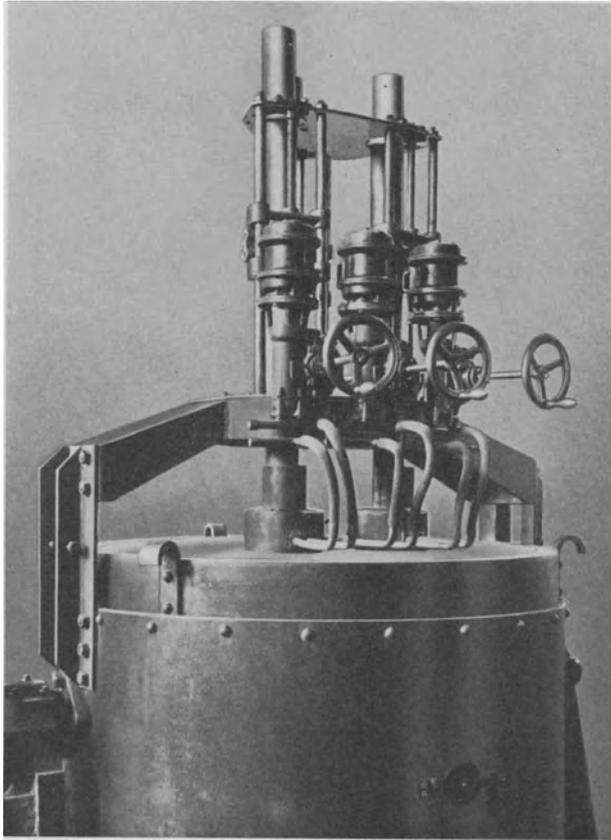


Abb. 137. 0,5-t-Ofen, Bauart Russ.

durch Aufwerfen von Beschickung sofort „gedeckt“ werden. Nun aber kann die empfindliche automatische Regulierung die Elektroden selbst bei unruhigem, also unwirtschaftlichem Ofengang, noch auf die eingestellte Stromstärke einregeln, während der Arbeiter, der die Handsteuerung bedient, schon um sich die Regelarbeit zu erleichtern, Sorge tragen wird, daß der Ofen ruhig geht.

Jede Elektrode ist stets mit einem eigenen Antriebsmotor zu versehen. Ursprünglich war dies bei den unbeweglichen Öfen nicht der Fall, und man verwendete einen einzigen Motor für alle Elektrodenpakete, deren Windwerke jeweils mit dem Motor gekuppelt wurden. Abb. 138 zeigt diese Ausführung für die drei Pakete eines Drehstromofens zur Karbidherstellung. Auch hier bemerkt man vorn die drei Handräder, die den Übergang von Handsteuerung auf Handbetrieb ermöglichen. Für das seitliche Ausfahren der Elektroden waren eigene Antriebe vorgesehen. In der Folge er-

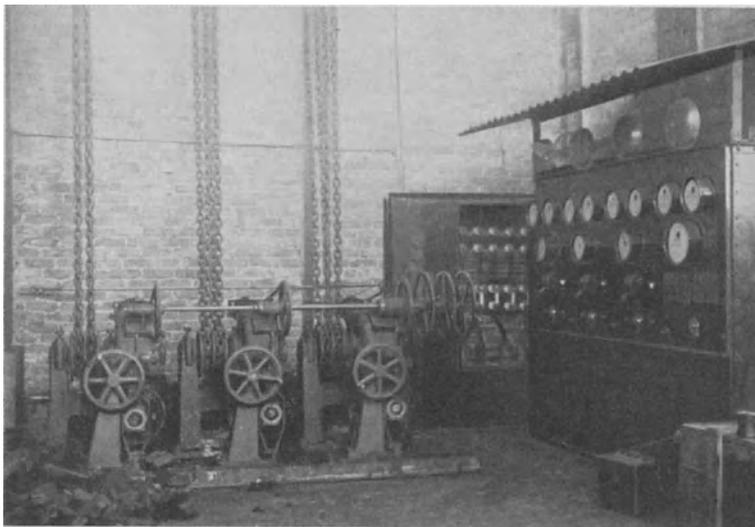


Abb. 138. Windwerk für Vertikalbewegung der drei Elektroden eines Drehstromofens mit gemeinsamen Motor.

hielt aber auch bei diesen Öfen jedes Paket den eigenen Motor, doch konnte er mittels einer Kupplung entweder für die Vertikalbewegung oder für die Horizontalfahrt verwendet werden. Ein solches Windwerk ist in Abb. 139 dargestellt. Es besteht aus zwei gleichen Schneckengetrieben  $A_{1-2}$ , wovon das erste  $A_1$  dauernd mit dem Motor  $B$  bzw. mit dem Getriebe  $C$  verbunden bleibt, während  $A_2$  mittels der Kupplung  $D$  an- oder abgeschaltet wird.  $a$  bis  $g$  sind feste Leitrollen für

die Kette, die von der Laufkatze  $E$  ausgehend, über die Leitrollen, Getrieberäder,

lose Rolle des Gegengewichtes  $F$  und über die Rollen  $h_{1-2}$  der Kranflaschen der Elektrodenaufhängung zur Katze zurückkehrt. Am Ende  $x$  ist die Kette einfach, kurz nach der Leitrolle  $f$  teilt sie sich in zwei Stränge mit den Enden  $y_{1-2}$ . Bei ausgeschalteter Schnecke  $A_2$  windet die Schnecke  $A_1$  je nach dem Drehsinn des Motors, Kette auf oder ab, und dementsprechend wird das Elektrodenpaket gehoben oder gesenkt.

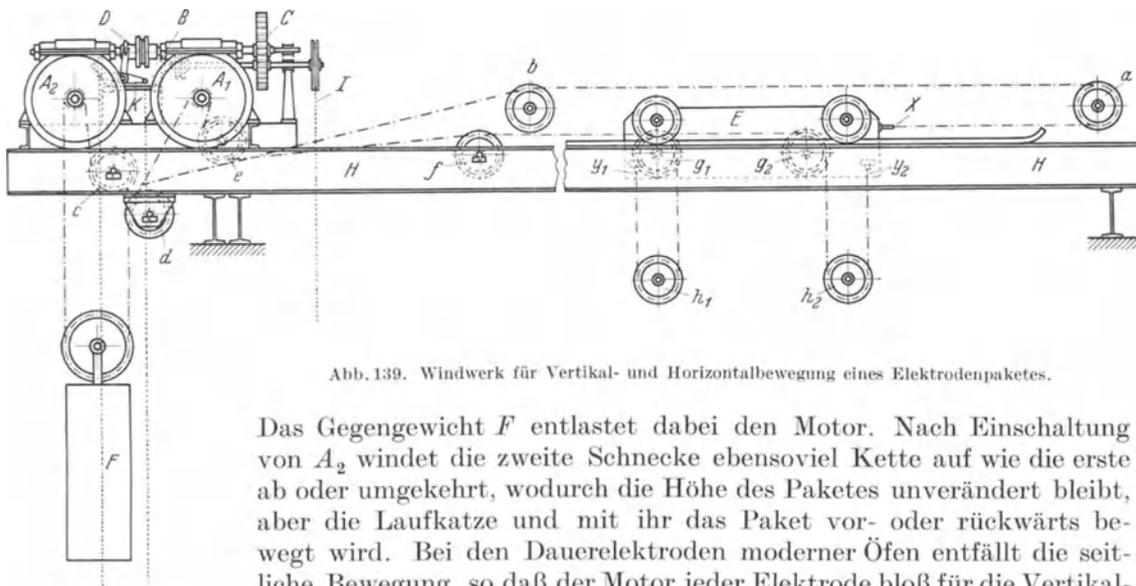


Abb. 139. Windwerk für Vertikal- und Horizontalbewegung eines Elektrodenpaketes.

Das Gegengewicht  $F$  entlastet dabei den Motor. Nach Einschaltung von  $A_2$  windet die zweite Schnecke ebensoviel Kette auf wie die erste ab oder umgekehrt, wodurch die Höhe des Paketes unverändert bleibt, aber die Laufkatze und mit ihr das Paket vor- oder rückwärts bewegt wird. Bei den Dauerelektroden moderner Öfen entfällt die seitliche Bewegung, so daß der Motor jeder Elektrode bloß für die Vertikal-

bewegung dient. Abb. 140 zeigt ein Getriebe mit anmontiertem Elektromotor für eine Dauerelektrode; das Kettenrad ermöglicht die Elektrodenverstellung von Hand aus. Motor und Getriebe sind trotz guter Kapselung möglichst aus dem Bereiche von Hitze und Staub anzuordnen, eine bei den Großöfen der chemischen Betriebe leicht erfüllbare Forderung, weil über dem Ofen meist ein Stampf- oder Verlängerungsraum für die Elektroden vorgesehen ist, in dem sich auch das Hubwerk unterbringen läßt. Die metallurgischen Öfen hingegen müssen gekippt werden, und die Elektroden samt Ständern und Antrieben machen die Bewegung mit. Nur bei wenigen Bauarten ist die Elektrodenaufhängung getrennt vom Ofenkörper angeordnet, wie dies in Abb. 102 (S. 131) gezeigt wurde, und dann ist die Unterbringung der Elektrodenwindwerke in geschützten Räumen ohne weiteres möglich. In der Regel aber sind die Antriebe am Ofen angebracht. Das bequemste Antriebsmittel ist auch hier der Elektromotor, doch findet man vielfach hydraulische Elektrodenverstellungen. Während der hydraulische Antrieb direkt am Elektrodenwagen angreift, ist der Elektromotor mit einem Getriebe verbunden, welches mittels Zahnstange, Schraubenspindel, Kette oder Seil die Verstellung bewirkt.

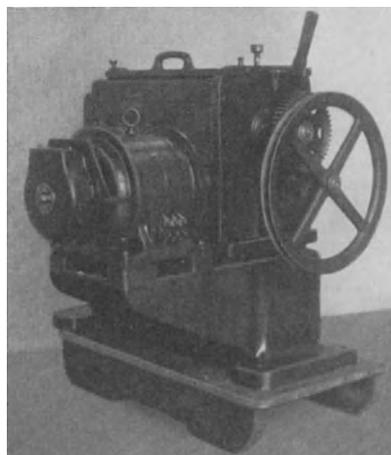


Abb. 140. Elektrodenwinde.

Das Gewicht der Elektrode und ihrer Halter wird durch ein Gegengewicht so weit ausgeglichen, daß für die Elektrodenbewegung bloß geringe Kräfte benötigt werden. Für die Begrenzung des Hubes soll stets ein Endschalter vorgesehen sein und auch für die Unterbrechung der Senkbewegung, im Falle die Elektroden auf ein Hindernis stoßen, ist Vorsorge zu treffen. Die Abschaltung des Elektrodenantriebes bei einem Fiat-Ofen der

Demag wurde bereits auf S.129 beschrieben. Die Siemens & Halske AG. windet das

Seil des Gegengewichtes um eine Antriebsrolle und erzielt dadurch eine gewisse Elastizität des Antriebes, weil bei Hemmung der Elektrode das Seil auf der Trommel gleiten kann. Als Beispiel einer hydraulischen Elektrodenverstellung mit in den Elektrodenständern eingebauten Preßzylindern diene der Heroult-Ofen von Brown-Boveri nach Abb.98 (S.128). Der 1,5-t-Ofen derselben Firma in Abb.141 dagegen besitzt Druckzylinder, die außerhalb der Ständer angeordnet sind, wobei auch der direkte Antrieb der Kolbenstangen an den Elektrodenwagen deutlich zu sehen ist. Die Anordnung der Elektromotoren samt Getrieben und Handrädern auf Konsolen, die an den Elektrodenständern befestigt sind, zeigt Abb.142, während aus Abb.143 die Unterbringung des Elektrodenantriebes auf den Ständern eines 4-t-Stahlhofens von Siemens & Halske zu ersehen ist.

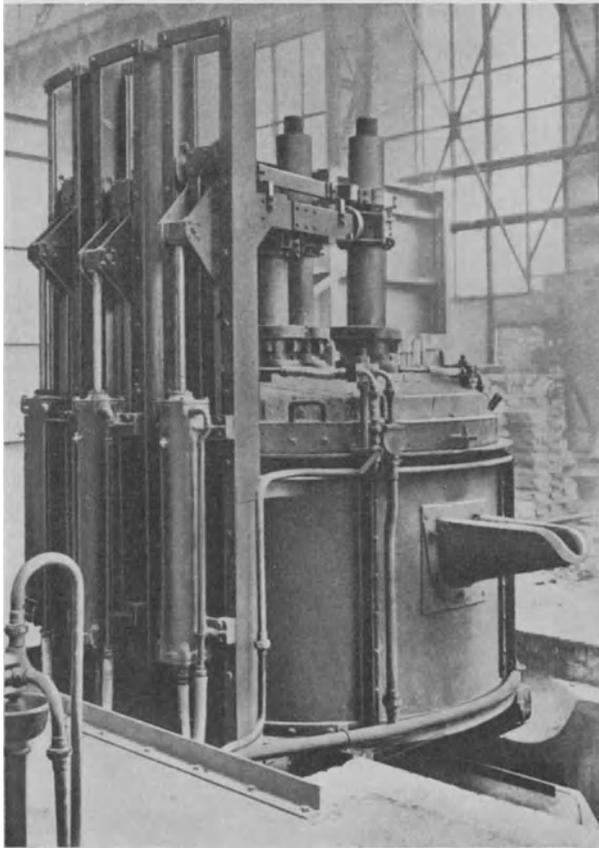


Abb.141. 1½-t-Ofen, Bauart Brown-Boveri.

Das Bedienungspersonal muß jederzeit in der Lage sein, die elektrischen Verhältnisse des Ofens mittels geeigneter Meßinstrumente kontrollieren zu können. Diese werden in einer Schalttafel vereinigt, die auch alle für die Regulierung der Elektroden notwendigen Schalter enthalten soll und derart aufzustellen ist, daß sie zwar vor Staub und Ofenhitze genügend geschützt, trotzdem einen vollkommenen Überblick über den Ofen gestattet. In Abb.138 (S.156) ist die Schalttafel für einen Karbidofen zu sehen, unmittelbar neben ihr das Windwerk für die Handsteuerung der drei Elektroden. Die Aufstellung der Schalttafel für einen 6-t-Stahlhofen mit hydraulisch-automatischer Elektrodenregulierung zeigt Abb.144.

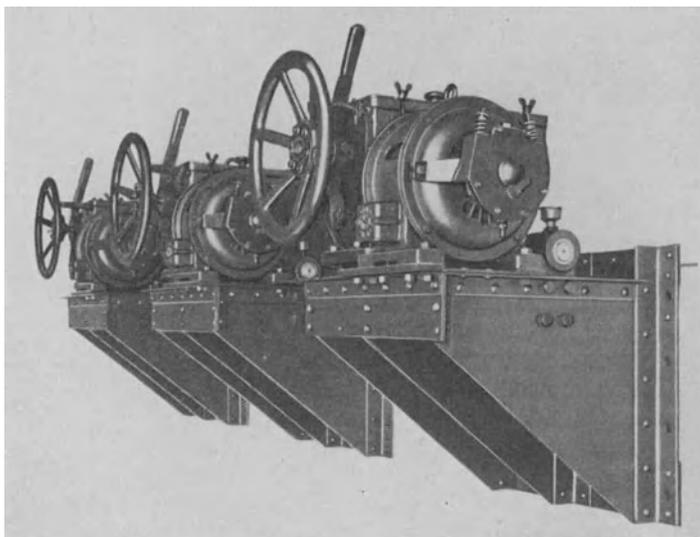


Abb.142. Elektrodenwinden mit Konsolen zur Anbringung an den Elektrodenständern.

In der obersten Instrumentenreihe sieht man links und rechts je ein Voltmeter, und zwar eines für die Primär-

seite des Transformators, um feststellen zu können, ob die Anlage überhaupt unter Spannung steht, das zweite für die Sekundärseite mit einem Umschalter auf die einzelnen Phasen. Dazwischen sind drei Amperemeter angebracht, die gleichfalls an der Sekundärseite der Phasen angeschlossen sind. Darunter ein Drehstrom-Wattmeter, zur Kontrolle der jeweils entnommenen Leistung und ein Zähler. Dazwischen eine Uhr, die an keinem Schaltbrett fehlen sollte. Die drei Handräder dienen zur Betätigung der Ölschalter und des Umschalters von Stern- auf Dreieckschaltung. Die kleinen, darunter befindlichen Ventilträder gehören zur hydraulischen Elektrodenregulierung. Für den Fall eines Versagens der automatischen Regulierung sieht man rechts von der Schalttafel die Bedienungshebel für die hydraulische Handregulierung der drei Elektroden.

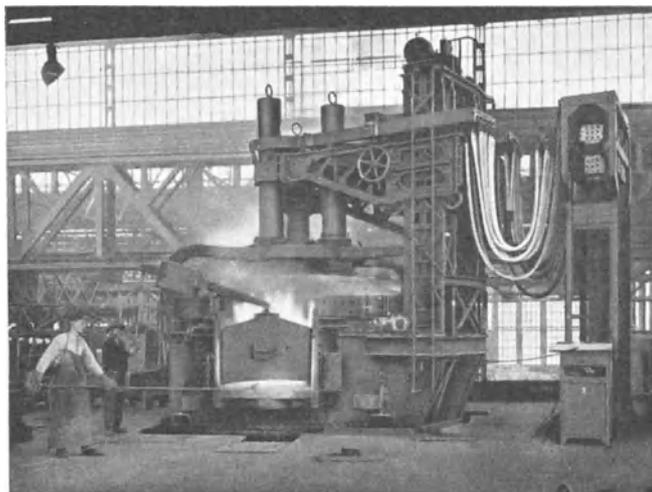


Abb. 143. 4-t-Ofen, Bauart Siemens.

Die automatische Regulierung erfolgt in der Regel auf gleiche Stromstärke. Bei ganz großen Öfen wurde auch eine Spannungsregulierung versucht, um die Bewegung der schweren Elektrode zu vermeiden. Die automatische Regulierung kann nach rein elektrischem, kombiniert mechanisch-elektrischem oder hydraulisch-elektrischem Prinzip eingerichtet sein. Die erste selbsttätige Regulierung gehörte dem kombinierten mechanisch-elektrischem System an und wurde von der Cuénod AG. (Genf) gebaut. Der von ihr verwendete Thury-Regler besitzt eine durch motorischen Antrieb in pendelnde Bewegung versetzte Schwinde. Ein vom Elektrodenstrom beeinflusstes Solenoid löst mittels eines Hebels eine Klinke in der Schwinde aus, diese nimmt einen Schalthebel mit, der den Stromkreis des Windenmotors

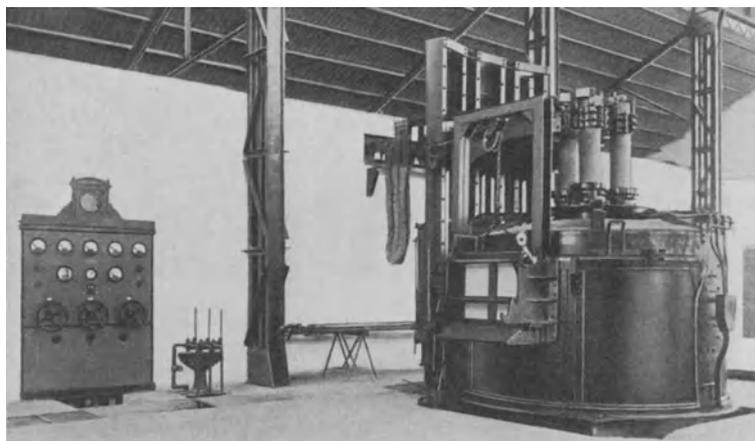


Abb. 144. 6-t-Ofen mit Schalttafel, Bauart Brown-Boveri).

schließt und dadurch die Elektrode verstellt. Abb. 145 zeigt den Thury-Regler. Das Rad  $V$  wird von einem Motor, der gleichzeitig mehrere Regulatoren, beispielsweise die aller drei Phasen eines Drehstromofens betreiben kann, dauernd gedreht. Mittels des Exzenters am anderen Wellenende wird die Drehung in eine Pendelbewegung der Schwinde  $D$  verwandelt. An der Schwinde sind zwei Klinken  $I$  und  $I'$  befestigt, die durch die Anschläge  $K$  und  $K'$  ausgelöst werden können. Die Solenoide  $B$  und  $F$  werden von einem Strom beeinflusst, der dem Elektrodenstrom proportional ist, weil er aus einem Umformer in der Stromzuleitung der Elektroden stammt. Wächst der Strom

über die gewünschte Stärke, so stoßen sich die beiden Solenoide ab, wobei sich der

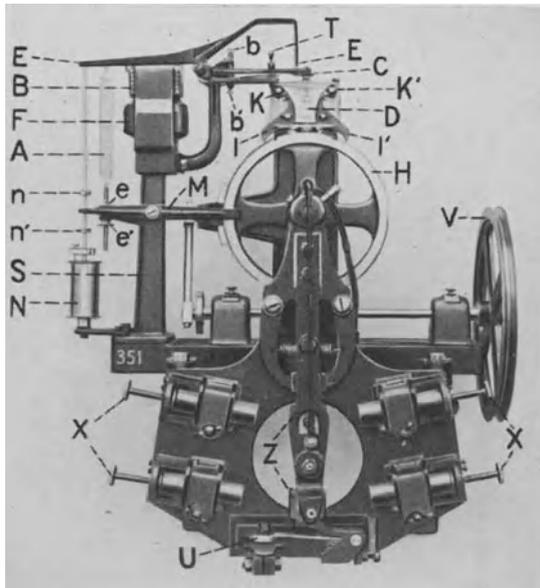


Abb. 145. Thury-Regulator.

Hebel *E* rechts senkt und mittels des Anschlages *C* den Auslöser *K'* berührt, der die Klinke *I'* freigibt. Da die Klinke mit der Schwinge pendelt, greift sie auf ihrem Wege in eine Kerbe des Rades *H* ein, nimmt dieses mit und schwenkt daher auch den Hebel *Z* nach links, bis er die beiden Kontakte *X* berührt und durch den Schluß dem Windenmotor einen Hubimpuls gibt. Beim Rückgang der Schwinge wird auch der Hebel wieder frei und der Windenmotor abgeschaltet. Das Spiel wiederholt sich in einem oder dem anderen Sinne so oft, bis die Stromstärke den richtigen Wert erlangt hat. Das Schaltschema dieser Regulierung nach Abb. 146 ist nun ohne weiteres verständlich. Der Controller *CM* ermöglicht auch hier den Übergang von automatischer Regulierung zur Handsteuerung.

Zu den rein elektrischen Regulierungen

gehört der Apparat der Bergmann-Elektrizitäts AG. (Berlin), dessen Schaltschema in Abb. 147 wiedergegeben ist. Auch hier beeinflusst der im Transformator *A* umgewandelte Elektrodenstrom ein Solenoid *a*, das mit einer Dämpfung *b* versehen ist. Mit ansteigendem Strom wird der Kern des Solenoides gehoben und die mit dem Hebel verbundenen beiden Kontakte *1* und *8* nach rechts bewegt. Dabei berührt der Kontakt *1* den Kontakt *2* eines um *c* drehbaren Hebels. Infolgedessen wird ein Stromkreis geschlossen, der von einem Gleichstromnetz ausgehend, über den Vorschaltwiderstand *e* und die Klemme *II* zu den Kontakten *2* und *1* durch die Spulen *f* und *g* über die Klemme *I* zum Netz zurückkehrt. Die Spule *g* zieht die Schaltschütze für die Hubbewegung des Elektrodenmotors *C* an und schließt die Kontakte *5* und *6*, so daß die Elektrode gehoben wird. Nun aber zieht die Spule *f* den Anker *3* samt dem Hebel

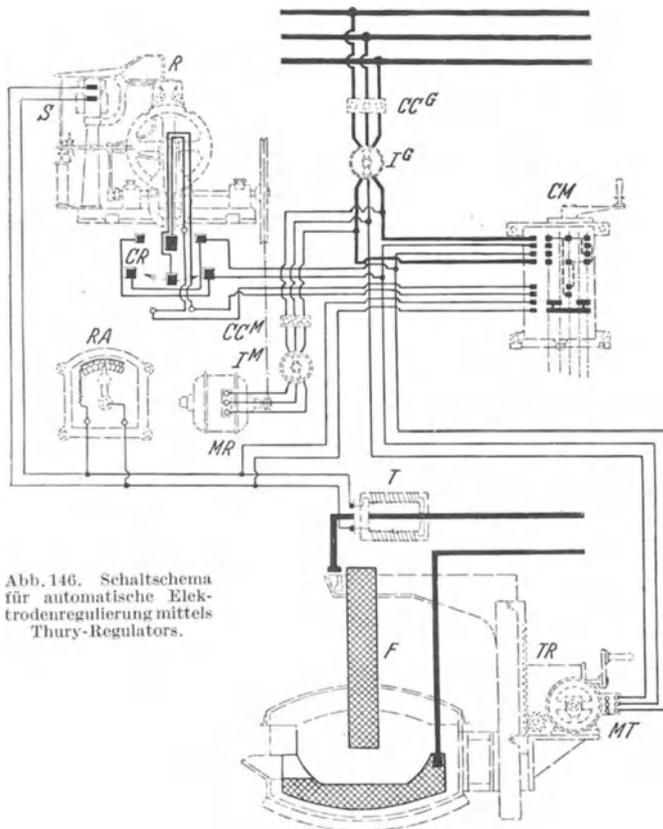


Abb. 146. Schaltschema für automatische Elektrodenregulierung mittels Thury-Regulators.

an, der mit dem Kontakte *2* den Kontakt *1* und das dazugehörige Hebelsystem des

Solenoidkernes zurückdrückt, bis der Kontakt 4 den Kontakt 7 berührt. Dadurch wird die Spule  $f$  kurzgeschlossen, und der Kontakthebel geht unter Einwirkung der Feder  $d$  in seine Mittellage zurück. Falls durch diesen Schaltimpuls die richtige Stromstärke eingeregelt wurde, bleibt das System in Ruhe. Dies ist aber selten der Fall, und der Vorgang wiederholt sich. Je stärker die Abweichung des Stromes vom Normalwert ist, um so kräftiger wird der Solenoidkern beeinflusst, und um so schneller läuft der Regler. Bei Kurzschlüssen ist die Kraft des Solenoides so groß, daß die Spule  $f$  den Kontakthebel nicht mehr zurückziehen vermag. Der Kontakt 4—7 kann nicht geschlossen werden, und der Regler arbeitet daher nicht mehr impulsweise, sondern durchlaufend, bis der Kurzschluß behoben ist. Beim Ausbleiben der Netzspannung würde die Elektrode andauernd gesenkt werden. Um dies zu verhüten, ist ein Nullspannungsrelais mit der Spule  $k$  eingebaut. Die Spule ist zwischen einer Ofenphase und Erde geschaltet und zieht einen Anker an, wodurch der Kontakt 12 geöffnet bleibt. Sobald das Netz spannungslos wird, gibt die Spule  $k$  den Anker frei. Der nun geschlossene Kontakt 12 bewirkt den Kurzschluß der Spule  $i$  für die Senkbewegung der Elektrode, und die Schütze mit den Kontakten 9—10 fällt ab. Mittels des Kontrollers  $V$  kann die Elektrodenbewegung auch von Hand aus gesteuert werden. Abb. 148 zeigt einen Bergmann-Regler.

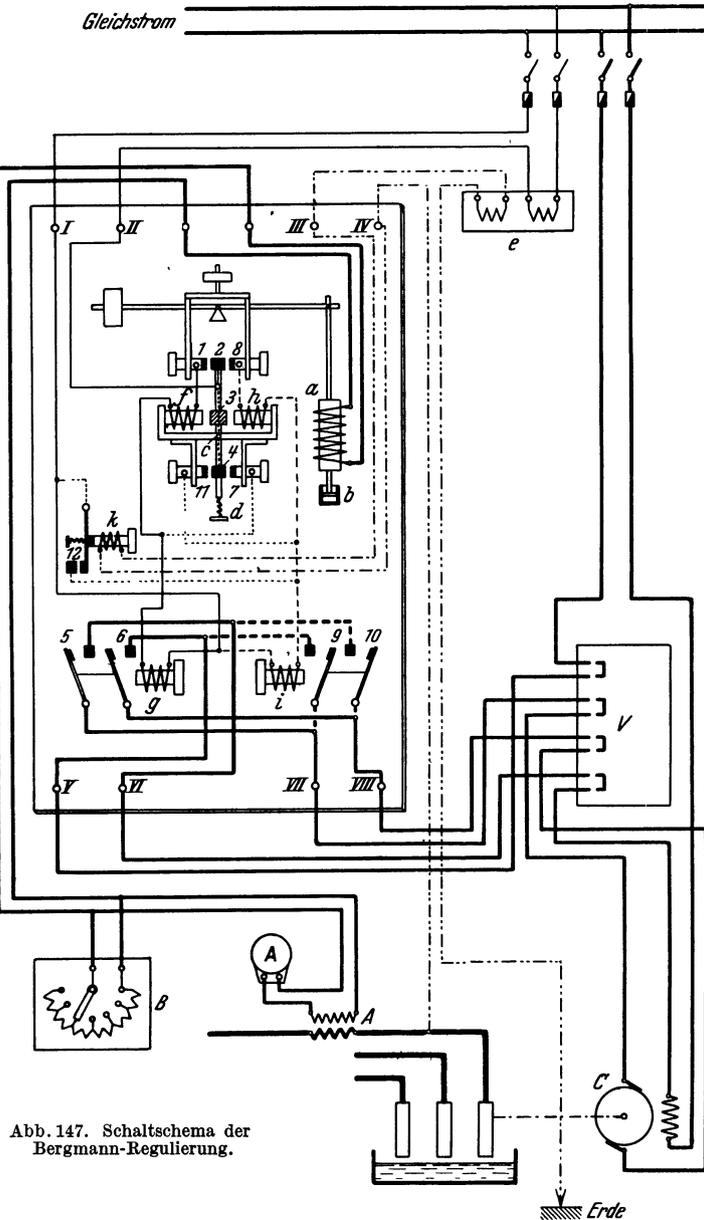


Abb. 147. Schaltschema der Bergmann-Regulierung.

Der Regler der Siemens-Schuckert-Werke(Charlottenburg) darf zu den rein elektrischen Apparaten gerechnet werden, denn er könnte auch ohne den mechanischen Taktgeber arbeiten, dem die Aufgabe zufällt, die Schaltbewegung in Impulse aufzulösen. In der Abb. 149 ist das Schaltschema des Reglers wiedergegeben; die für einen Hubimpuls des Windenmotors in Tätigkeit tretenden Teile sind im rechtsstehenden Schema herausgehoben. Der Siemens-Schuckert-Regler wird durch ein Differentialrelais  $B$  mit einer Stromspule  $a$  und einer Spannungsspule  $g$  gesteuert. Auch hier verursachen zu hohe Stromwerte den Hub des Kernes der Spule  $a$  und der da-

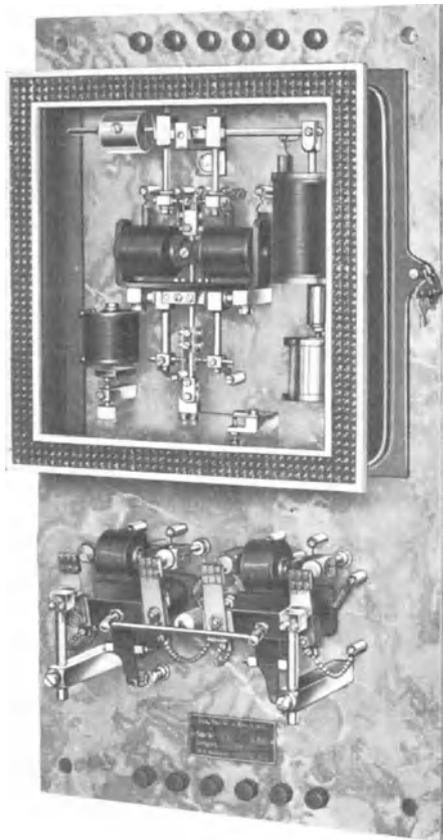


Abb. 148. Bergmann-Regler.

mit verbundenen Kontaktbrücke 1. Bei geringen Stromspannungen berührt diese vorerst bloß den Kontakt 2, wodurch aber keine Schaltbewegung ausgelöst wird, weil der Kontakt 5 noch offen ist. Erst bei weiterem Stromanstieg wird auch der Kontakt 3 geschlossen, und nun erhält die Spule *b* Strom, die ihren Kern mit der daran befestigten Schaltbrücke hochzieht. Dadurch wird der Kontakt 4 geschlossen, der die Hubschütze *c* des Elektromotors *F* einschaltet. Der Motor bleibt eingeschaltet, auch nachdem der Kontakt 3 wieder geöffnet ist, weil der Strom für die Spule *b* über den Kontakt 2 und den gleichzeitig mit 4 geschlossenen Kontakt 5 fließt. Erst wenn auch Kontakt 2 offen ist, oder wenn vorher der Taktgeber *E* den Strom unterbrochen hat, fällt die Hubschütze *c* ab, und die Elektrode kommt zum Stillstand. War die Regulierbewegung ungenügend und bleibt 2 bzw. auch 3 geschlossen, so wiederholt sich der Vorgang, sobald der Taktgeber wieder Strom zur Hubschütze einschaltet. Wie bei jeder Regulierung ist hier ein Endschalter *d* vorgesehen, der die Hubbewegung bei einer Höchststellung der Elektroden selbsttätig unterbricht. Der Umschalter *U* dient zum Übergang auf Handsteuerung, die mittels des Kontrollers *V* erfolgt.

Eine elektrohydraulische Elektrodenregulierung baut Brown-Boveri (Baden). Der Elek-

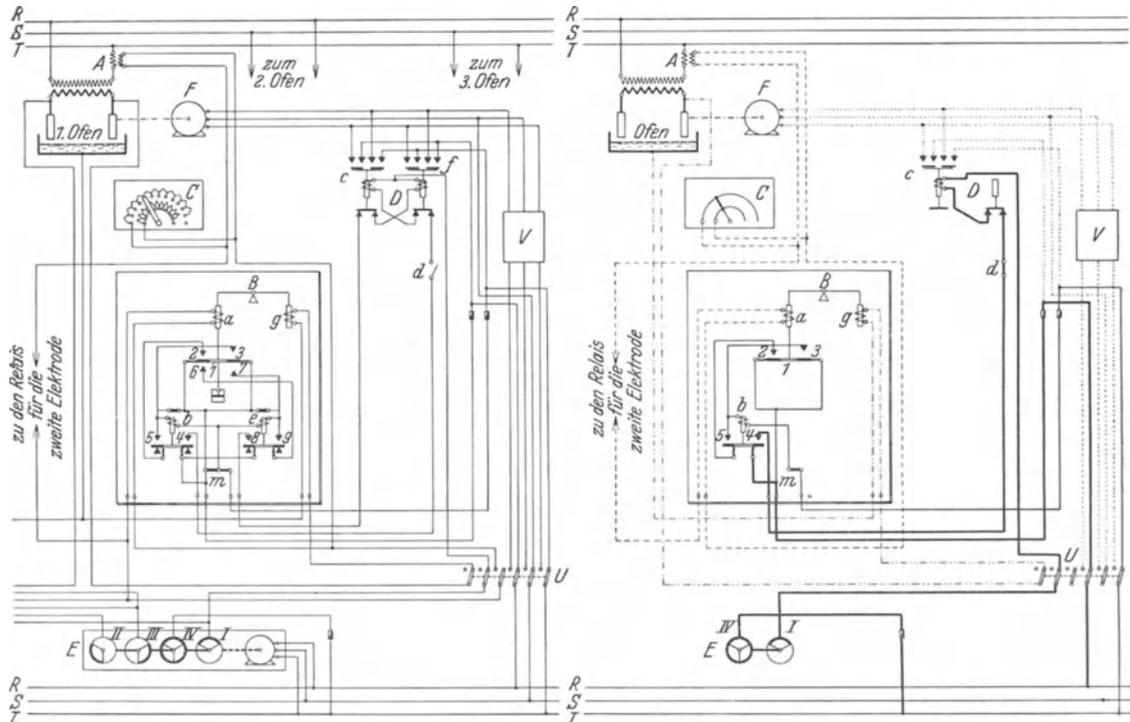


Abb. 149. Siemens-Schuckert-Regulierung.

trodenstrom beeinflusst einen Drehfeldregler, der ein Druckwasserventil steuert. Das Schema laut Abb.150 gibt Aufschluß über die Schaltung der Apparatur. Im Umformer 3 wird der Elektrodenstrom entsprechend transformiert und gelangt sodann in den Schnellregler 7, der aus einem Magnetsystem mit zwei Wicklungen besteht, deren phasenverschobene Ströme ein Drehfeld erzeugen. Dem Drehmoment der Reglertrommel wirkt die Feder 9 entgegen. Je nachdem, ob das Drehmoment der Trommel oder jenes

der Feder überwiegt, wird der Regler nach der einen oder nach der anderen Richtung ausschlagen und mittels der Übersetzung 8 den Kolben 11 des Druckwasserventiles 10 verschieben. Während der automatischen Regulierung muß das Ventil 13 geschlossen sein, der Handhebel 14 steht dann vertikal. Wird beispielsweise der Kolben des Steuerventiles gesenkt, so tritt das Druckwasser (4—10 at) aus 20 durch das Ventil 10 unter den Kolben des Elektrodenverstellzylinders 15, wodurch die Elektrode gehoben wird. Im gegenteiligen Falle, wenn der Steuerkolben gehoben wird, kann das Druckwasser aus dem Elektrodenzylinder durch das Steuerventil in den Ablauf 21 fließen, wobei die durch das Gegengewicht 16 nur teilweise entlastete Elektrode sinkt. Da bei geringen Abweichungen der Stromstärke auch die Ausschläge des Reglers und somit der Hub des Steuerkolbens klein ausfallen, ist es einleuchtend, daß infolge der nur zum Teil freigegebenen Leitungsquerschnitte auch die Regulierung langsamer erfolgen wird als bei starken Stromschwankungen. Die Empfindlichkeit des Reglers kann durch den Schalter 4, der das Übersetzungsverhältnis des Stromwandlers 3 einstellt, durch die Veränderung der Federspannung bei 9 und

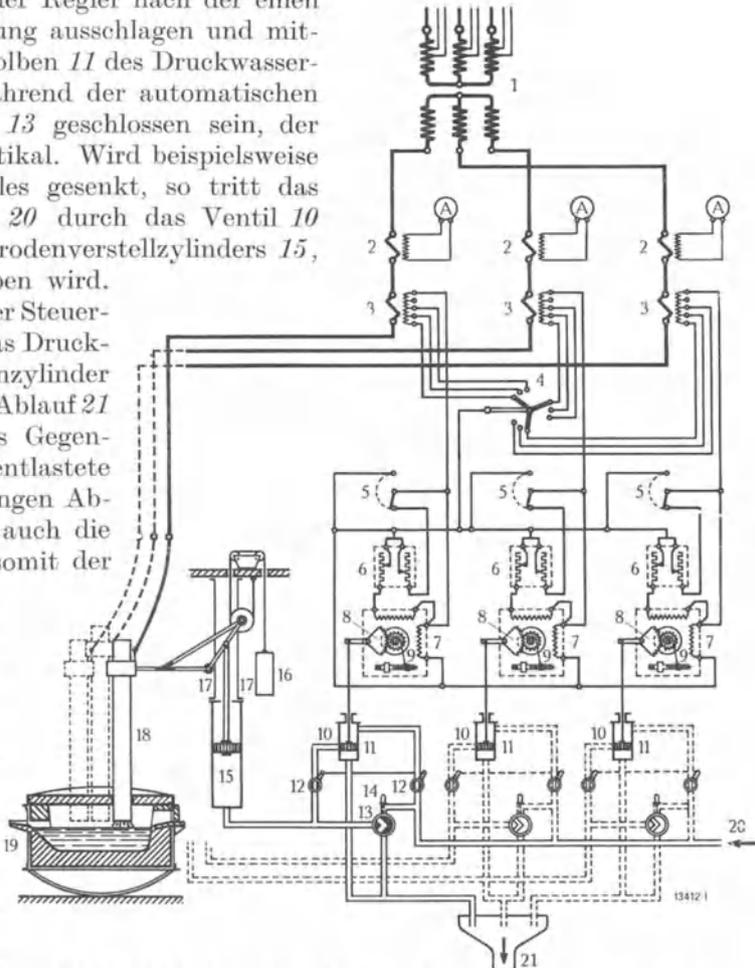


Abb. 150. Schaltschema der hydraulischen Regulierung, Bauart Brown-Boveri.

durch den Vorschaltwiderstand 6 beeinflusst werden. Abb.151 zeigt den Drehfeld-Schnellregler mit dem Steuerventil für das Druckwasser. Der Übergang zur Handsteuerung ist sehr einfach. Nachdem die Ventile 12 geschlossen wurden, steuert der Hebel 14 das Ventil 13 für die Elektrodenbewegung. Wird der Hebel nach rechts gedrückt, so kann Druckwasser in den Hubzylinder fließen, und die Elektrode geht hoch. Bei links gestelltem Hebel ist die Verbindung des Druckzylinders mit dem Ablauf hergestellt. Auch hier ist die Reguliergeschwindigkeit von der Größe des Hebelausschlages, also von den freigegebenen Durchgangsquerschnitten abhängig.

Die bereits erwähnte Cuénod AG. (Genf) baut auch einen elektrohydraulischen Regler, den sie als „Höchstschnellregler“ bezeichnet, weil man mit ihm Elektrodengeschwindigkeiten zwischen 130 und 150 mm je Sekunde erreichen kann. Die Verstellkraft für den Regler nach Abb.152 liefert die Druckölpumpe 10, während für die Regulierung der Elektrode das Druckwasser der Pumpe 3 dient. Die Steuerung erfolgt durch eine Strom-

spule 6 und durch eine Spannungsspule 7. Das Drucköl (1,5 at) gelangt in das Ölrelais 5, das durch einen Differentialkolben 12 abgeschlossen ist. Die beiden Kolbenflächen verhalten sich wie 1:2. Durch die Öffnung 11 im großen Kolben tritt das Öl in den Raum 13. Ist der Drehschieber 14, der durch die Stromspule 6 gesteuert wird, geschlossen, dann steigt der Druck im Raume 13, und der Differentialkolben 12 geht hoch, weil auf eine, dem halben großen Kolben entsprechende Fläche, ein Druck nach oben wirkt. Der Hebel 16 überträgt die Kolbenbewegung des Ölrelais auf den Kolben 2 der Druckwassersteuerung, wodurch der Elektrozylinder an die Druckwasserleitung geschaltet wird. Da der Ausschlag des Drehschiebers 14 von der Größe der Stromschwankung abhängt, wird auch die Reguliergeschwindigkeit entsprechend beeinflusst. Der Differentialkolben bleibt infolge der angegebenen Flächendifferenz in Ruhe, wenn der Druck im Raume 13 halb

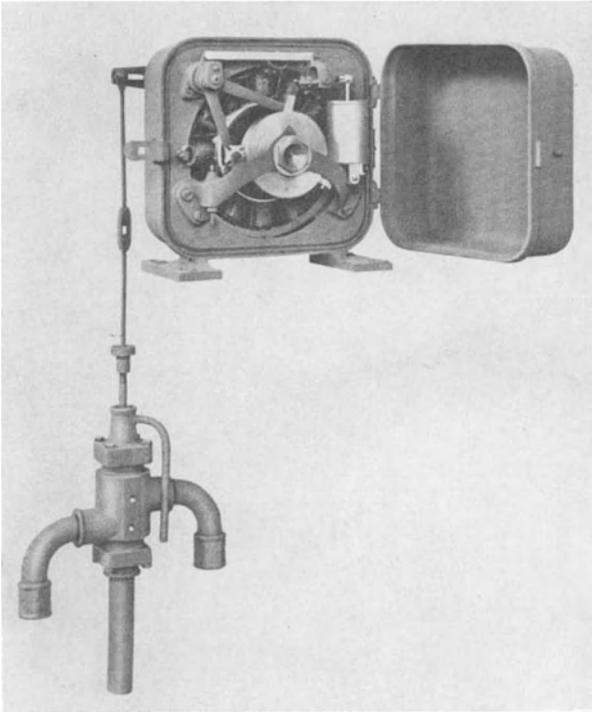


Abb. 151. Schnellregler der Brown-Boveri-Regulierung.

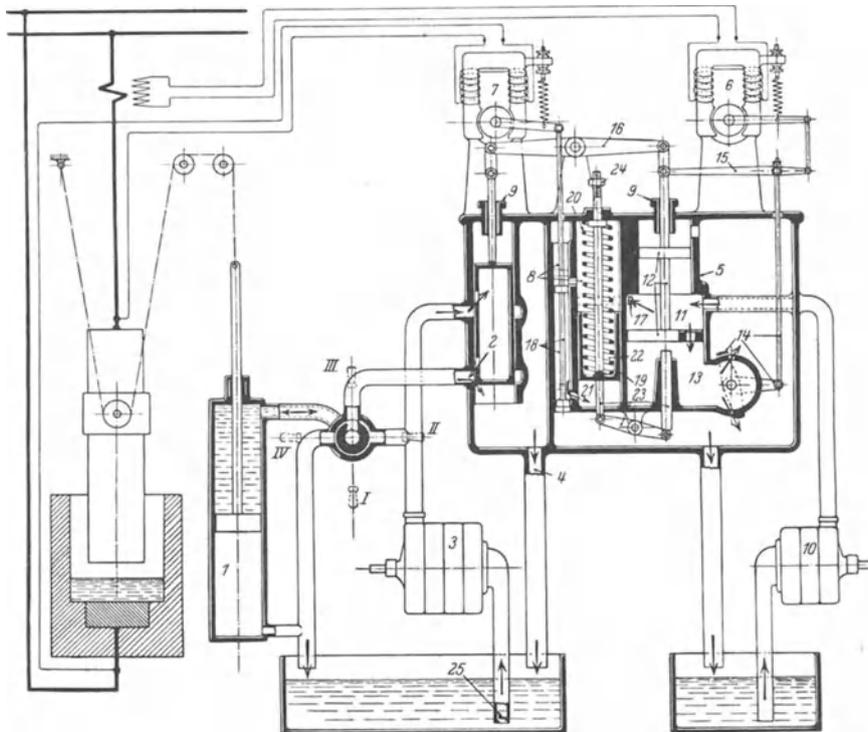


Abb. 152. Schema des hydraulischen Höchst Schnellreglers, Bauart Cuénod.

so groß ist wie im Raume zwischen den beiden Kolben. Bei geringeren Werten sinkt der Kolben, bei höheren steigt er. Ein Teil des Drucköles, das dauernd zugepumpt wird, fließt aus dem Raume zwischen den beiden Kolben durch die Öffnung 17 in die von der Spannungsspule beeinflusste Steuerung 18. Von dort tritt es bei normalen Verhältnissen durch die Öffnung 21 unter den Kolben 19 des Zylinders 22. Der Kolben wird gehoben und spannt die Feder 20. Wenn nun die Spannung ausbleibt, zieht die Feder der Spannungsspule 7 die Steuerspindel hoch, so daß das Öl durch die Öffnung 21 ausfließt. Der Kolben 19 sinkt infolge der Federkraft und des durch 8 eintretenden Drucköles. Die Abwärtsbewegung des Kolbens treibt mittels des Gestänges 23 den Bolzen unter dem Differentialkolben hoch und macht dadurch eine Abwärtsbewegung desselben, somit auch der Elektrode, unmöglich. Die Sperrhöhe kann mittels der Schraube 24 eingestellt werden, während für die Hubbegrenzung des Differentialkolbens und der Druckwassersteuerung die beiden Schrauben 9 dienen. Die Sperrvorrichtung tritt aber auch in Tätigkeit, wenn infolge eines Defektes das Drucköl ausbleibt. In diesem Falle sinkt der Druck unter dem Kolben 19, der durch seine Abwärtsbewegung die Sperrung des Differentialkolbens einleitet. Beim Versagen der Druckwasserzufuhr könnte das Wasser aus dem Elektrozylinder 1 durch die Pumpe 3 zurückfließen, doch wird dies durch das Rückschlagventil 25 verhindert. Eine allfällige Handsteuerung erfolgt mittels des Ventiles, dessen vier Handgriffe mit I—IV bezeichnet sind.

## Baumaterialien.

### A. Feuerfeste Stoffe.

Wenn es schon für die in gewöhnlichen Industrieöfen herrschenden Temperaturen keine Materialien gibt, welche die Beanspruchungen ständig aushalten, würden diese den viel höheren Temperaturen des elektrischen Ofens noch viel weniger widerstehen können.

Der elektrische Ofen unterscheidet sich aber von den anderen gebräuchlichen Ofenarten im wesentlichen dadurch, daß die Zone der Entfaltung der größten Hitze unmittelbar im Schmelzgute selbst liegt. Der heißeste Teil des Ofens wird von der meist festen Beschickung und der Schlacke abgegrenzt. Als latente Schmelz- und chemische Reaktionswärme entzieht die Beschickung andauernd große Wärmemengen der heißesten Zone, so daß diese auf einen verhältnismäßig kleinen Raum — der nächsten Umgebung der Elektroden — beschränkt bleibt. Infolgedessen werden die Materialien, aus welchen der Ofen gebaut ist, nicht entsprechend den im Ofen herrschenden extremen Temperaturen beansprucht.

Je nach der Art des Ofeneinsatzes und der vor sich gehenden Reaktion, verwendet man im Ofenbau saures, basisches oder neutrales Material. Das widerstandsfähigste Material in bezug auf Temperatur ist der Kohlenstoff. Er wird deshalb auch vielfach verwendet, namentlich für den Boden und die diesem nächstliegenden Teile der Ofenwand. Der Kohlenstoff wird verwendet entweder in Form von Kohlenziegeln oder als Stampfmasse, die in ähnlicher Weise hergestellt werden kann, wie dies bei der Elektrodenerzeugung beschrieben ist (siehe S. 111). Es ist aber nicht notwendig, für ihre Herstellung die dort beschriebene große Sorgfalt aufzuwenden. Das Brennen der Stampfmasse erfolgt oft im Ofenprozeß selbst. Gegenwärtig werden an den Erzeugungsstätten der Kohlenelektroden auch große Formstücke für den Ofenkörper hergestellt, die insbesondere für den Ofenboden dienen und sich durch sehr große Festigkeit und chemische Widerstandsfähigkeit auszeichnen. Durch genaue Bearbeitung der Stoßflächen kann man die Fugen auf ein Mindestmaß herabsetzen. Einer allgemeinen Verwendung des Kohlenstoffes stehen seine große elektrische Leit- und chemische Reaktionsfähigkeit mit gewissen Stoffen im Wege.

Nicht selten werden Schlacken als Ofenfutter verwendet, insbesondere die schwer schmelzbaren Magnesium- und Aluminiumschlacken. Der Ferrochromofen z. B. wird mit

Chromschlacke ausgekleidet. Wenn nun beim Bau einer neuen Anlage noch keine Schlacke vorhanden ist, kann man auch Chromerze unter Zugabe geeigneter Bindemittel zu einer Stampfmasse bereiten. Im übrigen werden die sonst für Industrieöfen üblichen feuerfesten Baustoffe auch für den Elektroofen verwendet. Diese Materialien können hier nicht eingehend behandelt werden, dies geschieht in eigenen Werken<sup>1</sup>. Im nachstehenden werden nur die wichtigsten Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Stoffe angeführt.

Von den folgenden beiden Tabellen<sup>2</sup> gibt die eine die physikalischen Eigenschaften, die andere den elektrischen Leitwiderstand feuerfester Stoffe an.

Ziegel aus	Schmelzpunkt °C	Raumgewicht g/cm <sup>3</sup>	Verhalten in der Hitze unter Belastung	Wärmeleitfähigkeit bei 1000° C kcal/cm <sup>2</sup> /sec/° C	Spez. Wärme kcal/g/° C	Widerstandsfähigkeit gegen Abplatzen
Schamotte	1615—1715	2,65—2,75	Erweicht bei 1350°	0,0039	0,199 bei 100 0,253 bei 1000	gut
Silika . .	1705	2,29—2,44	Erweicht u. bricht bei 1600—1650°	0,0044	0,219 bei 100 0,298 bei 1000	schlecht
Magnesit .	2165	3,44—3,60	Bricht bei 1410 bis 1550°	0,0079	0,231 bei 100 0,324 bei 1000	} sehr schlecht
Karborund	zersetztsich bei etwa 2000°	3,12—3,20	Bei 1650° kein Reißen und kein Erweichen	bei 200°:0,0070 bei 1000°:0,0200 bei 1400°:0,0260	0,186 zwischen 30 und 1000	
Bauxit. .	1565—1785	3,15—3,25	Erweicht bei 1350°	—	—	gut
Alundum.	2050	3,90—4,00	Bei 1550° noch kein Erweichen	bei 650—1020°: 0,0083	0,198 bei 100	gut
Spinell. .	2135	—	Erweicht nahe am Schmelzpunkt	—	—	gut
Sillimanit	1816	—	Erweicht bei 1700°	—	—	gut

Temperatur °C	Ohm je cm <sup>3</sup>				
	Magnesit-ziegel	Silika-ziegel	Schamotte-ziegel	Karborund-ziegel	Alundum-ziegel
600	—	—	21000	Die angegebenen Beobachtungen sind widerspruchsvoll.	—
700	—	—	17000	Jedenfalls ist die Leitfähigkeit erheblich höher als bei Silika usw.	16 · 10 <sup>6</sup>
800	—	—	13000	—	—
900	—	—	9000	—	5 · 10 <sup>6</sup>
1000	—	—	6600	—	2 · 10 <sup>6</sup>
1100	—	—	4400	—	—
1200	—	—	2300	—	—
1300	6200	9700	1300	—	—
1400	420	2400	690	—	—
1500	55	710	280	—	—
1550	30	22	60	—	—
1565	25	18	—	—	—

Schamotte wird durch Brennen von Ton unter Zusatz von Quarz, gebranntem Ton und anderen tonhaltigen Stoffen und Magerungsmitteln hergestellt. Wegen seiner geringeren Leitfähigkeit für Wärme wird er den anderen Baustoffen vorgezogen, hat aber den Nachteil geringerer Festigkeit und des Erweichens (bereits bei 1350°) weit unter seiner eigentlichen Schmelztemperatur.

Dinassteine, auch Silikasteine genannt, bestehen aus gemahlenem reinem Quarzgestein, dem vor dem Brennen und Pressen geringe Mengen von Ton oder Kalk zugesetzt sind. Ihr Erweichungspunkt liegt unmittelbar unter ihrem Schmelzpunkt, und sie widerstehen daher höheren Temperaturansprüchen besser als Schamotte und werden häufig als Ofengewölbe, Türpfeiler und Türbogen verwendet.

Die Silikatsteine dehnen sich beim Erhitzen infolge kristallographischer Veränderung der Quarzsubstanz aus. Dieses „Wachsen“ macht sich zwischen 500 und 600° C am meisten bemerkbar und ist um so geringer, je schärfer die Steine bei ihrer Herstellung gebrannt worden sind. Zum Schutz der Steine gegen Zerdrücken werden Dehnfugen durch Einbau von Holz, Pappe und anderen in der Hitze nicht beständigen Stoffen geschaffen. Diese Dehnfugen sind so bemessen, daß sie eine lineare Ausdehnung von 2,5% zulassen.

<sup>1</sup> Z. B. Niederleuthner: Unbildsame Rohstoffe keramischer Massen. Wien: 1928.

<sup>2</sup> Aus Sisco-Kriz: Das Elektrostahlverfahren. Berlin: Julius Springer.

Bei saueren Schmelzverfahren baut man die ganze Zustellung aus Silikasteinen. Bei ihrer Verwendung, namentlich als Bodenmaterial, ist ihre geringe elektrische Leitfähigkeit zu beachten.

Der natürliche (hauptsächlich in Steiermark) vorkommende Magnesit ( $\text{MgCO}_3$ ) wird ähnlich wie Kalkstein gebrannt. Bei der Brenntemperatur von  $1600\text{--}1700^\circ$  sintert das Material und wird dadurch dicht und sehr fest. Magnesit wird entweder als Stampfmasse oder Flickmasse verwendet oder in Form von Ziegeln. Letztere erhält man, indem man Sintermagnesit mahlt, nach geringem Wasserzusatz zu Formlingen preßt und diese bei  $1600^\circ$  brennt. Aus der Tabelle ist sein hoher Schmelzpunkt und die gute Leitfähigkeit ersichtlich. Auch die chemische Widerstandsfähigkeit des Magnesits, namentlich gegen Verschlackung, ist sehr hoch, weil die magnesiahaltigen Schlacken schwer schmelzbar und sehr zähflüssig sind. Für Herde und Seitenwände wählt man Magnesit trotz seines hohen Preises gerne für basische Öfen.

Dolomit ist bekanntlich das in der Natur vorkommende Kalzium-Magnesium-Karbonat ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), dem durch das Brennen die Kohlensäure ausgetrieben werden kann. Der so entstehende Sinterdolomit wird häufig für die Auskleidung des Herdes und der Seitenwände basischer Elektroöfen verwendet. Er wird in bohngroßen Stücken bezogen. Zu beachten ist, daß im Gegensatz zu Schamotte, Silikasteinen und Magnesit der Sinterdolomit durch die Feuchtigkeit der atmosphärischen Luft (ähnlich dem gebrannten Kalk) verwittert und zerfällt. Verwitterter Dolomit ist für den Elektroofenbau ungeeignet.

Karborundum (Siliziumkarbid  $\text{SiC}$ ) wurde von E. Acheson aus Quarz und Kohle im elektrischen Widerstandsofen erzeugt. Unter Zusatz verschiedener Bindemittel (Pech, Leinöl, Tonerde, Kieselsäure) wird das Siliziumkarbid geformt und gebrannt. Nächst dem Kohlenstoff widersteht es den höchsten Temperaturen am besten, seiner allgemeinen Verwendung steht aber zur Zeit noch sein Preis entgegen.

Andere feuerfeste Materialien sind geschmolzene Tonerde (künstlicher Korund), der auch als Alundum oder Koronit bekannt ist. Es hat eine große Widerstandsfähigkeit gegen Hitze (Schmelzpunkt etwa  $2000^\circ$ ), aber es zeigt wie die anderen tonerdehaltigen Materialien bei hohen Temperaturen starke Schrumpfung.

Magnesia und Ton liefern beim Schmelzen Magnesiaspinell ( $\text{MgOAl}_2\text{O}_3$ ), ein basisches, Kieselsäure und Schamotte Sillimanit ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ ), ein saueres feuerbeständiges Material, doch sind diese beiden hoch tonerdehaltigen Ziegel zunächst für eine allgemeine Verwendung noch zu teuer.

Es gibt keine einfachen Untersuchungsmethoden, die eine verlässliche Prüfung der feuerfesten Baustoffe gewährleisten, daher ist ihr Einkauf Vertrauenssache.

Im nachstehenden wird ein Beispiel einer Ofenauskleidung gegeben, die sich bei einem Elektrostahlöfen gut bewährt hat. Hierzu wurde eine Dinamarke verwendet, welche folgende Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften aufweist:

Chemische Zusammensetzung:		Physikalische Eigenschaften:	
Glühverlust . . . . .	0,14%	Feuerfestigkeit . . . . .	34/35 S. K. (Segerkegel)
$\text{SiO}_2$ . . . . .	95,07%	Porosität: nach Gewicht 8,9%, nach Volumen 17,5%	
$\text{Al}_2\text{O}_3$ . . . . .	1,64%	Volumengewicht . . . . .	1,97
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ . . . . .	0,83%	Spezifisches Gewicht . . . . .	2,37
$\text{CaO}$ . . . . .	1,97%	Erweichungspunkt bei Belastung $2 \text{ kg/cm}^2$ . $1680^\circ \text{ C}$	
Alkalien. . . . .	0,35%	Druckfestigkeit in kaltem Zustande . . .	$383 \text{ kg/cm}^2$

Diese Dinamarke zeichnet sich durch sehr geringe Porosität, große Druckfestigkeit in kaltem Zustande und durch hohen Erweichungspunkt unter Belastung aus. Beim Herstellen von Normal- und Formsteinen werden sehr exakte Formen und durch sorgfältiges Ausbrennen eine vollständige Umwandlung des Quarzites erzielt, was aus dem ausgewiesenen geringen spezifischen Gewicht hervorgeht. Diese Steine werden ausschließlich aus sehr reinen amorphen Quarziten erzeugt.

Die übrige Ausmauerung wurde mit Magnesitziegeln nachstehender Zusammensetzung und physikalischer Eigenschaften durchgeführt:

Chemische Zusammensetzung:		Physikalische Eigenschaften:	
Glühverlust . . . . .	0,12%	Porosität: nach Gewicht 6,50 %, nach Volumen	18,82 %
SiO <sub>2</sub> . . . . .	2,57%	Volumengewicht . . . . .	2,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	1,42%	Spezifisches Gewicht . . . . .	3,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . . . . .	6,74%	Erweichungspunkt . . . . .	1425° C
CaO . . . . .	1,54%	Druckfestigkeit bei hoher Temperatur . . .	1465° C
MgO . . . . .	87,77%	Intervall . . . . .	40° C

Das Pressen erfolgt hydraulisch unter hohem Druck und das Brennen der Ziegel in modernen Tunnelöfen.

## B. Isolierstoffe.

Nachstehende Tabelle gibt die Übersicht einiger Isolierstoffe und deren technisch interessanter Daten.

Firma	Name des Isoliermaterials	Zusammensetzung	Durchschlagspannung in Volt je 1 mm Schicht	Widersteht der Wärme bis zu ° C	Verhalten gegen Luftfeuchtigkeit	Bearbeitungsmöglichkeit
—	Naturglimmer	—	50 000 <sup>1</sup>	600—1000	unempfindlich	schn. <sup>2</sup> bo. st.
Jaroslaws erste Glimmerfabrik, Berlin	Mikanit	Glimmer und Bindemittel Schellack	12 000 <sup>1</sup>	100	unempfindlich	schn. bo. st. pr.
	gewöhnl. Heizmikanit	detto	detto	600	unempfindlich	schn. bo. st.
	Amber-Heizmikanit	detto	detto	800	unempfindlich	detto
	Amber-Naturglimmer	—	detto	800	unempfindlich	detto
H. Weidmann, Rapperswil (Schweiz)	Mikanit	Glimmer und Bindemittel	35 000 <sup>1</sup>	80	unempfindlich	schn. bo. st. schl.
	Cornit	—	je nach Sorte <sup>1</sup> 1500—5000	100—400	unempfindlich	sg. bo. schl. pol. dr.
	Vitrit	Asbest und Bindemittel	250	500	saugt Feuchtigkeit an	sg. bo. st. fr. pol.
	Rocaten	Naturgestein	große elektr. Durchschlagfestigkeit	hitzebeständig	unempfindlich	gut bearbeitbar
	Pierrit	Asbest-Zement	60—100	hitzebeständig	wenn nicht imprägniert, hygroskopisch	—
	Steatit	künstl. Speckstein, gebrannt	—	—	—	—
Bakelite G. m. b. H. Berlin W 35	Bakelite-material	Kunsthharz und Faserstoffe	20 000 <sup>1</sup>	300	unempfindlich	—
Neolitwerk-A.-G., Dessau	Neolit	Kunsthharz und Faserstoffe	25 000 <sup>1</sup>	180	unempfindlich	sg. bo. fr. dr.

<sup>1</sup> Für Dauerbeanspruchung empfiehlt es sich, mit ca. 25 % dieser Prüfwerte zu rechnen.

<sup>2</sup> schn. = schneiden                      st. = stanzen                      schl. = schleifen  
sg. = sägen                              pr. = pressen                      dr. = drehen  
bo. = bohren                              fr. = fräsen                      pol. = polieren.

Manche Teile des elektrischen Ofens, namentlich aber die Stromzuführungen, bedürfen elektrischer Isolierungen. Für ihre Wahl sind jedoch nicht bloß die elektrischen Eigenschaften maßgebend, sondern es muß auf mechanische Beanspruchungen, Temperatur- und Witterungseinflüsse Rücksicht genommen werden. Die handelsüblichen Bezeichnungen der Isolierstoffe sind in der Regel Fabrikmarken, die meistens keinen Schluß auf die Zusammensetzung gestatten. Die bekanntesten Isolierstoffe sind Glimmer, Porzellan und Glas, außerdem einige in der Natur vorkommende Gesteinsarten. Während die Eigenschaften von Glimmer, Porzellan und Glas sehr von den verschiedenen Sorten abhängen, sind die künstlichen Isoliermaterialien leicht in einheitlicher Qualität erhältlich.

### Bauarten von Elektrodenöfen.

Die Öfen für metallurgische Betriebe dienen entweder bloß zum Schmelzen der Beschickung, ohne daß dabei die chemische Zusammensetzung verändert wird, oder zur Veredelung des Einsatzes durch bestimmte chemische Einwirkungen. Beide Verwendungsarten bedingen einen diskontinuierlichen Betrieb, wenn auch mitunter das Zeitintervall zwischen den einzelnen Chargen kurz gehalten werden kann und der Ofen Tag und Nacht unter Strom steht. Im Gegensatz hierzu sind die Öfen der chemischen Industrie kontinuierliche Öfen, in denen aus einem Beschickungsgemisch ein chemisch neuer Körper erschmolzen wird. Hier wird der Betrieb nach Möglichkeit nicht unterbrochen, solange die verfügbare Energie noch hinreicht, um den Ofen warm zu halten. Erst bei größeren Reparaturen muß der Ofen abgestellt und ausgeräumt werden, doch ist es oft vorteilhafter, den ganzen Ofenkörper neu aufzubauen, weil man dann bei sorgfältiger Arbeit durch einige Jahre hindurch vor Betriebsunterbrechungen ähnlicher Art gesichert ist. Diese Öfen werden naturgemäß jetzt nur mehr für größere Leistungen gebaut und nehmen in einer Einheit bis zu 30 000 kW auf. Die metallurgischen Öfen werden allerdings bis zu 60 t Fassung gebaut, in der Regel aber können Einheiten mit 12 t Einsatz und etwa 3200 kVA Transformatorleistung als groß bezeichnet werden. Es wurde bereits erwähnt, daß man im Ofenbau aus Gründen der Wirtschaftlichkeit bestrebt ist, die Teile des Elektroofens weitgehend zu typisieren. Dies gilt besonders für die kleinen und mittleren Öfen für metallurgische Verwendungszwecke, die serienweise erzeugt und dementsprechend billig sein können.

#### A. Metallurgische Öfen.

##### a) Reine Lichtbogenöfen.

Bei diesen Öfen, die auch Strahlungsöfen genannt werden, kommt der Lichtbogen mit der Beschickung nicht in Berührung, daher kann sie weder Kohlenstoff aus den Elektroden aufnehmen, noch örtlich überhitzt werden. Der freibrennende Lichtbogen ist unabhängig vom jeweiligen Widerstand des Einsatzes und verursacht daher keine Stromstöße, so daß man den Ofen direkt an ein beliebiges Netz anschließen kann. Abb. 153 zeigt einen Lichtbogenofen der „Industrie“ Elektroofen G. m. b. H. (Köln) für 100 kg Fassung, der besonders zum Schmelzen von Kupfer, Kupferlegierungen, Nickel u. dgl. geeignet ist. Die schmiedeeiserne Wanne ist mit einer Wärmeisoliermasse ausgekleidet und der Herd aus feuerfestem Material hergestellt. Der Deckel, gleichfalls aus feuerfesten Steinen, trägt die wassergekühlten Dichtungsringe für die Graphitelektroden. Diese werden durch Fassungen gehalten, die als Gleitstücke ausgebildet sind und mittels Gewindespindeln längs je zwei Führungssäulen bewegt werden. Die Tragkonstruktion für die Elektroden besteht aus einer mit der Wanne verschraubten Brücke. Für Einphasenstrom sind zwei, für verketteten Zweiphasenstrom und Drehstrom drei Elektroden vorgesehen, die in einer vertikalen Ebene, aber unter entsprechendem Neigungswinkel zueinander angeordnet sind. Die Regulierung erfolgt bei diesen kleinen Öfen meist von

Hand aus. Beschickungstür und Abstich sind in einem Geschranke vereinigt. Die Beschickungstür schließt, ebenso wie der Deckel und die Elektrodendurchführungen, luftdicht. Die unmittelbar darunter befindliche Abstichöffnung wird jeweils mit einem Formstein geschlossen. Für die Kippung des Ofens ist eine Zapfenlagerung in seitlichen Böcken vorgesehen. Einer der beiden Zapfen trägt das Schraubenrad, das mittels Schnecke und Handrad betätigt wird. Der Ofen wird für Fassungen von 50—500 kg bei Transformatorleistungen von 75—250 kVA gebaut.

Der sog. Bonner Ofen wurde bereits kurz beschrieben (S. 91). Die drei sternförmig in einer horizontalen Ebene angeordneten Elektroden treten durch die Ofenwandungen

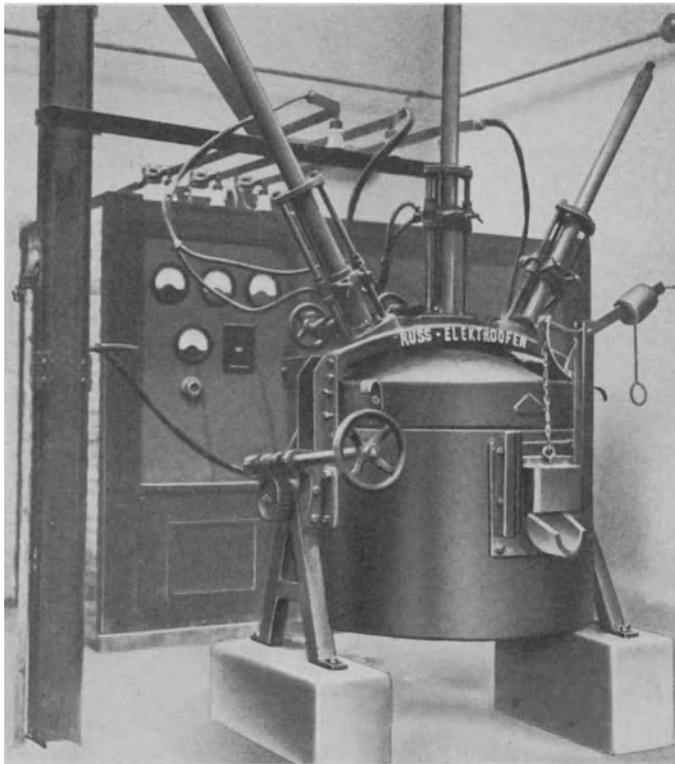


Abb. 153. 100-kg-Lichtbogenofen, Bauart Russ.

in das Innere, so daß der Deckel keinerlei Öffnungen besitzt und vollkommen frei ist. Da der Ofen meist zur Stahlerzeugung verwendet wurde, erhielt er bei basischem Prozeß eine Zustellung aus Magnesitsteinen und Dolomit-Teerstampfmasse, bei sauerem Prozeß eine solche aus Quarz-Ton-Teermischung. Die Eintrittsstellen der Elektroden in den Herd sind besonders sorgfältig aus feuerfestem Material hergestellt und von außen mittels wasserdurchflossener Zylinder, welche die Elektroden umgeben, gekühlt. Auch hier ist die Elektrodendurchführung luftdicht gebaut. Die Elektrodenregulierung erfolgt mittels Druckwasserzylinder, die ein Gleitstück des Elektrodenhalters auf Führungsstangen verschieben. Der Ofen besitzt einen tiefliegenden Abstich und auf der gegenüberliegenden Seite eine Arbeitstür. Er steht auf

Wiegen, die auf Rollen laufen, und wird durch Motorantrieb und Zahnkranz gekippt. Der Bonner-Ofen wurde für Fassungen von 200—5000 kg von den Rheinischen Elektrostahlwerken (Bonn) gebaut.

Der Rennerfelt-Ofen der Aktiebolaget Elektriska Ugnar (Stockholm) wurde auch schon erwähnt (S. 92). Er wird zur Stahlerzeugung und zum Schmelzen von Eisen, Kupfer und Legierungen verwendet. Für den Rennerfelt-Ofen ist die Form des Lichtbogens charakteristisch, der infolge der Elektrodenanordnung abwärts gegen das Bad gerichtet ist. Die Form des Ofens entsprach ursprünglich einem Zylinder mit horizontaler Achse. Der untere Teil bildete die Ofenwanne, der obere das abnehmbare Deckelgewölbe. Durch den Deckel ragte die Mittelelektrode in das Innere, während die beiden horizontalen Seitenelektroden entweder durch die ebenen oder durch die zylindrischen Wände der Ofenwanne eintraten. In einem Falle wurde der Ofen um die Zylinderachse gekippt, im anderen um eine dazu senkrechte. Schließlich wählte man an Stelle der Trommel eine kofferförmige Ofenwanne mit einem gewölbten Deckel. Öfen für große Fassungen erhalten zwei Sätze Elektroden, wie dies aus Abb. 52 (S. 91) eines 3-t-Ofens zu ersehen ist. Man

verwendet durchwegs Graphitelektroden, die bei den Durchtrittsstellen mit wasserdurchflossenen Kühlzylindern umgeben sind. Die Regulierung erfolgt meistens von Hand aus. Für jede Elektrode ist ein Handrad vorgesehen, dessen Drehung durch ein Kettenrad auf eine mit der Elektrodenfassung verbundene Zahnstange übertragen wird. Die horizontalen Elektroden können etwas gegen das Bad geneigt werden; hierzu dienen die Handräder, die ungefähr in Deckelhöhe über den Horizontalelektroden zu sehen sind. Der Abstich und die Arbeitstür stehen selbstverständlich senkrecht zur Elektrodenebene. Kleinere Öfen sind mit seitlicher Zapfenlagerung ausgestattet, größere erhalten Wiegen und sind motorisch nach beiden Seiten kippbar. Obwohl der Rennerfelt-Ofen sowohl für Gleichstrom als auch für Einphasen-Wechselstrom und Drehstrom verwendbar ist, so betreibt man ihn aus den angegebenen Gründen (S. 92) meistens mit verkettetem Zweiphasenstrom, der mittels Scott-Schaltung dem Drehstromnetz entnommen wird.

Die bekannt hohe Beanspruchung des Deckelgewölbes, das dauernd der Strahlung des Lichtbogens ausgesetzt ist, und der Wunsch, das Schmelzbad gut durchzurühren, hat zum Bau von Trommel- und Rollöfen geführt. Die Trommelöfen werden um ihre horizontale Achse in eine langsame Schaukelbewegung versetzt, während die Rollöfen um diese rotieren. Das Schmelzbad kommt daher mit dem größten Teil der Zustellung in Berührung und verhütet dadurch ihre Überhitzung. Abb. 154 zeigt einen Trommelofen für 500 kg der „Industrie“ Elektrofen G. m. b. H. (Köln). Die Ofentrommel, die in üblicher Weise ausgekleidet ist, besitzt zwei Laufkränze, die auf Rollen ruhen. Mittels eines Motors und geeigneter Vorgelege wird die Schaukelbewegung hervorgerufen. Die Elektroden treten durch die ebenen Wandungen in den Ofen, und zwar je eine auf jeder Seite bei einphasigem Wechselstrom, während bei Drehstrom eine der beiden Seiten mit zwei Elektroden versehen werden muß. Der Rollofen für 500 kg nach Abb. 54 (S. 92) der Rheinischen Metallwerke und Maschinenfabrik „Rheinmetall“ (Düsseldorf) hingegen rotiert um seine Achse. Er wird meistens zum Schmelzen von Kupfer, Aluminium, Zink, Zinn, Blei und deren Legierungen verwendet. Alle Elektroden sind in einer der beiden ebenen Wandungen untergebracht, in der gegenüberliegenden befindet sich die Arbeitstür und der Abstich. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die Trommel verhältnismäßig rasch ausgewechselt werden kann, ohne daß eine Demontage der Elektrodenwand nötig ist. Die Fassungen und Durchführungen der Elektroden sind wassergekühlt. Die Regulierung erfolgt von Hand aus. Wegen der rotierenden Bewegung des Ofens müssen die Stromzuleitungen zu Schleifringen geführt werden. Die Rheinmetall-Öfen werden bis zu 1000 kg Fassung gebaut.

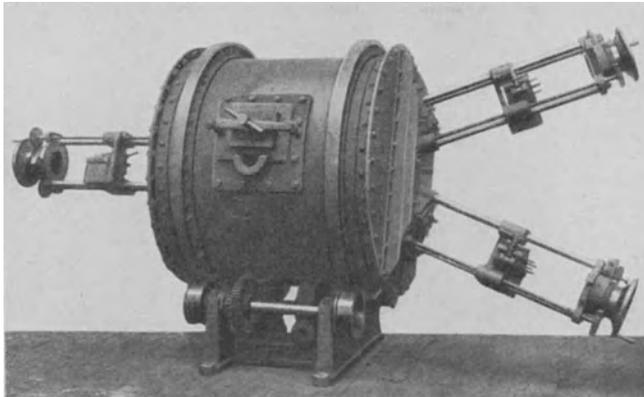


Abb. 154. 0,5-t-Lichtbogen-Trommelofen, Bauart Russ.

#### b) Kombinierte Widerstand-Lichtbogenöfen.

Die Öfen dieser Type sind in den metallurgischen Betrieben am meisten verbreitet. Unter ihnen kommt dem Héroult-Ofen die größte Bedeutung zu, da gegenwärtig fast alle Elektrodenöfen, die nicht reine Lichtbogenöfen sind, nach diesem System gebaut werden. Der Héroult-Ofen besteht aus einer mit entsprechender Zustellung versehenen Wanne, durch deren Deckel je nach der Art des verwendeten Stromes zwei oder drei

vertikale Elektroden in den Herd ragen. Das Bestreben, auch die tiefsten Schichten des Bades sicher heizen zu können, hat zur Konstruktion bodenbeheizter Öfen geführt (siehe S. 95), von denen der Nathusius-Ofen die weiteste Verbreitung gefunden hat. Wegen der Komplikation durch die Bodenanschlüsse des sonst ziemlich einfachen Ofens und wegen der geringeren Haltbarkeit des Ofenbodens ist man aber von der Bodenbeheizung wieder abgekommen. Der größte bestehende Ofen, der 60-t-Stahlöfen der Ford Motor Co. (Detroit) ist allerdings noch ein bodenbeheizter Greaves-Etchells-Ofen für Drehstrom, dessen Transformatorleistung 12000 kVA beträgt. Eine Phase ist mit dem Boden und die beiden anderen sind mit je vier 300-mm-Elektroden verbunden. Die Vorteile der gleichmäßigen Badtemperatur und der Verringerung der Stromstöße

infolge der ausgleichenden Wirkung des

Bodenanschlusses

beim bodenbeheizten Ofen lassen sich jedoch bei richtigem Betrieb

auch im Héroult-Ofen erzielen. Die Namen, welche einige Ofenbauarten führen, bezeichnen

gewöhnlich nicht ein eigenes Schaltprinzip, sondern bloß gewisse konstruktive

Einzelheiten der Ofenausrüstung, welche für die Zweckmäßigkeit

und Sicherheit des Betriebes von Bedeutung sind. Die Betriebsergebnisse eines Ofens

hängen ebenso sehr von seiner verlässlichen

Bauart als auch von

der Erfahrung und Gewissenhaftigkeit seines Betriebsleiters und Bedienungspersonales ab.

Der in Abb. 155 gezeigte 500 kg-Ofen für eine Transformatorleistung von 5000 kVA der „Industrie“ Elektroöfen G. m. b. H. zeigt große Ähnlichkeit mit dem Lichtbogenofen dieser Firma, nur sind die drei Elektroden vertikal und parallel zueinander angeordnet.

Auch hier trägt eine mit der Ofenwanne verbundene Brücke die Elektrodenständer und den Regulierantrieb. Die Elektrodenbewegung kann sowohl von Hand aus erfolgen als auch mittels der über den Getrieben sichtbaren Motore, die entweder durch Druckknopfschalter oder automatisch gesteuert werden. Die Beschickungstür und die Durchführungen der Elektroden im Deckel sind luftdicht ausgeführt. Die Kippung erfolgt in seitlichen Zapfenlagern durch Handantrieb.

Die Abb. 156 läßt die sorgfältige Konstruktion eines Ofens für 3—4 t Fassung der Brown-Boveri AG. (Baden) erkennen. Das zylindrische Ofengefäß besteht aus einem Blechmantel *a*, der durch Profileisen *b* entsprechend versteift und durch ein Winkeleisen mit der ebenen Bodenplatte *c* verbunden ist. Die Art der feuerfesten Zustellung *d* richtet sich nach dem Schmelzprozeß, für den der Ofen bestimmt ist. Das Deckelgewölbe *e* ist mit einem Deckelring *f* eingefäßt und ruht lose auf dem Ofengefäß, mit dem es durch die Bolzen *g* gegen Verschiebung während des Kippens gesichert ist. Die Elektrodenständer *h* sind an der Bodenplatte des Ofens bzw. an den Kippwiegen befestigt und nur durch eine

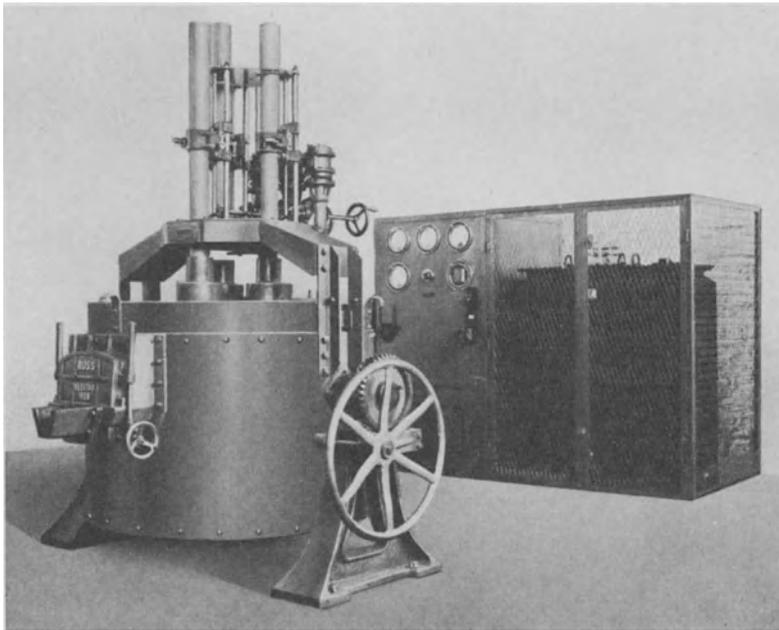


Abb. 155. 0,5-t-Lichtbogen-Widerstandsofen, Bauart Russ, mit Transformator und Schaltanlage.

der Erfahrung und Gewissenhaftigkeit seines Betriebsleiters und Bedienungspersonales ab.

Der in Abb. 155 gezeigte 500 kg-Ofen für eine Transformatorleistung von 5000 kVA der „Industrie“ Elektroöfen G. m. b. H. zeigt große Ähnlichkeit mit dem Lichtbogenofen dieser Firma, nur sind die drei Elektroden vertikal und parallel zueinander angeordnet. Auch hier trägt eine mit der Ofenwanne verbundene Brücke die Elektrodenständer und den Regulierantrieb. Die Elektrodenbewegung kann sowohl von Hand aus erfolgen als auch mittels der über den Getrieben sichtbaren Motore, die entweder durch Druckknopfschalter oder automatisch gesteuert werden. Die Beschickungstür und die Durchführungen der Elektroden im Deckel sind luftdicht ausgeführt. Die Kippung erfolgt in seitlichen Zapfenlagern durch Handantrieb.

Die Abb. 156 läßt die sorgfältige Konstruktion eines Ofens für 3—4 t Fassung der Brown-Boveri AG. (Baden) erkennen. Das zylindrische Ofengefäß besteht aus einem Blechmantel *a*, der durch Profileisen *b* entsprechend versteift und durch ein Winkeleisen mit der ebenen Bodenplatte *c* verbunden ist. Die Art der feuerfesten Zustellung *d* richtet sich nach dem Schmelzprozeß, für den der Ofen bestimmt ist. Das Deckelgewölbe *e* ist mit einem Deckelring *f* eingefäßt und ruht lose auf dem Ofengefäß, mit dem es durch die Bolzen *g* gegen Verschiebung während des Kippens gesichert ist. Die Elektrodenständer *h* sind an der Bodenplatte des Ofens bzw. an den Kippwiegen befestigt und nur durch eine



deren Kolbenstangen  $p$  direkt an den Elektrodenwagen angreifen. Das Druckwasser für die Zylinder muß wegen der Kippbewegung des Ofens mittels biegsamer Rohre  $q$  zugeführt werden. Die Durchführungsstellen der Elektroden durch den Deckel sind mit wasserdurchflossenen Kühlringen  $r$  und darüberliegenden Dichtungsvorrichtungen  $s$  versehen. Für den Wasserzulauf dient eine gemeinsame Leitung  $t$ , von der die drei mit Ventilen versehenen Leitungen zu den Kühlringen abzweigen. Der Ablauf des Wassers wird von jedem Ring getrennt zu einer Sammelwanne  $u$  geführt, so daß der Wasserdurchlauf jederzeit sichtbar ist. Natürlich sind die Kühlwasserrohre der einzelnen Phasen vor ihrer Vereinigung durch ein Stück Gummischlauch unterbrochen und somit voneinander isoliert. Der Ofen ist mit einer Arbeitstür  $v$  sowie einer Abstichschnauze  $w$  versehen und ist nach beiden Seiten kippbar. Die beiden kräftigen, aus Profilen und Blechen zusammengesetzten Wiegen  $A$  wälzen sich auf Z-Eisen  $B$  ab. Um ein Gleiten auf dieser Bahn zu verhindern, sind in entsprechenden Ausnehmungen der Wiegenkufen Drahtseile

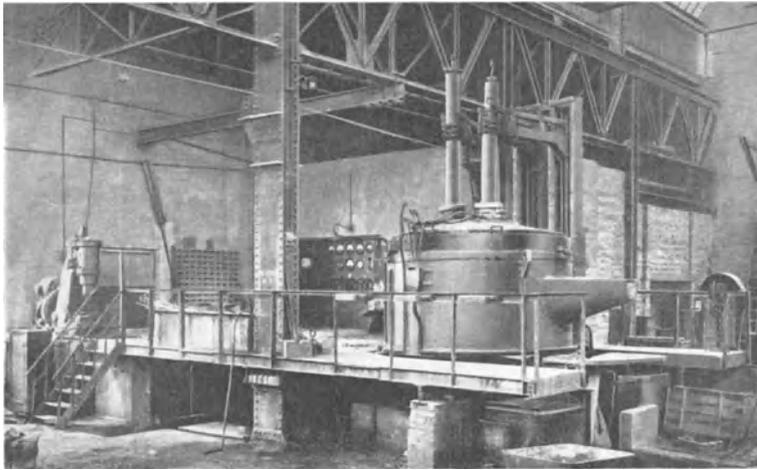


Abb. 157. 5-t-Ofen, Bauart Brown-Boveri.

eingelegt. Das Seil  $C_1$  ist mit dem einen Ende  $D_1$  an der Kufe, mit dem anderen Ende  $E_1$  am Fundament befestigt. Dasselbe gilt für das Seil  $C_2$  mit den Enden  $D_2$  und  $E_2$ . Der um  $G$  drehbar gelagerte und mit biegsamen Zuleitungen versehene Druckwasserzylinder  $F$  bewirkt die Kippung des Ofens. Um Bewegungen während des Betriebes zu verhüten, ist eine Sicherung  $H$  vorgesehen, welche die Bodenplatte mit der Ofenbühne verriegelt. Der Ofen nach Abb. 157 entspricht der soeben beschriebenen Type, obwohl er für 5 t Fassung gebaut ist. Links hinter dem Ofen sieht man die Schalttafel, rechts vorne den Schalthebel für die hydraulische Kippung. In Abb. 158 ist ein 25-t-Ofen derselben Firma dargestellt. Der bei dem großen Durchmesser des Ofengefäßes nicht mehr ebene Boden ruht auf einer kräftigen Wiegenkonstruktion, welche auch die als Gitter ausgebildeten Elektrodenständer trägt. Die hydraulische Elektrodenverstellung greift nicht direkt am Elektrodenwagen an, sondern ist durch eine Kette mit diesem verbunden. Das Gewicht des Wagens, des Auslegers und der Elektrode ist teilweise durch Gegengewichte ausgeglichen. Die Stromschienen sind nicht mehr durch die Ständer unter dem Ofen geführt; die Anschlußseile werden direkt an den horizontalen Schienenbündeln der Ausleger geklemmt, um die unvermischte Stromschleife zu verkürzen und die Phasenverschiebung günstiger zu gestalten. Im Ofengefäß ist eine zweite kleinere Arbeitstür vorgesehen, um den großen Herd genügend zugänglich zu machen. Die schweren Türen der Arbeitsöffnungen werden gleichfalls hydraulisch betätigt. Für die Kippung des Ofens greifen zwei Druckzylinder, je einer an jeder Kufe an. Der 20-t-Ofen, den Abb. 159 in Kippstellung zeigt, wurde von Brown-Boveri umgebaut und mit elektrohydraulischer Regulierung für die drei Söderberg-Elektroden versehen. Die Fassung und Verstellung der Elektroden wurde bereits besprochen (S. 140). In dieser Abbildung sieht man die knappe Bemessung der biegsamen Stromzuführungsseile, deren Mindestlänge durch den größten Kippwinkel des Ofens bestimmt wird und die mit Rücksicht auf die Phasenverschiebung nicht wesentlich überschritten werden soll.

Ferner bemerkt man einen Teil der Kippwiegen und der biegsamen Druckwasserleitungen für die Elektrodenverstellung und für die Kühlung. Gleichfalls mit Söderberg-Elektroden

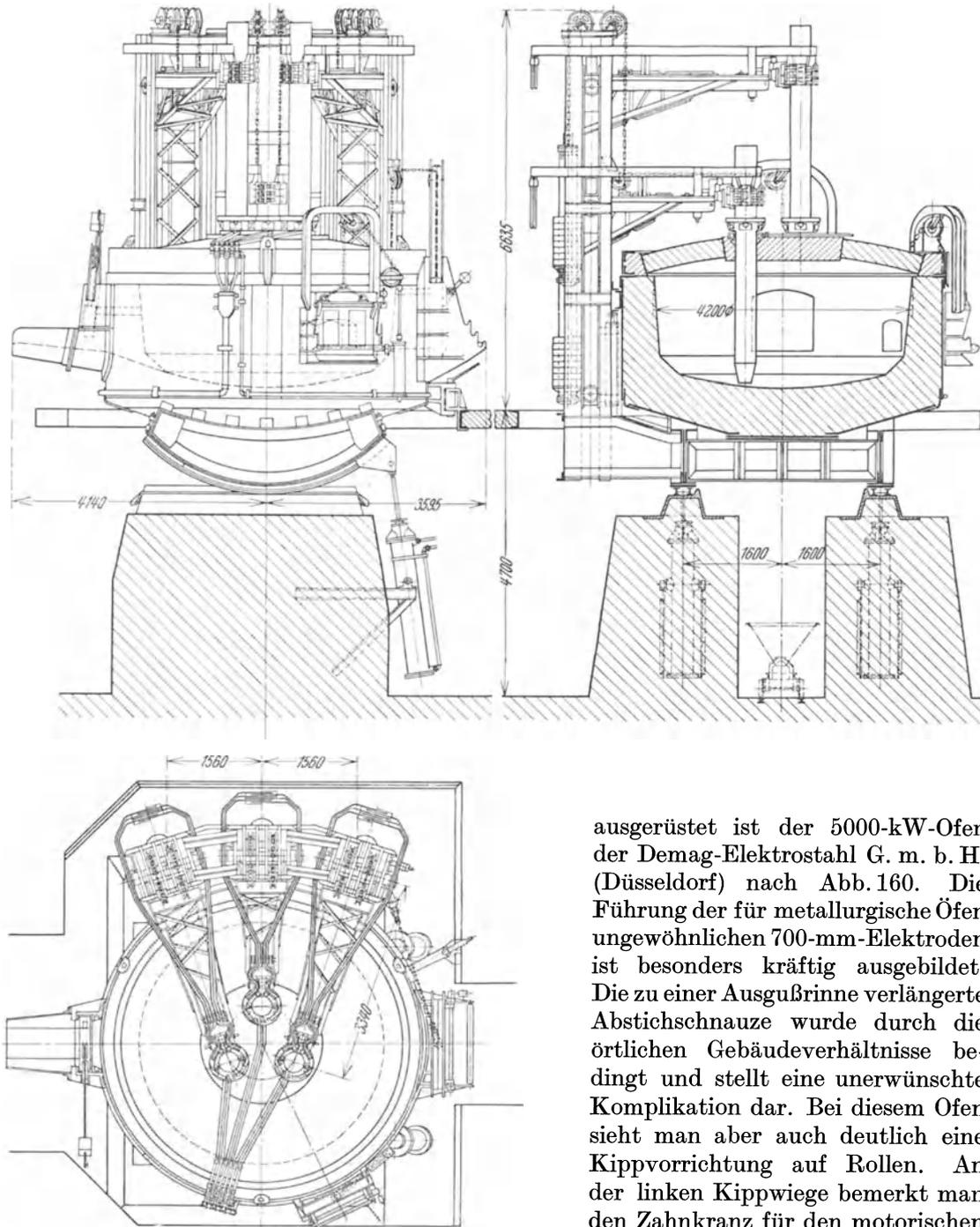


Abb. 158. 25-t-Ofen, Bauart Brown-Boveri.

ausgerüstet ist der 5000-kW-Ofen der Demag-Elektrostahl G. m. b. H. (Düsseldorf) nach Abb. 160. Die Führung der für metallurgische Öfen ungewöhnlichen 700-mm-Elektroden ist besonders kräftig ausgebildet. Die zu einer Ausgußrinne verlängerte Abstichschnauze wurde durch die örtlichen Gebäudeverhältnisse bedingt und stellt eine unerwünschte Komplikation dar. Bei diesem Ofen sieht man aber auch deutlich eine Kippvorrichtung auf Rollen. An der linken Kippwiege bemerkt man den Zahnkranz für den motorischen Antrieb. Wie schon erwähnt, ist die Kippung auf Rollen weniger zweck-

mäßig als jene auf ebener Wälzbahn, weil das Schnauzenende außer der Senkbewegung noch eine rückläufige Bewegung antritt, der die Gießpfanne folgen muß. Eine von den üblichen Ausführungen abweichende Kippung befindet sich am Ofen, welcher gelegent-



Abb. 159. 20-t-Ofen in Kippstellung.

fäßes ab, der gleichzeitig auch die Brücke für die Elektroden trägt.

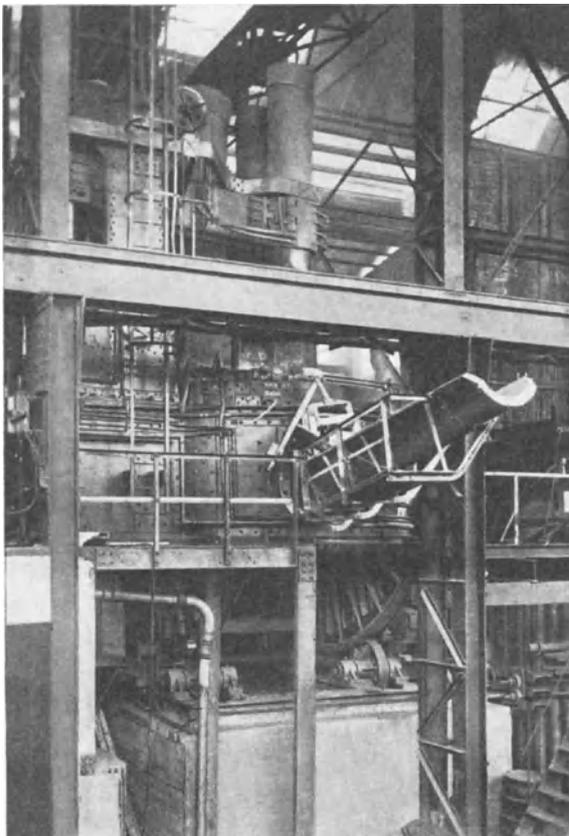


Abb. 160. 5000-kW-Ofen mit Söderberg-Elektroden, Bauart Demag-Elektrostahl.

lich der Beschreibung einer Fiat-Elektrodenabdichtung in Abb. 101 (S. 130) gebracht wurde. Bei großen schweren Öfen vermeidet man in der Regel eine seitliche Lagerung, um die Wänden des Ofengefäßes keinen mechanischen Beanspruchungen auszusetzen. Im Gegensatz hierzu zeigt dieser Ofen seitlich angebrachte Zahnkufen, die sich auf geradlinigen Zahnbahnen abrollen. Die Kufen stützen sich jedoch gegen einen besonders stark ausgebildeten

Randring des Ofenge-

füßes ab, der gleichzeitig auch die Brücke für die Elektroden trägt. Das Gefäß hängt also in dem Ring und wird daher seitlich nicht beansprucht. Da die Zugstange des Kippantriebes in der Höhe des Randringes angreift, befinden sich keinerlei mechanische Teile unter dem Ofen. Bei dieser Bauart des Fiat-Ofens muß beim Wechsel des Deckels die Brücke samt Elektroden und Ständern abgehoben werden. Diesen Nachteil beseitigt die Bauart nach Abb. 161. Die beiden Öfen für je 1500 kW besitzen eine normale Kippung, die wieder unter dem Ofen angebracht ist. Die Elektrodenbrücke ist aber als verfahrbares Tor ausgebildet, das in der Betriebsstellung auf Schienen einer Plattform ruht, die mit den Kippwiegen verbunden ist. Beim Kippen des Ofens neigt sich auch die Plattform, folglich auch die mit ihr verriegelte Elektrodenbrücke. Die Brücke besitzt ein Hubwerk zum Abheben des Ofendeckels. Beim Beschicken des Ofens oder beim Auswechseln des Deckels wird dieser gehoben und die Brücke samt Deckel vorgefahren. Die Beschickung kann nun mittels eines Korbes auf einmal eingesetzt werden, wodurch ein bedeutender Zeit- und Wärmegewinn erzielt werden kann. Abb. 162 zeigt den zweiten Ofen von der Arbeitsseite während des

Einsetzens der Beschickung mittels des Chargierkorbes. Die Brücke ist nach rückwärts abgefahren, und der Korb wird in den freistehenden Herd eingesetzt. Der untere, aus Drahtgeflecht bestehende Teil des Korbes bleibt im Ofen. Diese Beschickungsart, bei der das Drahtgeflecht geopfert wird, ist jener vorzuziehen, die durch Körbe mit aufklappbaren Bodenflügeln erfolgt, weil im ersten Falle der Herd geschont wird, während sonst die in den Herd kollernden Beschickungsstücke die Zustellung beschädigen. Die Ofengefäße sind bei dieser Sonderbauart auch um ihre vertikale Achse, etwa um  $60^\circ$  drehbar, wodurch eine bessere Bestreichung des

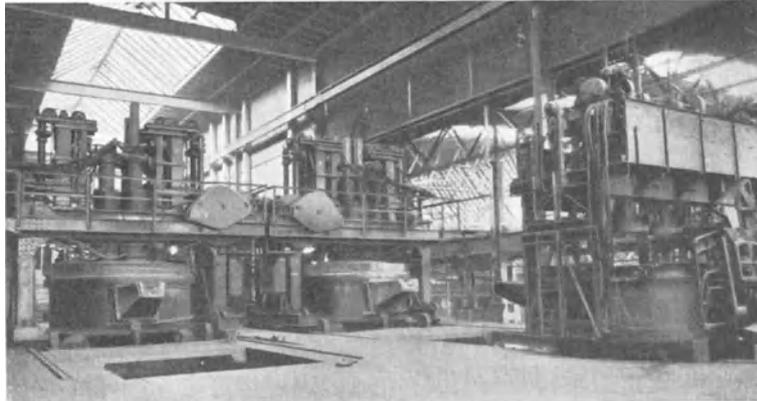


Abb. 161. 1500-kW-Öfen (mit abfahrbaren Deckeln und Elektrodenbrücken), Bauart Demag-Elektrostahl.

Bades durch die Elektroden ermöglicht werden soll. Mittels der am unteren Gefäßrand sichtbaren Kette wird die Drehung bewirkt. Abb. 163 stellt einen 15-t-Ofen der Siemens & Halske AG. dar. Auf den schweren Ständern befinden sich die Motore für die Elektrodenbewegung. Die Elektrodenwagen und Ausleger sowie die Stromzuführungen sind deutlich zu sehen. Die Elektrodenabdichtung ist in der beschriebenen Weise durchgeführt (S. 130); die Kühlringe liegen am Gewölbe auf, während die Zylinder in einer Tragkonstruktion angeordnet sind, deren Bügel unabhängig mit der Ofenwanne verbunden sind. Von derselben Firma stammt auch der größte europäische Stahlofen für 27 t nach Abb. 164, der bei Firth and Son (Sheffield) steht.

## B. Öfen der chemischen Industrie.

Während die metallurgischen Öfen trotz ihrer Verwendung am gleichen Orte wegen der Kippung durchweg zu den beweglichen Öfen gezählt werden können, sind die chemischen, für kontinuierlichen Betrieb eingerichteten Öfen allgemein beweglich und ihre Herde mit dem Fundament fest verbunden. Bei diesen Öfen ist auch die Aufhängung der Elektroden vollständig unabhängig vom Ofenkörper. Wie bereits erwähnt, unterscheidet man offene, gedeckte und geschlossene Öfen, je nachdem der Herd ganz

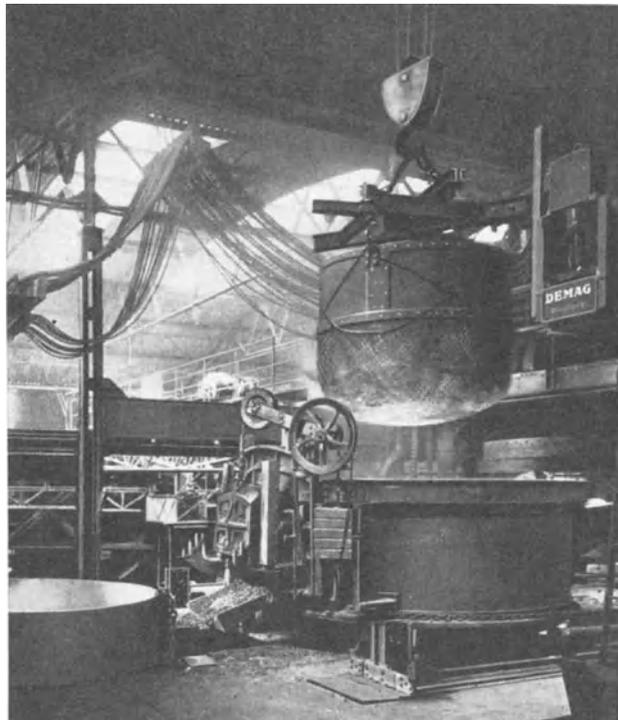


Abb. 162. 1500-kW-Demag-Ofen, Beschickung mittels Chargierkorbes.

offen ist und die Gase frei entweichen oder durch eine teilweise Schließung des Herdes mittels eines Gewölbes und Drosselung der freien Querschnitte durch lose Beschickung die Hauptmenge der Abgase gewonnen wird oder endlich der Ofen vollkommen luftdicht

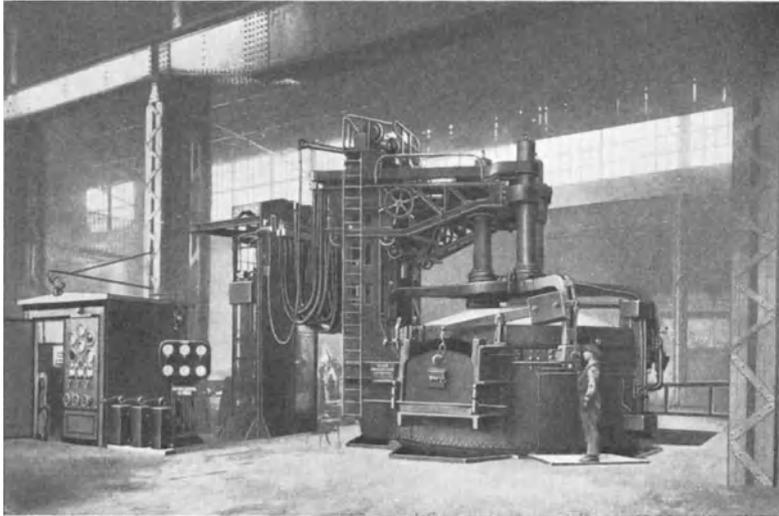


Abb. 163. 15-t-Ofen, Bauart Siemens.

abgeschlossen ist und die Gase restlos verwertet werden. Wegen der Schwierigkeiten, welche der Bau einer haltbaren Deckenkonstruktion und die Herstellung einer verlässlichen Abdichtung verursachen, findet man in den chemischen Betrieben meist offene Öfen. Allerdings sind unter diesen auch Konstruktionen, welche die Gewinnung verhältnismäßig konzentrierter Abgase gestatten würden.

#### a) Offene Öfen.

Der Karbidofen für 12000 kW Drehstrom nach Abb. 165 und Abb. 165 a ist noch mit Paketelektroden ausgerüstet, besitzt aber schon einen elliptischen Ofenkörper *a*, dessen

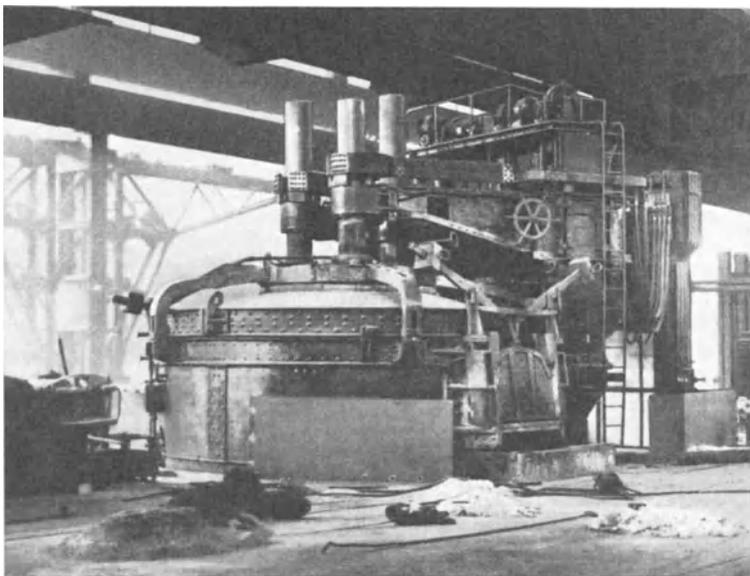


Abb. 164. 27-t-Ofen, Bauart Siemens.

Konstruktion ausführlich behandelt wurde (S. 103). Es wurde auch bereits erwähnt, daß dem Ofenkörper bloß die Aufgabe zufällt, die Beschickung zu fassen, die zusammen mit erstarrter Schmelze den eigentlichen Herd bildet, in welchem sich der flüssige Sumpf ansammelt. Entsprechend den drei Phasen entstehen hier drei Herde, deren elektrische Verbindung durch den Ofenboden und die unteren heißen Beschickungsschichten gebildet wird. Dem Prinzipie des offenen Ofens gemäß, entweichen die Abgase frei. Beim Durchgang

durch die Beschickung geben sie einen Teil ihrer Wärme an diese ab, auch verbrennt das Kohlenoxyd bei Anwesenheit von Luftsauerstoff in den oberen Schichten zu Kohlensäure. Dieser Verbrennungsprozeß ist besonders in der Nachbarschaft der Elektroden sowie deren Fassungen unerwünscht und gefährlich. Die Mantelung der Elektroden bietet wenig Schutz,

weil Blechmäntel, Asbest und Lehm bewürfe weder den Temperaturen noch den mechanischen Beanspruchungen durch die niedergehende Beschickung auf die Dauer gewachsen sind. Bei der vorliegenden Ausführung wurde um jedes Elektrodenpaket *b* ein Beschickungstrichter *c* errichtet, der die frische Beschickung an der Elektrode hält. Beim Austritt am unteren Ende des Trichters bösch sich die Beschickung im Ofen an. Dadurch erreicht man Zweifaches. Erstens ist die Beschickungshöhe außerhalb der Trichter wesentlich geringer und dementsprechend entweicht dort die Hauptmenge der Abgase. Zweitens kühlt die frische Beschickung sowohl den oberen Teil der Elektrode als auch

*Schnitt A-B*

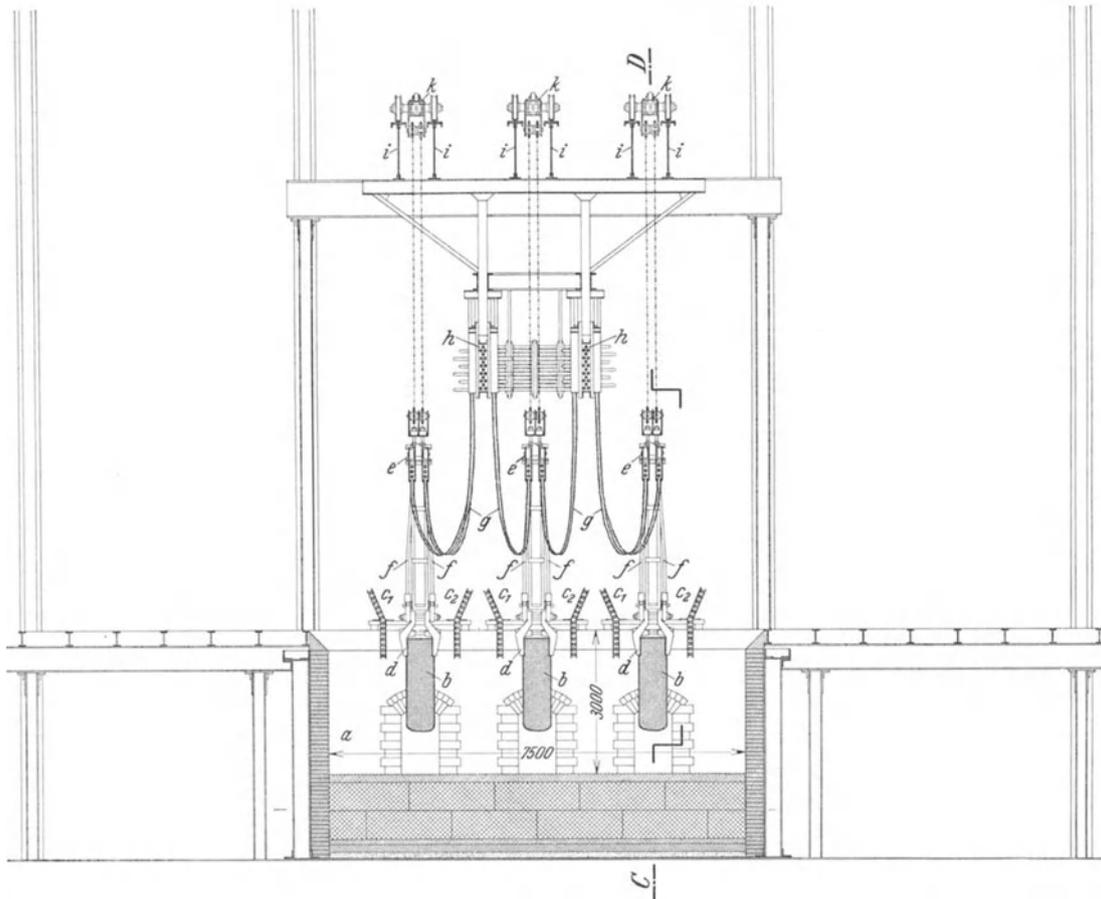


Abb. 165 a. 12000-kW-Drehstromofen für Karbid. (Schnitt A B s. Abb. 165).

bei tiefer Stellung die Fassung. Die Trichter werden aus je zwei Wänden  $c_{1-2}$  zusammengestellt, die aus wasserdurchflossenen Rohren bestehen und sich gegen den oberen Rand des Ofens bzw. gegen die Beschickungsbühne abstützen. Die Rohre sollen einen lichten Durchmesser von mindestens 50 mm haben; im unteren Teil verwendet man Stahlrohre, für den oberen hingegen genügen Gasrohre. Da die Trichter nur lose eingehängt sind, kann man sie bei Übergang auf niedrige Ofenbelastung leicht ausheben. Als Elektrodenfassung *d* wird die auf S.132 beschriebene Zangenfassung verwendet, die an dem Querhaupt *e* hängt. Die Stromzufuhr erfolgt mittels wasserdurchflossener Kupferrohre *f*. Wegen der hohen Stromstärke mußten auch hier die biegsamen Kupferseile jeder Phase in zwei Gruppen  $g_{1-2}$  unterteilt werden, die an den beiden Enden der Querhäupter mit den Stromrohren verbunden sind. Die der Querhauptlänge entsprechende Distanz der beiden Gruppen setzt die gegen-

seitige inductive Beanspruchung herunter und vermindert so die induktive Spannung.

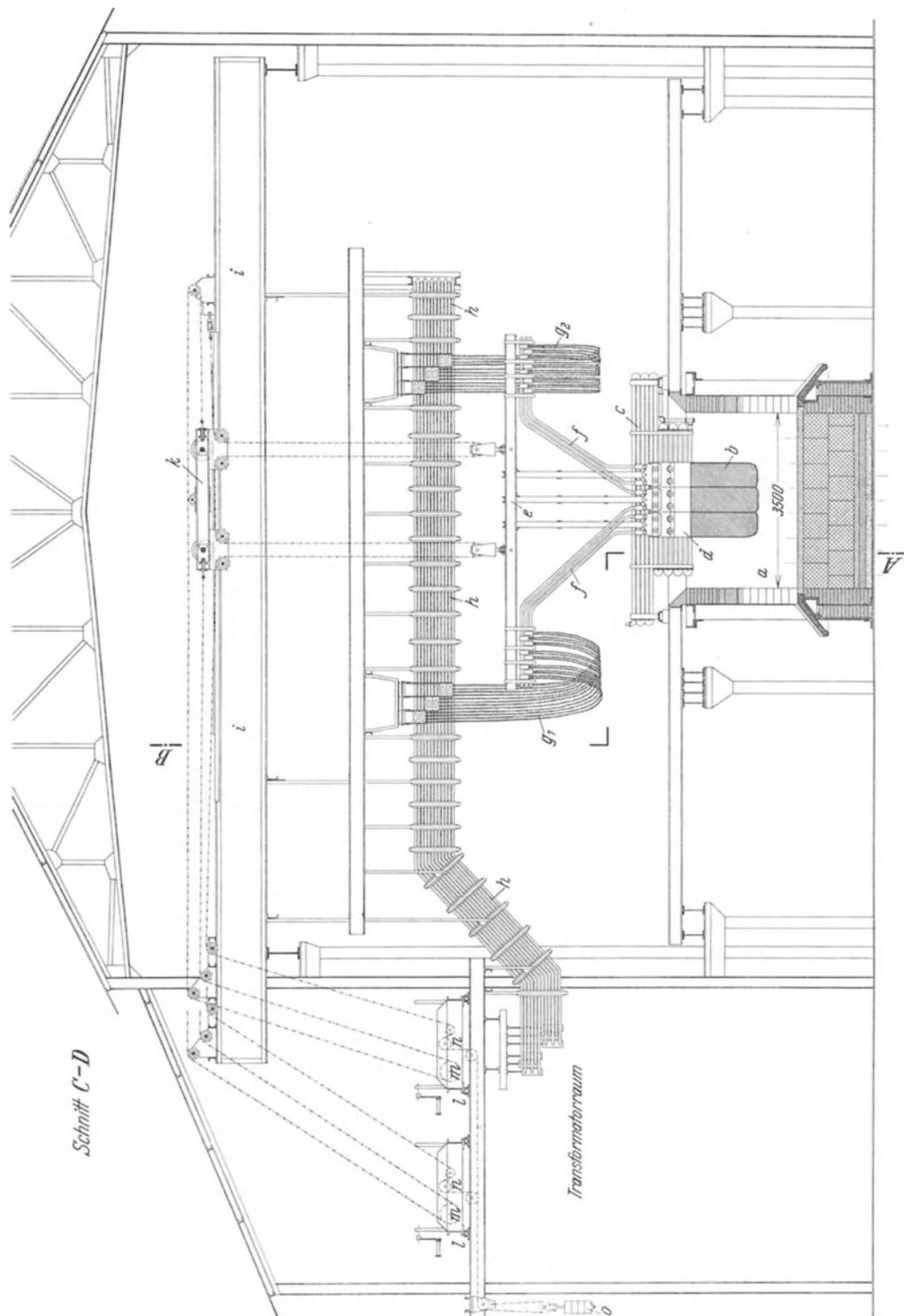


Abb. 165. 12000-kW-Drehstromofen für Karbid. (Schnitt C D s. Abb. 165 a.)

Durch diese Anordnung ist man aber gezwungen, die Ringleitung  $h$ , welche den Strom vom Transformator zum Ofen führt, über den Ofen zu leiten. Diese Bauart erfordert

eine besonders sorgfältige Konstruktion der Ringleitung, weil sie den heißen Abgasen und unter Umständen auch aufspritzendem glühendem Karbid ausgesetzt ist. Die Ringleitung wird daher aus wassergekühlten Kupferrohren gebaut, wobei die drei Phasen zwecks Erlangung einer möglichst geringen Phasenverschiebung vermischt werden. Über dem Ofen umwickelt man die Rohre mit Asbest, das mit Wasserglas geklebt wird. Diese Isolation schützt die Rohre vor gelegentlich auftretenden Stichflammen und verhütet Kurzschlüsse zwischen den Phasen, welche durch Staubablagerung oder auffliegende glühende Beschickungsteile entstehen können. Das Gewicht der Elektrode und der Aufhängung wird durch die kräftigen Hauptträger  $i$  aufgenommen, die sich gegen die Gebäudekonstruktion abstützen. Auf den Trägern bewegen sich die Laufkatzen  $k$ . Die Windwerke  $l$  dienen sowohl für die Hub- und Senkbewegung der Pakete, als auch für das seitliche Verfahren beim Elektrodenwechsel. Zu jedem Paket gehört ein eigenes Windwerk, das sowohl motorisch als auch von Hand betrieben werden kann. Für die Laufkatzenbewegung ist das Rad  $m$  mit der dazugehörigen Kette vorgesehen, die Paketregulierung erfolgt durch die einfache Kette, die über das Getriebe  $n$  läuft und an deren Ende sich das Gegengewicht  $o$  befindet. Die Windwerke sind seitlich vom Ofen in einem gesonderten Raum untergebracht. Darunter befindet sich der Transformatorraum, der gegen den Ofenraum vollkommen abgeschlossen ist. Es sei noch auf die Beschickungsbühne hingewiesen, die durch vier I-Profile getragen wird. Diese ungewöhnlich kräftige Unterstützung ist notwendig, einerseits weil die Spannweite der Träger größer als die Ofenlänge ist, da man zwischen den Abstichfenstern keine Stützsäulen einbauen kann, andererseits weil die Träger der Hitze des ausfließenden Karbides und der Ofenstrahlung ausgesetzt sind. Vielfach werden diese Träger paarweise durch Bleche miteinander verbunden und vernietet, wobei Hohlkörper entstehen, die von Kühlwasser durchflossen werden können. Der Spalt zwischen dem Oberrand des Ofens und der Beschickungsbühne wird abgedichtet, sowohl um Beschädigungen der Ofenmauerung durch eingeworfene Beschickung als auch, um Zugluft über dem Ofen zu vermeiden.

In Abb. 166 ist ein Ferromanganofen für 6500 kW der Siemens & Halske AG. gezeigt. Der Ofen ist mit drei in einer Reihe angeordneten Rundelektroden ausgerüstet. Diese Dauerelektroden aus amorphem Kohlenstoff haben einen Durchmesser von 1000 mm und werden durch moderne Rutschfassungen gehalten. Die Fassungen hängen an einer beweglichen Tragkonstruktion, deren Ausleger die wassergekühlten Stromrohre für die Fassung und die Anklammerung der biegsamen Kupferblechbündel für den Transformatoranschluß tragen. Der Transformator befindet sich wie üblich in einem abgeschlossenen Raum und ist mit indirekter Kühlung versehen. Man bemerkt sowohl die Ölpumpe als auch den Wasserkühler für das Öl. Die kurze Sekundärleitung besteht aus wasserdurchflossenen Kupferrohren und die Phasen sind darin entsprechend vermischt ausgeteilt. Der Raum über dem Ofen ist gleichfalls gegen den Ofenraum abgeschlossen. In ihm wird das Anstückeln der Elektroden vorgenommen. Unter der hierzu dienenden Bühne ist die Klemmvorrichtung zu sehen, mit der die Elektroden während der Anstückelarbeit gegen Verdrehung gesichert sind. In gleicher Höhe sind auch die Windwerke untergebracht. Die Ketten laufen vom Hauptträger über die Rollen der beweglichen Elektrodenkonstruktion und über die Führungsrollen am Hauptträger zur Trommel der Winde, sodann weiter zum Gegengewicht. Über dem Ofen befindet sich die mit einem Abzugsrohr versehene Gassammelhaube. Die Beschickung des Ofens erfolgt durch verfahrbare und drehbare Rohre. Vom hochgelegenen Mischkonveyer fällt das Material durch schwenkbare Stützen in die Trichter der Chargierrohre. Trichter und Rohre sind auf motorisch angetriebenen Wagen angebracht, so daß das Rohrende an den Elektroden vorbei die volle Ofenbreite bestreichen kann. Überdies ist der untere Teil des Rohres mittels eines Kegelradantriebes um seine Achse drehbar gemacht, wodurch die Verteilung des Materials durch das abgebogene Rohrende auch nach den Seiten hin möglich ist. Der Fahrtrieb und die Rohrschwenkung wird von der Beschickungsbühne aus gesteuert. Der Abstich des Ferro-



werden. Der Schlackenabstich erfolgt in unmittelbar beim Ofen stehende Schlackenwagen, während das Ferromangan in Rinnen abgeleitet wird.

Hier soll an Hand der Abb. 167 eine Abstichvorrichtung erläutert werden, wie sie in

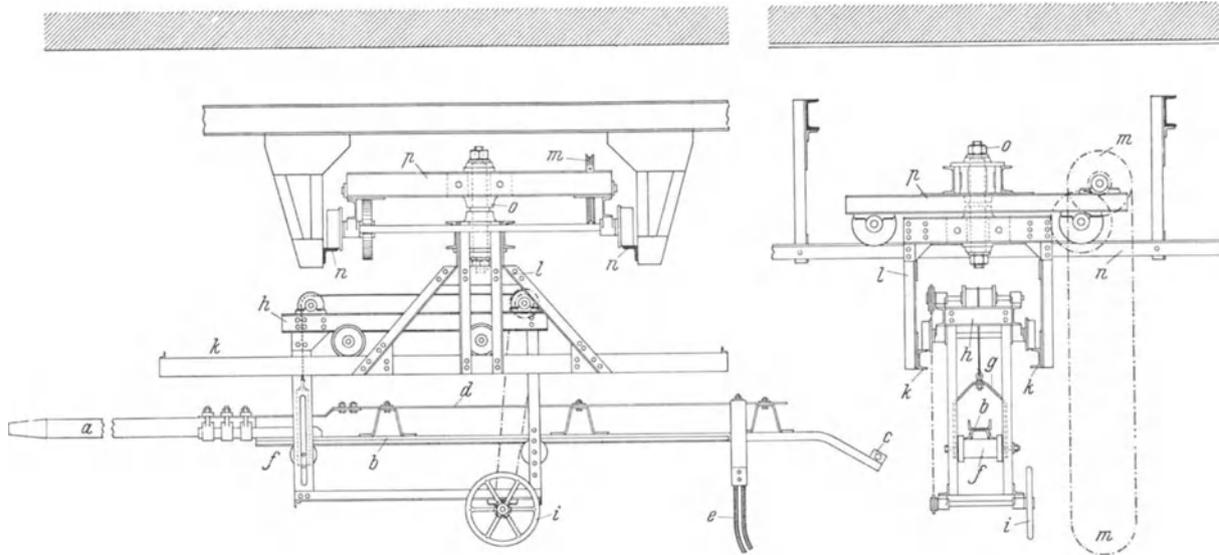


Abb. 167. Verfahrbare Abstichvorrichtung.

ähnlichen Ausführungen bei den meisten mehrherdigen Öfen in Verwendung steht. Die Aufbrennelektrode *a*, welche in der Regel aus Graphit hergestellt ist, um auf kleiner Fläche eine möglichst hohe Wärmekonzentration zu erzielen, wird durch eine Fassung am Elektrodenträger *b* angebracht, gegen den sie isoliert ist, ebenso wie die kupferne Stromschiene *d*, die zu den Stromzuführungsseilen *e* führt. Der Elektrodenträger ist mit einer Handhabe *c* versehen. Die Schrägstellung in der Vertikalebene wird mittels der Rolle *f* erreicht, die am Vorschubwagen *h* angebracht ist und durch die Winde *i* gehoben oder gesenkt werden kann. Zur Vor- und Rückwärtsbewegung rollt der Wagen *h* auf der Bahn *k*. Die Schrägstellung nach den Seiten ermöglicht der Zapfen *o*, um den das Gerüst *l* der Abstichvorrichtung drehbar gelagert ist. Für die Fahrt von einer Abstichöffnung zur andern dient der Wagen *p*, dessen Räder durch das Windwerk *m* angetrieben werden

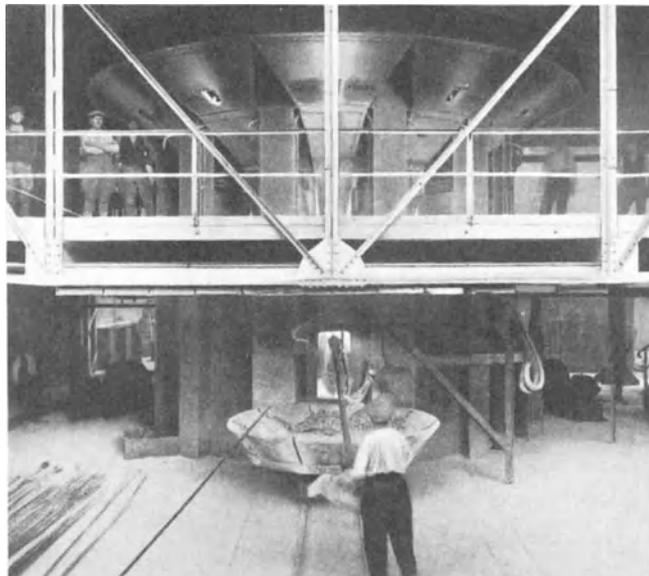


Abb. 168. Schwenkbare Abstichvorrichtung für Einphasenöfen.

und die auf den zur Ofenwand parallel verlegten Schienen *n* rollen. Die Stützen der Schienen sind gewöhnlich an den Trägern der Beschickungs- und Stochbühne befestigt. Bei Einphasenöfen mit bloß einer Abstichöffnung ist die verfahrbare Abstichvorrichtung

überflüssig. Dort verwendet man einen einfachen Ausleger, der um eine vertikale Achse drehbar ist. Vom Ende des Auslegers hängt an einer Kette der Elektrodenträger mit der Aufbrennelektrode und den Anschlußseilen. Nach Gebrauch wird die Vorrichtung abgestellt und zur Seite geschwenkt. Abb. 168 zeigt diese einfache, aber sehr zweckmäßige

Abstichvorrichtung in Tätigkeit. Eine ganz primitive Lösung für die Anbringung der Abstichelektrode, die auch bei Öfen mit mehreren Abstichöffnungen anwendbar ist, besteht aus einer parallel zur Ofenwand verlegten Stromschiene. Beim Abstich wird über die Schiene ein S-förmiger Eisenhaken gelegt, dessen untere Schleife in Arbeitshöhe herabhängt. In diese

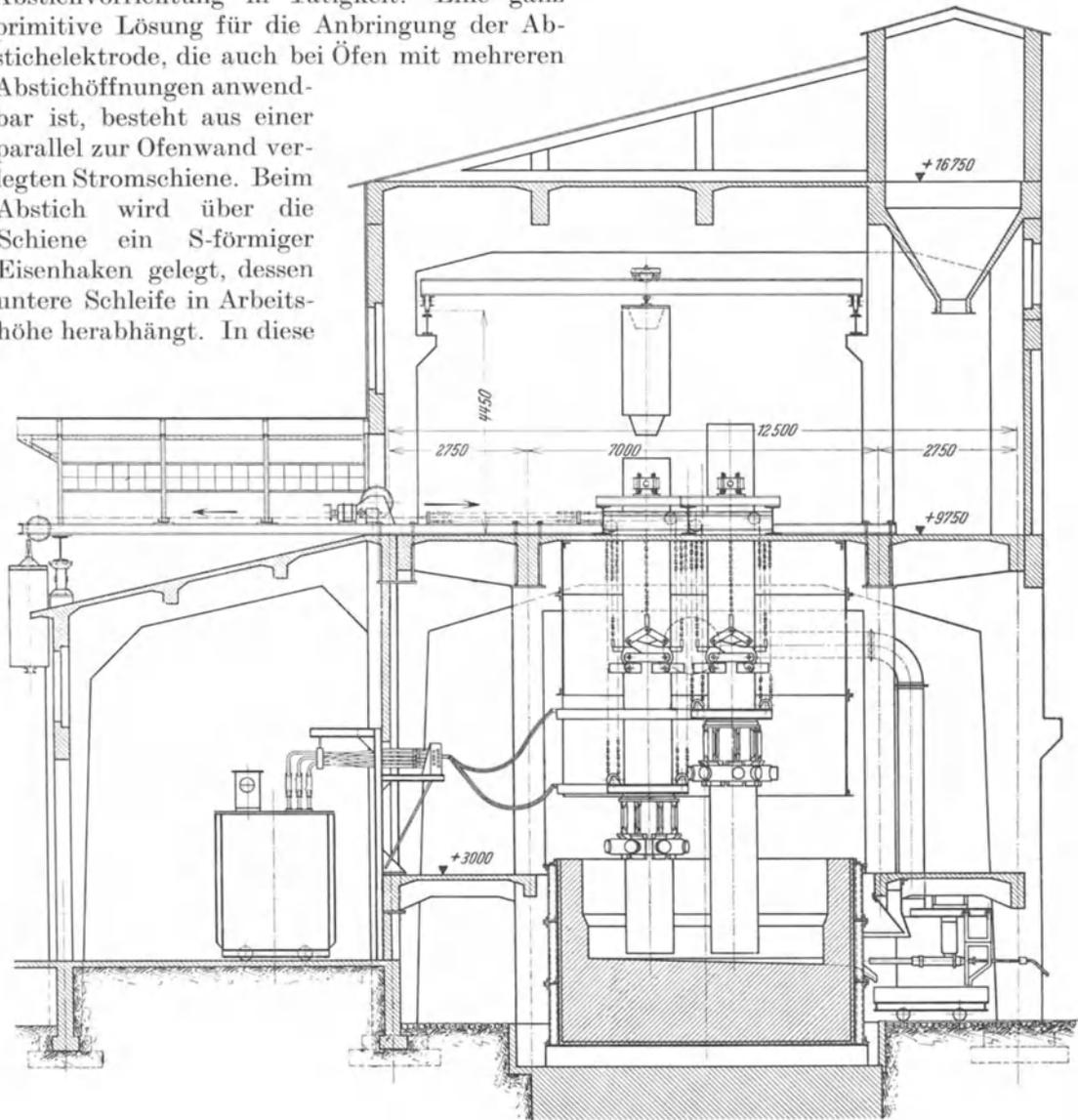


Abb. 169. Ferrosilizium-Anlage, 6500-kVA-Drehstromofen, Bauart Siemens.

Schleife legt man eine etwa 1'' starke Eisenstange, die gleichzeitig als Aufbrennelektrode dient. Sie wird an einem Ende vom Arbeiter gehalten, das andere Ende gegen die Abstichöffnung gedrückt.

Der Drehstromofen für 6500 kW zur Erzeugung von 45—95% igem FeSi nach Abb. 169 wurde ebenfalls in Rußland von der Siemens & Halske AG. gebaut. Er ist ein runder Ofen mit drei im gleichseitigen Dreieck angeordneten Dauerelektroden aus amorphem Kohlenstoff. Der Ofenkörper steht auf einem Betonsockel, der Kanäle zur Lüftung und Kontrolle des Ofenbodens besitzt. Die Herdsohle hat eine geringe Neigung zur ein-

zigen Abstichöffnung. Für den Abstich ist eine verstellbare Aufbrennelektrode vorgesehen. Das ausfließende Ferrosilizium wird in eisernen, mit Chamotte ausgekleideten Pfannen aufgefangen. Die drei 900-mm-Elektroden werden durch Rutschfassungen gehalten, die an beweglichen Traggerüsten hängen. Beim Nachstellen dieser Fassungen treten Hilfsfassungen in Verwendung, die mit Kniehebelwirkung arbeiten. Sie nehmen während der Verstellung das Elektrodengewicht auf. Eine Gassammelhaube umschließt den oberen Teil der Elektroden und reicht so tief zum Ofenrand hinab, daß bloß genügend Raum für die Beschickungsarbeiten frei bleibt. Nach oben reicht die Abzugshaube bis zur Decke des Ofenraumes, durch welche die Elektroden in den Anstückelraum ragen. Auch hier sieht man das Traggerüst mit den Elektrodenverklammungen

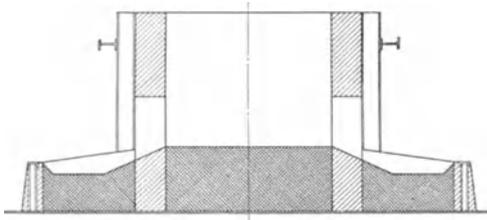


Abb. 170. Schema eines FeSi-Ofens mit Abstichmulden.

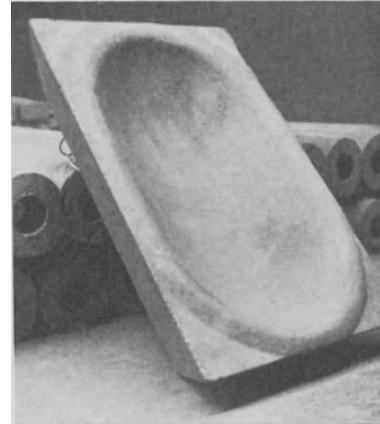


Abb. 171. Kohlefutter für FeSi-Abstichpfannen.

kelvorgang sowie die Windwerke und die Anordnung der Gegengewichte. Der Transformator ist in einem seitlich gelegenen Raum untergebracht. Die Sekundärleitung ist entsprechend phasenvermischt ausgeteilt. Die Verbindung mit den Stromrohren der Elektrodenfassung erfolgt durch biegsame Kupferblechbündel. Es sei hier erwähnt, daß ältere Bauarten von FeSi-Öfen mit Vormulden ausgestattet waren, in denen das Ferrosilizium abgestochen und erkalten gelassen wurde. Abb. 170 zeigt das Schema eines solchen Ofens. Gegenwärtig sticht man in die erwähnten Pfannen ab oder in solche, die mit Formkohlen nach Abb. 171 ausgefüllt sind, läßt das FeSi darin erstarren und hebt es dann in der Kühlhalle noch glühend aus.

Abb. 172 und 173 zeigen einen ähnlichen Drehstromofen zur Herstellung von Ferrolegierungen mit 600-mm-Söderberg-Elektroden. In Abb. 172 ist der Ofen von der Chargierbühne aus aufgenommen. Bemerkenswert ist hier die Anordnung von drei Transformatoren im Ofenraum, wobei jeder hinter einer Schutzwand möglichst nahe an die zugehörige Elektrode gerückt ist. Dadurch entfällt die stromvermischte Sekundärleitung, und die biegsamen Stromzuführungen können sehr kurz gehalten werden. Der untere Teil der Gasabzugshaube ist hier verschiebbar gebaut; er kann während des Betriebes tief heruntergezogen werden. Abb. 173

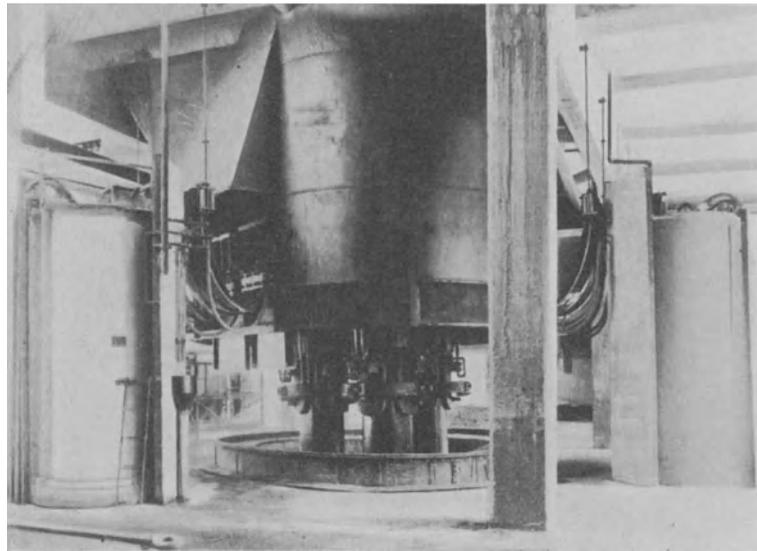


Abb. 172. Beschickungsbühne eines Drehstromofens für Ferrolegierungen.

Abb. 173 zeigt den Ofen von der Gegengewichtsbühne aus. Hier ist die Anordnung der Gegengewichte und der Windwerke zu sehen. Die Elektroden sind in den Anstückelraum ragen, und die Gegengewichte sind an den Traggerüsten befestigt. Die Windwerke sind an den Elektroden befestigt und dienen zur Abführung des überschüssigen Gases. Die Anordnung der Gegengewichte ist so, daß sie während der Verstellung der Elektroden das Gewicht der Elektroden aufnehmen können. Die Windwerke sind so angeordnet, daß sie das überschüssige Gas abführen können. Die Anordnung der Gegengewichte ist so, daß sie während der Verstellung der Elektroden das Gewicht der Elektroden aufnehmen können. Die Windwerke sind so angeordnet, daß sie das überschüssige Gas abführen können.

gibt eine Gesamtansicht des Ofens wieder, welcher auch die Abstichschnauze und den mit Kanälen versehenen Betonsockel deutlich erkennen läßt.

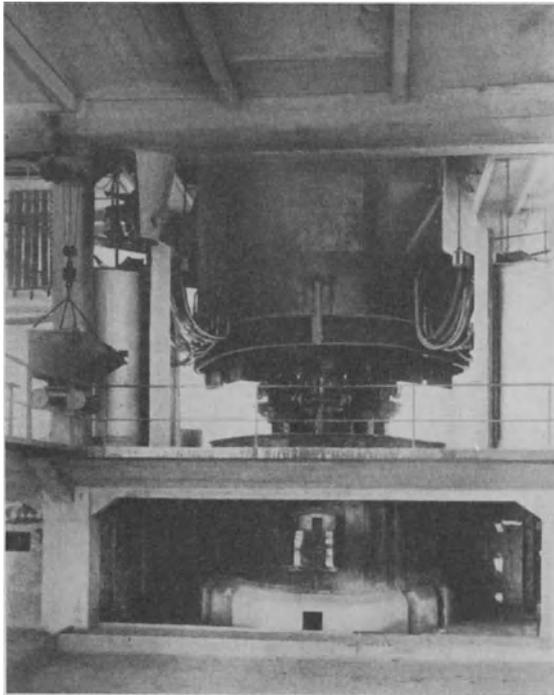


Abb. 173. Gesamtansicht des FerrolegierungsOfens nach Abb. 172.

Die Abb. 174 stammt von einem 15000-kW-Karbidofen, der mit drei 1250-mm-Söderberg-Elektroden versehen ist. Über dem Herd ist eine mächtige Abzugshaube angebracht, von der Ketten-schirme bis zum Ofenrand herabhängen. Oben bemerkt man die phasenvermischte Sekundärleitung sowie die Abzweigungen der biegsamen Stromzuführungen zu den beiden vorderen Elektroden. Für die Verteilung der Beschickung im Ofen dienen Pendelrohre, die von Hand aus dirigiert werden. Das Beschickungs-material gelangt aus den Silos in Gossen, die sich im Stampfraum über dem Ofen befinden. Dieser Stampfraum wurde bereits in Abb. 123 (S. 145) gezeigt, wo links im Hintergrunde die Gossen zu sehen sind. Eines der Pendelrohre mit der dazugehörigen Handhabe und Unter-stützung hängt im Vordergrund der Abb. 174 zwischen den Elektroden. Im ganzen sind drei Pendelrohre, je eines zwischen zwei Elektroden vorhanden;

überdies führt zur Mitte des Herdes ein festes Beschickungsrohr, dessen Wasserkühlung im Bilde, links vom vorderen Pendelrohr, zu sehen ist. Unterhalb der Ketten-schiene bemerkt man am

Bühnenboden Klapptüren. Diese werden beim Abstich geöffnet, um den dabei auftretenden Gasen eine Abzugsmöglichkeit aus dem Abstichraum zu geben.

Der Ofen nach Abb. 175 dient zur Erzeugung von Roheisen aus den Erzen<sup>1</sup>. Es werden hierzu 8000-kW-Drehstrom in drei

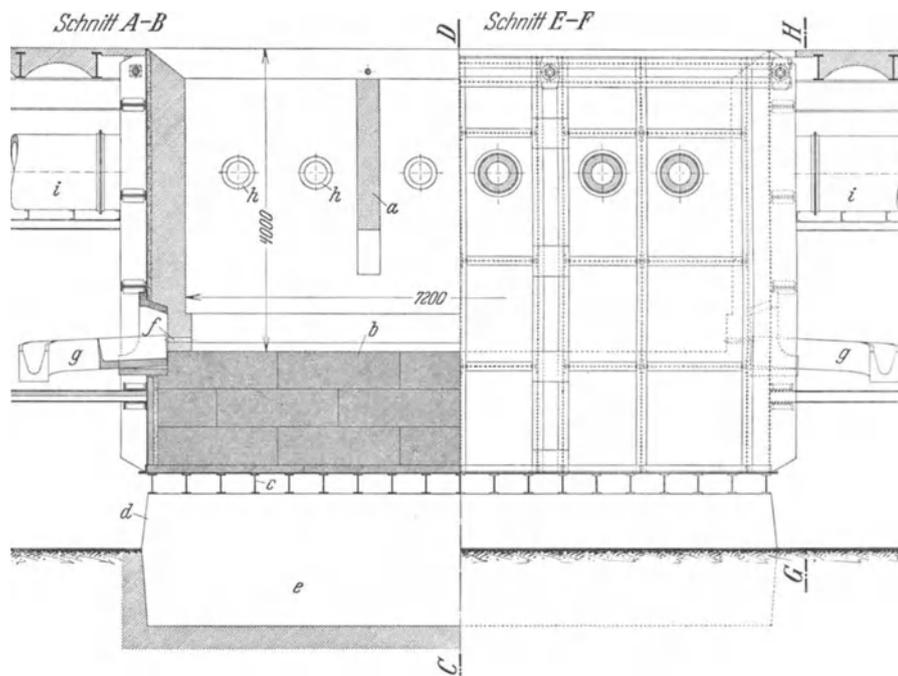


Abb. 175 a. 8000-kW-Drehstromofen zur Erzeugung von Roheisen aus Erzen.

<sup>1</sup> Vergl. den nur wenig abgeänderten Thysslandofen S. 195 und Grönwallofen S. 200.

Paketelektroden verwendet. Da die Beschickung gut leitend ist, müssen zwischen den Elektroden Trennwände *a* eingebaut werden, um zu verhindern, daß der Strom durch die oberen Beschickungsschichten fließt. Der Ofenkörper ist hier rechteckig ausgeführt und dementsprechend kräftig versteift. Der Boden *b* ruht auf Traversen *c*, die auf einem Fundament *d* mit tiefen Kühlschächten *e* liegen. Die Herdsohle besitzt eine zylindrische Wölbung, so daß sich das Eisen in der Mitte des Ofens ansammelt. Auch setzen die keilförmigen Bausteine des Bodens dem starken Auftrieb im geschmolzenen Eisen entsprechenden Widerstand entgegen. Der Abstich erfolgt in diesem Falle an den Schmalseiten des Ofens. Von den Abstichöffnungen *f* führen gegabelte Abstichrinnen *g* zu den Abstichpfannen bzw. zu den Schlackenwagen. Obwohl es sich hier um einen offenen Ofen handelt, ist der Versuch unternommen worden, das Abgas teilweise nutzbar zu machen. Zu diesem Zwecke führen durch die Längswände je zwei wassergekühlte Stützen *h* in jeden Herd. Die Enden der Stützen sind nach unten abgeschrägt, so daß sie durch die umgebende Beschickung nicht verlegt werden können. Die sechs Stützen jeder Seite münden in ein Sammelrohr *i*, das mit Putzöffnungen *k* und Explosionsklappen *l* versehen ist. In Abb. 176 ist links oben das Sammelrohr zu sehen, während sich vorne eine Abstichöffnung und die gegabelte Rinne befindet. Die nach hinten führende Rinne dient zum Ablassen der Schlacken; das Eisen nimmt den Weg durch die vordere Rinne, erst beim Austritt der Schlacken wird der Schieber in die Eisenrinne gelegt und die Schlacken in die rückwärtige Rinne abgelenkt.

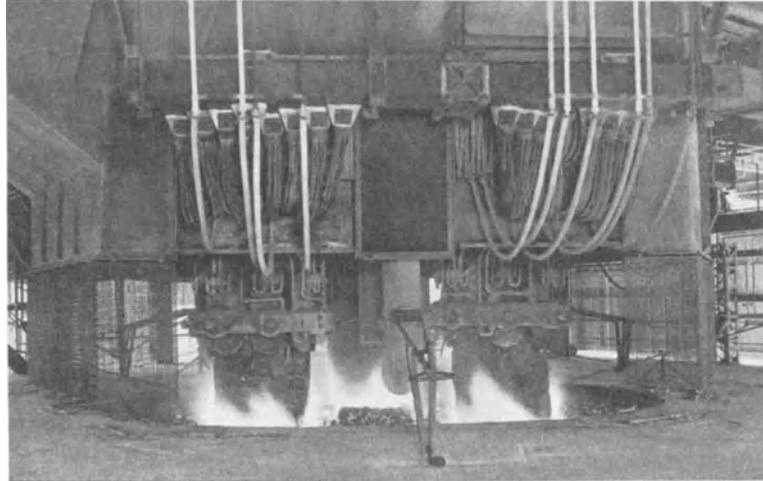


Abb. 174. Beschickungsbühne eines 15 000-kW-Drehstromofens für Karbid.

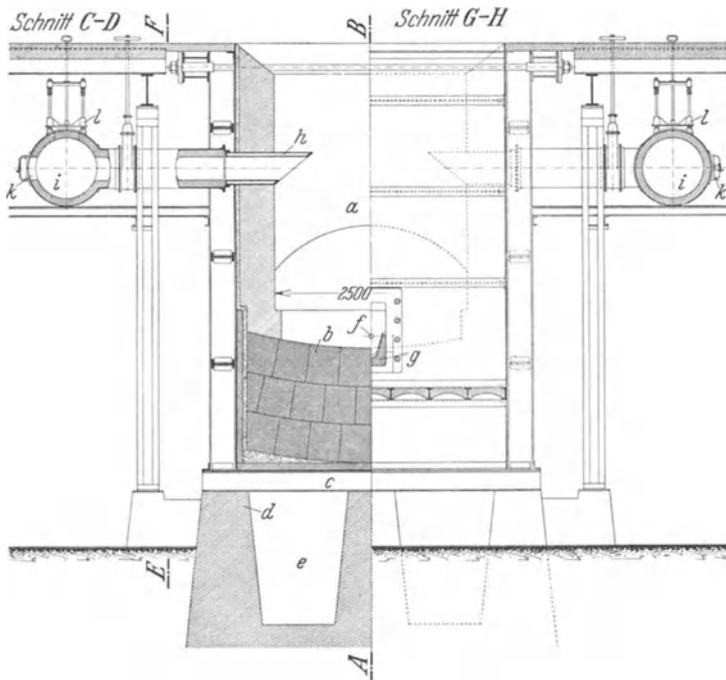


Abb. 175 b. 8000-kW-Drehstromofen zur Erzeugung von Roheisen aus Erzen.

Nach ganz neuen konstruktiven Gesichtspunkten sind die Einphasenöfen von P. Miguet gebaut, die seit Jahren sowohl zur Herstellung von Karbid als auch

von Ferrolegierungen in Verwendung stehen. Die scheinbar komplizierte Bauart des Ofens ermöglicht einen sehr wirtschaftlichen und weitgehend automatisierten Betrieb. Bei Anschluß an Drehstrom erreicht man mit zwei Ofeneinheiten in Scottschaltung eine gleichmäßige Belastung des Netzes. Charakteristisch für diese Öfen ist die Anordnung des Transformators zentral unterhalb des runden Ofens. Dadurch kann man die Sekundärleitung in eine große Anzahl Bündel unterteilen, von denen jedes mit nur etwa 10000 A belastet wird. Diese Bündel sind in gleichen Abständen am Ofenumfang verteilt und phasenvermischt bis über den Ofenrand geführt. Von dort zweigen die Zuleitungen zur Bodenelektrode und zur beweglichen Elektrode ab. Da diese kurz gehalten werden können, sind die unvermischten Stromschleifen kurz und die Phasenverschiebung entsprechend gering. Tatsächlich arbeiten die Öfen mit Phasenverschiebungen, die durchweg über 0,95 liegen. Über dem dicht abgeschlossenen Transformatorraum *A* in Abb.177 befindet sich der luftdicht gemantelte Ofenkörper, dessen

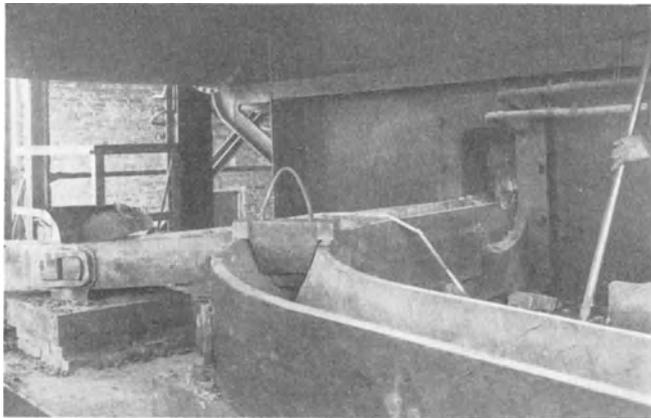


Abb. 176. Abstichrinne des Roheisenofens.

Einzelheiten ausführlich beschrieben wurden (S.104). Die Decke *B* des Transformatorraumes dient ihm als Fundament, das durch die in den Transformatorraum eingblasene Luft gekühlt wird. Darüber liegt die Bleischale *C* und die wassergekühlten Gußplatten *D* und *M* des Ofenpanzers, der vom Blechmantel *N* umschlossen ist. Die aus zwei Lagen von Kohlenblöcken *G* zusammengesetzte Bodenelektrode ruht auf Mauerpfeilern *E*, deren Zwischenräume mit Quarzsand ausgefüllt sind. Die Fugen *H* und *I* zwischen den Kohlenblöcken sind sorgfältig mit

Kohlen-Teer-Masse ausgestampft. Im Mauerwerk *J* des Ofens sind die Schächte *K* für die kupfernen Stromschienen *L* der Bodenelektrode ausgespart, nach deren Einbau sie mit Quarzsand ausgefüllt werden, um auch hier den Luftzutritt zu verhindern. Der Herd besitzt eine einzige Abstichöffnung mit einer kräftigen wassergekühlten Abstichschnauze *O*. Als Stütze für den Oberbau des Ofens dienen die aus U-Profilen und Blechen zusammengenieteten Hohlsäulen *P*, in deren Inneren die phasenvermischten Leitungsbündel *Q* untergebracht sind und durch welche auch die Kühlluft aus dem Transformatorraume abzieht. Die Dauerelektrode wurde an anderer Stelle eingehend besprochen (S.122 u.152). Sie besteht aus den Sektoren *a* aus amorphem Kohlenstoff, die an ein innenliegendes, aus I-Profilen *c* und Vierkanteisenringen *d* zusammengesetztes Traggerüst festgeschraubt sind. Der Elektrodenkern *b* besteht aus Stampfmasse. Zur Aufhängung der schweren Elektrode, die mehrere Meter im Durchmesser mißt, dienen Stahlspindeln *e*, deren Muttern *f* sich gegen Tragkonsolen *g* abstützen, die auf der brückenähnlichen Hauptträgerkonstruktion *h* angebracht sind. Die Spindeln sind derart in zwei Gruppen eingeteilt, daß jede zweite Spindel der gleichen Gruppe angehört. Die als Zahnräder ausgebildeten Muttern gleicher Gruppe sind durch eine Gallsche Kette miteinander verbunden, daher werden die dazugehörigen Spindeln gleichmäßig gehoben oder gesenkt und mit ihnen die Elektrode, weil sie stets nur an einer der beiden Spindelgruppen hängt. Die Elektrodenbewegung erfolgt mittels der Windwerke *j*, wovon je eines zu jeder Spindelgruppe gehört. Die Fassung besteht aus wassergekühlten Kontaktplatten *m*, deren Kegelfläche *o* auf der entsprechenden Innenfläche des Druckringes *n* liegt. Durch die Anpreßschrauben *p* mit Gegengewinde in drehbar gelagerten Bolzenmuttern wird der erforderliche Anpreß-

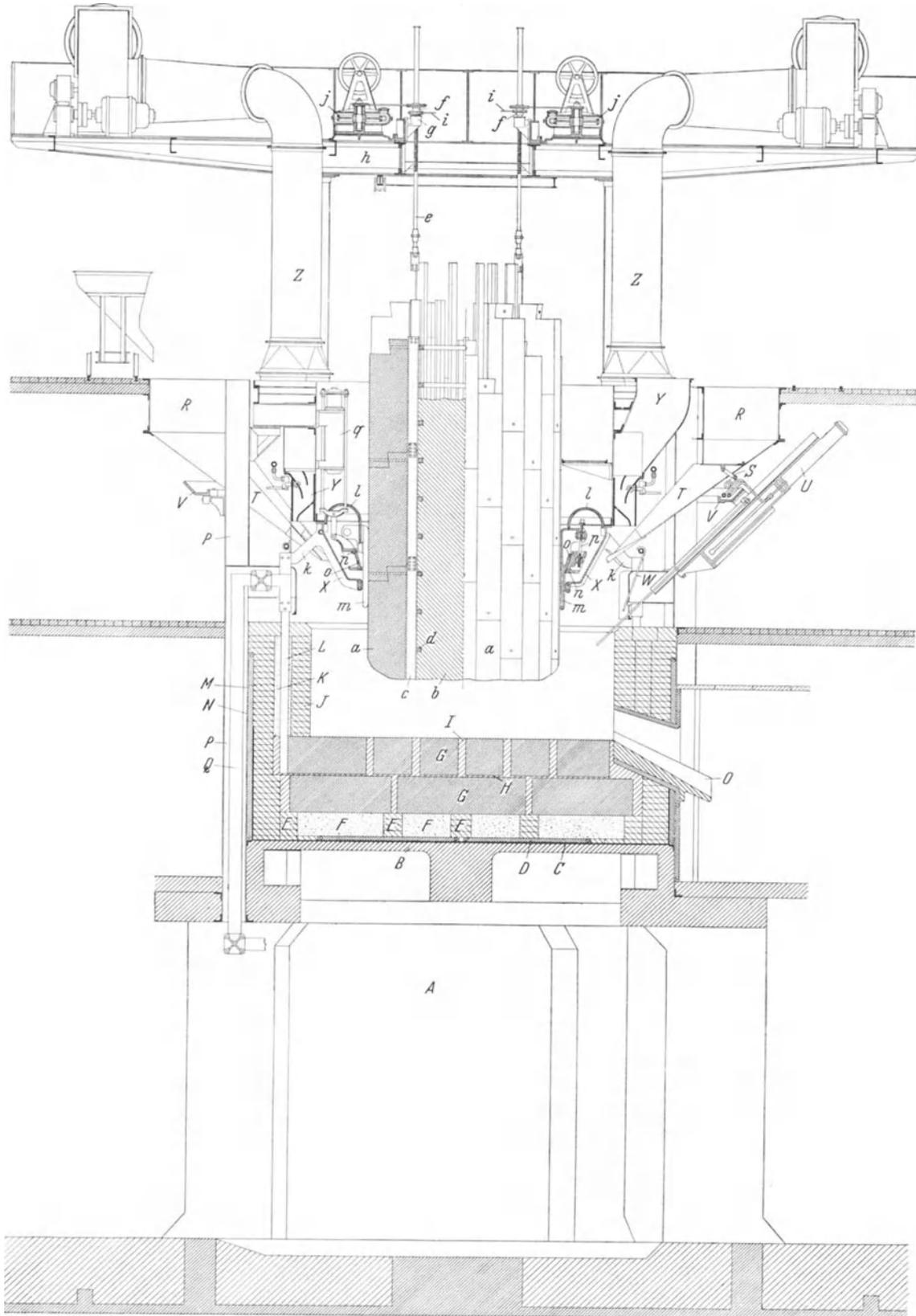


Abb. 177. Offener Einphasenofen für 2000—6000 kW, Bauart Miguet.

druck erzeugt. Für die Nachstellung der Fassung sind Druckölzylinder  $q$  vorgesehen. Die Stromzuführung erfolgt durch ganz kurze biegsame Kupferseile  $l$ , welche die Kontaktplatten mit dem Schutzkonus  $X$  leitend verbinden. Zum Anschluß des Schutzkonus an die Stromschienen der Leitungsbündel  $P$  dienen die Pratzen  $k$ . Dem Schutzkonus fällt also eine dreifache Aufgabe zu: er führt der Elektrode den Strom zu, schützt die Fassung vor der Hitze der Abgase und leitet diese zum Gasabzug  $Y$ . Der Gasabzug ist ringförmig um den ganzen Ofen angebracht und aus einzelnen Kammern zusammengesetzt, die aus wassergekühlten Gußkörpern bestehen. Die Kammern tragen im Innern Querwände, die einerseits infolge Veränderung des Durchgangsquerschnittes und der -richtung den von den Abgasen mitgeführten Staub zum Teil abscheiden, andererseits eine kräftige Durchwirbelung der Gase hervorrufen, so daß sie verläßlich mit den Kühlwänden in Berührung kommen. Da der abgeschiedene Staub die verengten Querschnitte der Kammern verlegen könnte, sind Düsen vorgesehen, um mittels Preßluft jede einzelne Kammer durchblasen zu können. Über dem Kammerring ist ein gleichfalls ringförmiger Sammelraum für die abgekühlten und entstaubten Abgase angebracht, der durch seitliche Türen zugänglich ist. Aus dem Sammelraum treten die Gase durch vier Blechstützen in je ein Gasabzugsrohr  $Z$ , die in der Höhe der Windwerksbühne in ein Knie münden. Je zwei benachbarte Kniee sind mit einem Sammelrohr verbunden, das zu einem auf der Haupttragkonstruktion befindlichen Ventilator führt. Die beiden Ventilatoren erzeugen über dem Herd einen schwachen Unterdruck. Um zu verhindern, daß dort von außen überflüssig viel Luft eingesogen wird und als Schutz gegen die Strahlung des Herdes, sind zwischen dem oberen Herdrand und den Gossen der Beschickungstrichter Schirme  $W$  eingebaut, die über dem Herdrande soviel freien Raum lassen, als zur Betätigung der pneumatischen Stochvorrichtung notwendig ist. Die Schirme, die der direkten Ofenhitze ausgesetzt und demnach einem erhöhten Verschleiß unterworfen sind, werden aus Rundeisenstäben zusammengesetzt, indem sie als Haken gebogen, einfach nebeneinander auf einem Stützrohr aufgereiht werden. Der Weg der Ofengase ist mithin folgender: Aus dem Herde streichen sie längs der Elektrode zwischen deren Schutzkonus und den Stabschirmen zum Kühlkammerring, gelangen nach Kühlung und Vorreinigung in den Sammelraum und von dort durch die Abzugsrohre zu den Ventilatoren. Die Ventilatoren drücken nötigenfalls die Gase noch durch eine Reinigungsanlage und hierauf in den Schornstein. Das Beschickungsmaterial für den Ofen wird in einem Trichterkranz  $R$  untergebracht, der außen um die Ofensäulen angeordnet ist, während sich die Konstruktion für den Gasabzug auf der Innenseite befindet. Bei den Miguet-Öfen verwendet man getrennt: leitende (kohlereiche) und Zusatzbeschickung (kohlearm). Beide werden in getrennten Trichtern aufgespeichert und einzeln aufgegeben. Diese Art der Beschickung wird als heterogene Beschickung bezeichnet und ist durch das DRP. 466755 geschützt. Zwischen je zwei Ofensäulen ist eine Gruppe von drei Trichtern mit einer gemeinsamen Gosse untergebracht. Die beiden seitlichen Trichter einer Gruppe dienen für leitende, der Mitteltrichter für Zusatzbeschickung. Der Verschluß der Trichter gegen die Gosse erfolgt durch Klappen, und zwar haben die Seitentrichter Vertikalklappen, die mittels Handhebel betätigt werden, so daß die leitende Beschickung jedes Trichters einzeln aufgegeben werden kann. Die Mitteltrichter sind durch eine horizontal angeordnete Klappe verschlossen, die durch ein Hebelsystem  $S$  betätigt wird, welches mit einer um den ganzen Ofen laufenden Kardanwelle verbunden ist, wodurch die Zusatzbeschickung aller Mitteltrichter gleichzeitig eingeworfen wird. Die Anordnung der Trichter, der Entleerungsklappen und der Gossen kann der Abb. 178 entnommen werden, Abb. 69 (S. 105) zeigt die Beschickungseinrichtung vom Herd aus gesehen. Beide Abbildungen sind während der Montage aufgenommen worden. Bei Aufgabe der Beschickung gleitet diese in den Gossen gegen die Elektrode und an ihr entlang in den Herd, wo sie sich unter dem natürlichen Böschungswinkel ansammelt. In jedem schmalen Ofenschacht besteht bekanntlich die Gefahr der Brückenbildung; dies gilt sogar für den Hochofen. Im Elektroofen wird die Brückenbildung be-

günstigt, weil die enorme Erhitzung auf einen ganz kurzen Schacht beschränkt ist, in welchem das Herabgleiten des Materials überdies noch durch die Elektroden behindert wird. Durch den schnellen Temperaturanstieg entstehen in der Beschickung Hohlräume (Kavernen) und es findet leicht eine Entmischung durch Ausseigern statt. Die Folge davon ist ein unruhiger Ofengang. Die Elektroden werden in kurzen Zeitintervallen in den Ofen gezogen, dann wieder hinausgetrieben, und der Ofen geht zeitweise sehr heiß. Dies verursacht Strom- und Materialverluste durch Dissoziation, minderwertige Schmelzprodukte und dergleichen. Beim gewöhnlichen Elektroofen muß daher die Beschickung mittels langer Stangen regelmäßig „gestocht“ werden, um die Brücken durchzustößen. Das gründliche, verlässliche „Stochen“ ist eine Grundbedingung für den rationellen Ofenbetrieb. Bei großen Öfen fallen jedoch die Stochstangen sehr schwer aus, da sie sonst im heißen Herde verbogen und abgeschmolzen würden. Die Handhabung der schweren Stangen ist aber sehr mühsam. Ein Stochen kann wegen der am gewöhnlichen offenen Ofen herrschenden Staub- und Hitzeplage, ferner wegen der Möglichkeit, mit den schweren Eisenstangen Kurzschlüsse zu verursachen, kaum verlässlich durchgeführt werden. Zur Vermeidung dieses Übelstandes ist beim Miguet-Ofen eine automatische Stochung eingerichtet. An den Tragsäulen des Ofens sind Konsolen mit Rollen angebracht, auf welchen sich ein Ring  $V$  bewegt, der den ganzen Ofen umgibt. Der Ring trägt unter etwa  $45^\circ$  geneigte Preßluftzylinder  $U$ , die je ein kräftiges Stochstangenpaar betätigen. Zwischen je zwei benachbarten Tragsäulen, also unter jeder Gosse, ist ein Stochzylinder vorgesehen. Abb. 179 zeigt die Gesamtansicht eines Karbidofens, von der Kühl-



Abb. 178. Beschickungsvorrichtung eines Miguet-Ofens während des Einbaus.

Abb. 179 zeigt die Gesamtansicht eines Karbidofens, von der Kühl-

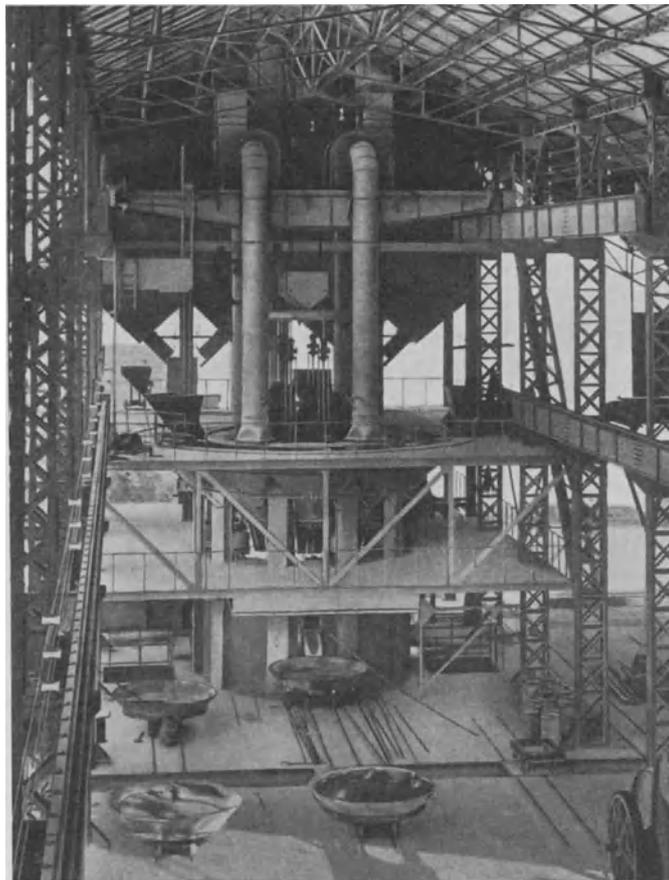


Abb. 179. Gesamtansicht eines Miguet-Ofens während des Betriebes.

halle aus gesehen. Bemerkenswert ist die vollkommene Rauchfreiheit, die bei Öfen anderer Konstruktion im Karbidbetrieb nicht erreicht werden kann. Eine gute

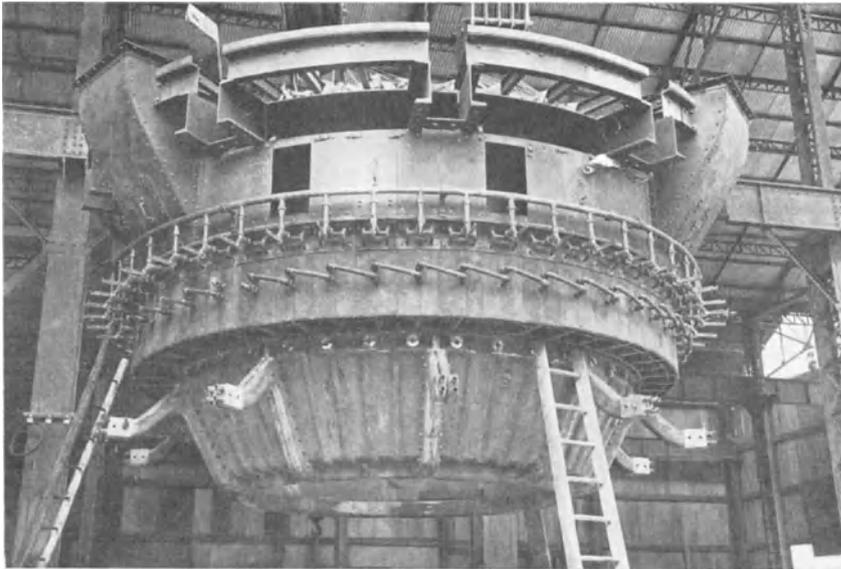


Abb. 180. Schutzkonus eines Miguet-Ofens vor dem Einbau.

Vorstellung vom Schutzkonus und dem Rauchabzugssystem gibt Abb. 180, die vor dem Einbau aufgenommen wurde. Im Schutzkonus bemerkt man die Rippen, in welchen sich die Wasserkühlung befindet, ferner die Unterteilung in einzelne Sektoren und Pratten, die als Stromzuleitungen und Kühlwasseranschlüsse ausgebildet sind. Über dem Konus ist der

Ring aus Kühlkammern angeordnet. Man sieht außen die Verbindungen der Kühlwasserrohre im unteren Teile der Kammern und im oberen den Eintritt der Preßluftdüsen, sowie ihre Betätigungshebel. Die Preßluftleitung läuft als Ring um den ganzen Ofenaufbau. Im anschließenden Sammelraum für die Abgase sind in der

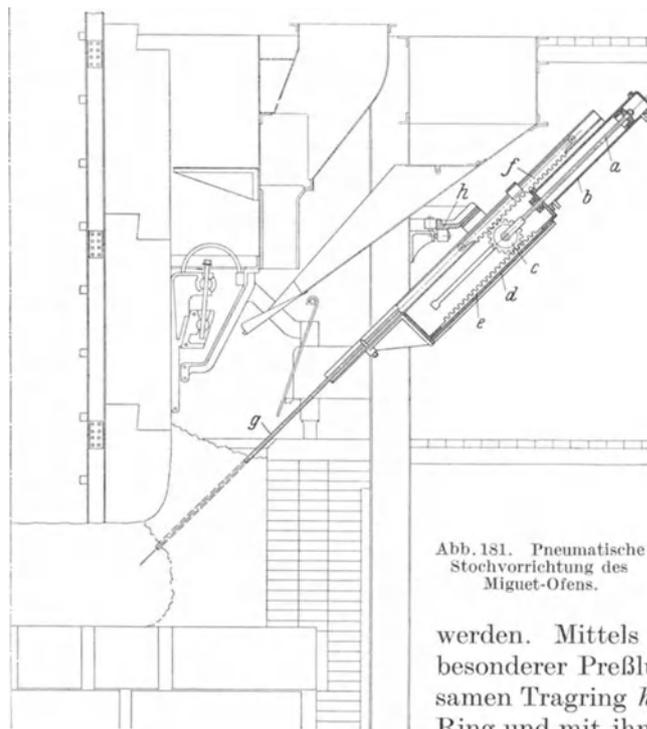


Abb. 181. Pneumatische Stochvorrichtung des Miguet-Ofens.

Ring aus Kühlkammern angeordnet. Man sieht außen die Verbindungen der Kühlwasserrohre im unteren Teile der Kammern und im oberen den Eintritt der Preßluftdüsen, sowie ihre Betätigungshebel. Die Preßluftleitung läuft als Ring um den ganzen Ofenaufbau. Im anschließenden Sammelraum für die Abgase sind in der

Abbildung zwei Türen ausgehoben. An den Seiten sieht man zwei der vier Blechstützen als Verbindungen des Sammelraumes mit den Abzugsrohren. Zur Erläuterung der automatischen Stochvorrichtung dient Abb. 181. Die Kolbenstange *a* des Preßluftzylinders *b* trägt ein Zahnrad *c*, das auf einer im Gehäuse *d* befestigten Zahnstange *e* abrollt. Dadurch erhält die bewegliche Zahnstange *f* und das mit ihr verbundene Stochstangenpaar *g* die doppelte Geschwindigkeit des Preßluftkolbens. Das Stochen erfolgt, indem mittels einer Steuerung die Stochstangen aller Preßluftzylinder ruckartig tief in den Herd getrieben werden. Mittels eines zweiten Umschalters wird ein besonderer Preßluftzylinder betätigt, der am gemeinsamen Tragring *h* angreift. Der Ring und mit ihm

werden. Mittels besonderer Preßluftzylinder betätigt, der am gemeinsamen Tragring *h* angreift. Der Ring und mit ihm

säulen. Auf diese Weise gelingt es, die ganze Beschickung des Ofens in wenigen Sekunden kräftig zu stochen. Die Stochstangen können entsprechend stark gewählt und genügend tief in den Herd getrieben werden. Da außerdem die Tiefe und die Richtung der Stochung gleichbleibt, bietet das an den Enden der Stangen anhaftende glühende

Schmelzprodukt nach jeder Stochung einen Anhaltspunkt für die Höhe des erschmolzenen Sumpfes und dient als Kontrolle für den Abstich. Die Anordnung der automatischen Stochvorrichtung ist aus Abb.182 ersichtlich, welche die Stochbühne

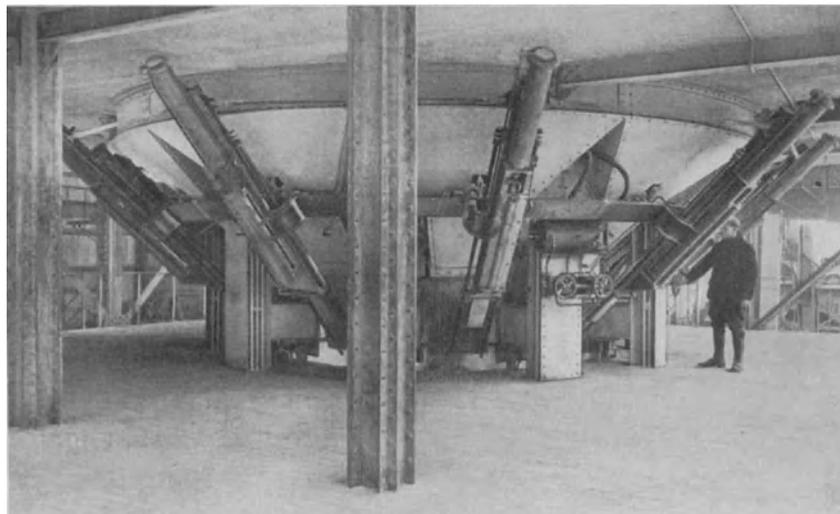


Abb.182. Stochbühne eines Miguet-Ofens.

eines Miguet-Ofens zeigt. Rechts vorne sieht man die Steuerräder für die pneumatische Betätigung der Vorrichtung und darüber den Preßluftzylinder für die seitliche Bewegung des gesamten Stochapparates.

#### b) Gedeckte Öfen.

Diese Type unterscheidet sich von den offenen Öfen nur durch den Einbau einer Decke, welche bis in die Nähe der Elektroden geführt ist, aber genügend Raum freiläßt, um beiderseits von der Elektrode Beschickung einwerfen zu können. Der 2200-kW-Drehstromofen zur Herstellung von Karbid, der in Abb.183 u. 183a gezeigt ist, gehört einer älteren Konstruktion aus dem Jahre 1910 an, die mit unterer Anklemmung versehen ist, wodurch zwar ein Elektrodenpaket erspart wird, aber die Nachteile des damals noch nicht vollkommen gelösten Bodenanschlusses in Kauf genommen werden mußten. Das Betonfundament *c* läßt unter dem Ofen zwei tiefe Lüftungsgänge *a* frei, in welche die Luft durch den Einsteigschacht und die den Ofen umgebenden Spalten *b* gelangt. Auf den Trägern *d* liegt eine unter dem ganzen Ofen durchgehende, aus mehreren Teilen zusammengeschaubte gußeiserne Bodenplatte *f*. An ihre Lappen *r* wird die eine der drei Phasen angeschlossen. Da die Grundplatte stromführend ist, läßt man sie nicht direkt auf den Fundamentträgern aufrufen, sondern legt dazwischen Isolierplatten *e* und auf diese zur günstigeren Gewichtsverteilung Flacheisen. Jeder Teil der Grundplatte muß eine eigene Zuleitung erhalten, weil die bloße Verschraubung der plangehobelten Flanschen keinen hinreichend verlässlichen Kontakt ergibt. Im vorliegenden Falle ist aus dem Leitungsbündel *p* je ein Leitungsstrang *q* zu den beiden mittleren Plattenteilen geführt, die durch die Kupferflaschen *s* mit den beiden Endstücken leitend verbunden sind. Die Bodenelektrode wird aus Schichten Stampfmasse *B* und *B'* und aus zwei Lagen *C* amorpher Kohlenblöcke gebildet. Um den Kontakt zwischen der unteren Stampfmassenschicht und der Bodenplatte zu sichern, gießt man in diese oft schmiedeeiserne Bügel ein, welche in die Masse ragen. Das Mauerwerk *A* wird in der üblichen Weise aufgeführt und ist hier mit einem gußeisernen Panzer *h* umgeben, der etwa 250 mm über die Herdsohle reicht. Die Vertikalträger *g* und die Horizontalträger *i* sollen dem Ofenträger die gegen das

Wachsen erforderliche mechanische Festigkeit geben. Für jedes der beiden beweglichen Elektrodenpakete ist ein Abstichfenster mit der dazugehörigen Abstichschnauze  $h'$  vorgesehen. Die Deckensteine  $l$  werden teils vom Mauerwerk, teils von den Barrieren getragen. Die Barrieren (S. 101) sind aus wassergekühlten Rohren hergestellt und mit feuerfesten Steinen vor direkter Einwirkung der Herdhitze geschützt. Durch diese von A. Helfenstein eingeführte Barrierenkonstruktion ist erst der Bau einer haltbaren Ofendecke bei mehrherdigen großen Öfen ermöglicht worden. Zwischen den Barrieren

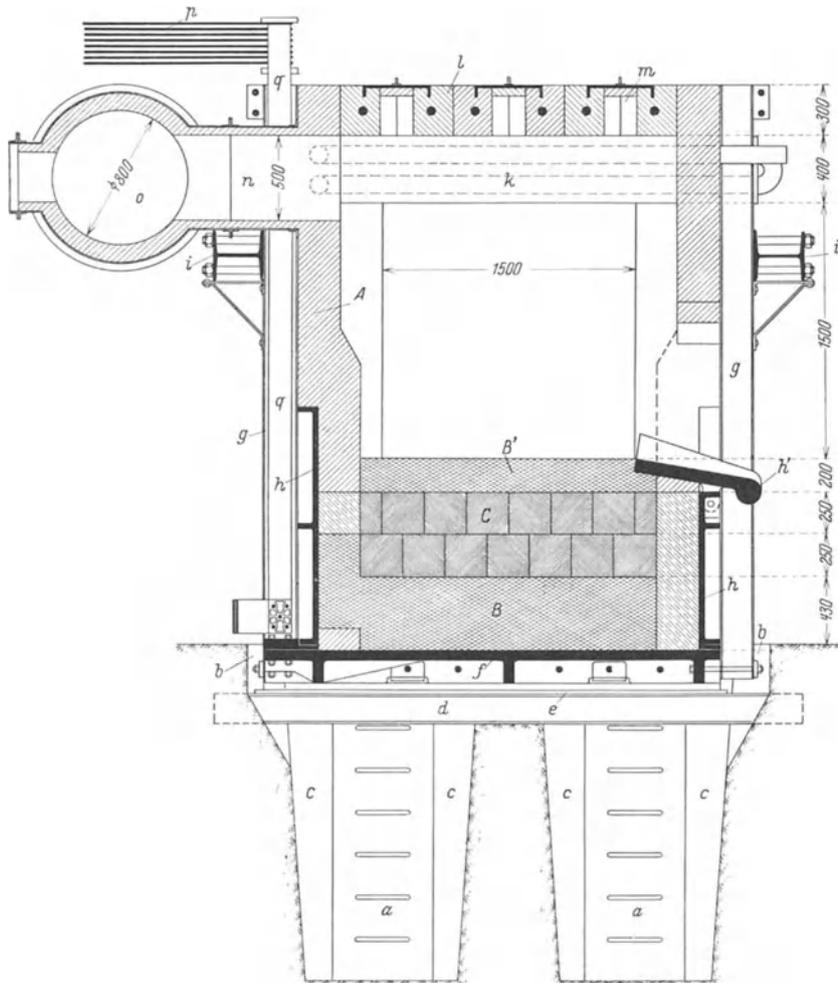


Abb. 183. Gedeckter Karbidofen für 2200 kW Drehstrom mit unterer Stromanklemmung (Helfenstein).

ragen die Elektroden in den Ofen und an ihnen bösch sich das eingeworfene Beschickungsmaterial an. Zur Überwachung der Beschickung und zum Stochen sind in der Decke Öffnungen  $m$  vorgesehen, die mittels sandverschlußähnlicher Deckel abgedichtet werden. In den toten Räumen unter den Barrieren, wohin keine Beschickung gelangen kann, sind die Gasabzugsstutzen  $n$  angeordnet, die in ein gemeinsames Sammelrohr  $o$  münden. Sowohl die Stutzen als auch das Sammelrohr sind mit feuerfestem Material ausgekleidet. Die Gasabsaugung wird derart eingestellt, daß aus den Beschickungstrichtern ganz kurze Flammen aufsteigen, zum Zeichen, daß im Ofen kein Unterdruck herrscht.

Es sei an dieser Stelle auch der Thyssland-Ofen angeführt, der während der Jahre 1922—1925 im Christiania Spigerwerk

ausgebildet wurde. Er ist ein gedeckter Niederschachtofen für die Herstellung von Roheisen. Abb. 184a u. 184b (aus Pirani, Elektrothermie) läßt die wesentlichen Merkmale dieses Drehstromofens erkennen, der für Leistungen von 6000 kVA (Christiania) und 9000 kVA (Bergen) in Verwendung steht. Die drei Söderberg-Elektroden sind durch die Beschickungsschächte in der Ofendecke geführt. Die Beschickung, die mittels Rohren direkt aus dem hochgelegenen Mischsilo zugebracht wird, bildet den Verschluß zwischen Elektroden und Schachtwandungen. Das hochwertige Gas sammelt sich in den toten Räumen zwischen den Beschickungskegeln und wird durch Stutzen und eine gemeinsame Leitung dem Verbräuche zugeführt. Der Energiebedarf beträgt je t Roheisen 2700 bis 3000 kW und soll auf 2200—2300 kW herabgedrückt werden können. Der Ofen kann betrieben werden, um Eisen von hohem oder niedrigem Gehalt an C, Si und Mn zu

erzeugen, bei sehr geringem Gehalt an P und S. Das Erzeugnis wird hauptsächlich

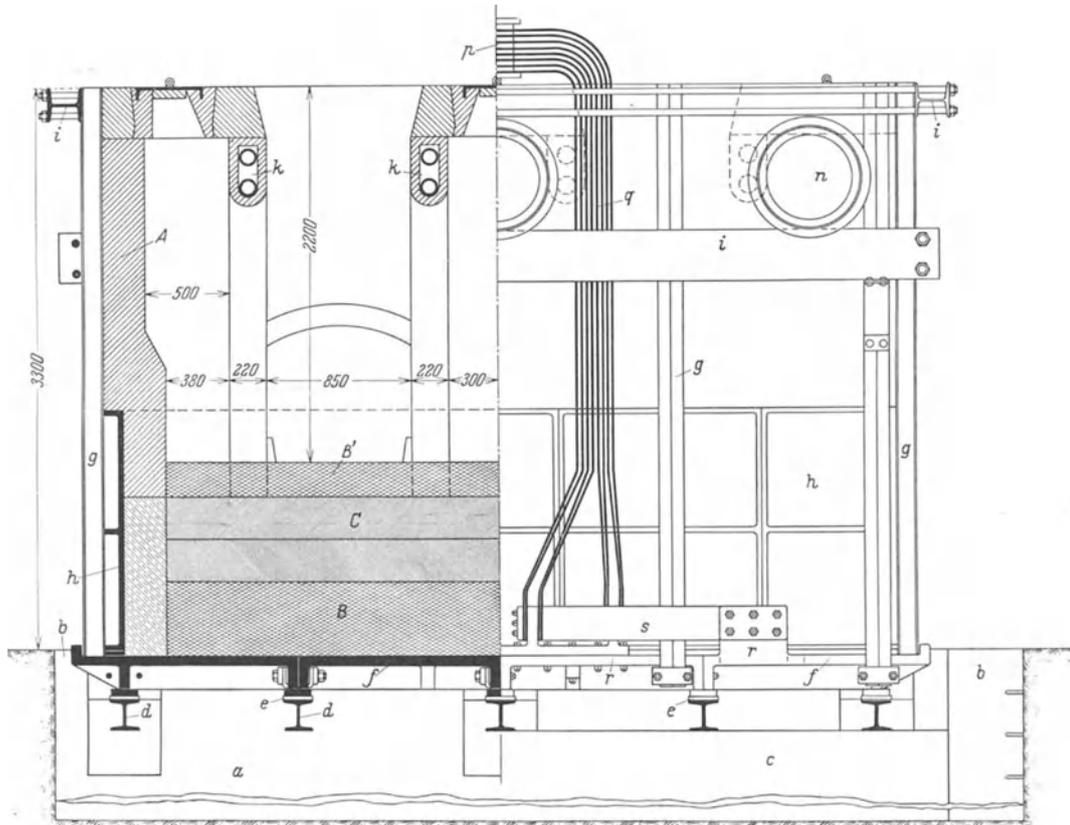


Abb. 183 a. Gedeckter Karbidofen für 2200 kW Drehstrom mit unterer Stromanklemmung (Helfenstein).

für Qualitätsguß verwendet. Somit werden die Ergebnisse des auf S. 186 abgebildeten Versuchsofens von Helfenstein in Domnarvet (1913) bestätigt<sup>1</sup>.

c) Geschlossene Öfen.

Die konstruktive Schwierigkeit bei dieser Ofentype besteht darin, eine brauchbare Abdichtung für die beweglichen Elektroden und für den Beschickungseinwurf zu finden, welche auch bei der andauernd hohen Temperatur einen störungsfreien Betrieb sichert. Beim Drehstromofen nach Abb. 185 zur Erzeugung von Karbid, weicht der Ofenkörper von den

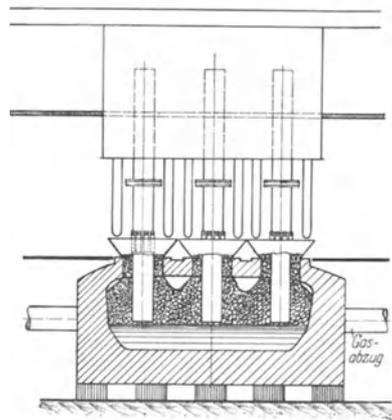


Abb. 184 a. Schema einer Roheisenanlage mit Niederschachtofen, Bauart Thyssland.

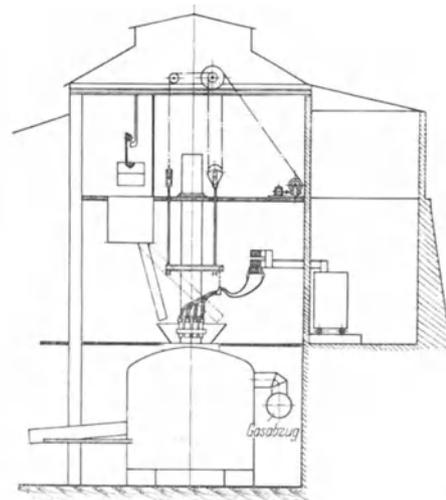


Abb. 184 b. Schema einer Roheisenanlage mit Niederschachtofen, Bauart Thyssland.

<sup>1</sup> Oesterreich, Dr. Max: Der Elektro-roheisenofen in Domnarvet. Stahl und Eisen 1914 S. 305.

üblichen Bauarten nicht ab. Das Fundament *a* mit ausgesparten Kühlschächten trägt die Profile *b* und diese wieder die gußeiserne Grundplatte *c*. Der Boden besteht aus einer Schicht *e* FeSi-Stampmasse, zwei Schichten *f* und *h* Kohlenstampmasse und zwei

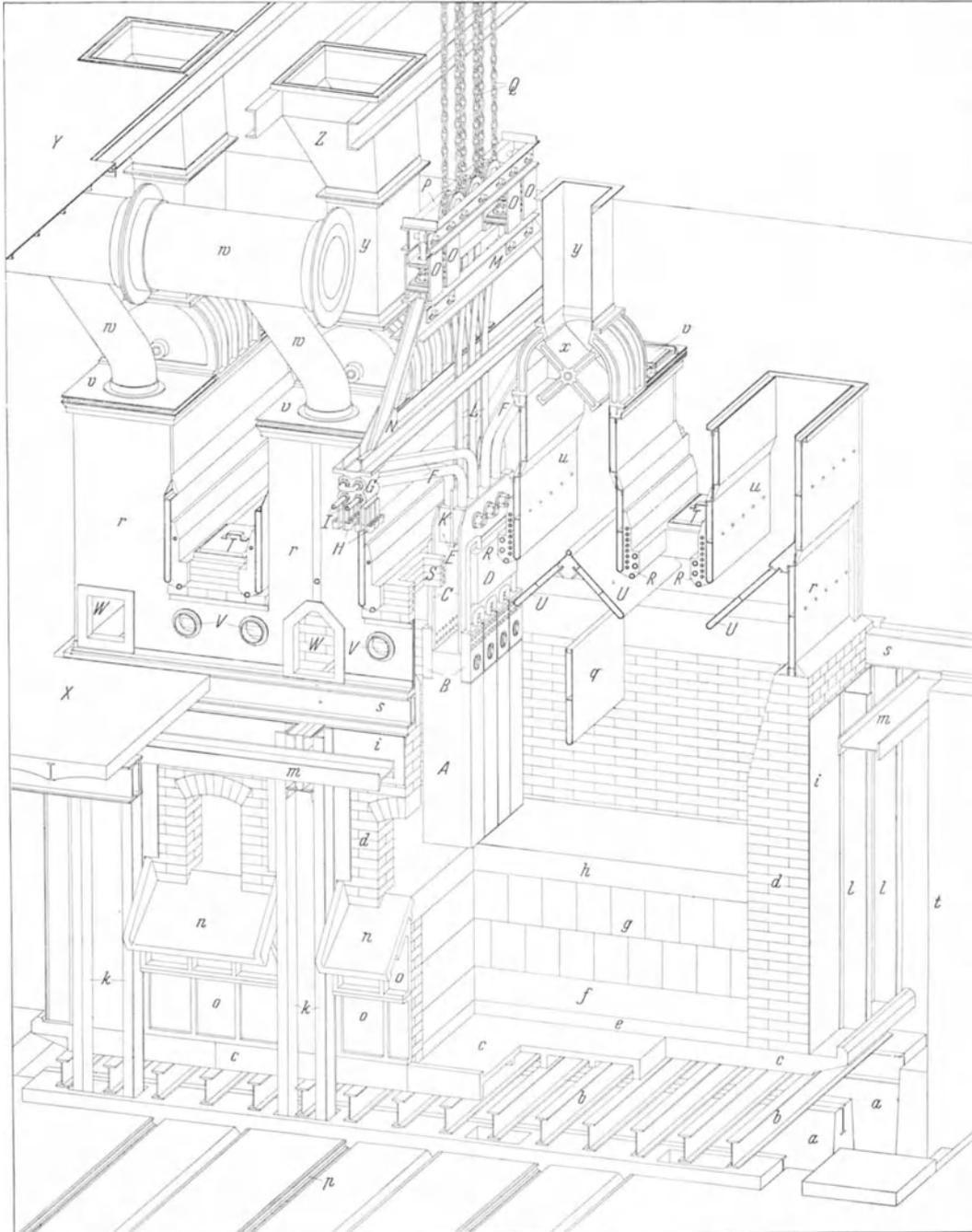


Abb. 185. Geschlossener Drehstromofen.

Lagen Elektrodenkohle *g*. Das Mauerwerk *d* ist mit einem Blechmantel *i* umgeben und durch die Vertikalträger *l* und *k*, sowie durch die Horizontalträger *m* versteift. Unter den Abstichschnauzen *n* ist die Mauerung gegen mechanische Beschädigungen beim Ab-

stich durch Gußschilder *o* geschützt. Die Vorrichtung zum Einwurf der Beschickung ähnelt einer Hochofenbegichtung. Zwischen den drei Elektroden *A* und an den beiden Enden des Ofens ist je ein Beschickungsschacht vorgesehen. Die vier Schächte sowie der ganze Ofenaufsatz *r* ist aus wassergekühlten doppelten Blechwänden zusammengesetzt. Die ungekühlten Nietstellen sind durch feuerfeste Formsteine geschützt. Die Beschickung wird in die Trichter *z* geworfen und gelangt in die Vorschächte *y*. Durch Drehung der wassergekühlten Chargierräder *x* fällt die zwischen den Abteilungen des Rades befindliche Materialmenge in die Beschickungsschächte, wo sie auf die gekühlten Verteilplatten *U* auffällt und gegen die Elektroden gelenkt wird. Da beim geschlossenen Ofen die ganze eingeworfene Beschickung eine hohe Temperatur annimmt und leitend wird, sind die Herde durch wassergekühlte Taschen *q* voneinander getrennt. In der Nachbarschaft der Kühltaschen kann die Temperatur der Beschickung nicht hoch ansteigen, der Strom wird somit gezwungen, seinen Weg durch die tieferen Schichten zu nehmen. Die Beschickungsschächte sind nach vorne und hinten zu Gassammelräumen *u* erweitert. Auf ihren Deckeln *v* sind vorne die Gasabzugstutzen *w* angebracht, die auch hier ein gemeinsames Sammelrohr besitzen; hinten befinden sich Explosionsklappen. Ferner sind im Ofenaufsatz seitliche Beobachtungsöffnungen *V* und Arbeitstüren *W* angebracht. Letztere ermöglichen das Stochen, sowie das Herausholen von Elektrodenbruchstücken und sollen auch als Explosionsklappen wirken können. Die Köpfe der Paketelektroden *A* sind so weit abgesetzt, daß die Kontaktplatten *B*, ebenso wie die Kühltaschen *D* der Laschenplatten *C* nicht aus dem Paketquerschnitt herausragen. Diese Fassung und Aufhängung wurde bereits beschrieben (S. 136). Mit der Kranflache *P*, die an den Windwerksketten *Q* hängt, ist die Haupttragkonstruktion *M* des Elektrodenpaketes durch die Isolierstücke *O* verbunden. Das Gewicht des Paketes wird durch die Flacheisen *L* auf die Tragkonstruktion übertragen, an der auch das Querhaupt *N* befestigt ist. An den beiden Enden des Querhauptes sind die Fassungen *G* der wasserdurchflossenen Stromzuführungsrohre *F* angebracht. An den Rohrfassungen bemerkt man die Kabelschuhe *H* für die biegsamen Kupferseile und die Anschlüsse *I* für die Kühlwasserleitungen. Die kupfernen Kontaktstücke *K* nehmen die Stromrohre auf und vermitteln den Kontakt mit den Laschenplatten *C*. Das Zwischenstück *E* dient als Verbindung zwischen dem Paket und der Tragkonstruktion. Da beim Paket und der Fassung alle vorspringenden Teile vermieden sind, bildet es ein Prisma, das durch eine knapp bemessene rechteckige Öffnung des Ofenaufsatzes hindurchgeführt werden kann. Diese Öffnungen sind mit feuerfesten Formsteinen eingefäßt, die von Kühlrohren unterstützt werden. Der schmale, zur Bewegung der Elektrode erforderliche Zwischenraum wird mittels aufgeworfenem Kohlenpulver abgedichtet. Vor und hinter der Elektrodendurchführung sind Stochöffnungen *S* mit absehbaren Deckeln *T* vorgesehen. Das Gewicht des ganzen Ofenaufsatzes wird nicht vom Ofenmauerwerk getragen, sondern von den wassergekühlten Trägern *s*, die sich auf seitlich vom Ofen befindliche Betonpfeiler *t* abstützen. Im Betriebe werden diese Öfen unter geringem Überdruck gehalten. Um diesen jederzeit ohne Meßinstrumente, die durch den Staub und die Hitze bald ihre Verlässlichkeit einbüßen, kontrollieren zu können, bringt man im Aufsatz, etwa in einer der Beobachtungsöffnungen, eine Bohrung von 5 mm Durchmesser an. Das entweichende angezündete Gas gestattet durch die Flammenslänge einen Schluß auf den im Ofen herrschenden Überdruck.

Der 5000-kW-Einphasenofen nach Abb. 186 wurde von Miguet auf Grund der Erfahrungen mit seinem offenen Einphasenofen entwickelt. Er behält auch die wesentlichen Merkmale dieser Konstruktion bei, so die Aufstellung des Transformators unter dem Ofen, den Bau und Anschluß der Bodenelektrode, die zusammengesetzte bewegliche Elektrode und deren Aufhängung. Dagegen ist hier eine neue Art der Stromzuführung vorgesehen, die auch für offene Einphasenöfen anwendbar ist. Der Strom wird nicht mehr in Schienenbündeln zu den Elektroden geführt, sondern man umgibt den ganzen Ofen mit einem metallischen Doppelmantel, der als Zuleitung dient. Vom Transformator gehen die

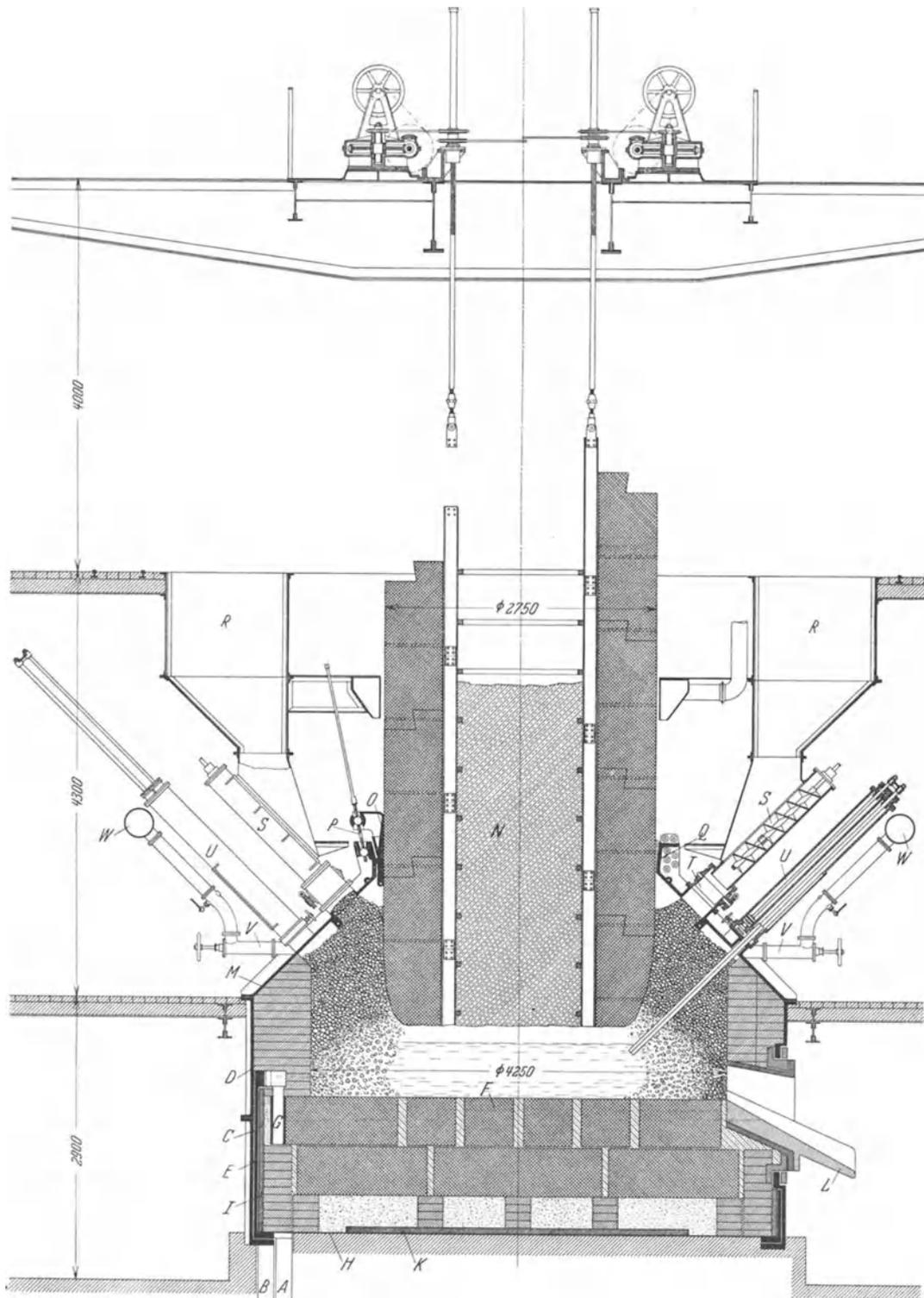


Abb. 186. Geschlossener Einphasenofen für 5000 kW, Bauart Miguet.

Stromschienen *A* und *B* aus, davon ist *A* mit dem Innenmantel *C* und *B* mit dem Außenmantel *D* verbunden. Die beiden Mäntel sind durch eine Isolierschicht *E* voneinander

getrennt, die verhältnismäßig schwach sein kann, weil der Ofen mit Spannungen zwischen 30 und 60 Volt arbeitet. Der Innenmantel dient als Stromzuführung für die Bodenelektrode  $F$ , mit der er durch die kurzen Schienenstücke  $G$  verbunden ist. Die Bodenelektrode ist wie beim offenen Ofen hergestellt und mit einer luftdichten Bleischale  $H$  gegen das Eindringen von Außenluft gesichert. Für die Kühlung der Bleischale und zum Schutze gegen mechanische Beschädigungen, ist der wassergekühlte Gußpanzer  $I$  und die Bodenplatte  $K$  beibehalten. Der Außenmantel wird aus einzelnen Feldern zusammengeschraubt, doch muß ein verlässlicher Kontakt gesichert sein. Die Abstichschnauze  $L$  ist gegen den Außenmantel sorgfältig zu isolieren. Als Material für die beiden Mäntel kommt Kupfer, Bronze oder Aluminium in Betracht. Durch die Verwendung des stromführenden Doppelmantels ist es möglich, dem Ofen wesentlich höhere Strommengen bei gleichgünstiger Phasenverschiebung zuzuführen. Mit Rücksicht auf diese mußten früher die Stromzuleitungen in zahlreiche phasenvermischte Bündel unterteilt werden, die je etwa 10000 A führen durften. Durch den Ofenumfang und den notwendigen Arbeitsraum über dem Ofen war die Anzahl und Distanz der Bündel, somit auch die maximale Stromstärke gegeben. Diese Einschränkung entfällt bei Anwendung des Doppelmantels. Der geschlossene Ofen erhält eine Decke, die einen stromführenden Konus bildet, der aus mehreren Feldern besteht, welche unten mit dem Außenmantel, oben mit der Elektrode in leitender Verbindung steht. Die Neigung dieser Verschlußplatten  $M$  soll nahezu dem Böschungswinkel des Beschickungsmateriales entsprechen, um einerseits unerwünschte Berührung der Beschickung mit der stromführenden Decke, andererseits große Gasansammlungen in leeren Räumen zu vermeiden. Die Metallfelder der konischen Decke sind untereinander und mit dem Außenmantel verschraubt. Der Kontakt mit der Elektrode  $N$  ist durch Kontaktplatten  $O$  hergestellt, deren Anpreßdruck durch die Gegengewindespindeln  $P$  erzeugt wird. Die Räume zwischen benachbarten Kontaktplatten werden jedoch auch zum Stromübergang ausgenutzt, indem Koks klein zwischen der Elektrode und dem als Durchführungsring  $Q$  ausgebildeten Hals der Metaldecke eingeworfen wird. Der Koks dient in diesem Spalt sowohl als Stromzuleitung als auch als Abdichtung. Die Elektrode dieses Ofens wird nur einmal im Tag nachgestellt und die Regulierung erfolgt in der Zwischenzeit durch Veränderung der Spannung, die dem Elektrodenabbrande entsprechend, im Laufe des Arbeitstages von etwa 30 bis auf 60 Volt ansteigt. Bei dieser Art der Regulierung kann die Elektrodendurchführung in der Decke verlässlich dicht gehalten werden. Die Zubringung der Beschickung ist gleichfalls in origineller Weise gelöst. Die Beschickungstrichter  $R$  sind in einem Ring um den Ofen angeordnet. Am unteren Ende der Trichter sind Chargierschnecken  $S$  angebracht, die von Preßluftmotoren angetrieben werden. Die Motore stehen dauernd unter Druck, laufen also selbsttätig an, sobald im Ofen Platz für frische Beschickung entsteht. Je zwei Beschickungstrichter mit den dazugehörigen Chargierschnecken bilden eine Gruppe. Im ersten Trichter befindet sich leitende Beschickung, im zweiten Zusatzbeschickung. Die aufgegebene Menge beider Beschickungssorten kann mittels des gemeinsamen exzentrisch gelagerten Verteilzylinders  $T$  beliebig verändert werden, da durch seine Stellung die beiden seitlichen Durchgangsquerschnitte regulierbar sind. Die verschiedenen Beschickungsschichten liegen hier also nebeneinander im Ofen, statt wie beim offenen Miguet-Ofen übereinander. Entsprechend den 20 Trichterpaaren besitzt der Ofen 40 Chargierschnecken und ebenso viele Stochzylinder  $U$ , die unter jeder Schnecke angebracht sind. Die Stochvorrichtung arbeitet mit Rücksicht auf die Dichtigkeit des Ofenverschlusses nur in einer Richtung, auf die seitliche Bewegung mußte verzichtet werden. Unmittelbar neben den Stochvorrichtungen sind die Gasabzugstutzen  $V$  angebracht, die durch Rohre mit einem gemeinsamen ringförmigen Sammelrohr  $W$  verbunden sind. Von dieser Ofentype waren im Jahre 1931 Einheiten bis zu 15000 kW im Bau.

Schließlich sei noch der Grönwall-Ofen für die Roheisenerzeugung aus den Erzen erwähnt. Es ist dies die Verbindung eines Eisenhochofens mit einem geschlossenen

Elektroöfen. Der Ofen wurde von Grönwall gemeinsam mit Stalhane und Lindblad entwickelt. Abb.187 zeigt eine dieser Anlagen. Der untere Teil des Ofens entspricht einem elektrischen Ofen, durch dessen Gewölbe schräg eine Anzahl Elektroden in den Herd eingeführt sind. Auf den Deckel ist zentrisch der hier zylindrische Ofenschacht aufgesetzt, der oben durch den üblichen Gichtverschluß abgeschlossen ist. Das an der Gicht entnommene Gas geht durch eine Reinigungsanlage, die im Grundriß der Abb.187 zu sehen ist, und sodann in der Höhe des Gewölbeansatzes wieder in den Ofen.

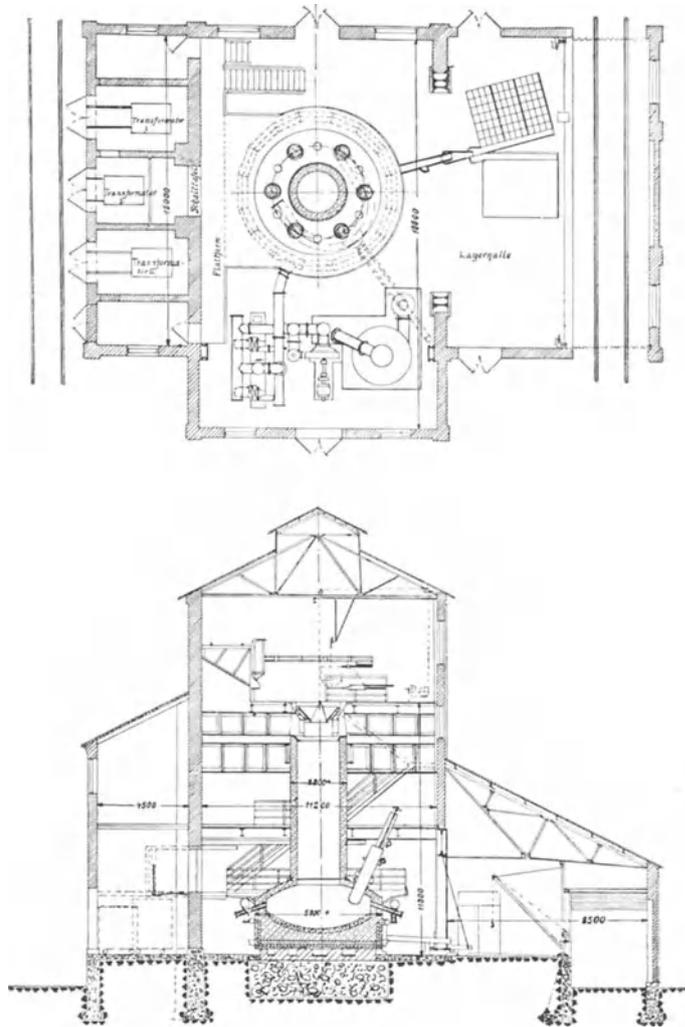


Abb.187. Schema einer Roheisenanlage mit einem Grönwall-Ofen.

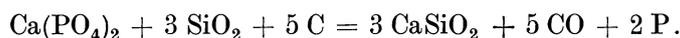
50 und 100 V und belastet die 600—700-mm-Elektroden mit je 500—700 kW. Der Energiebedarf beträgt je t Roheisen 2500—2700 kW, ferner werden etwa 6 kg Elektroden verbraucht. In Abb.188 ist die Elektrodenbühne eines 6000 kW Grönwall-Ofens mit 8 Söderberg-Elektroden wiedergegeben.

Der Elektrohochofen hat gegenüber dem Niederschachtofen für die Roheisengewinnung den Vorteil besserer Energieausnutzung, aber der Niederschachtofen bietet andere große Vorteile. Zunächst ist der Betrieb leichter zu führen. An die Tragfähigkeit seiner Beschickung werden keine besonderen Ansprüche gestellt, daher kann die gewöhnliche Holzkohle und sogar mulmiges Erz, wie z. B. der norwegische Schlich (ein sehr hochwertiges Eisenerz), der nach Brikettierung erst im Hochofen verwendbar

Durch die Gaszirkulation wird das stark beanspruchte Gewölbe gekühlt. Ein Teil der  $\text{CO}_2$  und des  $\text{H}_2\text{O}$  dissoziiert beim Auftreffen auf das glühende Gewölbe. Die  $\text{CO}$ -Gase wirken im Schachtraum reduzierend auf das Erz, während das freigewordene O zu  $\text{CO}$  verbrennt und die Reste von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  die aufgenommene Wärme an die Beschickung im Schacht abgeben. Auf diese Weise wird etwa ein Drittel der aufgewendeten elektrischen Energie als Wärme im Schacht nutzbar gemacht. Das im Elektroofen hergestellte Roheisen ist reiner als das übliche Hochofenerzeugnis, weil der für die Heizung erforderliche Kohlenbedarf, also zwei Drittel der gesamten Kohlenmenge, durch elektrische Energie ersetzt wird. Dementsprechend sinken die Verunreinigungen, die durch die Kohlenasche in das Roheisen gelangen, auf ein Drittel herab. Auch ist es möglich, ein kohlenstoffärmeres Eisen zu erzeugen, weil die Temperatur höher als im Hochofen gehalten werden kann (etwa  $2000^\circ$  gegenüber  $1600^\circ$ ). Der Ofen eignet sich für den Betrieb mit Strom beliebiger Form und Periodenzahl. Die Spannung wählt man zwischen

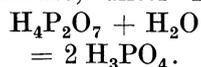
wird, im Niederschachtofen ohne weiteres verwendet werden. Außerdem sind die schräg-stehenden Elektroden des Grönwall-Ofens gegenüber vertikalen Elektroden im Nachteil (im Hinblick auf Regulierbarkeit und mechanische Beanspruchung). Schließlich kann das dem Niederschachtofen entströmende CO außerhalb des Ofens verwendet werden.

Die neueste elektrothermische Großindustrie ist die Erzeugung von Phosphorsäure. Obwohl der Phosphor einer der ersten Stoffe war, die im elektrischen Ofen technisch hergestellt worden sind, fand seine Erzeugung infolge seiner beschränkten Anwendungsmöglichkeit lange nur geringes Interesse. Die Phosphorsäure hat dagegen einen sehr großen Absatz als Düngstoff. Die Versuche zur direkten Erzeugung des  $P_2O_5$  durch Abtreiben mit  $SiO_2$  sind bisher industriell nicht gelungen. Man muß daher den Umweg über den freien Phosphor machen und erzeugt im elektrischen Ofen durch Zusatz von Koks nach Wöhler:



Durch Verbrennen des Phosphors mit Luft entsteht:  $P_2 + O_5 = P_2O_5$ , dessen Hydrierung je nach dem Grade

der Abkühlung in drei Stufen erfolgt. Bei  $350^\circ$  beginnt die Reaktion:  $P_2O_5 + H_2O = 2 HPO_3$ , also Bildung von Metaphosphorsäure; sodann bei  $215^\circ$ :  $2 HPO_3 + H_2O = H_4P_2O_7$  Pyrophosphorsäure, unter  $210^\circ$ :



Die Abb. 189 zeigen das Schema einer bewährten Anlage zur Herstellung von Phosphorsäure. *A* ist die Elektrode, *B* der Ofenkörper, *C* der Transformator, *O* die dazugehörige Ölkühlung und *N* die Transformatorschalter. Der hier verwendete Drehstromofen ist ein ganz primitiver Karbidofen, dessen Konstruktion ungefähr der Zeichnung entspricht. Heute würde man eine modernere Konstruktion vorziehen. Der wesentliche Unterschied zwischen den bisher besprochenen und dem vorliegenden Ofen ist der, daß hier das Ergebnis Phosphor bzw. Phosphorsäure mit den Ofengasen abgetrieben wird, während im Ofen eine wertlose Schlacke zurückbleibt, die von Zeit zu Zeit abgestochen werden muß. Allerdings hat man versucht, diese Schlacke zu verwerten. Außerdem kann man im Ofen als Nebenprodukt Phosphoreisen (mit etwa 22% P), eine wichtige Eisenlegierung, erzeugen. Der Ofen steht unter Minderdruck, daher wird dem Gemisch von CO und P-Dampf durch die Undichtheiten sowie durch eigens vorgesehene kleine Öffnungen am Ofen, so viel Luft zugeführt, daß der Phosphor zu  $P_2O_5$  verbrennt. Das Gemisch von CO und  $P_2O_5$  (verunreinigt durch Wasser, CaO,  $SiO_2$ , Kohlenstaub usw.) strömt durch die Öffnungen *D* in den Fuchs *E*. Schon auf diesem Wege findet schwache Abkühlung statt. Aber erst in der Kondensation *F* ist die Abkühlung so stark, daß die Verflüssigung beginnt. *F* hat Gefälle gegen die Hydrierung *G* und ist mit dieser verbunden, daher fließt das in *F* kondensierte Produkt nach *G*. Hier wird das vom Ofen mitgeführte

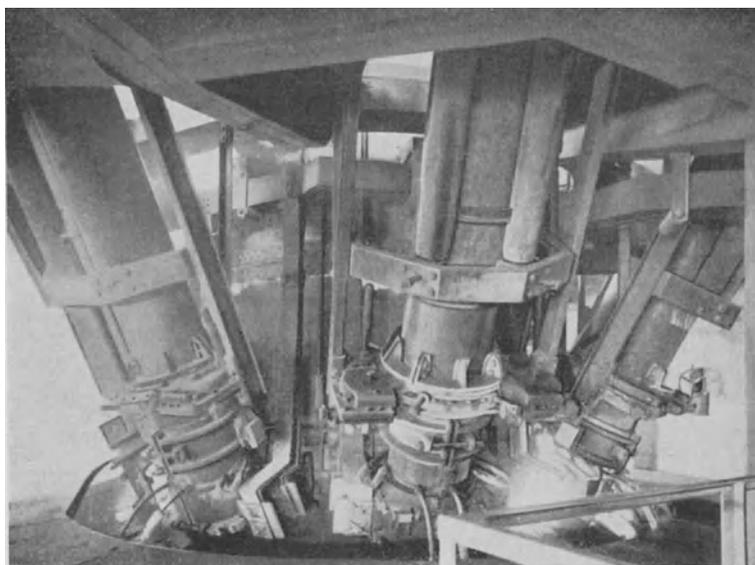


Abb. 188. Elektrodenbühne eines 6000-kW-Grönwall-Ofens mit 8 Söderbergelektroden.

Wasser ebenfalls verdichtet, außerdem wird die noch erforderliche Wassermenge zugesetzt. Die Säure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) kommt sodann in den Sammler *H* und fließt durch die

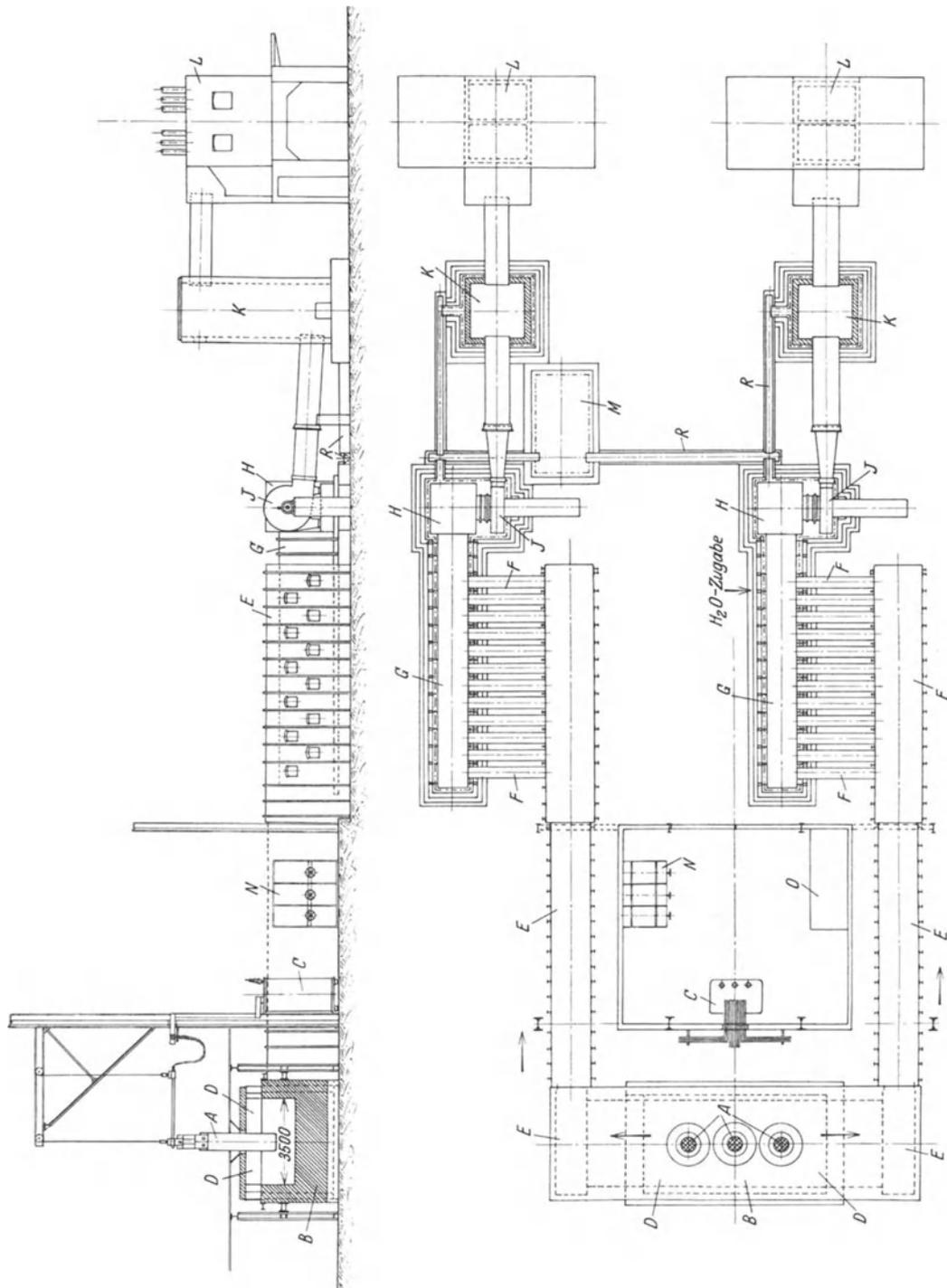


Abb. 189. Schema einer Phosphorsäureanlage.

Rinnen *R* von *H* und dem Turm *K* nach dem Sammelbecken *M*. Der Ventilator *I* zieht die nicht kondensierten Gase  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}$  und den Rest des  $\text{P}_2\text{O}_5$  ab. Diese passieren

den Waschturm *K* und gehen von hier zur elektrischen Staubabscheidungsanlage (Cottrell-Möller).

Dem theoretischen Verbrauch von 5,3 kWh je Kilogramm Phosphor steht als praktisch erreichbare Zahl 16 kWh gegenüber. Der Energiebedarf ist daher noch sehr hoch. Die Frage betreffend der Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage hängt vom Strompreis ab, denn maßgebend ist der Preis je Kilogramm P im Superphosphat.

Von den verschiedenen Vorschlägen, das hohe Energiegefälle zwischen freiem Phosphor und  $H_3PO_4$  auszunutzen, ist durch Lilienroth der erste Erfolg erzielt worden. Er verbrennt den Phosphor mit Wasserdampf und etwas Luft und erhält dabei je Kilogramm P theoretisch 0,16 kg, praktisch etwa 0,11 kg Wasserstoff, der für die Ammoniaksynthese verwendet wird. Das Verfahren wird in Deutschland von der I. G. in Piesteritz bzw. Leuna ausgeführt. Der Phosphorsäure als nichtflüchtiger Säure ist in der chemischen Industrie noch eine Sonderstellung vorbehalten, namentlich auch wegen der großen Affinität des  $P_2O_5$  zum Wasser. Einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Verfahren gibt Bunet<sup>1</sup>. Da man durch Behandlung des CO mit Wasserdampf unter Verwendung besonderer Katalysatoren auch noch H erzeugen kann, kann man mit dem ganzen zur Verfügung stehenden H je Kilogramm P 1 kg N als  $NH_3$  binden mit einem Aufwand von 3 kWh. Falls man nun dem P und N in Form von Dungstoff einen Kilogrammpreis von 4—6 Frank zugrunde legt, so erhält man:

	Verbrauch kWh	Ertrag Francs
Ohne Nutzbarmachung der Abfallenergie . . . . .	16	4
Mit Nutzbarmachung der Verbrennungswärme . . . . .	12	4
Mit Nutzbarmachung des Wasserstoffs . . . . .	19	10

## II. Induktionsöfen.

### A. Induktionsöfen mit Eisenkern.

#### a) Theorie.

Zum Unterschied von den Elektrodenöfen sind die eisengekoppelten Niederfrequenz-induktionsöfen Transformatorenöfen, deren Eisenkern mit einer Primärwicklung umgeben ist, während das Schmelzgut die aus einer einzigen, in sich kurzgeschlossenen Windung bestehende Sekundärwicklung darstellt. Abb. 190 zeigt das Schema des Induktionsofens; darin ist 1 der Rahmen aus Transformatorblech, der die Primärwicklung 2 trägt. Die Sekundärwindung ist eine mit geschmolzenem Metall gefüllte, gemauerte oder gestampfte Rinne 3 aus feuerfestem Material, die um den Schenkel des Magnetrahmens herumläuft.

Es kann also im Prinzip Wechsel- (oder Dreh-) strom von beliebig hoher Netzspannung und niederer Stromstärke zugeführt werden. Im Rinnenring herrscht dann niedrigere Spannung (etwa 1,1—1,3 V je m Umfang) und hohe Stromintensität. Die Energieverluste sind klein, wie bei Transformatoren überhaupt, daher wird die zugeführte Energie fast quantitativ im Metallbade nutzbar gemacht.

Die Induktionsöfen nahmen erst einen raschen Anstieg, wurden dann aber vom Lichtbogenofen überholt, der sich weit rascher entwickelte, weil seine Theorie verhältnismäßig einfach ist, während der Induktionsofen — ein kurzgeschlossener Transformator — schwerer erforscht und daher auch schwerer rechnerisch wie konstruktiv durchgearbeitet werden kann.

Ohne Zweifel besitzt auch der Induktionsofen große Vorteile. Die Praxis wog diese gegenüber denen des Lichtbogenofens ab und entschied sich für letzteren. Ob für immer, ist fraglich.

<sup>1</sup> Four elektr. 1930, S. 90

Es ist hier nicht der Ort, die kompliziertere und ein hohes elektrotechnisches Wissen erheischende moderne Transformatortheorie mathematisch zu behandeln, vielmehr soll versucht werden, in ganz primitiver und leicht verständlicher Weise eine ungefähre, aber richtige Anschauung über die Strom- und Spannungsverhältnisse zu geben.

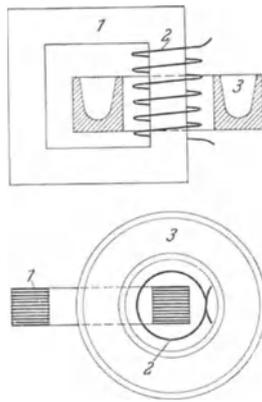


Abb. 190. Einrinnen-Niederfrequenz-Induktionsöfen.

Ein Ring oder Rahmen (Kern) aus leicht magnetisierbarem weichem Eisen, etwa ein Bund dünnen Eisendrahtes, trage „verkettet“ eine isolierte Wicklung. Abb.190a erläutert das Wort „verkettet“.

Wird durch eine solche Wicklung (eine Spule) ein Gleichstrom geleitet, so wird der Kern magnetisch, und es herrschen stationäre Verhältnisse. Der Strom folgt exakt dem Ohmschen Gesetze.

Anders, wenn eine Wechselstromspannung angelegt wird. In diesem Falle bewirkt der erste Stromstoß eine Magnetisierung des Rahmens. Nach dem Prinzip der Aktion und Reaktion antwortet das System auf diesen Impuls mit einer Gegenwehr, die sich durch eine augenblickliche Gegenspannung ausdrückt, welche im Idealfalle der angelegten Spannung gleich groß ist. Das ist auch bei Gleichstrom im Augenblicke des Einschaltens der Fall. Da aber die aufgedrückte Klemmen- (Maschinen-) spannung dort unveränderlich ist, werden die Verhältnisse stationär.

Bei Wechselstrom hingegen, wo die Gegenspannung nie auf jene Höhe der Klemmenspannung trifft, deren Folge sie war, sondern schon auf eine veränderte, kann sich kein stationärer Zustand ausbilden, doch wird der Strom stets geschwächt, gedrosselt, als müßte er einen großen Widerstand überwinden, der für Gleichstrom nicht vorhanden war. Dieser durch den Wechselstrom vorgetäuschte Widerstand wird als Blindwiderstand, induktiver Widerstand, Reaktanz, bezeichnet. In ihm wird nicht Energie in Wärme umgesetzt, wie in Ohmschen Widerständen, sondern

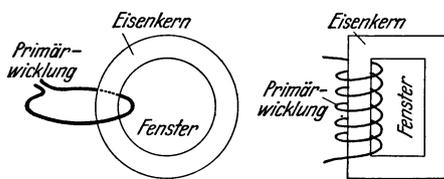


Abb. 190 a. Schema der Verkettung.

seine drosselnde Wirkung geht ohne Energieumwandlung, ohne Energieverbrauch, vor sich. stationärer Zustand ausbilden, doch wird der Strom stets geschwächt, gedrosselt, als müßte er einen großen Widerstand überwinden, der für Gleichstrom nicht vorhanden war. Dieser durch den Wechselstrom vorgetäuschte Widerstand wird als Blindwiderstand, induktiver Widerstand, Reaktanz, bezeichnet. In ihm wird nicht Energie in Wärme umgesetzt, wie in Ohmschen Widerständen, sondern

seine drosselnde Wirkung geht ohne Energieumwandlung, ohne Energieverbrauch, vor sich. Nun wollen wir uns diese Verhältnisse an einem Diagramm (Abb. 191 a—d, 4 Abbildungen) klarmachen.

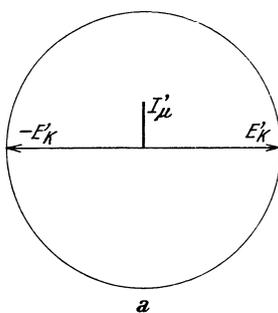


Abb. 191 a. Stromverhältnisse beim Induktionsofen mit Eisenkern.

Bisher wurde von einem eventuellen Ohmschen Widerstande der Wicklung sowie von dem Magnetisierungswiderstand abgesehen. Es gelte weiter, daß sowohl dem Stromdurchgange durch die Spule, wie auch der Magnetisierung kein Hindernis entgegenstehe bzw. daß diese so klein seien, daß sie vernachlässigt werden können.

Die Klemmenspannung  $E'_K$  wollen wir in die Abszissenachse eines Koordinatensystems der Abb. 191 a nach rechts auftragen, die Gegenspannung  $-E'_K$  (induktive Spannung), im Augenblicke gleich groß nach links.

Wir wissen aus dem Vorigen, daß zeitlich zuerst die Klemmenspannung  $E'_K$  auftritt, daß ihr zeitlich die induzierte Gegenspannung  $-E'_K$  folgt und daß zwischen beiden, vermittelnd, die Magnetisierung  $J'_\mu$  auftrat. Denken wir uns die in einer

Geraden liegenden Spannungen als Zeiger einer Uhr, dann differieren sie um 6 Stunden; der zwischen beiden liegende Magnetisierungsstrom käme dann einem dritten Zeigerarm zu, welcher auf den ersten senkrecht steht (gegen 12 weist).

Daß diese Darstellung streng richtig ist, kann hier nicht abgeleitet und bewiesen werden. Es möge die Hervorhebung dieser Tatsache genügen.



wicklung, also ohne Energieverlust. Sie findet in der Elektrotechnik vielfach Anwendung und heißt Drosselspule.

Damit aus der Drosselspule ein Transformator werde, muß die in Abb.191 b nach links gerichtete (durch Wechselmagnetismus hervorgerufene, induzierte) elektromotorische Kraft  $-E_i$  (Spannung) irgendwie für sich allein, von der Maschinen- oder Netzspannung getrennt, abgenommen werden können.

Der Idealfall läßt sich annähernd verwirklichen, wenn parallel und womöglich im Innern des Leiters der Primärspule eine ebenfalls isolierte leitende Ader mitgewickelt wird, so daß die Entfernung nahezu Null beträgt. Die Enden dieses Innen- oder Parallelleiters (sekundären Leiters) werden frei ausgeführt und an ein Spannungsmeßinstrument geklemmt. Dieses zeigt dann  $-E_i$  direkt an.

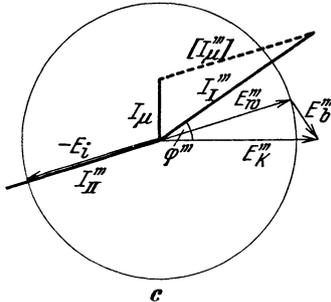


Abb. 191 c. Stromverhältnisse beim Induktionsofen mit Eisenkern.

Natürlich kann von diesen Sekundärklemmen nicht nur Spannung, sondern auch Strom entnommen werden. Wie sieht das Diagramm nun aus?

Hierzu zeichne man Abb.191 b so um, daß  $I_\mu$  vertikal steht, wie in Abb.191 c. Die Komponenten von  $I_\mu$  werden nicht benötigt und bleiben der Übersichtlichkeit halber weg.

Die rechte Seite des Diagramms entspricht den praktischen, tatsächlich gegebenen Verhältnissen, für die linke Seite sei noch der Idealzustand als vorhanden angenommen.

Dann fallen bei Stromentnahme Strom und Spannung der Richtung nach zusammen (sind gleichzeitig).  $J_{II}'''$  ist daher auf demselben Strahl aufzutragen, der  $-E_i$  enthält. Um aber diesen Strom  $J_{II}'''$  liefern zu können, muß die Primärseite eine entsprechend größere Strommenge  $J_I''$  aufnehmen. Die Seite ( $J_I''$ ) des Dreieckes ist parallel und längengleich mit  $J_{II}'''$ , dadurch ist  $J_I''$  der Größe und Lage nach unbestimmt und schließt mit der Richtung von  $E_K''$  den Winkel  $\varphi'''$  ein, den man Phasenverschiebung nennt.

Die Energieaufnahme der rechten (primären) Seite ist durch das Produkt  $J_I'' E_K'' \cos \varphi'''$  gegeben.

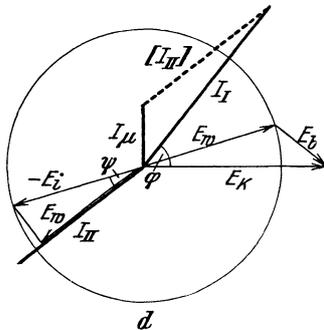


Abb. 191 d. Stromverhältnisse beim Induktionsofen mit Eisenkern.

Ein Blick auf Abb.191 c zeigt, daß primär mehr Strom aufgenommen als sekundär geliefert wird. Das Verhältnis beider nähert sich um so mehr dem Werte 1, eine je größere Annäherung an den Idealfall erreicht wird. Man sieht auch hier die hohe Bedeutung des Magnetisierungsstromes und die Vorteile, ihn möglichst klein zu halten.

Sekundär nahmen wir bisher noch ideale Verhältnisse an, die unerreichbar sind und bei Induktionsöfen sogar notwendigerweise auch nicht einmal annähernd erreicht werden können, denn  $J_{II}'''$  wirkt ja auf den Magnetkern nicht in idealer Weise, das heißt quantitativ zurück, ebensowenig wie die Primärspule ideal war. Deshalb wird  $J_{II}'''$  mit  $-E_i$  nie zusammenfallen, sondern wie in Abb.191 d auch einen Phasenverschiebungswinkel  $\psi$  einschließen, der auf  $\varphi$  vergrößernd zurückwirkt. Die möglichste Einschränkung der Phasenverschiebung  $\varphi$  bildet das große Problem bei der Konstruktion der Induktionsöfen.

Stets wird  $J_{II} E_i \cos \psi = J_I E_K \cos \varphi - V$  sein.  $V$  sind die Verluste durch den Leitungswiderstand der Spule, durch Wirbelströme in dieser und dem Kern und durch die Magnetisierungswärme;  $V$  ist jene Energie, die zur Umkehrung der Elementarmagnete nötig ist.

Auch aus Abb.191 d geht noch deutlich hervor, wie wichtig es ist,  $J_\mu$  möglichst klein zu halten.

Der Induktionsofen ist, wie eingangs erwähnt, ein Transformator, der nur eine einzige Sekundärwindung besitzt, die von dem geschmolzenen Metall gebildet wird, das in einer

horizontalen, kreisförmigen Rinne liegt. Die Zustellung und die nötige Hilfsmauerung bedingt einen Transformator Kern mit ziemlich großem Fenster. Das bedeutet aber eine Vernachlässigung der Bedingung 2, die hier nicht erfüllt werden kann.

Um so mehr sind die anderen erfüllbaren Bedingungen einzuhalten: 1. Bestes Transformatoreisen und in erster Linie, als wichtigste erfüllbare Bedingung, entsprechend großer Querschnitt des Kernes, um das Optimum der Magnetisierbarkeit nicht zu überschreiten. Der magnetische Zustand wird allgemein durch die Zahl der „Kraftlinien je Quadratcentimeter“ ausgedrückt, ein Maß, dessen Erklärung hier zu weit führen würde. Es genügt, zu wissen, daß ein Induktionsofen bei 5000—7000 Kraftlinien (oder „5000 bis 7000 Induktion“) am besten arbeitet.

Nicht veröffentlichte Versuche<sup>1</sup>, die vor nunmehr zwanzig Jahren an einem Versuchsofen durchgeführt wurden, bestätigten die Richtigkeit dieser Forderung. Ihrer Erfüllung steht das Bestreben der Konstrukteure entgegen, möglichst an Material zu sparen und daher, wie bei den Transformatoren, mit gewaltsam magnetisch übersättigtem Eisen zu arbeiten, dem man 15000 und noch mehr Kraftlinien je Quadratcentimeter aufzwingt. Die besten Resultate wurden bei einer Sättigung erzielt, die als Maximalwert der momentanen Magnetisierung 8000 Kraftlinien erreicht, das entspricht der oben genannten günstigsten effektiven Induktion von 5000—7000.

#### b) Elektrodynamische Erscheinungen an Induktionsöfen.

Dieselben elektrodynamischen Kräfte, die in Elektromotoren wirksam sind, wirken auch zwischen den Primär- und Sekundärspulen eines Transformators und in ganz gleicher Weise zwischen dem Metallbad und der Primärwicklung der Induktionsöfen. Da die gleichzeitig fließenden Ströme einander stets entgegengesetzt sind, kommt es zwischen dem Inhalt der Schmelzrinne und der Primärwicklung zu abstoßenden Kräften von sehr bedeutender Größe, denen die metallische Flüssigkeit als beweglicher Teil in ganz bestimmter Weise nachgibt, indem sich das Schmelzbad gleichzeitig nach auswärts, also vom Rinnenzentrum radial weg, und — je nach der Spulenlage — aus seiner Ebene nach auf- oder abwärts zu entfernen strebt.

Diese Erscheinungen lassen sich am besten an einem Ofen der einfachsten Type Kjellin (kreisrunde Schmelzrinne, konzentrisch angeordnete Primärspule) studieren und erklären.

Wählt man den Querschnitt der Rinne so, daß die Sohle des Bodens ganz schwach nach dem Zentrum geneigt ist, also einen flachen Trichter bildet, und füllt man nur so viel flüssiges Metall ein, daß es sich an der Innenseite der Rinne zu einem geschlossenen Ring sammelt, der nicht die ganze Breite der Sohle bedeckt, so bemerkt man beim langsamen Anlassen des Stromes, wie der Ring die geneigte Rinnensohle hinaufkriecht, dabei an Durchmesser zunimmt und schließlich — bei einiger Geschicklichkeit des Experimentators — sich an der Peripherie der Rinne anlegt und entgegen der Schwere, dort liegen bleibt<sup>1</sup>.

Die Ursache dieser Erscheinung ist klar. Jedes Leiterelement des geschmolzenen Metallringes sucht sich von der Spule, in der stets ein entgegengesetzter Strom fließt, zu entfernen und nimmt den Weg geringsten Widerstandes, nämlich entlang der geneigten Rinnensohle nach aufwärts.

Füllt man nun die Rinne mit größeren Mengen geschmolzenen Metalles, so beobachtet man, daß sich die Oberfläche schräg in Form eines Trichters einstellt. Jedes Leiterelement sucht sich von dem Zentrum zu entfernen, strebt also horizontal nach außen, gleichzeitig wirkt die Schwerkraft vertikal nach unten. Aus diesen Komponenten ergibt sich eine Resultierende, gemäß welcher sich die Oberfläche schräg einstellt.

Die Schlacke, die als weitaus schlechterer Leiter nur von einer geringen Strommenge durchflossen wird, unterliegt dieser abstoßenden elektrodynamischen Kraft nur in prak-

<sup>1</sup> Originalmitteilung von Dr. O. Gamber.

tisch unmerklichem Maße, so daß ihre Oberfläche horizontal steht. Es kann daher der Fall vorkommen, daß die Schlacke, die vor der Einschaltung des Stromes das Metallbad bedeckte, nach Stromschluß einen mehr oder weniger breiten Ring der Oberfläche an der äußeren Rinnenwand freiläßt. Das blanke Metall bildet dann an der Luft Oxydhäutchen<sup>1</sup>, die gleich der Schlacke schlechte Elektrizitätsleiter sind, infolgedessen der abstoßenden Kraft nicht unterliegen, sondern einzig der Schwerkraft folgend, die glatte geneigte Metallfläche abwärts zur Schlacke gleiten. Das fortwährende Entstehen der Oxydhäutchen und ihr ebenso fortwährendes Hinabgleiten täuschen eine Bewegung des Bades vor, als ob dieses in einer rollenden, an der Oberfläche gegen das Zentrum gerichteten Bewegung wäre. Es handelt sich hier um eine Täuschung, denn die tatsächliche Bewegung des Bades geht in umgekehrter Richtung vor sich, wie dies später erläutert werden soll.

Man zog aus dem elektrodynamischen Prinzip noch einen anderen Trugschluß. Weil sich isolierte Leiter (das Metallbad ist als solcher anzusprechen) voneinander zu entfernen trachten, wenn sie von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen werden, nahm man an, daß sich auch im Sekundärleiter selbst die induzierten Stromlinien möglichst vom zentralen Primärteil zu entfernen trachten. Diese Annahme war unbewiesen, aber sie wurde unbestritten hingenommen, wie die Durchsicht der Literatur zeigt. Daher hat Gamber vor Jahren eine Reihe von bisher unveröffentlichten Versuchen unternommen, die einwandfrei das Gegenteil der bisherigen Anschauungen zutage förderten<sup>2</sup>.

Zunächst wurde um das Joch eines Versuchsofens von 12 kW ein flacher ebener Kupferblechring an Stelle der Rinne gelegt. Der Ring war aus einem einzigen Stück Kupferblech, ohne Fuge, Nietung oder Lötung herausgeschnitten; seine Breite entsprach der Rinnenbreite. Zu seiner Anbringung mußte das Magnetjoch geöffnet und dann wieder instand gesetzt werden. Wurde nun der Primärstrom eingeschaltet, dann begann das blanke Kupfer an der Innenseite des ebenen Kreisringes anzulaufen, ein Zeichen, daß dort, und nicht im äußeren Teil, die größte Stromliniendichte herrsche. Derselbe Versuch wurde mehrmals wiederholt, schließlich ein kupferner Kreisring in gepulverte Holzkohle eingebettet und plötzlich stark mit Strom belastet. Hierbei schmolz der innere Teil des Ringes, während der äußere eben gerade Anlauffarben zeigte.

Dem Einwande, daß es sich hier nicht um Eisen, sondern um Kupfer, also nur ein unmagnetisches Material handle, kann entgegengehalten werden, daß Eisen schon bei seinem unteren Umwandlungspunkte (700—750°) die magnetischen Eigenschaften einbüße und in geschmolzenem Zustande ebenso unmagnetisch ist wie Kupfer. Um aber die Einwände völlig zu entkräften, wurden die Versuche mit Stahlblech und mit weichstem Transformatorblech wiederholt, also mit Eisen von hoher und solchem von niederer magnetischer Remanenz, Hysteresis und allgemeiner Elektrisierbarkeit, um alle Einflüsse an Extremen zu studieren.

In jedem Falle ergab sich dieselbe Erscheinung, wie beim Kupfer, nämlich daß die Anlauffarben als Zeugen höherer Temperatur, daher auch höherer Dichte der Stromlinien, der Primärspule zunächstliegen.

Um den Nachweis erbringen zu können, daß, dem Falle des Induktionsofens entsprechend, auch bei flüssigen Leitern die gleichen Verhältnisse wie in starren Leitern herrschen, wurde eine Kreisrinne mit rechteckigem Querschnitt und horizontalem Boden hergestellt, genau ausgeschliffen und mit der Wasserwaage in horizontale Lage gebracht. Als Zustellung diente ein Gemisch von drei Teilen Talkumpulver und einem Teil Zement, das den Vorteil hat, auch bei raschem Trocknen weder zu reißen, noch zu schwinden und noch feucht eine rasche Erhitzung auf 1200° verträgt.

Die Rinne wurde mit flüssigem Zinn gefüllt und letzteres auf 1200° andauernd durch Induktion erhitzt, bis die Rinne vollkommen trocken und auf Temperaturkonstanz gebracht war. Nun wurde der Strom für einige Zeit abgestellt, bis das Zinn auf etwa

<sup>1</sup> Originalmitteilung von Dr. O. Gamber.

<sup>2</sup> Die Ergebnisse dieser Versuche sind nachstehend (bis S. 212) erstmalig veröffentlicht.

1100° abgekühlt war. Beim neuerlichen plötzlichen Einschalten des Primärstromes — bis zur Überlastung, um eine möglichst rasche Wiedererhitzung zu erreichen — wurde auch hier das Zinn zuerst an der Innenseite der Rinne weißglühend. Die Zone höherer Temperatur hob sich grell gegen das umgebende Metall ab. Dieser Versuch wurde durch mehrere Stunden wiederholt und die Temperaturdifferenzen gemessen. Sie betragen je nach der Spannung, die man dem Ofen aufdrückte, 60—150°, wobei die höhere Temperatur stets an der Innenseite der Rinne auftrat.

Die beschriebenen Versuche waren mit 100—120 Perioden je Sekunde durchgeführt worden. Es war a priori nicht ausgeschlossen, daß sich die Verhältnisse bei anderen Periodenzahlen ändern könnten. Die Versuche (auch die mit den Blechringen) wurden daher bei 20—30 Perioden und bei 500 Perioden wiederholt, ergaben aber stets den gleichen Effekt.

Somit erscheint bewiesen, daß ganz allgemein bei elektrischer Induktion sich wohl die Leiterwindungen des primären und sekundären Stromkreises abstoßen, daß dies aber nicht von den Stromlinien innerhalb der Leiter selbst gilt.

Diese Erscheinung kann nur darin ihren Grund haben, daß die induzierten elektromotorischen Kräfte in einem ring- oder spulenförmigen Sekundärleiter an der Innenseite, also nahe dem Magneteisen am größten sind und dort den größten Stromfluß hervorrufen, zumal dort auch der Weg und damit der Widerstand am kleinsten ist. Direkte Spannungsmessungen am strombelasteten, mit Zinn gefüllten Ofen bestätigten diese Annahme. Die Messungen erfolgten über einen Winkel von 120 bzw. 180° des Rinnenkreises, innen wie außen. Sie ergaben für den Versuchsofen 1,2 V an der inneren, 0,8 V an der äußeren Seite als totale Rinnenspannungen.

Eng mit dem Verlaufe der Stromlinien hängt das Rollen des Metallbades zusammen. Zum Studium dieser Frage wählte man eine Kreisrinne mit halbkreisförmigem Bodenquerschnitt, die dem Rollen möglichst wenig Widerstand entgegengesetzt. Sie wurde mit Zinn gefüllt und bis 1200° erhitzt, wie vorhin beschrieben. Dann, nach Erreichung der Temperaturkonstanz, wurde das Metall der Abkühlung bis auf Rotglut überlassen und hierauf plötzlich mit Strom überlastet. Es trat die bereits erwähnte hell leuchtende Innenzone auf, und man sah deutlich, wie das heißere Metall die schräge Oberfläche empor nach außen floß, während gebildete Zinnoxidhäutchen über die schräge Metallfläche hinab, also nach innen glitten und eine entgegengesetzte Metallbewegung vortäuschten. Diese Täuschung verschwand in reduzierender Atmosphäre.

Das Einhalten eines kalten, angeruhten Kupferstabes rief einen von diesem weg, radial auswärts gerichteten Wirbelzopf von kaltem Metall hervor, der ebenfalls über die Rollrichtung keinen Zweifel ließ. Ferner wurden in die Rinne große, kalte Zinnbrocken eingeworfen, die das Metall am Boden kühlten. Unmittelbar darauf erschien an der Innenseite der Rinne ein deutlicher dunkler Fleck, der quer über die Oberfläche nach außen gespült wurde. Schließlich wurde ein leichtes Glimmerrädchen mit Schaufeln, wie bei einem unterschlächtigen Wasserrad, in das geschmolzene, unter Strom stehende Metall oberflächlich eingetaucht. Seine lebhaftige Rotation entgegen den täuschenden Oxydhäutchen mußte auch den letzten Zweifel beheben.

Das Rollen des Metalles ist somit eine rein thermische Erscheinung. Das an der inneren Rinnenseite erhitzte Metall steigt auf, überquert das Bad von innen nach außen und sinkt dort zu Boden, um seinen Kreislauf von neuem anzutreten.

Hiermit dürfte wohl ein für allemal die Unrichtigkeit der in der Literatur immer wieder gebrachten Angaben über die Rotationsrichtung erwiesen sein (Abb. 192).

Eine andere elektrodynamische Erscheinung ist das sogenannte „Pinchen“, wie es Hering zuerst benannte.

Bei zu hoher Strombelastung oder zu großer Leitfähigkeit des flüssigen Metalles reißt der Ring an einer Stelle unter Auswerfen von Tropfen, aber auch schwererer Bomben. Sobald der Ring gerissen ist, ist die Rinne natürlich stromlos. Die Metallenden suchen

sich, der Schwerkraft folgend, wieder zu vereinigen. Im Augenblicke der ersten Berührung schließt sich der Strom und reißt sofort wieder die Strombrücke unter Umher-schleudern von Tropfen ab. Die Folge davon ist, daß binnen kurzem der Rinneninhalt erstarrt.

Die Ursache davon ist gleichfalls eine elektrodynamische und mit der Schrägstellung verwandt. Ein Drahting, den man um den Magnetschenkel bzw. um die Primärspule legt, wird wie die Rotorwicklung in einem Motor abgestoßen. Auf den Ring wirken die einzelnen Primärwicklungen abstoßend, weil sie von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen sind. Wäre der Ring genau in der Mittelebene der Spule, so daß gleich viele Windungen ober und unter ihm lägen, dann wäre er im labilen Gleichgewicht, das nicht dauernd erhalten werden kann. In jeder anderen, zur Spulennachse normalen Ebene hat er das Bestreben, mit großer Kraft oben oder unten über die Spule zu schlüpfen. Das gleiche Bestreben liegt auch dann vor, wenn der Ring aus flüssigem Metall besteht.

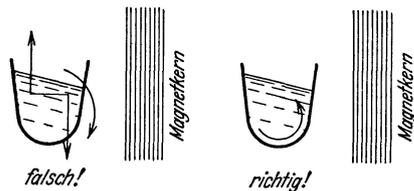


Abb. 192. Rotation des Schmelzgutes in der Rinne eines Induktionsofens.

Solange das Gewicht des Metallbades die abstoßende Kraft weit überwiegt, kommt es bloß zur Schrägstellung; anders, wenn die abstoßende Kraft sich in irgendeinem Elemente des Metallbades dem Eigengewichte nähert, wengleich sie es noch bei weitem nicht erreichen muß: dann besteht die Gefahr, daß dieses Leiterelement mit großer Kraft herausgeschleudert wird.

Das ist u. a. bei starker lokaler Rinnenverengung, z. B. durch Schlackenansätze der Fall, oder wenn allgemein die Strombelastung zu hoch wird.

Um den Mechanismus zu begreifen, möge die Vorstellung angenommen werden, der Metallring sei zunächst nicht flüssig, sondern teigig.

Infolge der abstoßenden Kraft würde die Schwere des Ringes überwunden, und er an einer Stelle gehoben, so daß die Oberfläche einen Hügel bildet. Dieser schmelze und fließe ab. Dadurch wird der Ringquerschnitt an dieser Stelle enger, und dieser verengte, also erleichterte Teil, wird neuerdings nach oben gebogen, weil er von derselben Strommenge durchflossen wird und die gleiche Abstoßung wie vorhin erleidet. Wieder fließt der Hügel ab. Man sieht, daß sich der Leiter an dieser Stelle andauernd weiter verengt, bis schließlich die Abstoßung die Schwere vollends überwindet.

Ganz ähnlich ist der Vorgang im Induktionsofen. Das geschmolzene Metall beginnt an einer Stelle zu schweben, entfernt sich mit zunehmender Kraft von der Rinnensohle, bis die letzte Strombrücke mit Vehemenz herausgeschleudert wird. Man sagt: der Ofen pincht.

Am stärksten ist die Abstoßung, wenn die Primärspule unter der Rinne angeordnet ist. Es läge nahe, die Spule zur Vermeidung des Pinchens über der Rinne anzuordnen, so daß ihre abstoßende Kraft mit der Schwerkraft gleichgerichtet ist. Auch bei dieser Spulenanordnung kann das Pinchen nicht völlig vermieden, aber weitgehend eingedämmt werden. Bei hohen Belastungen, wie sie bei Metallen hoher Leitfähigkeit nötig sind, bietet auch diese Anordnung keine hinlängliche Sicherheit.

Eine Anzahl Induktionsofenkonstruktionen, die das Pinchen und die Schrägstellung vermeiden sollten, trugen sekundäre Hilfswicklungen, die meist auch regulierbar waren, und deren Energie dem Schmelzbade nicht zugute kam. Alle haben den Nachteil, daß sie die Energie im Schmelzring schwächen, ihr Effekt also kein anderer ist als die Verminderung der nutzbaren Energieaufnahme. Allerdings wird mit verminderter Energiezufuhr die Pinchgefahr und die Schrägstellung wesentlich herabgesetzt, weil die abstoßende Kraft immer in einem ganz bestimmten Verhältnis zur aufgenommenen Energie steht. Eine Abhilfe kann also nur durch Änderung der Krafrichtung, nicht aber der Kraft selbst erzielt werden, und erstere ist nur in beschränktem Maße frei wählbar.

Ganz im allgemeinen pinchen Öfen mit magnetisch hochgesättigtem Eisenkern viel leichter als solche, bei denen an Transformatoreisen nicht gespart wurde.

Das Metall, an dem das Pinchen am besten untersucht werden kann, ist das Aluminium. Gießt man davon geringe Mengen in die Rinne des noch nicht eingeschalteten, aber entsprechend vorgewärmten Ofens, so beginnt sich der Ring bei allmählicher Einschaltung des Stromes zu winden und zu krümmen. Er steigt an manchen Stellen in die Höhe, verengt sich dort und nimmt an anderer Stelle an Stärke zu. Alsbald, bei weiterem vorsichtigem Steigern der Energiezufuhr, sieht man ganz deutlich, wie das Metall von den kletternden Stellen des Ringes gegen die tieferliegenden abrinnt und erstere immer dünner werden, bis dann eine von ihnen sich hoch aufwölbt und unter Bildung eines blendenden Lichtbogens abreißt. Im selben Augenblicke hört das Krümmen und Winden auf. Das Metall fällt auf der muldenförmigen Ringsohle in sich zusammen, die Enden suchen sich zu vereinigen, aber bei der ersten leisen Berührung prallen sie unter Lichtbogenbildung wieder auseinander. Das übrige geschmolzene Metall zuckt nur leicht, denn der Stromstoß ist zu kurz und zu schwach, so daß er das Metall nicht mehr zu bewegen vermag.

Noch ehe die normale Pinchgrenze erreicht ist, kann das Pinchen sofort herbeigeführt werden, wenn man den flüssigen Ring durch Eintauchen eines Schamottestäbchens verengt.

Es galt nun, zu untersuchen, ob der Pincheffekt nur durch induzierten Wechselstrom oder auch durch Gleichstrom hervorgerufen werden kann, der die Primärspule und den Ring in analoger Weise stationär durchfließt.

Zu diesem Zwecke wurde ein Ofen mit Aluminium gefüllt, normal angeheizt, dann die Wechselstromquelle abgeschaltet und durch die Primärspule wie durch die Rinne Gleichstrom in der dem Wechselstrom äquivalenten Menge hindurchgeschickt. Die nächste Folge war die Schrägstellung und bei Verstärkung eines der beiden Gleichströme konnte dann genau die gleiche Pinchwirkung wie bei Wechselstrom beobachtet werden. Wurde der Magnetschenkel entfernt, dann trat das Pinchen bei Gleichstrom erst unter mehrfach größerer Strombelastung ein.

Für weitere Versuche wurde der Induktionsofen verlassen und eine etwa 20 mm tiefe, 10 mm breite und 500 mm lange, gerade Rinne als Versuchsobjekt gewählt, die in einem Röhrenofen erhitzt werden konnte. Durch das geschmolzene Metall wurde dann Gleichstrom von 400 A geleitet.

Es gelang weder mit Quecksilber noch mit Zinn, noch auch mit Aluminium, irgendeinen Pincheffekt hervorzurufen, selbst Einschnürungen des Metalles konnten bei dieser Stromstärke nicht beobachtet werden.

Dagegen trat der Pincheffekt sofort auf, wenn unter der Versuchsrinne ein Gleichstrom von derselben Intensität parallel zur Rinne, jedoch in entgegengesetzter Richtung geleitet wurde.

Entsprechend den verschiedenen spezifischen Gewichten der Versuchsmetalle setzte das Pinchen bei Aluminium eher ein als bei Zinn und Quecksilber. Die erforderlichen Stromstärken verhielten sich zueinander wie die spezifischen Gewichte.

Verengen des Rinnenquerschnittes an einer Stelle durch Eintauchen eines Quarzstäbchens erleichterte das Eintreten des Pincheffektes um das Vielfache, ganz so wie beim Betrieb des Induktionsofens.

Wie erwähnt, gelang es nicht, das Pinchen bloß durch Strombelastung des geschmolzenen Metalles allein hervorzurufen, stets war die Wirkung eines zweiten elektrischen Feldes zur Hervorrufung der Erscheinung nötig.

Offenbar genügte der zur Verfügung stehende Gleichstrom nicht, um ein von Hering beschriebenes Einschnürungsphänomen im flüssigen Leiter ohne Einwirkung eines zweiten, entgegengesetzten Kraftfeldes hervorzurufen. Hering beschrieb nämlich, wie ein von hohen Stromstärken durchflossener, flüssiger Leiter sich an den Stromzuführungen staut und schwellt, während sich in der Mitte des flüssigen langgestreckten Leiters Einschnürungen einsenken. Diese Einschnürungen sollten durch die gegenseitige Anziehung der Stromlinien zustande kommen.

Auch Versuche, durch starke niedriggespannte Wechselströme Pincheffekte in vertikalen Röhren hervorzurufen, führten zu keinem Ergebnis, ehe die Siedetemperatur des Metalles erreicht war. Das dann eintretende Herausschleudern der Metallmasse dürfte mit der Siedeerscheinung allein ausreichend erklärlich sein.

Die in Wärme umgesetzte elektrische Energie ist bekanntlich  $L = J^2 w$ . Sie dient im Induktionsofen in erster Linie zur Erhaltung auf einer konstanten Temperatur, also zum Ersatz der Wärmeverluste und ist durch die Arbeitstemperatur und das Einsatzvolumen gegeben.

Ist nun infolge hoher Leitfähigkeit des geschmolzenen Metalles  $w$  klein, dann müßte  $J$  entsprechend erhöht werden. Solche Metalle erfordern daher hohe Stromstärken, und diese bringen erhöhte Abstoßung und erleichtertes Pinchen mit sich. In besonders hohem Maße liegt die Pinchgefahr bei Metallen vor, die gleichzeitig gut leitend und spezifisch leicht sind, wie Aluminium.

Es bliebe somit nur der Weg,  $w$  zu vergrößern, d. h. der Rinne einen größeren Durchmesser und engeren Querschnitt zu geben. Viel ist damit nicht erreicht, denn das Verhältnis von Stromdichte zu spezifischem Gewicht, von dem das Pinchen abhängt, ändert sich nicht, während die elektrischen Verhältnisse und die Wärmeökonomie sich ungünstiger gestalten. Eine andere Möglichkeit,  $w$  zu vergrößern, läge darin, die Hauptmenge des Metalles in einem tieferen Sumpf unterzubringen, von dem ein geschmolzener Ring abzweigt und um die Primärwicklung geführt wird. Hierdurch wird aber die Pinchgefahr nur vermehrt.

Man wurde des Pinchens erst Herr, als man die Rinne zu einem geschlossenen Kanal abdeckte und in weiterem Verfolg dieses Gedankens sie nahe dem Boden eines Metallsumpfes einmünden ließ.

Mit der Schaffung des engen Heizkanales sind elektrisch-konstruktive Vorteile verknüpft, welche sich in der Verbesserung des Leistungsfaktors auswirken und dem Konstrukteur die Anpassung an die normale Periodenzahl der Überlandnetze wesentlich erleichtert. Vor allem kann der plumpe Magnetkern wesentlich verkleinert und an passender Stelle, z. B. unter dem Schmelzbad, untergebracht werden. Auch die seitliche Anordnung wird weniger störend, und die Wicklungsverhältnisse nähern sich mehr denen normaler Transformatoren.

Es ist Geschmackssache, ob man die Heizkanäle vertikal oder horizontal anordnet. In jedem Falle ruft die Thermostromung ein gutes Durchmischen des geschmolzenen Metalles im Sumpfe hervor. Bei vertikaler Anordnung wallt das Bad, d. h. es bilden sich über den Kanalöffnungen Hügel, bei horizontaler Anordnung ist die Bewegung im Sumpf horizontal drehend. Beides hat seine Vor- und Nachteile. In ersterem Falle

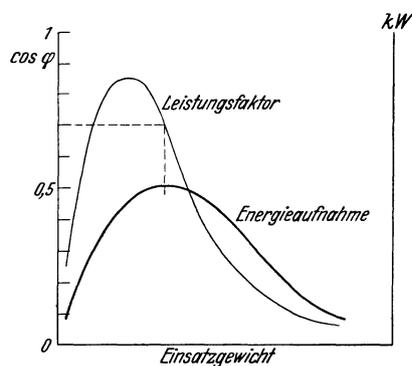


Abb. 193. Leistungsfaktoren und Energieaufnahme des Induktionsofens in Abhängigkeit vom Einsatzgewicht (n. G a m b e r).

besteht die Möglichkeit, daß der Schwall über die Schlacke hervorragt und der Oxydation ausgesetzt ist, im zweiten Falle kann der Einwand erhoben werden, daß die Durchmischung von oben nach unten weniger intensiv sei.

### c) Energieaufnahme und Phasenverschiebung.

Im Leerlauf ist natürlich der Leistungsfaktor ( $\cos \varphi$ ) klein, mit allmählich steigender Chargenmenge nimmt der Leistungsfaktor rascher als die Leistung zu. Schließlich sinkt der Leistungsfaktor wieder, die Energieaufnahme steigt aber mit vermehrtem Einsatz noch an (Abb. 193). Ihr Maximum erreicht sie, wenn  $\cos \varphi = 0,7-0,6$  ist, also bei einer Phasenverschiebung von  $45-55^\circ$ . Wird weiter zuchargiert, so sinkt die Energieaufnahme erst langsam und später rasch. Die Verhältnisse werden besonders ungünstig, wenn der Ofen von vornherein unter Ersparnis an Transformatoreisen für zu hohe Induktion konstruiert wurde.

## d) Bauarten der Induktionsöfen mit Eisenkern (Niederfrequenzöfen).

Das Prinzip der Erhitzung durch Induktionsströme wurde zuerst im Jahre 1887 von de Ferranti vorgeschlagen und durch ein Patent geschützt<sup>1</sup>. Der Ferranti-Ofen war im Wesen ein Manteltransformator mit Scheibenwicklungen, und zwar waren die Primärspulen als Scheiben über und unter der Schmelzrinne in einem doppelten Eisenkern angeordnet.

Den ersten in der Praxis brauchbaren Niederfrequenzofen baute Kjellin im Jahre 1890. Der Kjellin-Ofen, dessen Schema in Abb. 194 gezeigt wird, ist ein Einrinnenofen und gehört in die Gruppe der Kerntransformatoren mit Röhrenwicklung, weil er aus einem einfachen Eisenkern *a* besteht, wovon ein Schenkel mit der röhrenförmigen Primärspule *b* versehen ist, um welche konzentrisch als Sekundärkreis die Schmelzrinne *c* liegt. Die Schmelzrinne wird aus feuerfestem Material *d* hergestellt, das in der Regel eingestampft wird. Zwischen der Zustellung und der Ofenwanne *e* sieht man eine wärmeisolierende Mauerung *f* und gegebenenfalls Pufferschichten *g* vor. Letztere haben den Zweck, Ungleichförmigkeiten infolge Wärmedehnung auszugleichen. Der mit der Primärspule versehene Schenkel des Eisenkernes ist in einer zylindrischen Aussparung *h* untergebracht, deren Achse mit jener des Rinnenringes zusammenfällt. Die Spule wird durch eingeblassene Luft gekühlt und durch eine Kappe *i* vor Staub geschützt. Zum Abschluß der Rinne dienen Deckel *k* aus feuerfestem Material, das in entsprechenden Eisenrahmen gefaßt ist. Da die einzelnen schweren Deckelteile beim Einbringen des Einsatzes abgehoben werden müssen, ist am Transformatorjoch ein Drehkran *l* vorgesehen, der diese Arbeit erleichtert. Der Kjellin-Ofen wurde sowohl feststehend als auch kippbar gebaut. Der Ofen nach vorliegender Abbildung ist feststehend und besitzt zwei Abstichschnauzen *m*<sub>1-2</sub>, die von verschiedenen Höhen der Rinne ausgehen, um beim Abstich entweder einen Sumpf im Ofen zurückzubehalten oder die Rinne ganz entleeren zu können. Der Umstand, daß die Rinne den ganzen Einsatz fassen und möglichst nahe an der Primärspule liegen muß, bedingt einen großen Rinnenquerschnitt bei geringem Durchmesser des Rinnenringes. Der Sekundärstrom hat daher einen kurzen Weg mit kleinem Ohmschen Widerstand zu durchfließen, während der induktive Widerstand groß ist. Bei normaler Periodenzahl würde der Ofen einen sehr ungünstigen Leistungsfaktor aufweisen. Die Länge und der Querschnitt des die Sekundärwicklung darstellenden Schmelzbades ist gegeben, es bleibt somit nur die Möglichkeit, den Leistungsfaktor durch Herabsetzung der Periodenzahl

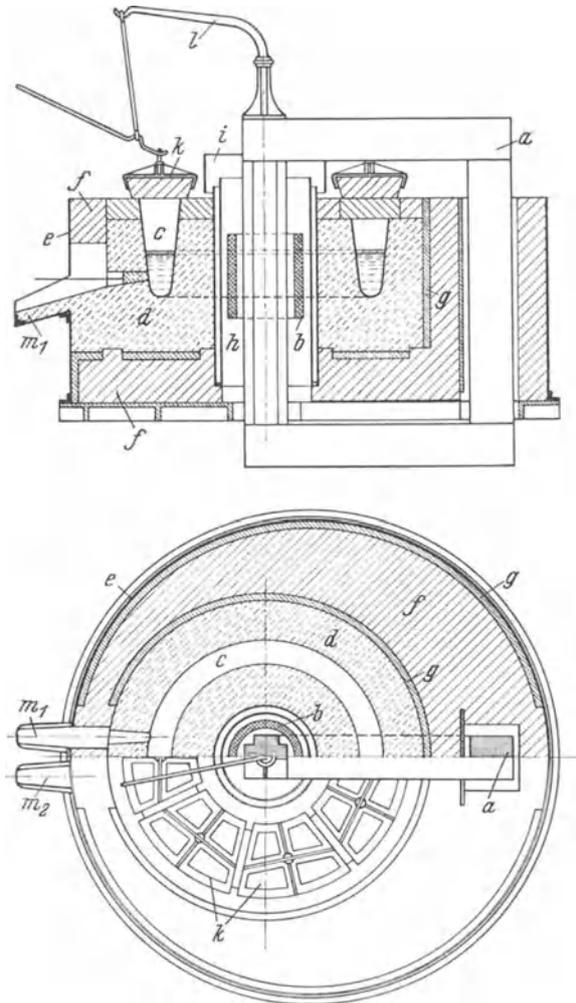


Abb. 194. Einrinnen-Induktionsofen, Bauart Kjellin.

feststehend und besitzt zwei Abstichschnauzen *m*<sub>1-2</sub>, die von verschiedenen Höhen der Rinne ausgehen, um beim Abstich entweder einen Sumpf im Ofen zurückzubehalten oder die Rinne ganz entleeren zu können. Der Umstand, daß die Rinne den ganzen Einsatz fassen und möglichst nahe an der Primärspule liegen muß, bedingt einen großen Rinnenquerschnitt bei geringem Durchmesser des Rinnenringes. Der Sekundärstrom hat daher einen kurzen Weg mit kleinem Ohmschen Widerstand zu durchfließen, während der induktive Widerstand groß ist. Bei normaler Periodenzahl würde der Ofen einen sehr ungünstigen Leistungsfaktor aufweisen. Die Länge und der Querschnitt des die Sekundärwicklung darstellenden Schmelzbades ist gegeben, es bleibt somit nur die Möglichkeit, den Leistungsfaktor durch Herabsetzung der Periodenzahl

<sup>1</sup> E. P. 700.

zu verbessern. Abb.195 zeigt die Beziehung zwischen Einsatzgewicht und Periodenzahl, aus der hervorgeht, daß größere Kjellin-Öfen teure Maschinen mit niederen Periodenzahlen erfordern.

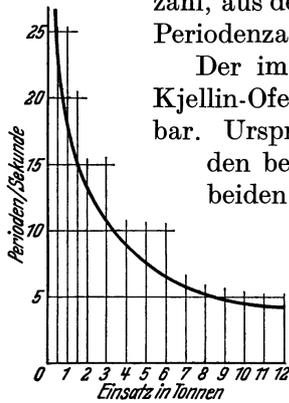


Abb. 195. Abhängigkeit der Periodenzahl vom Einsatzgewicht bei einem Kjellin-Ofen.

Der im Jahre 1905 entstandene Röchling-Rodenhauser-Ofen ist aus dem Kjellin-Ofen hervorgegangen, ist aber für normale Periodenzahlen verwendbar. Ursprünglich waren die beiden Röhrenspulen der Primärwicklung auf den beiden Schenkeln des gemeinsamen Magnetrahmens angeordnet. Die beiden Schmelzrinnen liegen nicht getrennt voneinander um die zugehörigen Spulen, sondern ihre benachbarten Teile sind zu einer breiten Mittelrinne vereinigt. Diese Mittelrinne wurde wesentlich breiter gehalten, als es der doppelten Rinnenbreite entsprochen hätte, auch wurden die beiden inneren Ringteile nicht nach der Achterform gegabelt, sondern zu einem Herd verbunden, dessen Länge dem größten Ringdurchmesser der Rinne gleichkam. Den beim Zweirinnenofen wegen der schmalen Heizrinnen, die nur einen Teil des Schmelzgutes aufzunehmen haben, an und für sich günstigeren Leistungsfaktor wollte man weiter verbessern und versah den Transformator außer mit den Primärwicklungen noch mit Sekundärwicklungen, deren Ströme zu Polplatten geführt waren, die sich an den Enden

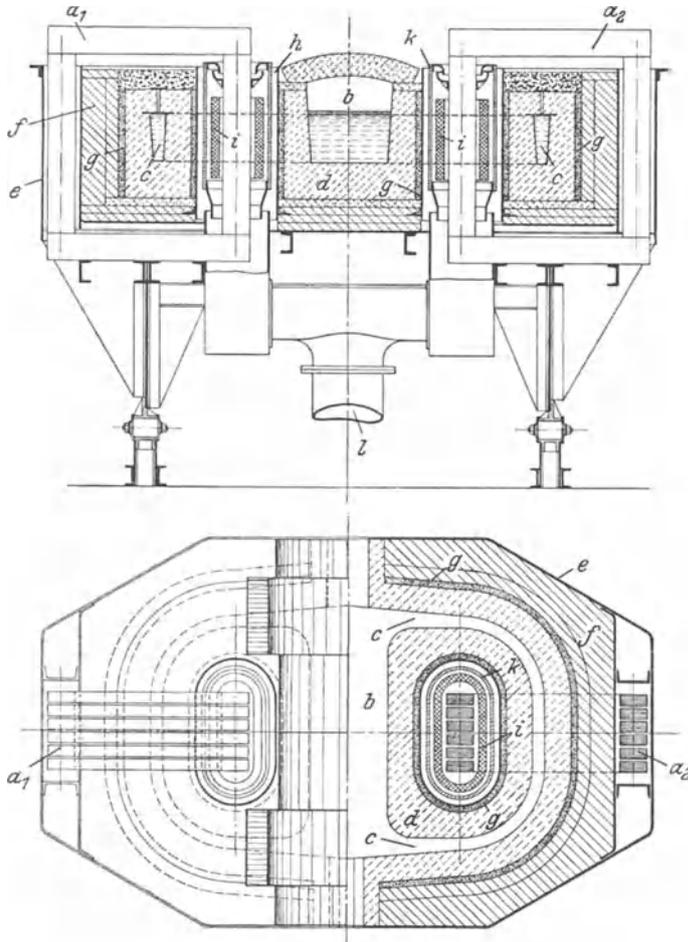


Abb. 196. Zweirinnen-Induktionsofen, Bauart Röchling-Rodenhauser.

der Mittelrinne in der Zustellung befanden. Der Hilfsstrom sollte die Aufgabe haben, bei genügend hoher Temperatur, bei der die Zustellung leitend wurde, die breite Mittelrinne mit einer zusätzlichen Widerstandserhitzung zu versehen. Die Sekundärwicklungen und die Stromzuführungsschienen zu den Polplatten stellten aber eine Komplikation des Ofens dar, die mit den beabsichtigten aber nicht erreichten Vorteilen in keinem Verhältnis stand. In der Folge sah man von der Zusatzbeheizung gänzlich ab. Das Bestreben, die Bauart des Ofens zu vereinfachen, und die Mittelrinne möglichst leicht zugänglich zu machen, führte zu einer neuen Type des Röchling-Rodenhauser-Ofens mit zwei getrennten Transformatoren  $a_{1-2}$  nach Abb.196. Dadurch ist der Raum über der Mittelrinne  $b$  frei, so daß man bei Raffinationsarbeiten den Arbeitsherd gut überblicken kann. Um das Eindringen der Schlacken in die schmalen Seitenrinnen  $c$  zu verhindern, arbeitet man mit gefüllten Heizrinnen, deren Abdeckung tiefer gelegen sein muß, als der Schlackenstand im Arbeitsherd. Die Zustellung  $d$  ist auch hier meist gestampft,

verbessern und versah den Transformator außer mit den Primärwicklungen noch mit Sekundärwicklungen, deren Ströme zu Polplatten geführt waren, die sich an den Enden

wobei das eiserne Ofengefäß *e* zuerst mit einer wärmeisolierenden Ausmauerung *f* versehen wird. Sowohl zwischen Mauerung und Zustellung als auch zwischen Zustellung und den Mänteln *h* der Spulenschächte befinden sich Pufferschichten *g*. Die Primärspulen *i* sind außerdem von besonderen Schutzmänteln *k* umschlossen und mittels Druckluft gekühlt, die aus einem gemeinsamen, unter dem Ofen gelegenen Verteilrohr *l* den Schächten zugeführt wird. Die Röchling-Rodenhauser-Öfen sind durchweg kippbar gebaut. Um die sonst mit Einphasenstrom gespeisten Öfen auch für Drehstrom verwenden zu können, hatte man eine Dreirinntentype entwickelt, doch ging dabei der übersichtliche Arbeitsherd verloren. Man hat in der Folge auch für Drehstromöfen die Zweirinntentype verwendet, doch sind in diesem Falle die beiden Primärspulen durch Scottschaltung miteinander verbunden. Einen 4-t-Ofen dieser Bauart, hergestellt von der Gesellschaft für Elektrostahlanlagen (Berlin) zeigt Abb. 197. Er arbeitet bei 50 Perioden, und größere Einheiten bis zu 8 und 12 t können noch bei 25 Perioden betrieben werden.

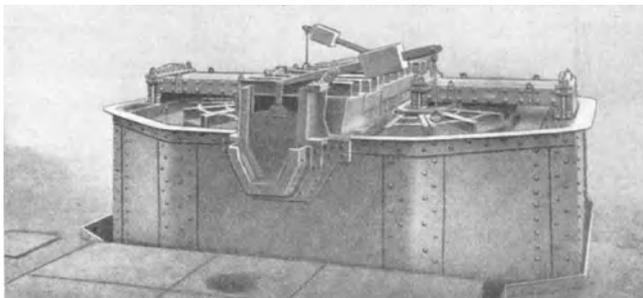


Abb. 197. 4-t-Röchling-Rodenhauser-Ofen.

Eine dem Röchling-Rodenhauser-Ofen ähnliche Type wurde von Frick gebaut. Die neben den Röhrenspulen verwendeten Scheibenspulen der Primärwicklung komplizieren diesen Ofen wesentlich, ohne nennenswerte Vorteile zu bringen.

Obwohl noch immer Niederfrequenzinduktionsöfen für die Stahlerzeugung in Verwendung stehen, werden für diesen Zweck keine neuen Öfen mehr gebaut. Der Niederfrequenzofen wird gegenwärtig für das Schmelzen von Nichteisenmetallen bevorzugt, steht daher für wesentlich kleinere Leistungen und in zweckmäßig abgeänderter Form in Gebrauch. Die Wichtigkeit einer gründlichen Durchmischung der Legierungen hat anfänglich den Bau von Induktionsöfen mit senkrechter Schmelzrinne gefördert, weil man sich bei dieser Lage der Heizrinne den Pinch- und Motoreffekt besonders wirksam dachte. Die eigentliche Heizrinne mündete in einem Schmelzraum und nahm bloß einen geringen Teil, etwa  $\frac{1}{30}$  des Einsatzes auf. Von den Öfen mit vertikaler Heizrinne hat der Ajax-Wyatt-Ofen nach Abb. 198 größere Verbreitung gefunden. Die horizontale Primärspule *a* umschließt den Eisenkörper *b* eines Transformators. Die Heizrinne *c* hat V-förmige Gestalt und mündet oben in den von feuerfester Mauerung *d* umgebenen Schmelzraum. Auch die „Industrie“-Elektroofen G. m. b. H. (Köln) baute Induktionsöfen mit vertikaler Schmelzrinne, hat aber diese Bauart wieder verlassen und ist zu einem Induktionsofen mit nahezu horizontaler Rinne übergegangen. Dieser Ofen ist in Abb. 199 wiedergegeben. Der Schmelzraum ist in einem Eisengefäß unter Zwischenlage von wärmeisolierendem Material eingestampft. Etwas über Bodenhöhe mündet eine schleifenförmige Heizrinne, die mit einer geringen Steigung um einen vertikalen Transformator geführt ist. Schon der thermische Auftrieb allein sichert eine befriedigende Zirkulation des Schmelzgutes. Durch die seitlich angeordnete Rinne bleibt der Transformator leicht zugänglich, ferner ist der hydraulische Druck in der Rinne geringer als bei der vertikalen Ausführung, wodurch die Abnutzung bedeutend herabgesetzt erscheint. Die Primärspule wird durch Druckluft gekühlt. Die Kippung des Ofens erfolgt meist um eine Achse, die knapp unter der Ausgußschnauze gelegen ist. Aus Abb. 200 geht die Lage des Trans-

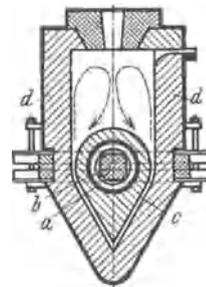


Abb. 198. Schema eines Induktionsofens mit vertikaler Schmelzrinne, Bauart Ajax-Wyatt.

formators gegenüber Schmelzraum und Heizrinne sowie die Kippung und das Gerüst eines 300-kg-Ofens hervor. Siemens & Halske (Berlin) bauen einen ähnlichen Ofen,

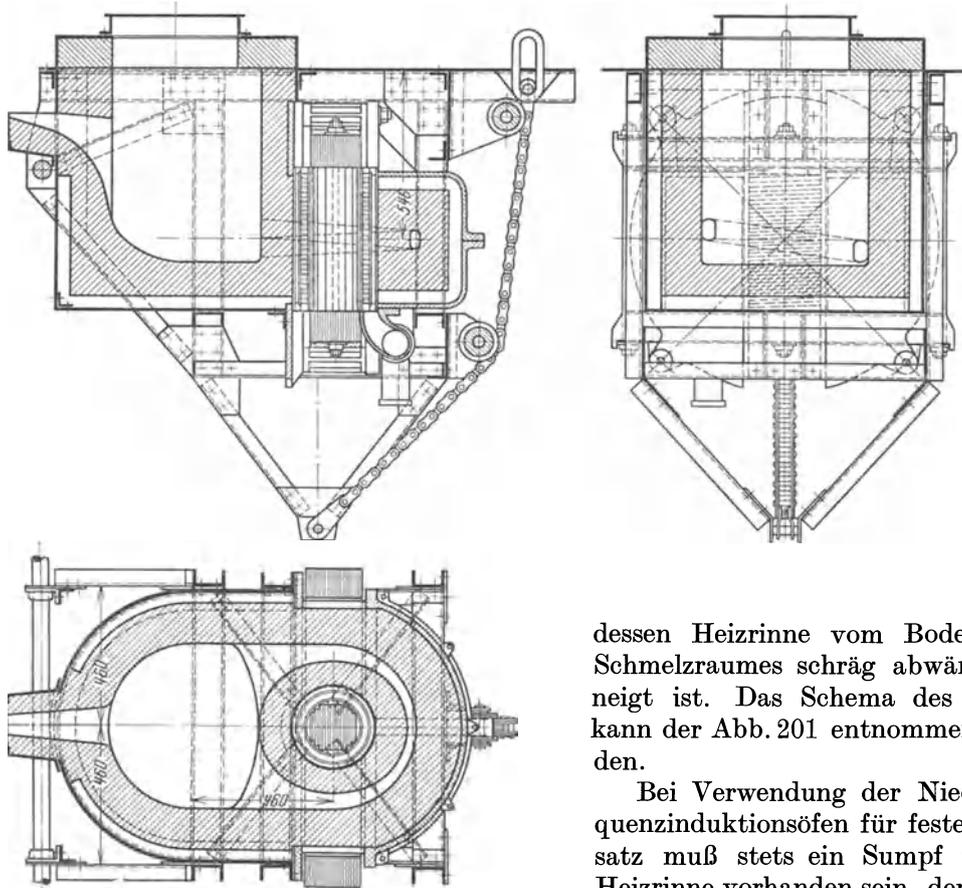


Abb. 199. Induktionsofen, Bauart Russ.

Beim erstmaligen Anfahren eines Ofens legt man, sofern kein flüssiger Einsatz verfügbar ist, einen ringförmigen metallischen Leiter in die Rinne. Oft dient hierzu die Metallschablone, welche zur Herstellung der Rinne benötigt

dessen Heizrinne vom Boden des Schmelzraumes schräg abwärts geneigt ist. Das Schema des Ofens kann der Abb. 201 entnommen werden.

Bei Verwendung der Niederfrequenzinduktionsöfen für festen Einsatz muß stets ein Sumpf in der Heizrinne vorhanden sein, der einen geschlossenen Sekundärkreis bildet.

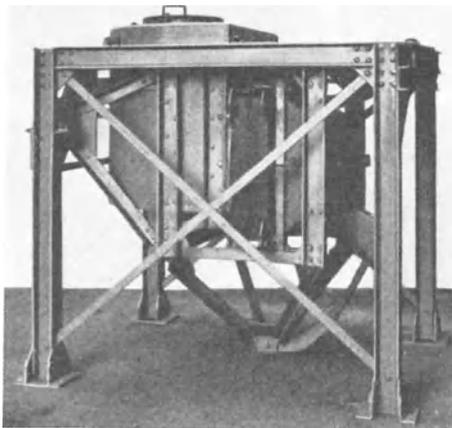


Abb. 200. Induktionsofen, Bauart Russ.

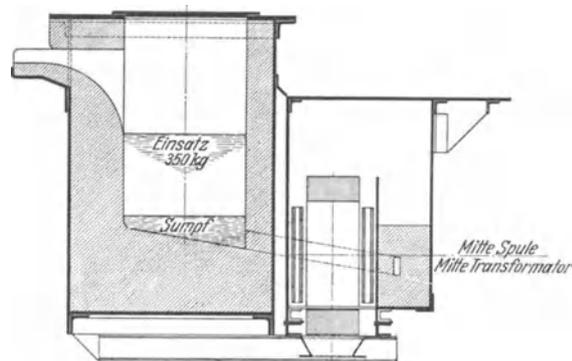


Abb. 201. 350-kg-Induktionsofen, Siemens & Halske.

wurde. Namentlich bei allseitig geschlossenen Rinnen ist aber darauf zu achten, daß die Zustellung durch die Wärmedehnung des Schablonenringes nicht gesprengt werde.

## e) Vor- und Nachteile der Induktionsöfen mit Eisenkern.

An Induktionsofenanlagen fällt vor allem die verhältnismäßige Schwäche der Stromzuleitungen und der Schaltvorrichtungen sowie ihre große Einfachheit auf. Während in der Schmelzrinne Ströme von vielen tausend Ampere kreisen, ist die Primärzuleitung kaum fingerstark. Die bei Lichtbogenöfen nötigen schweren Konstruktionen zur Führung der Elektroden mit ihren schweren Kabeln und die komplizierten automatischen Regulier Vorrichtungen entfallen vollkommen. Demzufolge sind auch die durch letztere hervorgerufenen Störungen ausgeschlossen und höchste Betriebssicherheit gewährleistet. Der Fortfall der Elektroden vermeidet alle durch dieselben hervorgerufenen Kosten und Unbequemlichkeiten und — was für manche metallurgischen Operationen von Wichtigkeit ist — auch ihre chemische Einwirkung auf das Schmelzgut und die Schlacke.

Ein Blick auf die Meßinstrumente, deren Zeiger unbeweglich stillstehen, beweist, daß weder Schwankungen noch Stöße des Stromes auftreten, und nur das leise, gleichmäßige Brummen des Eisenkernes verrät, daß der Ofen unter Strom steht.

Ebenso ruhig rollt das Metall in der Schmelzrinne, sich ständig durchmischend und immer neue Massen an die Schlacke heranzuführend. Lokale Überhitzungen, wie unter den Lichtbögen, treten nicht auf. Wohl herrscht in den Schmelzringen eine etwas höhere Temperatur, aber der Unterschied ist nur unbedeutend und ist daher von keinem nachteiligen Einfluß auf die Schmelze. Insbesondere ist das Verdampfen, das unter dem Lichtbogen stets eintritt und dem die leichter verflüchtigen Metalle, wie Mangan usw., unterliegen, im Induktionsofen vermieden. Mit ihm hat man es in der Hand, eine bestimmte optimale Temperatur während der ganzen Chargendauer innerhalb engster, wenige Grade umfassender Grenzen konstant zu erhalten und automatisch, so oft es gewünscht wird, auf das genaueste zu reproduzieren. Diese stets wiederherzustellende Temperaturkonstanz ohne lokale Überhitzungen, ist ein wichtiger Faktor bei der Erzeugung von Feinstählen und Feinlegierungen, die in Tiegelschmelzöfen weitaus nicht so exakt eingehalten werden kann.

Infolge dieser Eigenschaften eignet sich der Induktionsofen vorzugsweise als vollkommener Ersatz der Tiegelschmelzöfen.

Als die Induktionsöfen aufkamen, bemängelte man, daß sie für die Massenerzeugung von Flußstahl zu klein, für Feinstähle zu groß seien, weil damals von letzteren nicht jene großen Quantitäten gebracht wurden, die ein Induktionsofen bei ständigem Betrieb liefert. Seither hat sich die Lage geändert, und der Bedarf an Feinstählen ist ein ganz gewaltiger geworden. Wenn heute legierte Konstruktionsstähle nicht mehr im Tiegel, sondern im Martin- und Lichtbogenofen erzeugt werden, so geschieht dies, trotz gegenteiliger Behauptung, unter Verzicht auf die höchste Qualität. Hier könnte der Induktionsofen mit Erfolg Wandel schaffen. Ein bedeutendes Stahlwerk stellte schon vor 30 Jahren beste Feinstähle höchster Qualität im Induktionsofen her und erlangte damit Weltruf, vermied es aber, das Erzeugnis als Elektrostahl zu erklären, weil damals gegen diesen noch ein Vorurteil herrschte. Obwohl in demselben Stahlwerk später mehrere Lichtbogenöfen für die Erzeugung von Flußstahl in Betrieb kamen, baute man zur Erweiterung des Feinstahlbetriebes einen zweiten Induktionsofen derselben Type (Kjellin).

Wie schon erwähnt, glaubte man früher, Induktionsöfen nur mit niederer Periodenzahl betreiben zu können und stellte schwere rotierende Umformeraggregate auf, die Wechselstrom oder Drehstrom abnorm niederer Periodenzahl zu erzeugen hatten. Gelegentlich der auf S. 209 erwähnten Versuche, wurde an dem Versuchsofen ein und dieselbe Leistung bei gleichem Material mit Strömen von 10—500 Perioden erzielt. Man mußte nur die Primärspulen und den Kern entsprechend anpassen. Durch die seitherige weitere Entwicklung der Induktionsöfen, die zu geschlossenen, engen Heizkanälen führte, ist die frühere Schwierigkeit überwunden, und die neueren Typen werden direkt, ohne vorherige Umformung, mit Netzstrom betrieben.

Der Metallurg zieht es vor, die Schlackenoberfläche mit einem Blick zu übersehen,

um aus ihrem Verhalten auf den Zustand des darunterliegenden Schmelzbades schließen zu können, was bei den Induktionsöfen alter Type mit einer einzigen breiten Schmelzrinne nicht möglich war. Im Tiegelofen, mit dem der Induktionsofen am ehesten zu vergleichen ist, ist zwar auch keine Möglichkeit, die Schlacke bequem und ohne Abdecken zu beobachten, allein hier war man von alters her daran gewöhnt und fand darin keinen Nachteil, weil man es nicht anders kannte. Den Forderungen der Praktiker kamen die Öfen mit brillenförmigen Heizrinnen und dazwischenliegendem Herd entgegen. Es ist nicht einfach, eine Zustellung für diese Induktionsofentypen zu stampfen und verlangt große Sorgfalt, dann aber sind die Zustellungen ebenso haltbar wie bei Lichtbogenöfen.

Auch der Einwand, es sei der Schlackeneinwirkung nicht genügend Oberfläche geboten, ist hinfällig. Das Verhältnis von Chargenmenge zur Oberfläche ist nicht ungünstiger als bei Lichtbogen- oder Martinöfen; es ist daher eine Selbsttäuschung, wenn man, wie bei gewissen Konstruktionen, darauf ausgeht, bei unveränderter Tiefe einen breiten Herd zu schaffen. Gerade beim Induktionsofen ist es leicht, nach Belieben das Bad eng und tief oder breit und seicht herzustellen.

Das Anfahren des Ofens bedingt das Vorhandensein eines flüssigen Sumpfes, weil stückiges, kaltes Einsatzmaterial einen zu hohen elektrischen Widerstand besitzt. Man hat zwar vorgeschlagen, zum Anfahren einen starken Ring aus Flußeisen in Gußspäne einzubetten, allein man stelle sich diese Manipulation am heißen, eben entleerten Ofen vor. Der schwere Ring muß geöffnet, durch das Fenster gezogen und dann verschraubt oder vernietet werden. Diese Prozedur wäre vor jeder Charge nötig. Mit einem Sumpf zu arbeiten, hat nur dann keine Schwierigkeiten, wenn die nächste Charge der vorhergehenden gleich oder ähnlich zusammengesetzt ist. Zum Übergange von einer Legierung zu einer anderen, unähnlichen, müßten Zwischenchargen eingefügt werden, die den Ofen gewissermaßen ausspülen. Es bleibt somit nur übrig, mit flüssigem Einsatz zu arbeiten. Der Induktionsofen ist eben kein Einschmelzofen für stückiges Material.

Ein weiterer Nachteil ist die starke Magnetisierung der ganzen Umgebung. Eiserne Schaufeln und Ofengeräte würden einfach festgehalten, weshalb mit Bronzeschaufeln gearbeitet werden muß.

Das Ofengefäß, das die Mauerung und die Rinne aufnimmt, muß geschlitzt oder zerteilt sein, um nicht als unerwünschte Sekundärwicklung die Energie an sich zu reißen und hellrot zu glühen, während die Charge erstarrt. Die zufällige Überbrückung dieser Trennspalte ist ein zumindest unangenehmes Vorkommnis.

In den vier Jahrzehnten, welche seit der Konstruktion der ersten Induktionsöfen verflossen sind, ist es gelungen, viele Nachteile und Unbequemlichkeiten zu beseitigen, so daß seine Vorteile immer mehr hervortreten. Zudem hat man übertriebene Erwartungen abgelegt und sich darauf beschränken gelernt, im Induktionsofen nur das zu sehen, wozu er von vornherein geeignet ist, nämlich einen Raffinierofen für Feinstähle und Feinlegierungen. In der Massenproduktion von Flußstahl hat er dem Lichtbogenofen weichen müssen, denn er eignete sich nicht zum Einschmelzen von Altmaterial und den Versuchen, ihn dazu zu zwingen, waren bisher nur halbe Erfolge beschieden; dagegen hat seine moderne Ausgestaltung mit Heizkanälen statt der offenen Rinnen, immer mehr Eingang in die Legierungstechnik gefunden, in der die Lichtbogenöfen wegen ihrer hohen Lokalttemperaturen unverwendbar sind. Ob die weitere Entwicklung wieder zur Stahlbereitung zurückführen wird, ist nicht abzusehen.

## B. Induktionsofen ohne Eisenkern.

Die im vorigen Abschnitt behandelten „Niederfrequenz“-Induktionsöfen waren wie technische Transformatoren aufgebaut. Eine primäre Wicklung ist mit der in sich geschlossenen Schmelzrinne, in der das flüssige Metall die sekundäre Strombahn bildet, durch einen geschlossenen Eisenkreis magnetisch verkettet. Das Prinzip der elektro-

magnetischen Induktion ist an sich aber unabhängig von der Übertragung durch einen Eisenkreis. Jede Spule stellt schon einen „Magnet“ dar, ja jede einzelne Strombahn erzeugt in ihrer Umgebung ein elektromagnetisches Feld. Ganz allgemein lautet das Induktionsgesetz: Ein magnetisches Wechselfeld erzeugt in jeder geschlossenen Schleife, welche von dem Kraftlinienfluß durchsetzt wird, eine Spannung  $E$ , welche der Fläche der Schleife  $F$  (senkrecht zu den Kraftlinien), der magnetischen Induktion  $B$  und der Kreisfrequenz des Wechselstromes  $\omega = 2\pi f$  verhältnisgleich ist.

$$E = c \cdot \omega \cdot F \cdot B \quad (1)$$

( $c$  ist eine Maßstabsgröße:  $c = 10^{-8}$ , wenn  $F$  in  $\text{cm}^2$ ).

Besteht die Schleife aus einem elektrischen Leiter, dessen Enden kurzgeschlossen sind und der den Widerstand  $R$  hat, so entsteht durch die induzierte Spannung in dem Leiter der Induktionsstrom<sup>1</sup>

$$J = \frac{E}{R}. \quad (2)$$

Die auf die Leiterschleife übertragene Leistung ist dann

$$N = J^2 \cdot R = \frac{E^2}{R} = \frac{c^2 \cdot \omega^2 \cdot F^2 \cdot B^2}{R}. \quad (3)$$

Diese Leistung wird in der Leiterschleife restlos in Wärme umgesetzt.

Gleichung (3) ist die allgemeinste Darstellung der Leistungsübertragung durch Induktion. Die Gleichung läßt die beiden grundsätzlich verschiedenen Wege erkennen, welche die technische Entwicklung der Induktionsheizung gegangen ist. Die Leistung ist einmal der Induktion  $B$  und zum andern der Frequenz  $\omega$  bzw.  $f$  quadratisch proportional. Der eine Weg, der ältere, ist der bereits beschriebene: Bei niedriger Frequenz wird die Induktion durch Anwendung eines geschlossenen Eisenkreises gesteigert. Der andere Weg ist die Steigerung der Frequenz unter Verzicht auf die Erhöhung der Induktion durch Eisen. Dies führt auf den Induktionsofen ohne Eisenkern oder, wie er anfangs allgemein genannt wurde, „Hochfrequenzofen“. Da für den Übergang von hohen auf mittlere und auch tiefe (netzübliche) Frequenzen keine grundsätzliche Grenze besteht, ist die Bezeichnung „ohne Eisenkern“ kennzeichnender als die nach der Höhe der Frequenz.

Der Aufbau des Ofens ergibt sich im wesentlichen aus dem physikalischen Prinzip. Eine zylindrische Spule, durch welche Wechselstrom geschickt wird, erzeugt das magnetische Wechselfeld. Über die Höhe der Frequenz, welche zu wählen ist, wird nachher noch ausführlicher gesprochen. In einem metallischen Körper, welchen man in das im Inneren der Spule konzentrierte Feld bringt, werden wie in der oben angeführten geschlossenen Leiterschleife Ringströme großer Intensität erzeugt, welche den Körper erwärmen. Während also bei dem vorher behandelten Niederfrequenzinduktionsofen das Schmelzgut eine ringförmige Rinne erfüllen mußte, welche den Eisenkern umschließt, kann hier der Herd die metallurgisch und thermisch sehr viel günstigere Form eines Tiegels erhalten, der konzentrisch von der Primärspule umschlossen ist (Abb. 202). Der Name „Induktionstiegelofen“ wird deshalb auch mehrfach hierfür gebraucht. Neben den geringeren Wärmeverlusten, dem einfacheren Aufbau und der größeren Haltbarkeit des Futters bringt diese Herdform als wesentlichsten Vorteil gegenüber der Schmelzrinne die Möglichkeit, den kalten Ofen mit festem Einsatz zu beschicken. In dem Herd braucht kein flüssiger Sumpf zurückzubleiben. Auch bei stückigem Einsatz bilden sich die Wirbelströme in jedem einzelnen Stück aus und erwärmen den Einsatz bis zum Schmelzen. Im Gegensatz zum eisengeschlossenen Induktionsofen ist daher der eisenlose Induktionsofen auch für den unterbrochenen Betrieb geeignet.

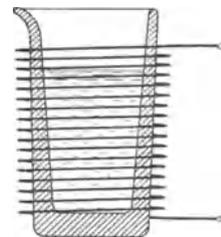


Abb. 202. Induktionstiegelofen.

<sup>1</sup> Zur Vereinfachung der Darstellung ist der induktive Schleifenwiderstand hier vernachlässigt.

## a) Geschichtliches.

Die ersten Vorschläge, die Energie hochfrequenter Wechselfelder für die Erhitzung von Metallen zu verwenden, gehen auf die Anfänge der Hochfrequenztechnik zurück. Bereits 1905 erhielt die Soc. Schneider (Creusot) ein französisches Patent<sup>1</sup> unter dem Titel: Elektrischer Induktionsofen für hochfrequente Ströme, das eine vollständige Beschreibung eines Hochfrequenzofens enthält. Das Patent läßt die Frage der verwendeten Hochfrequenzstromquelle sowie überhaupt der elektrischen Dimensionierung offen. Praktische Ergebnisse sind nicht bekannt geworden. Aus demselben Jahr stammt ein schwedisches Patent, in dem O. Zander<sup>2</sup> vorschlägt, eine Primärwicklung unmittelbar um einen Tiegel zu legen, in welchem der Einsatz durch Wirbelströme erhitzt wird. Zur Ausführung ist der Gedanke offenbar nicht gekommen. In den Jahren 1912/13 gelang es A. Debuch, im Schwingungskreis eines Poulsen-Lichtbogengenerators Proben von etwa 20 g Zinn oder Zink zum Schmelzen zu bringen. Die Versuche wurden damals aber nicht veröffentlicht und abgebrochen.

Neuer Anstoß kam 1916 in Amerika durch E. F. Northrup. Zur Hochfrequenz-erzeugung verwendete er zunächst die inzwischen für die Bedürfnisse der drahtlosen Telegraphie entwickelte Methode der Stoßerregung mit Funkenstrecke. Im angeschlossenen Schwingungskreis aus Ofenspule und Kondensatoren (vgl. Abb. 206, S. 227) erhielt er dabei gedämpfte Schwingungen hoher Frequenz. Die einem Hochfrequenztechniker schon damals geläufige Maßnahme, den bei den hohen Frequenzen überwiegenden induktiven Widerstand des Ofens durch Kondensatoren zu kompensieren, d. h. hochfrequenz-technisch gesprochen, den Ofenkreis abzustimmen, erhält er durch Patente<sup>3</sup> geschützt. Mit einer Funkenstrecke anderer Konstruktion geht unabhängig M. G. Ribaud (Straßburg) einige Jahre später denselben Weg. Beide arbeiten zunächst mit Frequenzen zwischen 50 000 und 100 000 Hz auf Öfen für einige Kilogramm Schmelzgut. In Deutschland gibt das Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung (Düsseldorf) die erste Anregung zu eigener Entwicklung auf diesem Gebiete, die 1924/25 zunächst gemeinsam mit der C. Lorenz-AG. (Berlin-Tempelhof) aufgenommen wird. Entgegen den ersten Ausführungen in Amerika und Frankreich geht die Entwicklung in Deutschland, an der sich als Lizenznehmer der amerikanischen Patente<sup>3</sup> bald auch Siemens & Halske und Hirsch, Kupfer- und Messingwerke (Eberswalde) beteiligen, von Anfang an auf die Verwendung der Hochfrequenzmaschine als Stromquelle hinaus, die für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie bereits seit einigen Jahren entwickelt war. Die theoretischen Arbeiten, welche bis dahin aus Amerika<sup>4</sup> und Frankreich<sup>5</sup> vorlagen, begnügten sich mit Näherungslösungen, welche jedoch für die weitere Entwicklung nicht ausreichten. Eine eingehende theoretische Grundlegung der induktiven Erwärmung ohne Eisenschluß wurde 1926 von F. Wever und W. Fischer<sup>6</sup> veröffentlicht, unabhängig von einer kurz vorher in England erschienenen Arbeit von Burch und Davis<sup>7</sup>. Weitere theoretische Arbeiten folgten von M. Strutt, F. Walter, W. Esmarch, U. Schwedler<sup>8</sup> und anderen.

## b) Theoretische Betrachtungen.

Da für das Verständnis der weiteren Entwicklung, sowie der Anwendungsmöglichkeiten ein Einblick in die theoretischen Beziehungen notwendig ist, soll versucht werden,

<sup>1</sup> Franz. Pat. Nr. 316627 vom 13. Juli 1905.

<sup>2</sup> Hårdén, J.: Tekn. T. 1923 Nr. 5.

<sup>3</sup> DRP. 398872 vom 4. Mai 1918 und DRP. 409416 vom 13. Nov. 1919 der Ajax-Metal-Co. (Philadelphia, USA.).

<sup>4</sup> Northrup, E. F.: Trans. Amer. electrochem. Soc. Bd. 35 (1919) S. 69; Bd. 39 (1921) S. 331 u. a.

<sup>5</sup> Ribaud, M. G.: J. Physique Radium Bd. 4 (1923) S. 185.

<sup>6</sup> Wever, F., u. W. Fischer: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch., Düsseld. Bd. 8 (1926) S. 149.

<sup>7</sup> Burch, C. R., u. N. R. Davis: Philos. Mag. Bd. 1 (1926) S. 768.

<sup>8</sup> Strutt, M.: Ann. Physik Bd. 82 (1927) S. 605. — Walter, F.: Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 574. — Esmarch, W.: Wiss. Veröff. Siemens-Konz. Bd. 10 (1931) S. 172. Verlag Julius Springer, Berlin. — Schwedler, U.: Arch. Elektrotechn. Bd. 25 (1931) S. 669.

ohne mathematische Ableitungen auf Grund physikalischer Anschauung ein Bild von den ziemlich verwickelten Zusammenhängen zu geben.

Wir betrachten zwei koaxiale, ineinanderstehende Spulen, d. h. einen Lufttransformator ohne Eisen, bei dem die äußere Spule die Primärwicklung, die innere die Sekundärwicklung ist. Bei einem gewöhnlichen Transformator wird von der Sekundärwicklung der transformierte Strom einem außen angeschlossenen Verbraucher zugeleitet und dort etwa in Wärme oder andere Energie umgewandelt, d. h. die übertragene Energie wird dort „verbraucht“. Der Widerstand der Transformatorwicklung selbst ist dabei meist zu vernachlässigen. Dem Vorgang im eisenlosen Induktionsofen nähern wir uns mit der Annahme, daß kein äußerer Verbraucher an die Sekundärwicklung angeschlossen, sondern daß diese direkt kurzgeschlossen sei. Jetzt ist der in der Sekundärwicklung auftretende Kurzschlußstrom nur abhängig von der (geometrischen) Summe aus dem Ohmschen und dem induktiven, oder dem „Wirk“- und „Blind“-Widerstand der Sekundärwicklung. Ist der Ohmsche Widerstand vernachlässigbar klein (dicke Kupferwicklung), so ist der Kurzschlußstrom durch den induktiven Widerstand begrenzt. Die in Wärme verwandelte Leistung ist dann aber sehr gering, denn sie ist gleich dem Produkt aus Stromquadrat und dem hier sehr kleinen Wirkwiderstand. Wird der Wirkwiderstand übermäßig groß (Sekundärwicklung aus einem Halbleiter oder dergleichen), so wird der Strom außerordentlich klein und damit die Wirkleistung wieder gering. Das Maximum der auf die Sekundärseite übertragenen und in Wärme umgesetzten Leistung liegt dazwischen, und zwar bei demjenigen sekundären Wirkwiderstand, der gleich dem Blindwiderstand der Sekundärwicklung ist. Diese Verhältnisse ändern sich nicht, wenn wir statt der sekundären kurzgeschlossenen Spule eine einzige Windung, d. h. einen entsprechenden Hohlzylinder annehmen. Damit sind wir der Ofenform schon wesentlich näher. Machen wir den Sekundärzylinder der Reihe nach aus verschiedenen Metallen, so ist zunächst bei sehr guter Leitfähigkeit die Wärmeleistung gering, da der Blindwiderstand viel höher ist als der Wirkwiderstand. Mit abnehmender Leitfähigkeit steigt die Leistung, bis zu dem Material, für das gerade Wirk- und Blindwiderstand denselben Wert haben. Bei weiterer Verschlechterung der Leitfähigkeit sinkt die Leistung wieder (immer unter Voraussetzung gleicher primärer Stromstärke und konstanter Frequenz). Steigern wir jetzt die Frequenz, so steigt der Blindwiderstand; das Optimum liegt jetzt bei einer geringeren Leitfähigkeit als vorher. Daraus geht ein Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Frequenz hervor: je geringer die Leitfähigkeit, desto höher muß die Frequenz sein, um das Optimum der Energieübertragung zu erreichen.

Sowohl Wirk- wie Blindwiderstand hängen unter sonst gleichen Umständen vom Durchmesser des Sekundärzylinders ab; der Wirkwiderstand steigt direkt, der Blindwiderstand quadratisch mit dem Durchmesser. Bei doppeltem Durchmesser ist also der Blindwiderstand doppelt so groß als der Wirkwiderstand geworden, wenn beide vorher gleich waren. Um auf das Optimum zu kommen, müßte also die Frequenz jetzt nur halb so groß gewählt werden. Der Durchmesser des sekundären Kurzschlußkreises ist also mit in die Beziehung zwischen Frequenz und Leitfähigkeit verwoben, in der Weise, daß die Frequenz um so tiefer sein kann, je größer der Durchmesser ist.

Die Ableitung dieser Zusammenhänge bezog sich auf den idealisierten Fall eines sekundären Hohlzylinders, hat also mit einem gefüllten Schmelztiegel nicht unmittelbar zu tun. Der Übergang von Hohl- zum Vollzylinder bringt aber keine qualitativen, sondern nur quantitative Verschiebungen.

Der Strom in dem hohlen Sekundärzylinder erzeugt seinerseits ebenfalls ein magnetisches Feld, welches dem Primärfeld entgegenwirkt. Ist der Wirkwiderstand praktisch Null, so entsteht sekundär der maximale Strom, der nur durch den Blindwiderstand begrenzt ist. Er ist dem Primärstrom in der zeitlichen Phase genau entgegengesetzt und erzeugt ein Gegenfeld, welches im Innern des Sekundärzylinders das Primärfeld vollkommen aufhebt. Ist ein merklicher Wirkwiderstand vorhanden, so wird das Gegen-

feld schwächer und verschiebt sich auch in der Phase gegenüber dem Primärfeld. Es bleibt also ein kleines Restfeld übrig. Sind Wirk- und Blindwiderstand gerade gleich, so ist das Feld im Innern auf den  $\sqrt{2}$ -ten Teil geschwächt. Wird der Wirkwiderstand sehr groß, der Sekundärstrom also klein, so wird das Primärfeld nicht mehr merklich beeinflusst.

Wir machen nun den Übergang von dem Hohlzylinder auf den Vollzylinder, also auf den gefüllten Schmelztiegel. Wir denken uns den Hohlzylinder aus Material mit verhältnismäßig hohem Widerstand. Durch seinen Kurzschlußstrom ist das Feld im Innern des Zylinders um einen bestimmten Betrag geschwächt. Nun setzen wir einen zweiten, etwas kleineren Hohlzylinder in den ersten. Er befindet sich dann ebenfalls in einem magnetischen Wechselfeld, welches aber schwächer als das Primärfeld ist. Es wird also auch in dem zweiten Zylinder ein Kurzschlußstrom induziert, der aber wesentlich geringer ist, als der in dem ersten. Auch er erzeugt ein Gegenfeld, welches das innere Restfeld weiter schwächt. So kann man fortfahren, bis der ganze Hohlraum mit immer kleiner werdenden konzentrischen Hohlzylindern ausgefüllt ist. Die Stromstärke wird nach der Achse zu immer kleiner und nimmt stetig bis auf Null ab. Die äußeren Zylinder schirmen die Energie von den inneren ab; entsprechend ist auch die Erwärmung des äußeren Zylinders am stärksten. Überwiegt in den Einzelzylindern der Wirkwiderstand gegenüber dem Blindwiderstand, so ist die Feldschwächung nur gering, der Abfall der Stromdichte ist nach der Achse zu annähernd linear. Überwiegt aber umgekehrt der Blindwiderstand, so ist schon nach den ersten Schichten das Feld im Innern so geschwächt, daß praktisch kein merkliches Restfeld mehr übrigbleibt, in den inneren Zylindern also kein merklicher Strom mehr induziert wird. Der Strom ist in den äußeren Schichten konzentriert. Steigert man z. B. die Frequenz, so wächst dadurch der Blindwiderstand gegenüber dem Wirkwiderstand; damit tritt eine immer stärkere Strom- und Feldverdrängung in die äußeren Schichten ein. Dies ist die bekannte Erscheinung der „Hautwirkung“ (Skinneffekt) bei hohen Frequenzen. Die Stärke der Hautwirkung ist bedingt durch die Höhe der Frequenz, aber immer relativ zu Leitfähigkeit und Durchmesser des Materiales, da sie von dem Verhältnis zwischen Wirk- und Blindwiderstand in den einzelnen Schichten abhängt. Je höher die Leitfähigkeit ist, bei um so geringeren Frequenzen wird die Hautwirkung schon bemerkbar.

Zwischen den einzelnen Kurzschlußzylindern besteht keine radiale Spannung. Der physikalische Vorgang wird also nicht geändert, wenn man statt einer Anzahl voneinander getrennter Hohlzylinder einen massiven Zylinder annimmt. Auch in diesem werden Ringströme induziert, welche in konzentrischen Kreisen um die Zylinderachse verlaufen. Wie bei den elektrisch voneinander getrennten Hohlzylindern, ist auch hier die Stromdichte in den Außenzonen wesentlich stärker als innen. Abb. 203 gibt als Beispiel die effektive Stromdichteverteilung in einem induktiv geheizten Kupferbolzen (Leitfähigkeit  $5 \cdot 10^5 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) bei verschiedenen Frequenzen an. Bei geringen Frequenzen fällt die Stromdichte angenähert linear von der Oberfläche nach der Mitte ab. Wird die Frequenz bei konstanter primärer Amperewindungszahl gesteigert, so wird die Stromdichte an der Oberfläche sehr viel höher, die Stromdichtekurven fallen aber nach innen zu sehr viel steiler ab. Der ganze Strom drängt sich mehr und mehr in die äußeren Schichten zusammen. Bei anderer Bolzengröße oder anderer Leitfähigkeit würde sich grundsätzlich dasselbe Bild ergeben, jedoch nach anderen Frequenzen verschoben.

Die exakte Ableitung dieser Stromverteilungskurven würde eine umfangreiche mathematische Behandlung erfordern. Es muß daher auf die Originalliteratur<sup>1</sup> verwiesen werden.

Der Stromdichteverteilung entspricht natürlich auch die Verteilung der Erwärmung. Je stärker die Hautwirkung ist, desto stärker ist die Energieumsetzung in die äußeren

<sup>1</sup> Fischer, W.: Z. Hochfrequenztechn. Bd. 37 (1931) S. 127. — Fischer, W.: Elektrowärme 1932 S. 41 und 67.

Schichten gedrängt. Es gilt zwar auch hier die Eigentümlichkeit aller induktiven Erwärmung, daß die Wärme auf das Arbeitsgut nicht von außen übertragen, sondern im Gut selbst erzeugt wird; hier aber mit dem besonderen Umstand, daß die Wärmequellenverteilung über den Querschnitt nicht gleichmäßig ist, sondern der Hautwirkung des Stromes entspricht.

Die Stärke der Stromverdrängung beeinflusst das Maß der auf den Körper induzierten und in Wärme umgesetzten Leistung. Bestimmend für die relative Stromverdrängung ist ein Parameter

$$q = \pi d \sqrt{2f\mu\kappa} 10^{-9}, \tag{4}$$

welcher den Zusammenhang von Schmelzgutdurchmesser  $d$  (cm), Frequenz des Wechselstromes  $f$ , Permeabilität  $\mu$  und Leitfähigkeit  $\kappa$  (Ohm<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>) des Gutes angibt. In Abb. 203 ist dieser Parameter an den einzelnen Kurven eingetragen. Je größer dieser Parameter, d. h. (in Übereinstimmung mit der vorher abgeleiteten Vorstellung) je größer Durchmesser, Frequenz, Leitfähigkeit oder Permeabilität, desto stärker ist die Hautwirkung. Nach der Theorie hängt die in Wärme umgesetzte Leistung  $N$  mit dem Parameter  $q$  durch eine Funktion  $P(q)$  zusammen nach der Gleichung

$$N = c \cdot (J_1 w)^2 \cdot d^2 f \mu \cdot P(q). \tag{5}$$

Die Leistung ist zunächst proportional dem Quadrat des primären Strombelages, d. h. des Produktes aus Strom  $J_1$  in der Primärspule und Windungsdichte  $w$  (Windungen je Zentimeter Spulenhöhe). Dabei ist es gleichgültig, ob der Wert dieses Produktes aus hohem Strom und geringer Windungsdichte oder umgekehrt entsteht.

Die Funktion  $P(q)$  ist in Abb. 204 in ihrem Verlauf dargestellt. Mit wachsendem Argument  $q$  nimmt die Leistung zunächst zu bis zu einem Höchstwert bei  $q = 2,5$ . Darüber hinaus fällt sie wieder ab. Das Maximum der Funktion fällt zusammen mit dem Wert von  $q$ , bei welchem der effektive Wirkwiderstand gleich dem effektiven Blindwiderstand des Sekundärkreises, d. h. des Schmelzgutes ist. Dies bestätigt das oben genannte allgemeine Gesetz für das Optimum der Leistungsübertragung.

Die Abhängigkeit der Leistung von den vier Bestimmungsgrößen  $f, \mu, \kappa, d$  ist auf dem aufsteigenden Ast (kleine  $q$ -Werte) und auf dem absteigenden Ast (große  $q$ -Werte) sehr verschieden. Durch Näherungsansatz für die Funktion  $P(q)$  ergibt die Theorie für die Leistung  $N$  in den beiden Gebieten angenähert

$$\text{für } q < 2: \quad N \sim \text{const} \frac{q^4}{\kappa} = \text{const} d^4 f^2 \mu^2 \kappa,$$

$$\text{für } q > 5: \quad N \sim \text{const} \frac{q}{\kappa} = \text{const} d \sqrt{\frac{f\mu}{\kappa}}.$$

Aus diesen Funktionen ist ohne weiteres der Einfluß der einzelnen Faktoren auf die Wärmeleistung zu entnehmen.

Bei konstantem Strombelag der Primärspule steigt die Leistung mit wachsender Frequenz, aber in beiden Gebieten nicht im selben Maß. Solange das Argument  $q$ , in dem die Frequenz ja auch als Faktor unter der Wurzel steht, noch klein ist, steigt die

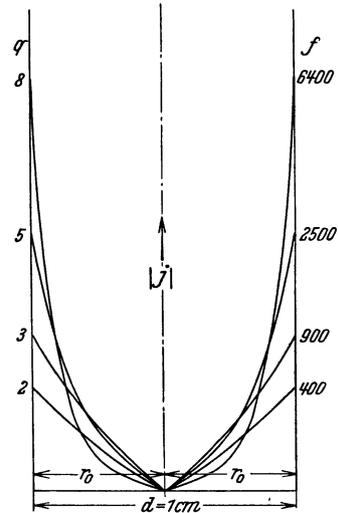


Abb. 203. Stromdichteverteilung in einem Kupferbolzen bei verschiedenen Frequenzen.

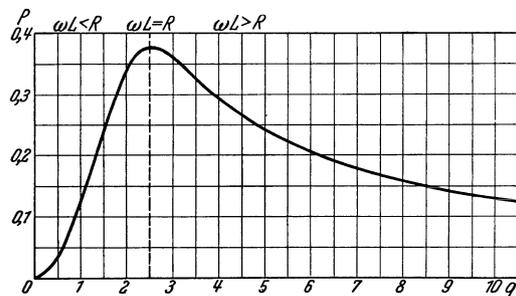


Abb. 204. Funktion  $P(q)$ .

Leistung mit dem Quadrat der Frequenz, bei größeren Werten von  $q$  aber nur mehr mit  $\sqrt{f}$ . Man wird also bestrebt sein müssen, die Frequenz wenigstens soweit zu steigern, bis man in das zweite Gebiet der großen  $q$ -Werte kommt. Handelt es sich darum, ohne Rücksicht auf den Wirkungsgrad eine große Sekundärleistung zu erzielen, wie etwa in einem Laboratoriums-Hochtemperaturofen, so wird man eine möglichst hohe Frequenz wählen (soweit die Spulenverluste noch durch die Wasserkühlung zu bewältigen sind). Bei einem Betriebsschmelzofen aber wird man immer auf den Wirkungsgrad achten müssen, und von diesem Gesichtspunkt aus ergibt sich kein Vorteil mehr durch eine Steigerung der Frequenz wesentlich über das Knie der  $P$ -Kurve in das Gebiet großer  $q$ -Werte hinein. Da auch in dem Kupferleiter der Primärspule die Hautwirkung bei höheren Frequenzen auftritt, steigt auch der Verlustwiderstand der Primärwicklung an, nähert sich mit  $\sqrt{f}$ , so lange man nicht besondere Kunstgriffe mit unterteiltem und verdrilltem Leitungsmaterial anwendet. Der Wirkungsgrad bleibt daher mit weiter steigender Frequenz konstant.

Im selben Sinne wie die Frequenz wirkt die Permeabilität. Magnetisches Material erwärmt sich sehr viel rascher als unmagnetisches. Der Wärmezuwachs durch Histeresisverluste ist dabei noch gar nicht berücksichtigt, da er nur untergeordnete Rolle spielt.

Für die Leitfähigkeit  $\kappa$  liegt, ganz in Übereinstimmung mit der aus dem Hohlzylinder entwickelten Anschauung, zwischen den beiden  $q$ -Gebieten, welche mit den Gebieten: Blindwiderstand  $\omega L < \text{Wirkwiderstand } R$  und  $\omega L > R$  zusammenfallen, unter sonst gleichen Voraussetzungen ein Optimum, welches mit  $\omega L = R$  identisch ist. Mit steigenden  $q$ -Werten steigt die induzierte Leistung zunächst mit  $\kappa$ , bei großen  $q$ -Werten aber fällt sie mit  $\sqrt{\frac{1}{\kappa}}$ . Sehr kleine Leitfähigkeit gibt sekundär kleine Leistung, da der Widerstand zu groß und der entstehende Kurzschlußstrom zu gering ist. Sehr hohe Leitfähigkeit hat starke Hautwirkung zur Folge, so daß der Strom auf ganz engen Raum beschränkt bleibt und so keine erhebliche Wärmeleistung hervorbringen kann. Große und kleine Leitfähigkeit sind hier aber relativ zu verstehen zu dem  $q$ -Wert, der sich daraus ergibt.

Es galt lange als unmöglich, Materialien mit sehr viel schlechterem Leitvermögen als demjenigen der Metalle ( $\kappa = 5 \cdot 10^5 \div 10^4 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ), etwa Salze im Schmelzfluß oder wässrige Lösungen ( $\kappa = 1 \div 0,1 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) durch Induktion unmittelbar zu erhitzen. Der Grund, warum dahingehende Versuche mißlingen, war der, daß sie in einem Maßstab ausgeführt wurden, für den die verwendete Frequenz nicht ausreichte. Aus obigen Regeln geht klar hervor, daß man bei so geringen Leitfähigkeiten entweder sehr große Tiegeldurchmesser oder außerordentlich hohe Frequenzen verwenden muß. Beide Versuche haben inzwischen, im richtigen Maßstab durchgeführt, eine Bestätigung der Theorie auch in diesem Gebiet der Halbleiter und Elektrolyte gebracht.

Der Einfluß des Durchmessers, der Stückgröße, wird deutlicher, wenn wir nicht wie eben die gesamte auf den Körper induzierte Energie betrachten, sondern die Energie je Volumeneinheit des Stückes, welche ja für den Temperaturanstieg die maßgebende Größe ist. Die oben angegebenen Näherungsfunktionen sind also durch das Volumen, d. h. hier durch  $d^2$  zu dividieren, so daß wir

$$\begin{array}{ll} \text{für } q < 2 & \text{Leistung/Volumen proportional } d^2, \\ \text{für } q > 5 & \text{Leistung/Volumen proportional } 1/d \end{array}$$

erhalten. Hieraus ergibt sich, ähnlich wie bei der Abhängigkeit von  $\kappa$  für gegebene Frequenz und Leitfähigkeit ein günstigster Stückdurchmesser. Er ist wiederum bestimmt durch den Wert  $q = 2,5$ . Geht man unter diese Stückgröße herunter, so sinkt die Gesamtleistung mit der vierten Potenz, die Leistung je Volumeneinheit mit der zweiten Potenz von  $d$ . Dies ist in der Praxis der Hochfrequenzheizung einer der wichtigsten Punkte für die Dimensionierung. Bei kleingestückeltem Einsatz ist jedes Stück als

kleiner Zylinder anzusehen, der durch Oxyd- und Schmutzschichten elektrisch von den Nachbarstücken getrennt ist, so daß in die Betrachtung der Stückdurchmesser, nicht der Tiegeldurchmesser einzusetzen ist. Man darf also, wenn man genügende Energieübertragung erwarten will, bei gegebener Frequenz nicht wesentlich unter die Stückgröße heruntergehen, für welche  $q = 2,5$  wird, da darunter die Leistung sehr rasch zurückgeht. Diese noch zulässige kleinste Stückgröße ist um so größer, je geringer die Leitfähigkeit ist; bei gegebenem Material ist sie um so größer, je niedriger die Frequenz ist. Die folgende Tabelle gibt ein Bild über die Größe dieses optimalen Durchmessers bei verschiedenen Frequenzen und verschiedenen Werkstoffen.

Günstigster Durchmesser in cm bei verschiedenen Frequenzen.

Werkstoff	$\frac{\%}{\text{Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}}$	50 Hz	500 Hz	5000 Hz	50 000 Hz	500 000 Hz
Kupfer, kalt . . . . .	$5 \cdot 10^5$	3,6	1,13	0,36	0,113	0,036
Eisen, kalt ( $\mu = 1$ ) . . . .	$1 \cdot 10^5$	8,0	2,5	0,8	0,25	0,08
Blei (Cu flüssig) . . . . .	$5 \cdot 10^4$	11,3	3,6	1,13	0,36	0,113
Eisen 800° . . . . .	$1 \cdot 10^4$	25	8,0	2,5	0,8	0,25
Graphit . . . . .	$1 \cdot 10^3$	80	25	8,0	2,5	0,8

Die Funktion von  $d$  zeigte, daß für große  $q$ -Werte die Leistung je Volumeneinheit mit  $1/d$  wieder fällt. Zu großer Stückdurchmesser wird also wieder ungünstiger. Es ist unter Umständen richtiger, in einen gegebenen Tiegelraum kleinstückigen Schrott statt einen massiven Block einzusetzen, sofern für die Schrottstücke bei der gegebenen Frequenz die zulässige Mindestgröße noch nicht unterschritten wird.

Für alle drei Größen  $d$ ,  $\kappa$ ,  $f$  ist der Wert  $q = 2,5$  ein ausgezeichneter Punkt, der nicht unterschritten werden soll, da die Leistung darunter mit allen drei Größen rasch abfällt.

Diese Zusammenhänge zeigen deutlich, daß die Wahl der Frequenz immer von der Art des Einsatzes, sowohl von seiner elektrischen Leitfähigkeit als auch von seiner Stückgröße abhängt. Je geringer die Leitfähigkeit und je kleiner die Stücke<sup>1</sup> sind, desto höher muß die Frequenz sein.

### c) Aufbau des Ofens.

Die wesentlichen Bestandteile des Ofens sind Herdfutter und Spule. Da innerhalb der Spule jedes Metall durch induzierte Ströme erwärmt würde, kann das Ofenfutter keine metallische Armierung erhalten. Die Ofenspule muß selbst als Armierung dienen. Bei kleinen Laboratoriumsöfen wird einfach ein gebrannter Tiegel in die Spule eingesetzt und der Zwischenraum zwischen Tiegel und Spule noch mit einer Wärmeschutzschicht ausgefüllt. Bei größeren Öfen werden vorgebrannte Tiegel selten verwendet, sondern durch einen aufgestampften und im Ofen selbst gesinterten Herd ersetzt. Die Form von Spule und Herd ist so zu wählen, daß das Schmelzgut von einem möglichst konzentrierten Spulenfeld durchsetzt wird. Ein flacher Herd würde nur eine schlechte Kopplung zwischen Spule und Bad ergeben. Je höher eine Spule ist, desto mehr bleibt das Feld im Innern konzentriert. Die Form des tiefen Tiegels bleibt daher auch bei größeren Öfen bestehen. Über ein Verhältnis von 2:1 zwischen Höhe und Durchmesser des Bades geht man jedoch in größeren Öfen kaum hinaus, sondern nähert sich eher dem thermisch günstigeren Verhältnis 1:1, welches die kleinste wärmeableitende Oberfläche hat. Für die Stärke des Futters sind außer der Forderung genügender mechanischer Festigkeit thermische und elektrotechnische Überlegungen maßgebend. Das Futter ist zugleich der Wärmeschutz zwischen dem Schmelzbad und der wassergekühlten Primärspule. Um die Wärmeverluste zu verringern, sollte man es möglichst stark machen. Das bedeutet aber Ver-

<sup>1</sup> Sofern der Schrott nicht so sauber und blank ist, daß der ganze Tiegelinhalt als eine geschlossene Masse vom Durchmesser des Tiegels gewertet werden kann, wie beispielsweise bei Kugelnickel und ähnlichen nicht oxydierenden Metallen.

Vergrößerung des Spulendurchmessers und damit nicht nur Verringerung der Kopplung, sondern auch Vergrößerung der Kupferverluste der Spule; geringe elektrische Verluste erfordern schwaches, geringe Wärmeverluste starkes Futter. Je nach Arbeitstemperatur, Größe und Leistung des Ofens und Wärmeleitfähigkeit des Herdmateriales ist die Futterstärke so zu wählen, daß sich die geringsten Gesamtverluste ergeben.

In Abb. 205<sup>1</sup> ist der schematische Schnitt durch einen 1000-kg-Stahlöfen (150 Liter) gegeben, aus dem folgende Hauptmasse zu entnehmen sind:

Mittlerer Baddurchmesser . . . . .	52 cm	Innerer Spulendurchmesser . . . . .	70 cm
Badhöhe . . . . .	70 cm	Spulenhöhe . . . . .	80 cm
Mittlere Wandstärke . . . . .	9 cm		

Der ganze Ofen ruht in einem Rahmen aus Winkleisen. Da die Spule in ihrer näheren Umgebung ein starkes Streufeld erzeugt, müssen auch außen alle metallischen Armierungen, vor allem, wenn sie aus Eisen gemacht werden sollen, in ziemlich großer Entfernung von der Spule gehalten werden, um Wirbelstrombildung und damit zusätzliche Verluste zu vermeiden.

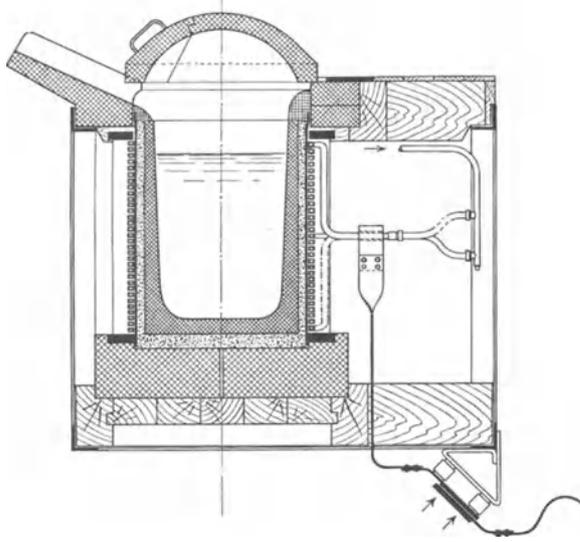


Abb. 205. Schematischer Schnitt durch einen 1000-kg-Stahlöfen.

Magnetisches Material kann dadurch wirksam abgeschirmt werden, daß man es mit genügend starkem Kupferblech verkleidet. Außerdem muß sorgfältig vermieden werden, daß sich in dem Ofengestell geschlossene Stromkreise um die Spule ausbilden können, da hierin starke Kurzschlußströme induziert werden. Die einzelnen Teile des Ofengestelles sind daher elektrisch voneinander zu isolieren. Da die Spule mit Wasser gekühlt und somit keine Wärme von der Ofenwand nach außen abgestrahlt wird, können manche Teile des Ofenstuhles unbeschadet aus Holz

ausgeführt werden, um Wirbelstromverluste in unnötigen Metallteilen zu vermeiden.

Die Spule selbst steht auf einer Schamotteplatte. Das Futter wird nach einer Eisenschablone, welche dem inneren Tiegelraum entspricht, unmittelbar in die mit Asbestpappe ausgeschlagene Spule eingestampft. Dabei wird entweder die schwach angefeuchtete Masse mit Preßluftstampfern aufgestampft oder nach Rohn<sup>2</sup> die ganz trockene Masse mit geringem Sinterzusatz lose aufgeschüttet. Der so hergestellte Herd wird mit der ersten Schmelze gesintert. Dabei dringt die Sinterung nur wenige Zentimeter tief vom Herd aus in die Wand ein, so daß die äußeren Teile als Puffer und Wärmeschutzschicht ungesintert bleiben. In größeren Öfen wird der eigentliche Tiegel auch mitunter zwischen zwei Schablonen gestampft, die dann abgezogen werden. Der Raum zwischen Tiegel und Spule wird dann mit ganz trockener Füllmasse ausgefüllt (vgl. Abb. 205).

Für saure Zustellung wird meist Klebsand verwendet, mit trockenem Klebsand als Pufferschicht. Auch reiner Quarzit hat sich gut bewährt. Wichtig ist dabei, daß etwa 25—30% feines Mehl dem körnigen Material zugesetzt ist. Dasselbe gilt bei basischem Futter aus Magnesit, dem einige Prozent Ton und Wasserglas oder auch Borsäure als Sinterzusatz beigemischt werden. Als Pufferschicht wird hierbei am besten technisch reine Tonerde verwendet. Für das Einbrennen der so hergestellten Tiegel genügt es,

<sup>1</sup> Pölguter, F.: Stahl u. Eisen Bd. 51 (1931) S. 513.

<sup>2</sup> DRP. Nr. 423715.

wenn die erste Schmelze bei saurem Futter um 1—2, bei basischem um 3—4 Stunden verlängert wird. Die Tiegel halten dann auch bei weichen oder hochlegierten Sonderstählen und im unterbrochenen, einschichtigen Betriebe 50—80 Schmelzen aus. Um sie vor schroffer Auskühlung zu schützen, ist es zweckmäßig, bei Schichtende den leeren Tiegel mit ganz trockenem Fittersand voll zu füllen, der vor der nächsten Schmelze wieder ausgeleert wird.

Für einen 1000-kg-Ofen ist eine neue Zustellung in 8—12 Arbeitsstunden zu erstellen. Berücksichtigt man dabei den außerordentlich geringen Materialverbrauch, so ergibt sich, daß die Zustellungskosten je Tonne Schmelzgut für den eisenlosen Induktionsofen nur ein Viertel bis ein Sechstel von denen eines Lichtbogenofens gleicher mittlerer Stundenleistung betragen.

Da das Futter verhältnismäßig schwach ist und eine beträchtliche Wärmemenge nach außen leitet, muß die dicht anliegende Ofenspule wassergekühlt sein, um die Verlustwärme sowie die eigene Stromwärme ableiten zu können. Kupferrohr ist dadurch das gegebene Baumaterial. Die Spulen sind meist einlagig gewickelt, da sonst, wenn nicht fein unterteilte Leiter verwendet werden, zusätzliche Verluste durch Wirbelstrombildung auftreten. Die spezifische Belastung des Spulenkupfers ist außerordentlich hoch, da hier infolge der Hautwirkung der Strom auf die innere Spulenwand zusammengedrängt wird, so daß nur ein kleiner Teil des Rohrquerschnittes vom Strom durchflossen wird. 20—30 A/mm<sup>2</sup> und darüber werden oft erreicht. Diese hohen Belastungen mit entsprechenden Verlusten können nur durch fein unterteilte und verschachtelte Leitungen<sup>1</sup> vermieden werden. Ausführungen in dieser Richtung sind in Entwicklung.

Der ganze Ofenstuhl hängt in einem Kippwerk, dessen Achsrichtung möglichst durch die Gießschnauze verläuft, so daß unter Umständen unmittelbar in Kokillen gegossen werden kann.

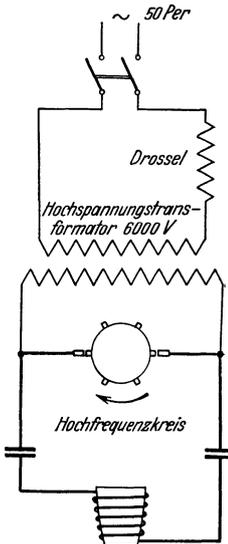


Abb. 206. Schaltung für Funkenstreckenerregung.

#### d) Elektrische Ausrüstung.

Als Stromquelle kommt bis 10000 Hz die Hochfrequenzmaschine, darüber bis etwa 100000 Hz die Funkenstrecke und weiter der Röhrengenerator in Frage. Die Wahl der Frequenz hängt, wie oben auseinandergesetzt, von Einsatzmaterial und Stückgröße ab. Ein Blick auf die Tabelle (S. 225) zeigt, daß für Eisen und andere Metalle von einigen Zentimetern Schrottgröße Frequenzen zwischen 500 und 5000 Hz ausreichen, so daß heute für alle industriellen Öfen die Maschine als Stromerzeuger verwendet wird. Funkenstrecke und Röhrengenerator kommen nur für kleine Leistungen bei Laboratoriumsanlagen in Frage, wo der geringen Stückgröße des Einsatzes wegen oder um sehr hohe Temperaturen zu erzielen, höhere Frequenzen verwendet werden müssen. Die Amerikaner verwenden eine Doppelfunkenstrecke in wassergekühltem Gußgehäuse mit zwei festen Elektroden gegen ein Quecksilberbad in Wasserstoffatmosphäre. Die Leistung wird durch Veränderung der Funkenlänge reguliert, die durch Heben und Senken des Quecksilberspiegels eingestellt wird. Die Franzosen benutzen eine rotierende Funkenstrecke, eine Metallscheibe mit Kontaktstücken. Die festen Gegenelektroden sind wassergekühlt. Zur Leistungsregulierung dient eine Drossel im Primärkreis. Die grundsätzliche Schaltung ist in Abb. 206 dargestellt. In Deutschland wurden nach beiden Arten nur wenige Laboratoriumsanlagen gebaut. Der Röhrengenerator ist erst vereinzelt für diese Zwecke verwendet worden.

Die Hochfrequenzmaschinen werden meist so gebaut, daß der Rotor keine Wicklung trägt. Ein massiver Stahlrotor ist durch eingefräste Nuten gezähnt. Bei der Drehung

<sup>1</sup> DRP. 507556.

steht den Statorzähnen abwechselnd Rotorzahn oder -nut gegenüber. Durch diese Veränderung des Luftspaltes wird der magnetische Fluß, den die im Stator liegende Gleichstromwicklung erzeugt, pulsierend verstärkt und geschwächt. Diese rhythmische Flußänderung induziert in der in den Statornuten liegenden Arbeitswicklung die Wechselspannung, deren Frequenz das Produkt aus Rotorpolzahl und sekundlicher Drehzahl ergibt. Bei 3000tourigen Maschinen (50 Umdr./Sek.) ergeben sich für 10000 Hz. Zahnbreiten von wenigen Millimetern.

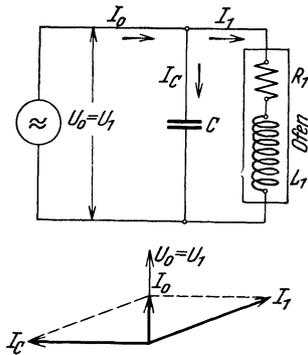


Abb. 207. Stromresonanzschaltung.

Würde die leere Ofenspule an die Maschine angeschlossen, so müßte die Maschine reinen Blindstrom abgeben, da die Spule als Drossel wirkt. Die Blindleistung ist der Querschnittsfläche der Spule proportional. Ist der Ofen gefüllt, so wird war durch die Gegenwirkung der Sekundärströme das Spulenfeld im Innern des Einsatzes mehr oder weniger aufgehoben; in dem Raum zwischen Einsatz und Spule bleibt es jedoch fast unverändert bestehen, so daß auch der belastete Ofen zu der Wirklast noch eine außerordentlich große induktive Blindleistung aufnimmt. Zu den oben angeführten Bedingungen für die Dimensionierung des Ofenfutters kommt also hier noch die Überlegung, daß die Spulenfläche möglichst weitgehend durch metallisches Schmelzgut ausgefüllt werden soll, um unnötige Vergrößerung der Blindleistung zu vermeiden. Aber auch bei günstiger Dimensionierung bleibt eine Blindleistung am Ofen bestehen, die bei Öfen mit 1000 Hz das 10—15fache, bei solchen mit 10000 Hz das 20—30fache der Wirkleistung beträgt. Wollte man den Ofen unmittelbar mit der Maschine betreiben, so müßte diese auf das ebenso Vielfache ihrer Wirkleistung bemessen werden. Man muß daher die induktive Blindlast durch entsprechende kapazitive Blindlast kompensieren. Belastung mit Induktivität bedeutet bekanntlich 90°-Nacheilung des Stromes hinter der Spannung, Belastung mit Kapazität 90°-Voreilung. Beide zusammen ergeben einen Ausgleich, so daß der Speisekreis nur den Wirkstrom (in Phase mit der Spannung) liefert. Abb. 207 und 208 zeigen die beiden Möglichkeiten der Schaltung. In Abb. 207 ist ein Kondensator parallel zum Ofen geschaltet; der Ofen selbst ist durch Wirk- und Blindwiderstand gekennzeichnet. Der Ofenstrom  $J_1$  eilt der angelegten Maschinenspannung  $U_0$  stark, aber infolge seines Wirkwiderstandanteiles nicht ganz um 90°, nach. Der parallellaufende Kondensatorstrom  $J_c$  läuft dagegen der Spannung um genau 90° voraus. Die Summe beider Ströme ergibt bei richtiger Dimensionierung (Resonanz) des Kondensators den Maschinenspeisestrom  $J_0$  als reinen Wirkstrom in Phase mit  $U_0$ . Im Ofenkreis fließt also ein vielfach größerer Strom, als ihn die Maschine aufbringen muß. Die Schaltung heißt daher Stromresonanzschaltung. Ofenspannung und Maschinenspannung sind hier gleich.

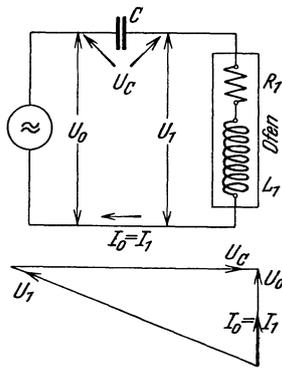


Abb. 208. Spannungsresonanzschaltung.

Die andere Möglichkeit ist die Spannungsresonanzschaltung nach Abb. 208. Hier ist der Kondensator zum Ofen in Reihe geschaltet. Maschine, Ofen, Kondensator, durchfließt derselbe Strom. Die Ofenspannung  $U_1$  eilt aber infolge des stark induktiven Ofenwiderstandes dem Strom beträchtlich voraus, während die Kondensatorspannung  $U_c$  um 90° nacheilt. Die Summe beider Spannungen ergibt bei richtiger Bemessung des Kondensators die sehr viel kleinere Maschinenspannung  $U_0$  in Phase mit  $J$  als reine Wirkspannung. Am Ofen liegt also hier eine sehr viel größere Spannung als die Maschine abgibt.

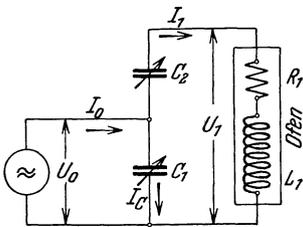


Abb. 209. Kombination von Strom- und Spannungsresonanz.

Am Ofen liegt also hier eine sehr viel größere Spannung als die Maschine abgibt.

Bei großen Öfen wird praktisch fast immer die Stromresonanzschaltung (Abb. 207) angewendet, da man allzuhohe Spannungen am Ofen scheut und lieber mit großen Strömen am Ofen arbeitet. Läßt sich die Maschine schwer für die zur Stromresonanzschaltung nötige Spannung bauen, so kann durch eine Kombination von beiden Schaltungen sowohl eine Strom- wie eine Spannungstransformation von der Maschine auf den Ofen hervorgerufen werden. Eine der möglichen Schaltkombinationen ist in Abb. 209 angegeben. Diese Kombination von Strom- und Spannungsresonanz hat den Vorteil, daß man durch Veränderung der Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  während des Betriebes am Ofen sowohl Strom als auch Spannung unabhängig von der Maschine regulieren kann, während bei den Schaltungen nach Abb. 207 und 208 immer eine der beiden Größen an die Maschine gebunden ist. Da sich während einer Schmelze, besonders bei magnetischem Material, wenn es durch den Umwandlungspunkt geht, die wirksamen Widerstandsgrößen am Ofen beträchtlich ändern, ist diese Reguliermöglichkeit zur vollen Ausnutzung der Maschinenleistung von einer gewissen Bedeutung. Da sie die Schaltanlage verteuert und die Bedienung kompliziert, wird sie jedoch meist nur bei kleineren Laboratoriumsanlagen angewendet, wo man größere Beweglichkeit in der Ausnutzung für verschiedene Ofengrößen wünscht, welche wahlweise angeschlossen werden sollen. Ähnliche Reguliermöglichkeiten können auch durch verschiedene Anzapfungen an der Ofenspule geschaffen werden.

Die bei diesen Frequenzen verwendeten Kondensatoren unterscheiden sich kaum von den in der Starkstromtechnik zur Phasenkompensation gebräuchlichen. Das Dielektrikum besteht aus dünnstem Papier von nur 0,1—0,2 mm Stärke in mehreren Lagen, zwischen dünner Aluminiumfolie, gelegt oder gewickelt. Die Pakete oder Wickel werden sorgfältig evakuiert, mit Öl getränkt und unter Öl luftdicht verschlossen. Die Verluste guter Kondensatoren betragen nur 2—3 Watt je kVA Blindleistung.

#### e) Verwendung.

Die praktischen Anwendungen der Induktionsheizung ohne Eisenschluß liegen auf verschiedenen Gebieten. Zunächst bietet sich hier ein geradezu ideales Schmelzgerät für das metallurgische Laboratorium, das die Aufgabe stellt, kleine Proben bis zu Einsatzgewichten von einigen Kilogramm ohne Verunreinigung in beliebiger Atmosphäre schnell einzuschmelzen, das höchste Temperaturen und genaue Temperaturregulierung verlangt. Der Umstand, daß die Wärme im Schmelzgut selbst erzeugt wird, gibt in der Anheizgeschwindigkeit dem Induktionsofen einen bedeutenden Vorsprung vor anderen Laboratoriumsöfen. Wesentlicher noch ist das Freisein von jeder kohlenden Atmosphäre, die bei den meisten anderen elektrischen Öfen für höhere Temperaturen ein exaktes quantitatives Arbeiten fast unmöglich macht. In dem Hochfrequenzofen steht der Schmelztiegel, gleichsam von innen heraus geheizt, in eine dünne Wärmeschutzschicht eingebettet, in der kalten Spule und ist von oben her bequem zugänglich; es fehlen alle Heizgase, Elektroden oder anderen äußeren Wärmeträger, die bei anderen Öfen das freie metallurgische Arbeiten im Tiegel erschweren. Dieser einfache Aufbau macht es auch



Abb. 210. 50-kg-Schmelzofen mit 10 000 Hz.

leicht möglich, den Ofen zu einem Vakuumofen auszubauen. Zwischen die stromführende Spule und den Tiegel wird ein Quarz- oder Hartporzellanrohr als Vakuumgefäß eingesetzt.

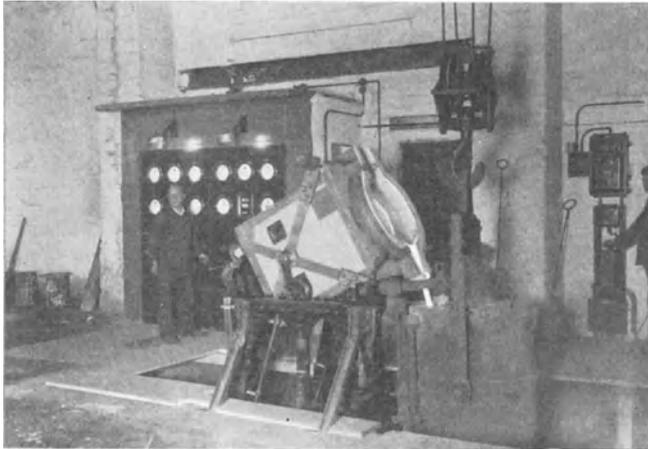


Abb. 211. 250-kg-Induktionstiegelofen.

Dimensionierung können Temperaturen von 2800 bis 3000° erreicht werden.

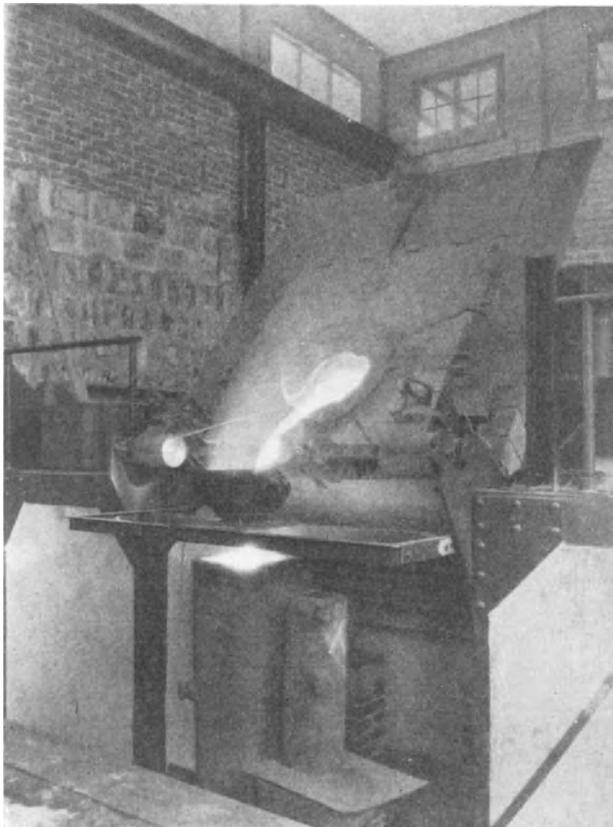


Abb. 212. 500-kg-Stahlöfen.

Da die Spule, welche das Rohr dicht umschließt, gekühlt ist, wird die Gefäßwand thermisch nur wenig beansprucht. Der Tiegel mit dem Schmelzgut steht frei in dem Vakuumgefäß.

Die erreichbare Temperatur hängt nur von der Feuerbeständigkeit des Tiegelmateriales und von der Isolierfähigkeit des Wärmeschutzes zwischen Einsatz und Spule ab. Die Temperaturgrenze ist erreicht, wenn die gesamte induzierte und im Schmelzkörper in Wärme umgesetzte Leistung in den Wärmeverlusten durch das Futter und durch Strahlung verbraucht wird. Bei geschickter

Die außerordentlich bequeme und feine Temperaturregelbarkeit ist ein besonderer Vorteil des Induktionstiegelofens. Da die wärmeerzeugenden Induktionsströme in jedem Augenblick der Stromstärke in der Ofenspule proportional sind, hat man mit der Erregung des Hochfrequenzgenerators die feinste Regulierung der Ofenleistung in der Hand. Bei jedem von außen geheizten Ofen muß man auch nach Abschalten der Heizquelle noch mit einem Wärmeschub aus der heißeren Ofenwand rechnen; dies tritt hier nicht ein, da die höchste Temperatur hier im Schmelzgut selbst liegt und keine Energie mehr nachfließt, sowie die Spule stromlos ist.

Ein Laboratoriums-Schmelzofen für 50 kg Stahl ist in Abb. 210 gezeigt. Er wird mit einer 10000-Hz-Maschine von 45 kW Generatorleistung betrieben und schmilzt den Einsatz in etwa einer Stunde ein.

Die Betriebsfrequenz geht bei großen Öfen wesentlich weiter herunter. Da meist grober Schrott eingeschmolzen werden kann, reichen hier 2000 Hz bequem aus. Man ist

teilweise auf 500 Hz gegangen. Neuerdings tauchen Pläne auf, Tiegelöfen mit über

1000 kg Fassungsvermögen bei flüssigem Einsatz mit 50periodigem Netzstrom zu speisen.

Im Hüttenwerk steht der Induktionstiegelofen in Konkurrenz mit dem Lichtbogenofen und mit dem eisengeschlossenen Niederfrequenzinduktionsofen. Letzterer hat sich in der Bauart mit geschlossener Schmelzrinne besonders in der Messingschmelze ein weites Feld erobert und ist im Wirkungsgrad hier kaum von einem anderen Ofen zu übertreffen. Die komplizierte Form der Schmelzrinne begrenzt seine Anwendung aber heute noch im wesentlichen auf das Temperaturbereich der Kupferlegierungen und fordert vor allem durchlaufenden Betrieb, da in der Schmelzrinne immer ein flüssiger Sumpf gehalten werden muß. Hierin ist der eisenlose Induktionstiegelofen überlegen. Die einfachere Tiegelform gibt eine viel größere Beweglichkeit im Aufbau des Herdes. Die Temperaturgrenze ist dadurch so weit heraufgerückt, daß der Ofen für alle schmelztechnischen Zwecke verwendbar ist. Daß man kalten Schrott einschmelzen, den Ofen ganz entleeren und die Legierungen beliebig wechseln kann, macht diesen Ofen gerade für den unterbrochenen und wechselvollen Betrieb wertvoll.

Im Elektrostahlwerk ist der alte Niederfrequenzinduktionsofen wegen seiner Zustellungsschwierigkeiten fast ganz durch den Lichtbogenofen verdrängt. In dem Induktionstiegelofen entsteht diesem nun für manche Gebiete ein fühlbarer Konkurrent, für andere Gebiete eine wertvolle Ergänzung. Das Fassungsvermögen der Induktionstiegelöfen geht heute noch selten über 2000 kg hinaus; infolge der kurzen Einschmelzdauer (1 bis  $1\frac{1}{2}$  Stunden) ist trotzdem die Tagesleistung eines mittleren Lichtbogenofens zu erreichen. Auch die Stromverbrauchszahlen halten dem Vergleich mit den Betriebskosten eines Lichtbogenofens stand. Für Öfen von 300 kg Fassungsvermögen und darüber liegt die Einschmelzleistung für Schnelldrehstahl und legierte Stähle bei 580 bis 650 kWh je Tonne. Bei geschickter Schmelzföhrung und günstigen Schrottverhältnissen sind Werte unter 500 kWh/t erreicht worden. Rechnet man die Zustellungskosten und beim Lichtbogenofen die Elektrodenkosten mit ein, so sprechen die Gesamtbetriebskosten zugunsten des eisenlosen Induktionsofens.

In Amerika und England wird der Induktionstiegelofen ausschließlich als Umschmelzofen mit ausgesuchtem hochwertigem Einsatz verwendet. Da örtliche Überhitzungen, wie im Lichtbogenofen nicht auftreten, ist der Abbrand an wertvollen Legierungszuschlägen wesentlich geringer; jede Aufkohlung wird vermieden. In Deutschland gingen die Bestrebungen vom Anfang der Entwicklung an darauf hin, den Induktionstiegelofen auch als Raffinierofen zu verwenden. Dazu lockt eine besondere Eigentümlichkeit des eisenlosen Induktionsofens, seine außerordentlich starke Badbewegung. Sie kommt folgendermaßen zustande: Der Hauptteil des Stromes fließt in der äußeren Schicht des



Abb. 213. 1000-kg-Stahlöfen.

Bades. Die starken in parallelen Ringen fließenden Ströme ziehen sich gegenseitig an. Es entsteht also eine Kraftwirkung an der Tiegelwand entlang in axialer Richtung nach unten. Die Ströme in der Schmelze fließen ziemlich in Gegenphase zu dem Spulenstrom, werden also von diesem in radialer Richtung nach innen zu abgestoßen. Diese beiden Kraftwirkungen erzeugen eine Strudelbewegung des flüssigen Bades, das in der Mitte hochquillt und an der Tiegelwand nach unten fließt. Die Badoberfläche ist dadurch leicht gewölbt. Bei schwer legierbaren Bestandteilen erzeugt diese Badbewegung in kürzester Zeit eine vollkommen gleichmäßige Durchmischung. Dadurch, daß so beständig neues Material aus der Schmelze an der Schlackendecke vorbeigeführt wird, tritt eine

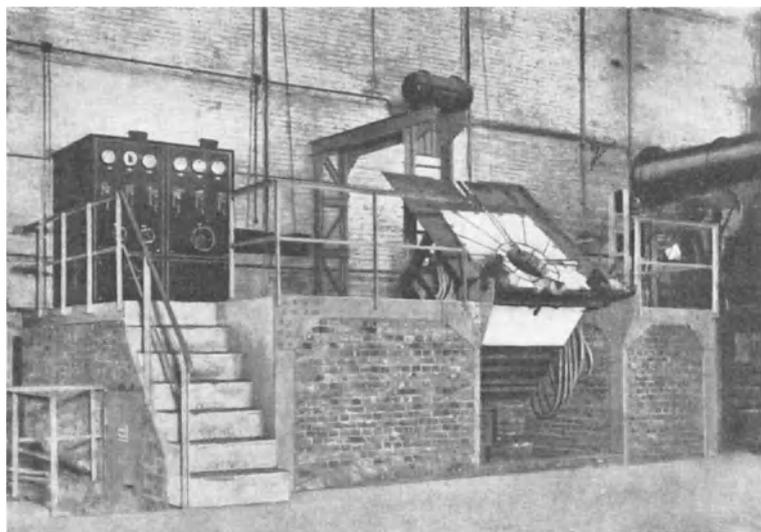


Abb. 214. 750-kg-Induktionstiegelofen.

sehr rasche und vollkommene Reaktion zwischen Schlacke und Bad ein. Ein Nachteil ist dabei die Schlacke nur vom Bad aus geheizt wird, also nicht sehr heiß ist.

Ob der Induktionstiegelofen ebenso weitgehend und rationell als Frischofen verwendet werden kann, wie die anderen im Stahlwerk gebräuchlichen Öfen, ist eine Frage, über welche heute die Ansichten noch stark auseinandergehen. Eingehende Vorarbeiten hier-

über sind vor allem von F. Wever und seinen Mitarbeitern<sup>1</sup> im Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung<sup>2</sup> ausgeführt worden.

In den Abb. 211—214 sind noch einige größere Induktionstiegelschmelzöfen gezeigt. Der Ofen hat ein Fassungsvermögen von 250 bis 300 kg Stahl und wird mit einem 500-Perioden-Generator von 100 kW betrieben. Es ist einer der ersten größeren Öfen in Deutschland, der für Schnelldrehstahl und andere legierte Stähle verwendet wird. Die Entwicklung geht heute zu größerer elektrischer Leistung je kg Einsatz. Der Ofen Abb. 212, welcher in Schweden steht und für 500 kg Edelstahl bestimmt ist, arbeitet mit 300 kW Generatorleistung. Die Abb. 213 stammt von einer anderen schwedischen Anlage für 750 kg Stahleinsatz. Der 1000-Perioden-Generator dazu hat eine Leistung von 330 kW bei einer Spannung von 2000 V. Die Anlage Abb. 214 ist im wesentlichen für Nichteisenmetalle in Gebrauch und arbeitet bei einem Einsatz von 750 kg Kupfer-Nickel-Legierung mit einem 1000-Perioden-Generator von 380 kW. Heute sind bereits einige Anlagen bis 4000 kg Stahleinsatz in Betrieb.

<sup>1</sup> Wever, F., u. H. Neuhaus: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforschg. Düsseld. Bd. 8 (1926) S. 171. — Wever, F., u. G. Hindrichs: Ebenda Bd. 9 (1927) S. 319. — Hessenbruch, W.: Ebenda Bd. 13 (1931) S. 169.

<sup>2</sup> Badenheuer, P. u. W. Bottenberg: Ebenda Bd. 14 (1932) S. 91.

# Namen- und Sachverzeichnis.

(Kursivziffern bedeuten die Nummern, die nächstfolgenden normalen Ziffern die Seiten der Abbildungen.)

- Abdichtung, Elektroden Siemens 109.  
— — Fiat 109.  
— Ofen 178, 199.  
Abhitze-Ausnutzung 9.  
Abstichfenster 182.  
Abstichöffnung 99, 104.  
Abstichpfannen, Kohlenfutter 171, 185.  
Abstichrinne d. Roheisens 176, 185.  
Abstichschнауze 93, 174, 188, 196, 199.  
Abstichschwierigkeiten 65.  
Abstichvorrichtung 183, 184, 167, 168, 183.  
Acheson Ltd. 125, 167.  
— Ofen 48, 90.  
AEG 94.  
AG. für Stickstoffdünger 145.  
Aktiebolaget Elektriska Ugnar 93, 170.  
Aluminiumfolie 229.  
Aluminiumkalksilikate 14.  
Aluminiumschlacken 165.  
Alundum 166.  
Änderung d. Spannung f. Einphasenstrom 13a, 13b, 57.  
Andersen & Bowen 17.  
Anklemmung, Strom- 193.  
Anschlußschuhe 137.  
Anstrichfarbe, Einfluß 52.  
Anstückelvorrichtung 118, 119.  
Anthrazit 111.  
Antimagnetisch 155.  
Anorthit 8.  
Anzapfung, mehrstufig 64.  
Arbeitsstüren 110.  
Atomwärme 6.  
Aufbrennelektrode 125, 182, 183, 184.  
Aufhängemantel 148.  
Aufhängezylinder 144.  
Ausdehnungsmöglichkeit, genügende 109.  
Ausfall eines der drei Öfen 88.  
Ausgleichsventil 154.  
Ausrüstung, elektrische, f. Induktöfen o. Eisenk. 227.  
Ausstrahlungsverluste 63.  
Automatische Stochovorrichtung, Miguet 192, 193.  
Automatisierter Betrieb 188.  
Backenbremse 145.  
Backkohle 111.  
Badbewegung im kernlosen Induktoven 231.  
Badvolumen 106.  
Badenheuer 232.  
Bakelit-Ges. 168.  
Bakelitmaterial 168.  
Barrieren 101.  
Barrierekonstruktion 194.  
Bauarten der Elektrodenöfen 169 bis 203.  
— der Transformatoren 25, 67.  
Bausteine, keilförmige 187.  
Bauxit 166.  
Beanspruchungen, mechanische 169.  
Bedienungsmotor 93, 155—165.  
Beeinflussungen, unerwünschte 76.  
Belastungsänderungen, stoßweise 66.  
Bemessung d. Transformators 64.  
Beobachtungsöffnungen 197.  
Berechnung d. Chargen 21—23.  
— fehlender Daten 6.  
Bergmann-Elektrizitäts AG. 160.  
— Regler siehe Regler.  
Bertolus 1.  
Beschickungsmaterial 89.  
Beschickungsschacht 196.  
Beschickungstrichter 179, 190, 199.  
Betrieb, diskontinuierlich (Elektrodenöfen) 169.  
—, kontinuierlich 177, 191.  
Bildungswärmen, negative 11.  
—, positive 11.  
Bindemittel 167.  
Bingham 44, 47.  
Bleiblechabdichtung 104.  
Bleisumpf 105.  
Bleischale 188.  
Bliemeister, W. 125.  
Blindkilowatt 59.  
Blindlast, induktive 228.  
—, kapazitive 228.  
Blindleistung 59, 60, 228.  
Blindwiderstand 221, 224.  
Blockbetrieb 93.  
Bodenanschluß, lösbar 94.  
Bodenelektrode 93, 94, 95, 188, 197.  
Bodenplatte 193.  
Bonner Maschinenfabrik Mönkemöller 91.  
— -3-t-Ofen 51, 91, 92, 170.  
Bottenberg, W. 232.  
Bowen & Greig 16, 17.  
Bremsbänder, stählerne 145.  
Brown-Boveri 69, 126, 128, 158, 159, 162—164, 170—178.  
—, Isolation 128.  
Burch, C. R. 220.  
Chamotteziegel 107, 165—168.  
Chaplet 105.  
Chargenberechnung 21—29.  
— FeSi 75% 21—26.  
— — 50% 26.  
—, künstl. Korund 29.  
Chargierbühne 185.  
Chargierkorb 177.  
— m. aufklappbaren Bodenflügeln 177.  
Chargierrohre 181.  
Chargierschnecken 199.  
Chemische Einflüsse 106.  
Chromschlacke 166.  
Clematélite 135.  
Cornit 168.  
Coutagne 32.  
Crampton 8.  
Cuénod 159, 160, 163, 164.  
Dämpfe, einatomige 7.  
—, mehratomige 8.  
Dauerelektroden 113—124, 184.  
—, Bewegung 140—157.  
—, runde 104, 140, 154.  
—, selbstbackende, Söderberg 120 bis 122, 140—148.  
Davis, N. R. 220.  
Debuch 220.  
Deckel 46, 107, 108.  
Dehnungsbuchsen 148—150.  
Demag-Elektrostahl G. m. b. H. 96, 127—129, 158, 175—177.  
Diagramm, Leistungs- 17, 59.  
— — f. Beispiel 19, 60.  
—, System SiO<sub>2</sub>-CaO 3, 15.  
— — SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4, 16.  
— — SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5, 16.  
— — MgO-SiO<sub>2</sub> 6, 17.  
— — CaO-MgO 7, 17.  
— — MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8, 17.  
— — CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9, 18.  
Dichtungsringe, wassergekühlt 169.  
Dielektrikum 229.  
Dinasteine 108, 165—167.  
Dolomit 167.

- Doppelmantel, Miguet 197.  
 Doppelfunkstrecke 227.  
 Drehspäne 25.  
 Drehstrom 74, 75.  
 —, Elektroden 86.  
 Drehstromofenanlage FeMn 166, 182.  
 — FeSi 169, 184.  
 — Phosphorsäure 189, 202.  
 — Roheisen (Grönw.) 187, 200.  
 Drehstromofen, Ferrolegierungen 172, 173, 185, 186.  
 —, gedeckt, Schema 65, 101.  
 — — Gasabzugsrohr 66, 102.  
 —, geschlossen 195—197, 185, 196.  
 —, Karbid 165a, 165b, 179, 180, 174, 187.  
 — —, gedeckter 193, 183a 183b, 194, 195.  
 —, offen, Schema 64, 101.  
 —, Roheisen (Helf.) 175, 186.  
 — — (Grönw.) 188, 201.  
 — — (Thyssl.) 184a, 184b, 195.  
 —, Transformator B. B. C. 27, 69.  
 — — S. S. 31, 70.  
 Dreieckanordnungen der Elektroden 84.  
 Dreieckschaltung 21, 61; 60, 64.  
 Dreieck, Spannungs- 22, 61.  
 Dreieck- u. Sternschaltung 24, 64.  
 Dreieck, Widerstands- 18, 59.  
 Dreiphasenstrom 60.  
 Dreiphasenwechselstrom 64.  
 Drossel 228.  
 Drosselspulen 77, 78.  
 Druckwasserzylinder 174.  
 Druckölzylinder 190.  
 Dulong-Petitsche Regel 6, 35.  
 Edelstahlherstellung 65.  
 Einatomige Dämpfe 7.  
 Einfluß der Anstrichfarbe 52.  
 Einphasenofen Miguet, offen 187 bis 193.  
 — — geschlossen 197—199.  
 Einphasentransformator f. 4500 kVA Savoie 32, 33, 71.  
 — Savoie, 34, 72.  
 — f. 6500 kVA Savoie 35, 72.  
 — f. 1600 kVA Savoie 36, 73.  
 — f. 11400 kVA S. S. 28, 69.  
 — mit Ölkasten S. S. 29, 70.  
 Einphasenwechselstrom 60.  
 Eisenkreis, kein geschlossener 79  
 Eisenraffination 96.  
 Eisenstangen 191.  
 Electro-Metals-Ofen 95, 199, 200.  
 Elektrische Ausrüstung kernl. Induktöfen 227.  
 — Heizkästen 121.  
 Elektrisch leitfähiger Staub 63.  
 Elektrischer Muffelofen 49, 90.  
 Elektrode (n) 86, 89, 110, 153.  
 Elektrodenabbrand 79.  
 Elektrodenabdichtung, Fiat 101, 130, 176.  
 — — Spannungskammern 75, 109.  
 — mit Ringplatten 74, 109.  
 — nach Siemens 76, 109.  
 Elektrodenanzahl für Einphasenstrom 169.  
 — f. Zweiphasenstrom 169.  
 — f. Dreiphasenstrom 169.  
 Elektrodenanordnung im Ofen 84.  
 Elektroden, Anstückelung prismatischer 119.  
 — — über dem Ofen 89, 90, 118.  
 Elektrodenaufhängung, Querhaupt 79, 110, 136.  
 — — f. 12000-kW-Ofen 111, 137.  
 — u. Stromzuführung 106, 134.  
 Elektrodenbelastung 79.  
 Elektrodenbewegung 155—165, 177.  
 — im B. B. C.-Ofen 158.  
 — im Demagofen 158.  
 — im Heroultföfen 158.  
 Elektrodenbrennofen 112.  
 Elektrodenbrücke 176.  
 Elektroden, kombiniert, Miguet 122.  
 Elektrodenfassungen 80, 125—127, 130, 132, 137—140, 146.  
 Elektrodenfassung m. seitl. Kontaktplatten, Vierelektrodenpaket 105, 133.  
 — — —, Sechselektrodenpaket 109, 136.  
 —, Kopf- 113, 139.  
 —, Zangen- siehe Zangenfassung.  
 Elektroden, freihängende 13.  
 Elektrodengehänge 135.  
 Elektrodengewinde, Dimens. konischer 85, 116.  
 Elektrodenkern 188.  
 Elektrodenkitt 115, 118.  
 Elektrodenkopf 133.  
 Elektrodenkopffassung 113, 139.  
 Elektrodenmantelung 178.  
 Elektrodenmasse 121.  
 —, Mischanlage für 77, 111.  
 Elektrodenmaterial 111.  
 Elektroden, Miguet 122, 114, 139.  
 — —, alte Dauer 94, 123.  
 — —, Aufhängung der Dauer- 136, 155.  
 — —, Dauer- 135, 154.  
 — —, Innenansicht einer Dauer- 95, 124.  
 —, Muttergewinde 84, 116.  
 Elektrodennachstellung 147, 154, 155.  
 Elektrodenöfen 61, 89—203.  
 —, Bauarten der 169—203.  
 Elektrodenöffnungen für den Durchtritt der 109.  
 Elektrodenpaket 179.  
 —, Aufhängung eines 108, 135.  
 —, Planschleifen 79, 113.  
 Elektrodenpresse 78, 112.  
 Elektrodenquerschnitt, Belastung 79.  
 Elektrodenregulierung 155.  
 —, elektrohydraulische 162.  
 —, hydraulisch-automatische 158.  
 —, mechanisch-elektrische 159.  
 Elektrode, Gewindekonus an einer Rund- 83, 116.  
 Elektroden, Rutschfassung, ferngesteuerte (Sie-Plania) 129, 149.  
 —, —, —, Dehnungsbuchse f. 130, 150.  
 —, —, — (S.-Hütten) 131, 151.  
 —, —, —, — 132, 152.  
 —, —, — m. 1000 mm (S-Hütten) 133, 152, 134, 153.  
 —, —, —, Söderberg, siehe Elektrode Söderberg.  
 —, Söderberg 750 mm 121, 144.  
 —, — 700 mm 175.  
 —, —, Aufhängung einer modernen 118, 142.  
 —, —, — d. Preßringes der 119, 143.  
 —, —, — mit Wisdombändern 124 u. 125, 146.  
 —, —, Blechmantel für 93, 121.  
 —, — im Dreieck 123, 145.  
 —, — im Einphasenofen 122, 144.  
 —, —, Fassung u. Aufhängung einer 115, 140.  
 —, —, Federfassung u. Fernsteuerung f. runde 126, 147.  
 —, —, flache 128, 148.  
 —, —, Kühlwasserleitung im Preßring der 120, 143.  
 —, —, prismatische 127, 148.  
 —, — mit Stampfhaus 116, 141.  
 — mit Tragzylinder 117, 141.  
 —, Schnitt durch eine Konusverbindung 91, 119.  
 —, Schraubenverbindung 114.  
 Elektrodenstumpen 114.  
 Elektroden, Trag- u. Anstückelungsnippel 86, 117.  
 —, — — mit Schelle 88, 118.  
 —, Tragnippel, Anschrauben 87, 118.  
 —, Verbindung von Vierkant- 92, 119.  
 —, Verstellung 155.  
 Elektrodenwagen 174.  
 Elektrodenwechsel 80.  
 Elektrodenwinde 140, 157.  
 — m. Konsolen 142, 158.  
 Elektrodenwindwerk 150, 157.  
 — für drei 138, 156.

- Elektrodenwindwerk für Elektrodenpaket zur vertikal u. horizontalen Bewegung 139, 157.  
 Elektroden, Zusammenschrauben 82, 115.  
 Elektrohochofen f. Roheisen 200.  
 Elektromotorische Kraft 56, 57, 58.  
 Elektroniederschachtofen 200.  
 Elektrostahlwerke, Rheinische 91.  
 Elektrotechnische Grundlagen 56.  
 Elektrothermische Berechnung 56.  
 Elin 68.  
 Energieaufnahme 212.  
 Energieausnutzung 29.  
 Energiebedarf, effektiver 29, 203.  
 —, theoretischer 29.  
 —, Roheisen 194.  
 Energieumwandlung 56.  
 Entspannungskammern 109.  
 Erhitzung, direkte 89.  
 —, indirekte 90.  
 —, Nichtleiter 90.  
 Erz, mulmiges 200.  
 Esmarch 220.  
 Explosionsklappen 197.
- Fähnrich L. 85.  
 Fassung, federnd mit pneumatischer Auslassung 146.  
 —, Federfassung 146.  
 —, Italienische 138.  
 —, Kopffassung f. Elektroden 80, 126, 138, 139.  
 —, Ringfassung 126, 140, 141, 153.  
 —, Rutschfassung 80, 146.  
 —, Zangenfassung f. Elektroden 126, 127, 137, 140.  
 —, — f. Paketelektroden 130, 132.  
 Ferranti de 213.  
 —-Ofen 213.  
 Ferrolegierungen 185, 188.  
 Ferromangan 183.  
 Ferromanganofen f. 6500 kW Siemens-Halske 181.  
 Ferrosilizium 45—95% 184, 185.  
 — 75%, Chargenberechnung 21 bis 26.  
 — 50%, Chargenberechnung 26.  
 Feuerfeste Materialien 106, 169.  
 — Stoffe 165.  
 Feuerfestigkeit 167.  
 Fiat, Abdichtung 109.  
 —, Elektrodenabdichtung 176.  
 —-Ofen 96, 107, 129, 157, 176.  
 Filterpresse für Öl 74.  
 Firth and Son 177.  
 Fitzgerald 47, 48, 50, 52, 53, 54.  
 Flusin 13.  
 Ford Motor Co. 172.  
 Forcrand (Formel) 9.  
 Formkohlen 113.  
 —, Abmessung der 113.  
 Frequenz 57, 62, 220, 223, 224, 225.
- Frick 125.  
 Frischprozesse 14.  
 Funkenstrecke 227.  
 Futter, basisches 107.  
 —, saueres 107.
- Gallsche Ketten 143, 153, 188.  
 Galvani 1.  
 Gamber, O. 207, 208ff.  
 Gasabsaugung 194.  
 Gasabzug 190.  
 Gasabzugshaube 185.  
 Gasabzugsöffnungen 101.  
 Gasabzugsrohre 101.  
 Gasfeuerung 112.  
 Gasrohre 179.  
 Gasüberdruck, Messung 197.  
 Gegenspannung 204, 205.  
 Generator, Wahl 60.  
 Geophysikalische Inst. Wash. 15.  
 Gesamte Leistung, Sinken der 224.  
 Gesamter Wärmefluß 41.  
 — Wärmearbeit 9.  
 Gesta 215.  
 Gießpfanne 110.  
 Gießpfannenschnauze 93.  
 Girod-Ofen 95.  
 Gleichstrom 74.  
 Glimmer, Natur- 168.  
 —, Amber Natur- 168.  
 Glühofen 90.  
 Goldschmidtsche Reaktion 12.  
 Grammatom 9, 10.  
 Grammkalorien 56.  
 Gramm-Moleküle 10.  
 Grammol 9.  
 Graphische Ermittlung d. äußeren Ofentemp. 11, 46.  
 Graphitelektroden 125, 169.  
 —, Aschegehalt 125.  
 —, Belastbarkeit 125.  
 —, Herstellung 125.  
 —, Nippelverbindung 125.  
 —, Wärmeleitfähigkeit 125.  
 Graphit, künstlicher 90.  
 Greaves-Etchells-Ofen 95, 172.  
 Grönwall-Ofen, Roheisen 199, 201.  
 Grundlagen, elektrotechnische 56 bis 84.  
 Grüneisen (Formel) 9.  
 Gußkörper 190.  
 Gußnippel 116.  
 Gußrahmen 147.
- Handsteuerung 155.  
 Harden 220.  
 Härteofen 90.  
 Hartporzellanrohr 230.  
 Hautwirkung 222.  
 Hebelarme 150.  
 Heizkästen, elektrische 121.  
 Heizrinnen 214, 215, 216.  
 Heizstrom 89.
- Helpenstein 2, 194, 195.  
 — (Abstichvorrichtung) 183.  
 — (Barrieren) 101.  
 Henry 58.  
 Herd 97.  
 Herdauskleidung 106.  
 Herdform 97.  
 Herdgröße 106.  
 Herdspannung 88.  
 Hering 35, 47, 48, 49, 209, 211.  
 Heroult-Ofen 2, 2; 3, 96, 97, 128, 158.  
 Herzplatte 133.  
 Hessenbruch, W. 232.  
 Hilfselektrode 105.  
 Hindrich, G. 230.  
 Hirsch, Kupfer- u. Messingwerke 220.  
 Hochdruckzylinder 150.  
 Hochfrequenzofen 219.  
 Hochfrequenzmaschine 227.  
 Hochofenbegichtung 197.  
 Höchstschnellregler Cuenod 163.  
 Hoff, Van't 8.  
 Hohlkörper, wassergekühlte 181.  
 Hohlräume 191.  
 Holzkohle 200.  
 Horizontalschienen 147.  
 Horry-Ofen 96.  
 Hütten J. L. 150; s. Siem.-Hütten.  
 Hygroskopischer Staub 63.  
 Hysteresis 208.  
 Hysteresisverluste 224.
- I. G. Farbenindustrie Piesteritz 203.  
 — — Leuna 203.  
 Induktion, gegenseitige 75, 86.  
 —, Selbst- 75, 86.  
 Induktionsgesetz 219.  
 Induktionsöfen 62.  
 — mit Eisenkern 203.  
 — —, Abhängigkeit d. Periodenzahl vom Einsatzgewicht b. Kjelin-Ofen 195, 214.  
 — —, Ajax-Wyatt-Schmelzrinne, Schema 198, 215.  
 — —, Einrinnen-Schema 190, 204.  
 — —, Kjelin 194, 213.  
 — —, Leistungsfaktoren und Energieaufnahme 193, 212.  
 — —, Röchling-Rodenhauser Einrinnen 4 t- 197, 215.  
 — —, — Zweirinnen 196, 214.  
 — —, Rotation d. Schmelzgutes 192, 210.  
 — —, Ruß 199, 216.  
 — —, S. & H. 201, 216.  
 — —, Stromverhältnisse beim 191a—d, 204—206.  
 — —, Verkettung, Schema 190a, 204.  
 — ohne Eisenkern 218, 225.

- Induktionsöfen ohne Eisenkern, Tiegel 202, 219.  
 — —, Funktion  $P(q)$  204, 223.  
 — —, Stromdichteverteilung 203, 223.  
 — —, Stromresonanzschaltung 207, 228.  
 — —, Schaltschema zu Anlage von 205, 226.  
 — —, Schaltung für Funkenstreckenerregung 206, 227.  
 — —, Spannungsresonanzschaltung 208, 228.  
 — —, Komb. Strom- u. Spannungsresonanzschaltung 209, 228.  
 — — —, 50-kg- mit 10000 Hz 210, 229.  
 — — —, 250-kg- 211, 230.  
 — — —, 500-kg-Stahl- 212, 230.  
 — — —, 1000-kg-Stahl- 213, 231.  
 — — —, 750-kg-Tiegel- 214, 232.  
 Induktionstiegelöfen 219.  
 Induktiver Verbraucher, reine Spannungsstrom- u. Leistungskurve 15, 58.  
 — Widerstand 59.  
 Industrie-Elektroöfen-Ges. 169, 171, 172, 215.  
 Interpolationsformel 4.  
 Isolation am Ofen B. B. C. 128.  
 Isolatorenreinigung 74.  
 Isolierungen, elektrische 169.  
 Isolierplatten 81.  
 Isolierschicht 198.  
 Isolierstoffe 168, 169.  
 Isolierstücke 107, 135; 142, 147, 150, 197.  
  
 Jaroslaws Glimmerfabrik 168.  
 Joulesche Wärmeentwicklung 46, 47, 56, 57, 121.  
  
 Kabelschuhe 78, 134.  
 Kaiser Wilhelm-Institut 232.  
 Kalziumkarbid 23.  
 Karbidofen 44, 93, 178.  
 — für 12000 kW 165, 180.  
 — für 15000 kW 174, 187.  
 Karborundum 90, 166, 167.  
 — -Ofen 48.  
 Kegelstumpfflachfedern 146.  
 Kegelstutzen 131.  
 Keller-Ofen 95.  
 Kern- u. Manteltransformatoren 67.  
 Kieselsäurebedarf 12.  
 Kilogrammkalorien 10, 56.  
 Kilovoltampere 59.  
 Kilowatt 56, 59.  
 Kilowattstunden 56.  
 Kippantrieb 176.  
 Kippriechung 110.  
 Kippvorrichtung 175.  
  
 Kippwiegen 175, 176.  
 Kippen des Ofens 93.  
 Kippung, hydraulische 174.  
 Kjellin 207, 213.  
 — -Ofen 213, 214.  
 Klapptür 110.  
 Klebsand 226.  
 Klemmenkurzschluß, satter 66.  
 Klemmenspannung 204, 205.  
 Klemmplatte 83.  
 Koaxiale Spulen 221.  
 Kofferförmige Öfen 107.  
 Kohlenelektroden, amorphe 111.  
 Kohleektroden 153.  
 Koks 24.  
 Kombination Ohmscher u. induktiver Verbraucher 16, 58.  
 Kondensator 228, 229.  
 Konduktanzfaktor, thermischer 35.  
 Korschak 9.  
 Kontaktbacken 131.  
 Kontaktplatten 133, 137, 146, 148.  
 —, wassergekühlte 150.  
 Konvektion 35, 41, 43, 45.  
 Koordinatensystem 15.  
 Kopffassung für Elektroden 80, 126, 138, 139.  
 — für ein Sechselektrodenpaket 112, 138.  
 Korund 29.  
 Kranbahnträger 135.  
 Kranflaschen 150.  
 Kraftlinien je  $\text{cm}^2$  207.  
 Kreisrinne 208.  
 Kreisrunde Öfen 104.  
 Kriechwege, Ausbildung 73.  
 Kupferblechbündel 181, 185.  
 Kupferquantum 75.  
 Kupferrohr 227.  
 — als Leiter 79.  
 —, wasserdurchflossen 142, 179.  
 —, — wassergekühlt 83, 181.  
 Kupferseile, feilitzige 78, 179, 190.  
 Kupferschienen 81.  
 Kühlkammern 109.  
 Kühlluft 188.  
 Kühlringe 109.  
 —, wasserdurchflossene 174.  
 Kühlschächte 187.  
 Kühltaschen 137, 197.  
 Kühlwasser 79.  
 Kühlwasserrohre 174, 192.  
 Kühlwasserschläuche 143.  
 Kühlung des Transformators 67.  
  
 Langmuir 36, 38, 39, 42, 43, 52.  
 Latente Wärmenberechnung 9.  
 Laufkatze 157.  
 Leerlauf 212.  
 Leerlaufstrom 205.  
 Leistung des Drehstromofens 84.  
 Leistungsaufnahme als Funktion des Leistungsfaktors 37, 77.  
  
 Leistungsdiagramm 17, 59.  
 — für Rechenbeispiel 19, 60.  
 Leistungsfaktor 60, 75, 76, 77, 212.  
 Leistungskurve u. Spannungsstrom f. Ohmschen Verbraucher 14, 57.  
 — — f. induktiven Verbraucher 15, 58.  
 Leistungsmaximum 77.  
 Leistungsregulierung 227.  
 Leiterquerschnitt 76.  
 Leiterschleife 219.  
 Leitfähigkeit, Änderung des Materialiales 63.  
 — f. Magnesit 40.  
 — f. Schamotte 40.  
 —, spezifische 33.  
 Leitung, Anlage, Dimensionierung 60.  
 —, Anordnungen, gebräuchliche 79.  
 —, Belastung der 75.  
 —, Bündel, phasenvermischte 105, 106.  
 —, flexible 78, 79.  
 —, Querschnitt der 34, 75.  
 —, starre 78.  
 —, Vermischung 76.  
 —, Verschachtelung 76.  
 —, Widerstände, verschiedener Abschnitte 78.  
 Leitvermögen des Mauerungsmaterialiales 40.  
 Lichtbogen, Erhitzung 50—54, 91 bis 93.  
 —, lang 64.  
 Lichtbogenlänge, reduzieren 64.  
 Lichtbogenofen 89, 91.  
 —, reiner 169.  
 Lichtbogenspannung 96.  
 Lichtbogenwiderstandserhitzung, komb. 92.  
 Lichtbogenwiderstandsofen, komb. 63.  
 Lindblad 200.  
 Lindenbergr., Stahlwerk 96.  
 Lilienroth 203.  
 Lorenz, C., AG. 220.  
 Luftspalt 228.  
  
 Magnesit 166, 167.  
 —, Leitfähigkeit 40.  
 Magnesitsteine 108.  
 Magnesiumschlacken 165.  
 Magnet 219.  
 Magnetisierbarkeit 207.  
 Magnetisierungsstrom 205.  
 Magnetisierungswiderstand 204.  
 Mantel, zweiter 142.  
 Mantel, Blech- 121.  
 Mantel- und Kerntransformatoren 67.  
 Mantelung der Elektroden 178.  
 Material- und Energieaufwand für Korund 29.

- Material, feuerfestes 169.  
 Mauerungsmaterial, Leitvermögen 40.  
     Maximalwert 57.  
 Mehratomige Dämpfe 8.  
 Mehrphasensystem 60.  
 Mehrphasenströme, Darstellung charakteristischer Größen 60.  
 Meiser, F. 112.  
 Miguet 2, 69, 71, 72, 88, 95, 97, 105, 106, 152, 187, 193, 197.  
 Miguet-Elektrode 122, 123, 124, 153, 155, 188ff., 198ff.  
 —, Aufhängung 153.  
 Mikanit 168.  
 —, Heiz- 168.  
 —, —Amber- 168.  
 Mischkonveyer 181.  
 Mittelelektrode 92.  
 Mittlere spezifische Wärme 4.  
 Moisan 3.  
 Molekularwärme 6.  
 Momentanwert 57.  
 Mönkemöller Bonner Maschinenfabrik 91.  
 Motorantrieb, automatisch gesteuerter 155.  
 —, handgesteuerter 155.  
 Muffelofen, elektrischer 49, 90; 91.  
  
 Nachstellen der Elektroden 146, 147, 155.  
 Nathusius-Ofen 96, 130, 172.  
 Naturglimmer 168.  
 —, Amber- 168.  
 Neolit 168.  
 — -Werke AG. 168.  
 Neuhaus, H. 232.  
 Niederschachtofen, Roheisen 194, 200.  
 Niederfrequenzofen 213, 216.  
 Niederfrequenz 218.  
 Nichtleiter, Erhitzung 90.  
 Nippelhöhe 116.  
 Nippel, zylindrische, Dimensionierung der 81, 114.  
 — —. Tab. 125.  
 Norske Aktieselskab for Elektrokemisk Industri 120, 121.  
 Northrup, E. F. 220.  
 Nürnberger Ofen 93.  
 Nusselt 34, 48.  
  
**Ofenanlage, Wirk- und Scheinwiderstand** 59.  
 Ofenauskleidungen 113.  
 Ofenböden 113.  
 Ofenbrücke 129.  
 Ofenbühne 79.  
 Ofendeckel 108.  
 Ofendimensionen und Einsatzgewicht 70, 106.  
 Ofeneinheiten, Vergrößerung 63.  
 Ofenentleeren 110.  
 Ofenfutter aus Formkohlen 80, 113.  
 Ofengang, unruhig werdender 63.  
 Ofen-Gasabzugsrohr 66, 102.  
 Ofengefäß, kippbar 107.  
 Ofen, herdbeheizte Typen 58, 95.  
 Ofenköpfe, gemauerte 90.  
 Ofenkörper 97.  
 —, elliptischer 67, 103.  
 —, rechteckiger 62, 99.  
 —, —, Verspannung 63, 100.  
 —, runder 68, 104.  
 Ofenmauerwerk 108.  
 Ofenregulierung, automatische 61.  
 Ofenschacht, elliptischer 103.  
 —, kreisrunder 98.  
 Ofenschaulinien 12, 48.  
 Ofentemperatur, graphische Ermittlung der 11, 46.  
 Ofentransformator, Anordnung 74.  
 —, Beschreibung 63, 69—73.  
 —, Brown-Boveri, Drehstrom 15300 kVA 27, 69.  
 —, höhere Nennleistung 65.  
 —, Wartung 65.  
 Ofenwachsen 102.  
 Ofenwände 38.  
 Ofenzuleitungsanlage 76.  
 Ofen-Bauart, chemische 169, 177.  
 —, Drehstrom- für Ferrolegierungen, Gesamtans. 173, 186.  
 —, — für Ferrolegierungen, Beschickungsbühne eines 172 185.  
 —, Siemens, Drehstrom für FeMn, 6500 kW 166, 182.  
 —, —, — für FeSi, 6500 kW 169, 170, 184, 185.  
 —, Drehstrom für Karbid, 12000 kW 178, 165a u. b, 179, 180.  
 —, —, — Beschickungsbühne eines 15000 kW- 174, 187.  
 —, —, — gedeckter 183, 183a, 194, 195.  
 —, — geschlossener 185, 196.  
 —, — für Phosphorsäureanlage, Schema einer 189, 202.  
 —, —, Anlage f. Roheisen (Grönw.) 187, 200.  
 —, — Elektrodenbühne eines — (Grönw.) 188, 201.  
 —, — für Roheisen, 8000 kW (Helf.) 175, 186.  
 —, —, — (Thyssl.) 194, 184a, 184b, 195.  
 — Horry 60, 96.  
 — Miguet 95, 97.  
 — —, Abdichtung 199.  
 — —, Ansicht eines 179, 191.  
 — —, Beschickungsvorrichtung eines 178, 191.  
 — —, Bodenelektrode 197.  
 — —, Chargierschnecken 199.  
 Ofen-Bauart, Miguet, Doppelmantel 197.  
 — —, geschlossener 186, 198.  
 — —, Herd im Bau 69, 105.  
 — —, Isolierschicht 198.  
 — —, offener 177, 189.  
 — —, pneumatische Stochvorrichtung eines 181, 192.  
 — —, Schutzkonus eines 180, 192.  
 — —, Spannung 199.  
 — —, Stochbühne eines 182, 193.  
 — Nürnberg 56, 94.  
 — Rathenau 57, 94, 126, 155.  
 — Siemens- f. FeMn-Anlage (6500 kW) 166, 182.  
 — — für FeSi-Anlage (6500 kW) 169, 184.  
 — Wilson- 55, 93.  
 —, Induktions- s. Induktionsöfen.  
 —, — mit Eisenkern 203, 213, 216.  
 — Kjellin- 213, 214.  
 — Röchling-Rodenhauser, Einarinnenofen 214, 215.  
 — —, Zweirinnenofen 214.  
 —, Induktions- ohne Eisenkern 218, 225.  
 —, 1000 kg Stahl- 227, 213, 231.  
 —, metallurgische 2, 95, 169.  
 —, —, Bonner 51, 91, 170.  
 —, —, Brown-Boveri 1,5 t 141, 158.  
 —, —, — 3—4 t 156, 173.  
 —, —, — 5 t 157, 174.  
 —, —, — 6 t 144, 159.  
 —, —, — 20 t 159, 176.  
 —, —, — 25 t 158, 175.  
 —, —, Demag 5000 kW 160, 176.  
 —, —, — 1500 kW 161, 162, 177.  
 —, —, — 20 t mit Söderberg-elektroden 98, 128.  
 —, —, — 4000 kW Heroult- 99, 129.  
 —, —, Fiat 96, 107, 100, 129.  
 —, —, Heroult 2, 2.  
 —, —, erster in Deutschland 96, 61, 97.  
 —, —, — Steinplan für Deckel 71, 107.  
 —, —, —, Zustellung 72, 108.  
 —, —, —, Deckel 73, 108.  
 —, —, Nathusius- 96, 130, 102, 131.  
 —, —, Rennerfeldt- 52, 91; 155, 170.  
 —, —, — in Kippstellung 53, 92, 171.  
 —, —, Rheinmetall 54, 92, 171.  
 —, —, Russ, elektrischer Muffel- 49, 90.  
 —, —, — Elektrodenregulierung eines 0,5 t 137, 156.  
 —, —, — 100 kg Lichtbogen- 153, 170.

- Ofen-Bauart, metallurgische, Russ, 0,5 t Lichtbogen- 154, 171.  
 —, —, 0,5 t Lichtbg.-Wid. 155, 172.  
 — Siemens-Werner, Tiegel- mit Stabelektrode I, 1.  
 — — 4 t 143, 159.  
 — — 15 t 163, 178.  
 — — 27 t 164, 178.  
 Öfen, automatisch regulierbare 61.  
 —, Drehstrom-, geschlossene 195, 185, 196.  
 —, —, Beobachtungsöffnungen 197.  
 —, —, Beschickungsschacht 197.  
 —, —, Explosionsklappen 197.  
 —, —, Gasüberdruckmessung 197.  
 —, —, Hochofenbegichtung 197.  
 —, —, Isolierstücke 197.  
 —, —, Kühltaschen 197.  
 —, —, Stochöffnungen 197.  
 —, —, Stromzuführungsrohre, wasserdurchflossene 197.  
 —, —, Taschen, wassergekühlte 197.  
 —, —, Vorschächte 197.  
 —, Elektroden- 61, 89.  
 —, FeSi-, Schema eines 170, 185.  
 —, gedeckte 101, 155, 193.  
 —, geschlossene Helfenstein- 64, 101.  
 —, kofferförmige 107.  
 —, kreisrunde 104.  
 — nach Chaplet 105.  
 —, offene Helfenstein- 65, 101.  
 —, ruhig gehende 155.  
 —, Lichtbogen- 169.  
 —, —, (Strahlungsöfen) Schema 50, 91 (s. a. Ofenbauart: Bonner, Rennerfeldt, Rheinmetall, Russ).  
 —, — 153, 170.  
 —, — 154, 171.  
 —, Niederschacht- 194.  
 —, —, Roheisen 200.  
 —, —, Holzkohle 200.  
 —, —, mulmiges Erz 200.  
 —, —, Schlich 200.  
 —, Widerstands-Lichtbogen-, kombinierte 63, 93.  
 —, —, — mit Bodenelektroden 95.  
 —, —, — Brown-Boveri 3—4 t 156, 173.  
 —, —, — 20 t 159, 176.  
 —, —, — Demag 160, 176, 161, 177.  
 —, —, — Electro-Metals 95.  
 —, —, — Fiat 96, 176.  
 —, —, — Ford-Motor, 60 t 172.  
 —, —, — Girod 95.  
 Öfen, Widerstands-Lichtbogen-, Greaves-Etchells 95, 172.  
 —, —, —, herdbeheizter 95.  
 —, —, — Keller 95.  
 —, —, — Nathusius 96, 172.  
 —, —, — Nürnberger 93.  
 —, —, — Russ, 0,5 t 154, 171.  
 —, —, — — 155, 172.  
 —, —, — 15 t Siemens & Halske 163, 177.  
 —, —, — Wilson 93 (s. a. Ofenbauart: Heroult, Brown-Boveri, Demag, Fiat, Miguet, Russ, Siemens usw.).  
 —, Widerstandserhitzung, direkte, Schema 46, 89.  
 —, —, indirekte, Schema 47, 90.  
 —, —, Achseon- 48, 90.  
 —, —, Glüh- 90.  
 —, —, Härte- 90.  
 —, —, Muffel- 49, 90; 91.  
 —, —, Temper- 90.  
 —, —, Tunnel 90, 91.  
 —, technische, Wärmeverluste 38, 10a, 10b, 39.  
 Öffnungen für den Durchtritt der Elektrode 109.  
 Ohmscher Widerstand 76, 204, 205.  
 Ohmsches Gesetz 56, 57, 205.  
 —, Verbraucher 14, 57; 58, 59, 61, 89.  
 Öldruckzylinder 153.  
 Ölfüllung eines Transformators 73.  
 Ölheizapparat 73.  
 Öloxydation 74.  
 —, Häutchen 208, 209.  
 —, Temperatur 73.  
 Ölprobe auf Wassergehalt 73.  
 Ölreinigung 74.  
 Ölschalter 74.  
 Öltransformator Elin 26, 68.  
 Öltrocknung 73, 74.  
 Oxydationstemperatur des Öles 73.  
 Paket Elektroden 84, 113, 181, 187.  
 — — nebeneinander 43, 86.  
 Pecelet 36.  
 Perioden 57, 75.  
 Permeabilität 223, 224.  
 —, magnetisch 78.  
 Perthies 47.  
 Petrolkoks 111.  
 Pferdestärke 56.  
 Phasen 60, 84, 86, 87.  
 —, gegenseitige Beeinflussung der 44, 86.  
 Phasenspannung 64, 85.  
 Phasenvermischung 81.  
 Phasenverschiebung 58, 174, 181, 212.  
 — Vektordiagramm 16, 58.  
 Phosphor 203.  
 —, Wöhler 203.  
 Phosphor, Energiebedarf Lilienroth 203.  
 —, I. G. Piestritz 201.  
 —, — Leuna 201.  
 Phosphorpentoxyd 14.  
 Phosphorsäure 201.  
 Pierrit 135, 168.  
 Pinchen 209.  
 Pinch-Effect 210.  
 —, Erklärung 210.  
 —, Mittel gegen den 210.  
 — — -Versuche 211.  
 — mit Aluminium 211.  
 — mit Zinn 211.  
 — mit Quecksilber 211.  
 Plania-Werke 113, 115, 116, 148, 149.  
 Polysilikate 14.  
 Polardiagramm 57.  
 Preßdruck 148.  
 Preßflüssigkeit 149, 150.  
 Preßluft 143, 146.  
 —, Leitung 192.  
 Preßluftzylinder 191.  
 Preßorgane, Rutschfassung 146.  
 Preßring 147—149, 153.  
 Preßschraubefassung 144.  
 Preßvorrichtung, selbsthemmend 150.  
 Primärseite 60.  
 Primärspannung 63.  
 Primärstrom 209.  
 Pufferschichten 213, 226.  
 Quarzit 25.  
 Quarzrohr 25.  
 Querschnitt, ideell 39.  
 — des Kerns 207.  
 Querhaupt 79, 80, 132, 137, 179.  
 Radiatoren 67.  
 Raffinationsprozeß 63.  
 Rahmen 250.  
 Rankin 16, 17.  
 — und Mervin 17.  
 Rauchfreiheit, vollkommen 192.  
 Rathenau-Ofen AG. 94, 126, 155.  
 Reaktanz 66, 76, 77, 80.  
 Regularbeit 156.  
 Regler, Bergmann 160, 161 148, 162.  
 —, Brown-Boveri 151, 164.  
 —, Cuenod Höchstschnell- 163.  
 —, Siemens-Schuckert 161, 149, 162.  
 —, Thury 159, 145, 160.  
 Regleranlage, Schaltschema 147, 161.  
 —, — Brown-Boveri 150, 163.  
 —, — Cuenod, Thuri 146, 160.  
 —, —, Höchstschn. 152 164.  
 Regulierung bei kleinen Öfen 169.

- Reibungsklötze 145.  
 Reihenschaltung 88.  
 Remanenz 208.  
 Rennenfeldt Ivar 92, 155, 170, 171.  
 — Ofen neuere Bauart 52, 91, 92.  
 — —, Kippstellung 53, 92.  
 Restelektrode 117.  
 Retortenkoks 111.  
 Rheinische Elektrostahlwerke 91, 170.  
 Rheinische Metallwerke 93, 171.  
 Rheinmetallöfen 54, 92, 171.  
 Ribaud M. G., Straßburg 220.  
 Richards 7, 10.  
 Ringfassungen 126, 140, 141, 153.  
 Ring-Zangenfassung 150.  
 Ringleitung 80, 81, 83, 41, 82.  
 —, Abnahme einer Phase von 40, 81.  
 Ringofen 112.  
 Ringspalt, Abdichtung 109.  
 Rippen, Söderberg, Mantel 121.  
 Rocaten 135, 168.  
 Röchling-Rodenhauser-Ofen 214, 215.  
 Roheisenzeugung 199.  
 — unter Schlacke 27.  
 — aus Erzen 186.  
 Roheisen, Energiebedarf 194.  
 Roheisenherstellung 194.  
 Rohre, wassergekühlt 79.  
 Röhrengenerator 227.  
 Rohrstücke, Stoßstellen der 83.  
 Rollen des Metallbades 209.  
 Rotorpolzahl 228.  
 Ruff 9.  
 Rundelektrode, Querschnitt der 113, 140.  
 Ruß aus Erdgas 111.  
 —, Köln 91.  
 Rutschfassung 80, 146, 150.  
  
 Sammelschienen 88.  
 Savoisiene Sté Const. Electr. 72.  
 Scott-Schaltung 23, 62; 61, 72, 88, 171.  
 Schaltung, Dreieck- 21, 61, 24, 64.  
 — zweier Einphasenöfen 45, 88.  
 —, Scott 23, 62.  
 —, Stern- 20, 61.  
 —, Transformator- 81.  
 — V 88, 42, 84.  
 Schalpult 74.  
 Schamotte 166.  
 —, Leitfähigkeit 40.  
 Schaulinien kugel- u. würfelf. Ofen 12, 48.  
 Scheinleistung 59, 75, 85.  
 Scheinwiderstand einer Ofenanlage 59.  
 Schienenringleitungen 83.  
 Schirme 190.  
 Schlacken 14.  
 Schlacken, Aluminium 165.  
 —, Chrom 166.  
 —, Index 19, 20.  
 —, Magnesium 165.  
 —, saure 14.  
 —, Substanzen-Wärmeabgabe Tab. 44.  
 Schlackenabstich 183.  
 Schlackenanalyse 7.  
 Schlackenrezept 7.  
 Schlackenwagen 183.  
 Schlich, norwegisch 200.  
 Schließung des Herdes 178.  
 Schlitze ged. Ofen, Helfst. 101.  
 Schmelzen von Kupfer 169.  
 — von Kupferlegierungen 169.  
 — von Nickel 169.  
 —, Herdverlegung im Ofen 65.  
 Schmelzfähigkeit und Viskosität 14.  
 Schmelzgerät f. met. Lab. (Hochfrequenzofen) 229.  
 Schmelztemperaturen, Ber. der Metalle 10.  
 Schmelzwärmen 8.  
 Schraubengewinde, konische 115.  
 Schraubennippel 115.  
 Schutzkonus 154, 190, 192.  
 Schwedler, U. 220.  
 Schwerkraft 208.  
 Seilringleitungen 83.  
 Seitenwände, Stampfen der 108.  
 Sektoren, Miguet-Eelektrode 123, 139, 153.  
 Sekundärleitung 185.  
 Sekundärspannung 63, 64, 88.  
 Sekundärwicklung 78.  
 Sekundärzylinder 221.  
 Selbstinduktion 59, 75, 78, 86, 87.  
 —, Spannung 58, 75.  
 Serienofen 59, 96, 93.  
 Siedetemperaturen, Ber. d. Metalle 10.  
 Siemens, Werner 1.  
 Siemens & Halske 150, 158, 177, 181, 184, 216, 220.  
 —, Abdichtung 109.  
 Siemens-Hütten-Rutschfassung 2 150—152.  
 Siemens-Plania-Werke, Ratibor 2, 111, 113, 115—118, 148.  
 Siemens-Schuckert 69, 70, 71, 87, 161.  
 Silika 166.  
 Silikatschlacken 20.  
 Siliziumkarbid SiC 167.  
 Sillimanit 166.  
 Sinter Dolomit 107.  
 Sinter-Magnesit 107.  
 Snyder 105.  
 Solenoid 160.  
 Sonderstähle, hochlegiert 227.  
 Söderberg 111, 120, 141, 142, 147, 148, 152; s. a. Elektroden und Öfen.  
 Söderberg-Elektrode 600 mm 185.  
 — 1250 mm 186.  
 — 174, 175.  
 —, Anfahren 122.  
 —, Herstellung 121.  
 —, Dauer-, selbstbackende 141.  
 Spannung 56, 199.  
 —, phasenverschoben 88.  
 —, Umformung 62.  
 —, verkettet 64.  
 Spannungsänderung für Einphasenstrom 13a, 13b, 57.  
 Spannungsdreieck 22, 61.  
 Spannungsregulierung 159.  
 Spannungsresonanz 229.  
 Spannungsresonanzschaltung 228.  
 Spannungsschwankungen 77.  
 Spannungswandler 74.  
 Spannungsstrom und Leistungskurve, indukt. Verbraucher 15, 58.  
 — —, Ohmscher Verbraucher 14, 57.  
 Spezifische Wärmen, Berechnung 9.  
 — — fester Körper 4.  
 — — geschmolzener Körper 7.  
 — — vergaster Körper 7.  
 Spigerwerk Christiania 194.  
 Spinell 166.  
 Spulen, koaxiale 221.  
 Spulenverluste (Wasserkühlung) 224.  
 Stahlöfen, Ford 172.  
 — nach Chaplet 105.  
 —, Leitungsführung 78.  
 Stahlrohre 179.  
 Stahlwerksteer 107.  
 Stalhane 200.  
 Stampfhaus 143.  
 Stampfmasse 107, 188.  
 Stampfraum 142.  
 Stassano 91.  
 Statorzähne 228.  
 Staub, elektrisch leitfähiger 63.  
 —, hygroskopischer 63.  
 — und Hitzeplage 191.  
 Steatit 168.  
 Steinkohlenkoks f. Elektroden 111.  
 Steinkohlenteer f. Elektroden 111.  
 Stephan 38, 39, 43, 52.  
 Sternschaltung 20, 61, 64.  
 Stern- u. Dreieckschaltung 24, 64.  
 Stochung 101, 191.  
 Stochungöffnungen 197.  
 Stochstangen 191, 193.  
 Stochvorrichtung, pneumatische 190, 192, 193.  
 Stochzylinder 191.  
 Stoßflächen, Schleifen der 113.

- Strahlung u. Konvektion, Berechnung der 41, 45.  
 Strahlungsöfen, Schema 50, 91.  
 Stromabnahmestellen 80, 83.  
 Stromanklemmung 94, 193.  
 Strombelag 223.  
 Stromdichte Verteilung 222.  
 Stromleitungen, Richtlinien f. d. Entwurf der 74.  
 —, Hohlquerschnitt 76.  
 —, Unterteilung der 76.  
 Stromresonanzschaltung 229.  
 Stromrohre, wassergekühlte 181.  
 Stromstärke 56, 75.  
 Stromwandler 74.  
 Stromzuführungen 169.  
 Stromzuführungsrohre 150, 152, 185, 187.  
 —, wasserdurchflossene 179.  
 Stromzuleitung bei kleinen Öfen 38, 78.  
 — bei großen Öfen 39, 79.  
 Stromzuleitungsrohr 143.  
 Stückelektroden 113.  
 Stückdurchmesser 225.  
 Stückgröße 225.  
 Strutt, M. 220.
- Tabellenwerke 11.  
 Taschen, wassergekühlte 197.  
 Technische Öfen (Wärmeverluste) 38.  
 Teer 111.  
 —, Dolomit- 107.  
 —, Magnesit- 107.  
 Temperaturschwankungen 79.  
 Temperöfen 90.  
 Theorien über Wärmeabgaben, praktische Anwendung 38.  
 Theoretisch mögliche Temperatur 12.  
 Theoretischer Energiebedarf 29.  
 Thermische Mho 33.  
 — Ohm 33.  
 Thury-Regler 159, 145, 146, 160.  
 Thyssland-Ofen 194.  
 Tiegeldurchmesser 225.  
 Tiegelöfen 93.  
 Tiegel, Siemens 1, 1.  
 Titandioxyd 14.  
 Tragarm 127.  
 Tragbrille 142, 143, 145.  
 Tragkonstruktionen 125, 126, 132  
 Tragnippel 116.  
 Tragrahmen 142, 148.  
 Transformator 62, 82, 88.  
 —, Anzapfung 66.  
 —, Aufstellung 80.  
 —, — Ort 67.  
 —, Bauarten 25, 67; 68—73.  
 —, Bauart B. B. C. 27, 69.  
 —, — Elin 26, 68.  
 —, — Sav. 32, 33, 71, 72.
- Transformator, Bauart Sav. Miguet 34, 35, 72.  
 —, — — Miguet-Perron 36, 73.  
 —, — SS 28, 29, 31, 69, 70.  
 —, Bemessung 64.  
 Transformatoreisen 207.  
 Transformator Kühlung 67.  
 Transformator Kühlrippen 68.  
 Transformator kurzschlußspannung 66.  
 Transformatorleistung 65.  
 Transformator mantel u. Kern 67.  
 Transformator nennleistung 65.  
 Transformator öl 73, 74.  
 —, Füllung 73.  
 —, gekühlt 67.  
 Transformator regelschalter SS 30, 70.  
 Transformator schaltungen 81—84.  
 Transformator, Schutzwand für 185.  
 —, Wartung 73.  
 Trennschalter 74.  
 Trennwände 184.  
 Tunell-Öfen 90, 91.  
 Türpfeiler 108.
- Übergangswiderstände 35.  
 Überlandleitung 77.  
 Umformer, rotierend 62.  
 —, ruhend 62.  
 Umformung der Spannung 62.  
 Ummagnetisierung 79.  
 Umwandlungswärmen der Elemente 10.  
 Unverkettetes Zweiphasensystem 62.
- Vakuumgefäß 230.  
 Vektor 86.  
 Vektordiagramm (Phasenverschiebung) 58, 85, 86.  
 Ventilationsanlage (Versagen) 67.  
 Ventilation, künstliche 67.  
 Verdampfungswärmen 9.  
 Vergrößerung der Ofeneinheiten 63.  
 Verlängerungselektrode 116.  
 Verlustwiderstand 224.  
 Versuchsöfen (Wärmeverluste) 38.  
 Verschlackungswärme 12.  
 Vertikalbewegung 79.  
 Vierkantelektroden (Querschnitt) 113.  
 Viskosität 14.  
 —, Maß 19.  
 Vitrit 135, 168.  
 Vogt 8.  
 Volta 1.  
 Vorschächte geschl. Öfen 197.  
 Vorschaltung 88.
- Wachsen der Mauerung 107.  
 — der Silikasteine 166.
- Wartenberg, Formel 9.  
 Wartung der Transformatoren 73.  
 Wattmeter 75.  
 Wärmeabgabe an bewegte Luft 37.  
 — an ruhende Luft 35.  
 — durch Mitteilung (Konvektion) 35.  
 —, praktische Anwendung der Theorien 38.  
 Wärmearaufwand, gesamt 9.  
 Wärme, Atom- 6.  
 Wärmeberechnung, chemische (Wärmetönungen) 10.  
 — aus latenten u. spezifischen 9.  
 —, physikalische 4.  
 Wärmebilanz, theoretische 9.  
 Wärmeeinheiten 56.  
 Wärmeersparnis durch Schutz- hüllen 47.  
 — durch Verringerung der Wärmestrahlung 52.  
 — durch Wandverstärkung 49.  
 Wärmefluß, Berechnung 39.  
 —, gesamt 41.  
 — durch Ofenwand 9a, 39.  
 Wärmeisolierstoffe 168, 169.  
 —, Joulesche 46, 47.  
 Wärmeleistung 221.  
 Wärme, Menge der verbrauchten 56.  
 —, mittlere spezifische 4.  
 —, Molekular 6.  
 —, spezifische, fester Körper 4.  
 —, —, geschmolzener Körper 7.  
 —, —, vergaster Körper 7.  
 —, Schmelz- 8.  
 Wärmestauung 65.  
 Wärmestrahlung 37.  
 Wärmetönungen der Verbindungen 11.  
 Wärmeumwandlung der Elemente 10.  
 Wärme, Verdampfungs- 9.  
 Wärmeverlust (Tb.) 42, 47, 107, 226.  
 — durch Elektroden 46.  
 — durch die Ofenwände 38.  
 —, Ofen zum Rechenbeispiel 10a, 10b, 39.  
 Wärme, Verschlackung 12.  
 Wechselstrom 74, 75.  
 Weidmann, H. (Isolierstoffe) 168.  
 Werner & Pfeleiderer 111.  
 Wever, F. 220, 232.  
 Wiegenkonstruktion 174.  
 Wiegenkufen 174.  
 Widerstand 56, 204.  
 —, Blind- 221.  
 —, Dreieck 18, 59.  
 —, Erhitzung 89, 90.  
 —, —, direkte 46, 89.  
 —, —, indirekte 47, 90.  
 —, Lichtbogenerhitzung, komb. 92.

- Widerstand, induktiver 59, 61, 75.  
 Widerstandskörper 90.  
 Widerstandlichtbogenöfen, komb. 93.  
 Widerstand, Ohmscher, -induktiv, kapazitiv 61.  
 Widerstandofen, Schema 46, 89.  
 Widerstand, Wirk- u. Blind- 221.  
 —, — u. Schein- einer Ofenanlage 59.  
 —, Wirk- 221, 224, 228.  
 Wicklung 60.  
 Wilson, T. L. 3.  
 — -Ofen 93.  
 Windungsdichte 223.  
 Windungszahl 64.  
 Windkessel 154.
- Windwerk 142, 166, 181.  
 Wirbelstrombildung 79, 227.  
 Wirklast 228.  
 Wirkleistung 59, 75.  
 Wirkwiderstand 59, 221, 224, 228.  
 Wirkungsgrad 59.  
 Wirtschaftlichkeit 60.  
 Wisdom Shaviningen Chemicals Ltd. 144, 145, 152.  
 Wöhler 201.  
 Wotschke 84.
- Zahnkranz für den motorischen Antrieb 175.  
 Zander 6. 220.  
 Zangenbacke 131.  
 —, Fassung, Brown Boveri 96, 127.
- Zangenbacke, Fassungen für Elektroden 126 bis 137, 140.  
 —, —, Demag 97, 127.  
 —, — für Paketelektroden 130, 103, 132.  
 Zinn 208, 209.  
 Zinnverschluß als Rohrverbindung 104, 132.  
 Zusatzbeschickung 190.  
 Zusatztransformator SS 87.  
 Zustand, magnetischer 207.  
 Zustellungskosten 227.  
 Zweck der Umspannung 62.  
 Zweiphasensystem, unverkettet 62.  
 Zweiphasenrinnenofen 214.  
 Zwischentransformator 63.  
 Zylindrische Nippel, Tab. 125.