

# Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung

Von

**Dr. Victor Paschkis**

Beratender Ingenieur VBI

Mit 251 Abbildungen im Text  
und 3 Tafeln



**Berlin**  
Verlag von Julius Springer  
1932

ISBN 978-3-642-90227-7

ISBN 978-3-642-92084-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-92084-4

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

**Copyright 1932 by Julius Springer in Berlin.**

**Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1932**

## Vorwort.

Der Bau elektrischer Industrieöfen wurde bis heute mit wenigen Ausnahmen empirisch durchgeführt. Über Teilfragen haben für Induktionsöfen vor allem Northrup und W. Fischer, über Lichtbogenöfen Riecke und über Widerstandsöfen Rohn und Stassinot gearbeitet; außerdem darf für die letztgenannte Ofenart auf eine Reihe von Einzelarbeiten des Verfassers hingewiesen werden. Es fehlt aber bis heute eine einheitliche Zusammenfassung über die gesamten Zusammenhänge und eine systematische Berechnung der Elektroöfen; dies ist erklärlich, da es sich bei diesen Öfen um ein Grenzgebiet zwischen der Wärmelehre, der Elektrotechnik und der Chemie der Ofenbaustoffe handelt. Weiter wird die Ofenbauform noch von der Technologie des Verfahrens, das in dem Ofen vorgenommen werden soll, erheblich beeinflusst.

Das vorliegende Buch setzt sich die Aufgabe, eine einheitliche, den ganzen Ofen umfassende Darstellung der Zusammenhänge zu geben. Diese sind in dem einleitenden Abschnitt allgemeingültig behandelt. Der Ausbau dieser allgemeinen Grundlagen zu einer ins einzelne gehenden Rechenvorschrift ist in diesem Buch nur für die (für die Weiterverarbeitung hauptsächlich in Betracht kommenden) Widerstandsöfen (oder nach der Bezeichnung dieses Buches „mittelbar beheizten Widerstandsöfen“) durchgeführt. Diese Rechenvorschrift ermöglicht eine lückenlose Berechnung elektrischer Widerstandsöfen in einer Art und Ausführlichkeit, wie sie sonst auch für Maschinen angewendet wird, aber für Öfen bisher nicht möglich war. Der Inhalt dieses Buches stellt demnach eine Originalarbeit dar, die sich nur in geringem Umfang auf bestehende Veröffentlichungen stützen konnte. Gerade wegen des umfassenden Ineinandergreifens war aber der Umfang der Arbeit gegeben, und verbot die Veröffentlichung in wissenschaftlichen Zeitschriften. Die Tatsache, daß es sich bei der Elektrowärme um ein Grenzgebiet handelt, hat dazu geführt, daß in fast allen Arbeiten, die sich mit der Elektrowärme grundsätzlich auseinandersetzen, die eine oder andere der drei Grundwissenschaften vernachlässigt wird. Meist ist dies die Wärmelehre; gerade die Wärmelehre ist aber für die Beherrschung der Öfen von ausschlaggebender Bedeutung. Auf sie ist daher nicht nur bei den über die Hälfte des Buchumfangs in Anspruch nehmenden Grundlagen, sondern auch bei der Besprechung der Ausführungsformen, die hier erstmalig systematisch behandelt werden, in weitestem Maße Rücksicht genommen.

Das Gebiet der elektrischen Öfen für die weiterverarbeitende Industrie bedarf zunächst nach zwei Seiten hin der Abgrenzung: Einmal

muß die Grenze gegenüber den Öfen für die Rohstoff und Halbzeug erzeugende Industrie, und dann gegen die Geräte gefunden werden.

Die Grenze gegen die Öfen für die Rohstoff- und Halbzeugindustrie war verhältnismäßig leicht zu finden, da eine Formgebung durch Gießen sich eindeutig als Halbzeugfertigung erklären läßt. Über die wichtigsten hierher gehörigen Aufgaben der Elektrowärme bestehen ausführliche Bücher. Der Ausbau der in diesem Buche gegebenen allgemeinen Berechnungsgrundlagen für diese Öfen wird unschwer gelingen.

Als Geräte sind — nach Meinung des Verfassers — alle Gegenstände der Elektrothermie zu bezeichnen, bei denen die Erwärmung nicht in einem geschlossenen Hohlraum (wie bei Öfen) erfolgt, sondern ganz oder fast ganz in der freien Umgebung, wie z. B. beim Schweißen. Das Gebiet der Geräte ist außerordentlich groß. Die Aufgabenstellung ist meist in noch erheblich stärkerem Maß auf die Technologie der Anwendung zugeschnitten als bei den Öfen, und so mußte — trotz der gewissen Willkür, die in ihrer Ausscheidung liegt — auf ihre Behandlung verzichtet werden.

Eine letzte Abgrenzung bedarf noch ihrer Rechtfertigung. Diejenigen Öfen, die meist im Gewerbe — wenn auch oft im Großgewerbe — verwendet werden (wie die Backöfen, Öfen im Druckereigewerbe usw.), mußten außer Betracht bleiben. Die Gründe waren die gleichen wie die für Auslassung der Geräte.

In der weiterverarbeitenden Industrie finden bis heute mit verschwindend geringen Ausnahmen „mittelbar beheizte Widerstandsöfen“ und vereinzelt „primär verbundene unmittelbar beheizte Widerstandsöfen“ Anwendung. Induktive Erwärmung ist bisher noch kaum verwendet worden, und so erschien es dem Verfasser nicht richtig, die elektrische Theorie der Induktionsöfen, die sich kurz nicht erörtern läßt, zu bringen. Lediglich die wenigen Ausführungsformen der Induktionsöfen für Weiterverarbeitung fanden Erwähnung; es steht zu erwarten, daß dieses Teilgebiet sich in der nächsten Zeit stark ausdehnen wird. Die Grundlagen der Berechnung sind, wie gesagt, allerdings nach Meinung des Verfassers für alle elektrischen Industrieöfen gleich. Erst die elektrische Auswertung wird, je nach Beheizungsart und Anwendung, verschieden sein. An die Spitze des Abschnitts „Berechnung der Widerstandsöfen“ ist daher der Versuch gestellt, eine gemeinsame Berechnungsgrundlage für alle Elektroöfen zu finden.

Das Buch wendet sich in gleicher Weise an die Erbauer elektrischer Öfen, an die Benutzer derselben, wie auch an die Elektrizitätswerke, die, wie der Verfasser aus eigener Erfahrung weiß, an der Einführung der in diesem Buch besprochenen Öfen sehr interessiert sind und auch sein müssen. Bei der Verschiedenartigkeit der Kreise, an die das Buch sich wendet, wird es sich nicht vermeiden lassen, daß dem

einen oder anderen Leser manches ihm Geläufige begegnet; so wird z. B. in dem Abschnitt über Wirtschaftlichkeit die Ausführung über Tarife usw. dem Elektrizitätswerksfachmann nichts Neues bringen können; im Abschnitt über Baustoffe wird der Werkstofflieferer keine ihm unbekanntes Tatsachen finden. Während der Erbauer der elektrischen Öfen die meisten der im zweiten Teil gezeigten Konstruktionen aus dem Fachschrifttum kennen wird, kann der Benutzer sich hier eine Übersicht über die gebräuchlichsten Formen verschaffen. Mit wenigen Ausnahmen verlangt jeder Ofen für einen bestimmten Zweck eine individuelle Planung, die die Mitarbeit von Technologen des betreffenden Gebiets erfordert. Das vorliegende Buch führt den Leser bis zur Anwendung der Einzeltechnologien heran. Zur technisch-wirtschaftlichen Entwicklung der Öfen muß aber der Fachmann, der von der Anwendungsseite her zur Mitarbeit an Ofenproblemen kommt, von sich aus wieder über die ofentechnische Seite unterrichtet sein. Auch dieser Aufgabe wird dieses Buch zu dienen haben.

Leser, denen das im Buch behandelte Gebiet völlig neu ist, dürften gut daran tun, zunächst den Abschnitt über Bauformen wenigstens in großen Zügen zu lesen, ehe sie den ersten Teil über „Grundlagen“ durcharbeiten.

Die Abschnitte über „Grundlagen“ sollen dazu dienen, die wichtigsten Zusammenhänge klarzustellen. Die vollständige Berechnung von Widerstandsöfen ist, wie erwähnt, im vorliegenden Buch erstmalig veröffentlicht worden. Der Verfasser möchte ausdrücklich betonen, daß das Buch nicht dazu führen kann, daß der Leser, ohne selbst Erfahrungen zu sammeln, Öfen bauen kann. Wie aus den betreffenden Abschnitten hervorgeht, ist man an vielen Stellen in der Berechnung der Öfen noch auf Erfahrungszahlen angewiesen, deren richtige Handhabung — wie ihr Name sagt — Sache der Erfahrung ist, die durch das Lesen dieses Buches nicht ersetzt werden kann. Wenn trotz der Unmöglichkeit, Öfen ganz zu berechnen, die einschlägigen Abschnitte verhältnismäßig ausführlich gehalten wurden, so geschah dies aus dem Gedanken, daß die Anwendung der Erfahrung durch Erkenntnis der physikalischen Zusammenhänge wesentlich erleichtert wird.

Im Abschnitt „Ofenbaustoffe“ fanden die nichtmetallischen Baustoffe eine breitere Behandlung als die metallischen, weil es den meisten aus dem Maschinenbau kommenden Ofenbauern etwas ungewohnt ist, mit keramischen Materialien zu arbeiten, deren Eigenschaften ihnen oft weniger geläufig sind als die metallischer Baustoffe.

Einer gewissen Rechtfertigung bedarf in diesem Buch auch der Abschnitt über Wirtschaftlichkeit. Man kann in der letzten Zeit in amerikanischen Zeitschriften wiederholt die Meinung vertreten finden, der elektrische Ofen hätte in Amerika in Übereilung ein zu breites Feld

erobert. Die Ausbreitung der Elektrowärme habe sich deswegen in der letzten Zeit wesentlich verlangsamt. Wenngleich sich diese Behauptungen, die dem Verfasser auch von amerikanischen Ofenfachleuten persönlich bestätigt wurden, zahlenmäßig mit Rücksicht auf die Wirtschaftskrise nicht prüfen lassen, so erscheinen sie doch recht glaubwürdig. Eine derartige Entwicklung wäre für deutsche Verhältnisse mit Rücksicht auf die Kapitalknappheit verhängnisvoll. Man sollte tatsächlich beim Bau der elektrischen Öfen die Wirtschaftlichkeit sehr gründlich prüfen. Allerdings ist diese Prüfung eine sehr schwierige und undankbare Aufgabe. Um hier einige Anhaltspunkte zu geben, ist der Abschnitt über Wirtschaftlichkeit eingefügt und auch recht ausgedehnt worden. Bei richtiger Prüfung der Wirtschaftlichkeit werden sich genügend viele Anwendungen für den elektrischen Ofen ergeben, und man hat es dann nicht nötig, sich um Anwendungen zu bemühen, die auf die Dauer nicht für die Elektrowärme zu gewinnen sind. Vor allem die Elektrizitätswerke haben an einer derartigen Entwicklung, daß nämlich der Anschluß neuer Öfen lieber langsam aber dafür ohne Rückschläge erfolgt, das größte Interesse.

Aus der Fülle des beschreibenden Materials sind bei den Ausführungsformen nur diejenigen Arbeiten erwähnt, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Inhalt dieses Buches stehen. Bei der Unergeschlossenheit des hier behandelten Gegenstandes ist es selbstverständlich, daß eine große Zahl von Öfen in den Zeitschriften beschrieben wird, ohne daß sie technisch Neues oder besonders Interessantes bringen. — Die Patentliteratur ist, soweit es dem Verfasser möglich war, berücksichtigt worden, ohne daß hierbei Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann.

Bei der Darstellung der Zusammenhänge wurden in den grundlegenden Abschnitten im weitesten Maße die graphischen Hilfsmittel verwendet. Vielfach hat der Verfasser auch Nomogramme zu Hilfe gezogen und namentlich auch eine Vereinigung von Kurvenscharen und Nomogrammen. Diese Vereinigung — so erscheint es dem Verfasser — ist bisher viel zu wenig angewendet worden. Sie gestattet an vielen Stellen die graphischen Tafeln übersichtlich zu gestalten und leicht zu handhaben, während ausgedehnte und große Nomogramme unter Umständen daran zu wünschen übriglassen. Die Ausarbeitung von Tafeln ist im Buch so weit getrieben, daß die wichtigsten Teile der Ofenbemessung mit ihrer Hilfe ohne Rechnung durchgeführt werden können.

Bei der Besprechung der Ausführungsformen war der Verfasser in weitestem Maße auf die Mitarbeit der ofenbauenden Industrie angewiesen. Eine bloße Wiedergabe der in den Fachzeitschriften sich meist findenden Außenansichten würde über den Aufbau der Öfen

schr wenig sagen. Der Verfasser fand dafür und für die Notwendigkeit, Zahlen über die Öfen bekanntzugeben, bei den meisten Firmen sehr weitgehendes und dankenswertes Verständnis. Nur ganz wenige Firmen lehnten die Hergabe irgendwelcher Prinzipzeichnungen ab. Die Firmen scheuten auch nicht den oft recht umfangreichen und mühsamen Schriftwechsel bis zur Auffindung geeigneter Darstellungen und haben so wesentlich zur Ausgestaltung des zweiten Teils dieses Buches beigetragen. Ebenso haben die Materiallieferer mit dankenswerter Offenheit ihre Unterlagen zur Verfügung gestellt. Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, allen diesen Firmen sowie ihren verantwortlichen Ingenieuren an dieser Stelle seinen wärmsten Dank auszusprechen.

Weiter möchte er aber noch einer Reihe von Fachleuten danken, die ihm mit wertvollem Rat zur Seite gestanden haben. Herr Dr. W. Rohn, Hanau, hat ihm wiederholt sowohl über Werkstoffe als auch über Öfen anregende und interessante Mitteilungen gemacht. Herr Dr. H. Hiemenz, Hanau, hatte die außerordentliche Liebenswürdigkeit, die Abschnitte über Berechnung und über Baustoffe durchzusehen und eine Reihe wertvoller Hinweise für Ergänzungen zu geben. Ebenso haben die Herren Dr. Albers Schönberg und Dipl.-Ing. Bichowsky, Berlin, die besondere Liebenswürdigkeit gehabt, die Abschnitte über keramische Werkstoffe einer sorgfältigen Durchsicht zu unterziehen und mit wichtigen Ergänzungsvorschlägen zu versehen. Herr Dr. Pulfrich, Berlin, hat dem Verfasser ebenfalls in einer Reihe von Besprechungen über die Prüfung keramischer Baustoffe liebenswürdigerweise seine Erfahrungen vermittelt. Allen genannten Herren möchte der Verfasser an dieser Stelle für ihre wertvolle Hilfe aufrichtigst danken.

Weiter möchte er auch besonders seiner Frau danken, die trotz anstrengendster sonstiger Tätigkeit in treuer Mitarbeit an dem Zustandekommen dieses Buches wesentlichen Anteil hat.

Schließlich möchte der Verfasser nicht versäumen, der Verlagsbuchhandlung für ihr außerordentliches Entgegenkommen bei der Drucklegung, insbesondere bei der Beschaffung und Herstellung der Abbildungen verbindlichst zu danken.

Ein Buch über ein so neues Gebiet, wie das der elektrischen Öfen für die Weiterverarbeitung, kann keinen Anspruch darauf erheben, ein Abschluß zu sein. Im Gegenteil ist der Verfasser der Meinung, erst einen Anfang gemacht zu haben. Er bittet daher alle Fachgenossen, ihn durch Mitteilung abweichender Ansichten und Erfahrungen unterstützen zu wollen, damit das Gebiet in weiterem Ausbau immer mehr vervollkommnet werden kann.

Berlin-Johannisthal, im Januar 1932.

**Victor Paschkis.**

# Inhaltsverzeichnis.

	<b>Seite</b>
<b>Einleitung.</b>	
<b>I. Einteilung der Öfen . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>II. Grundsätzlicher Aufbau der Öfen . . . . .</b>	<b>3</b>

## Erster Teil.

### Die Grundlagen des Ofenbaues.

<b>I. Berechnung . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>A. Übersicht über die Berechnung (gültig für alle elektrischen Industrieöfen) . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>B. Berechnung der mittelbar beheizten und Elektrodenwiderstandsöfen . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>1. Durchwärmungszeit . . . . .</b>	<b>11</b>
a) ohne Berücksichtigung des Temperaturverlusts bei Beschickung des Ofens . . . . .	12
b) mit Berücksichtigung des Temperaturverlusts bei Beschickung des Ofens . . . . .	17
c) Bedeutung der Wärmeübergangszahl und der anderen in den Gleichungen auftretenden Größen für die Durchwärmungszeit . . . . .	21
d) Anwendung auf die Praxis . . . . .	26
<b>2. Ofengröße und Ofenzahl . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>3. Nutzwärme . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4. Wärmeverluste . . . . .</b>	<b>36</b>
a) Verluste bei ununterbrochenem Betrieb (Leerverluste) . . . . .	39
$\alpha$ ) Die reinen Wärmedurchgangsverluste 39. — $\beta$ ) Berücksichtigung der Wärmekurzschlüsse 50. — $\gamma$ ) Verluste durch unbedeckte heiße Flächen 52. — $\delta$ ) Einige wichtige Sonderfälle 52.	
b) Die Berechnung der Speicherwärme . . . . .	56
c) Verluste bei unterbrochenem Betrieb . . . . .	57
d) Bemerkungen zur Frage der wirtschaftlichsten Isolierstärke . . . . .	59
<b>5. Widerstände . . . . .</b>	<b>63</b>
a) Anschlußwert . . . . .	63
b) Typen der Widerstände . . . . .	64
c) Bemessung der Widerstände . . . . .	64
$\alpha$ ) Metallische Widerstände 64. — $\beta$ ) Siliziumkarbidwiderstände 74. — $\gamma$ ) Bäder 77.	
<b>6. Einige wichtige Sonderfälle . . . . .</b>	<b>81</b>
a) Wanderöfen . . . . .	82
$\alpha$ ) Berechnungsverfahren für Forderung 1, 83. — $\beta$ ) Berechnungsverfahren für Forderung 2, 84. — $\gamma$ ) Berechnungsverfahren für Forderung 3, 85.	
b) Emaillieröfen . . . . .	88

	Seite
<b>II. Schaltung und Regelung</b> . . . . .	92
1. Die Arten der Leistungsverminderung . . . . .	92
a) Änderung der Einschaltdauer . . . . .	92
b) Änderung der Aufnahme . . . . .	92
$\alpha$ ) Änderung der Aufnahme durch Aus- oder Umschalten der Heizwiderstände 93. — $\beta$ ) Änderung der Aufnahme durch Änderung der Spannung 96.	
2. Regelgenauigkeit . . . . .	98
a) Wahre und scheinbare Regeldifferenz . . . . .	98
b) Die Unempfindlichkeit des Reglers . . . . .	99
c) Charakteristik und Temperaturanstiegskurve . . . . .	100
d) Ermittlung der Regeldifferenz . . . . .	102
e) Endliche Zeitverzögerung . . . . .	103
f) Indirekt gesteuerte Öfen . . . . .	104
g) Öfen mit außen beheiztem Nutzraum (außen beheizte Muffeln) . . . . .	106
3. Regelschaltungen . . . . .	108
<b>III. Ofenbaustoffe</b> . . . . .	109
<b>A. Metallische Baustoffe</b> . . . . .	111
1. Übersicht über die Baustoffe . . . . .	111
2. Eigenschaften und ihre Prüfung . . . . .	113
a) Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre . . . . .	113
$\alpha$ ) Prüfung der Lebensdauer durch Messung der Widerstandsänderung 115. — $\beta$ ) Prüfung der Lebensdauer durch Messung der Gewichtsänderung 115. — $\gamma$ ) Unmittelbare Prüfung der Lebensdauer 116.	
b) Beständigkeit gegen die Auflagematerialien . . . . .	116
c) Mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit) . . . . .	119
d) Unempfindlichkeit gegen raue Behandlung . . . . .	121
e) Möglichst kleine Alterung . . . . .	121
f) Leichte Bearbeitbarkeit . . . . .	122
g) Wärmeausdehnung . . . . .	122
h) Entsprechender spez. Widerstand . . . . .	123
i) Temperaturkoeffizient des Widerstandes 0 oder positiv . . . . .	123
k) Sichere Reproduzierbarkeit . . . . .	124
<b>B. Nichtmetallische Widerstände</b> . . . . .	125
a) und b) Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre und gegen die Auflagematerialien bei Betriebstemperatur . . . . .	125
c) Mechanische Festigkeit . . . . .	125
d) Unempfindlichkeit gegen raue Behandlung . . . . .	125
e) Möglichst kleine Alterung . . . . .	125
f) Leichte Bearbeitbarkeit . . . . .	126
g) Geringe Längendehnung . . . . .	126
h) Spezifischer Widerstand . . . . .	126
i) Temperaturkoeffizient des Widerstandes . . . . .	126
k) Leichte Reproduzierbarkeit . . . . .	127
<b>C. Keramische Baustoffe.</b> . . . . .	127
1. Die wesentlichsten Eigenschaften der keramischen Baustoffe vom Gesichtspunkte des Ofenbaues und die Möglichkeit ihrer Prüfung . . . . .	128
a) Mechanische Eigenschaften . . . . .	128
$\alpha$ ) Festigkeit 128. — $\beta$ ) Härte 130. — $\gamma$ ) Kantenbrüchigkeit 130. — $\delta$ ) Abrieb 131. — $\epsilon$ ) Raumgewicht 131. — $\zeta$ ) Gasdurch-	

	Seite
lässigkeit 132. — $\eta$ ) Hygroskopizität 132. — $\theta$ ) Maßhaltigkeit 132. — $\iota$ ) Erschütterungsfestigkeit 132.	
b) Wärmetechnische Eigenschaften . . . . .	133
$\alpha$ ) Wärmeleitfähigkeit 133. — $\beta$ ) Spezifische Wärme 134. — $\gamma$ ) Wärmeausdehnung 134. — $\delta$ ) Feuerfestigkeit 134. — $\epsilon$ ) Temperaturwechselbeständigkeit 134.	
c) Chemische Eigenschaften . . . . .	136
$\alpha$ ) Reaktion mit dem Widerstandsmaterial 136. — $\beta$ ) Angriff durch Schlacke 136.	
d) Elektrische Eigenschaften . . . . .	137
$\alpha$ ) Isolationsfähigkeit 137. — $\beta$ ) Elektrolyse 137.	
2. Besprechung der einzelnen Baustoffe . . . . .	137
a) Feuerfeste Steine . . . . .	138
b) Halbfeuerfeste Steine und Wärmeschutzstoffe . . . . .	138
$\alpha$ ) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von etwa 400 bis 600°, 138. — $\beta$ ) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von etwa 800...1000°, 140. — $\gamma$ ) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von 1000...1400°, 143.	
c) Elektrische Isolier- u. Konstruktionsmaterialien . . . . .	144
<b>IV. Einige Sondermeßverfahren der Ofentechnik . . . . .</b>	<b>145</b>
1. Unmittelbare Bestimmung der Nutzwärme . . . . .	145
2. Anheizversuch und Leerverluste . . . . .	147
3. Die Leerverlustanalyse . . . . .	149
4. Wärmebilanzen an Öfen mit vom Durchsatz abhängigen Wärme- gleichgewicht . . . . .	150
5. Temperaturmessung . . . . .	153
6. Temperaturverteilungsmessungen . . . . .	154
<b>V. Wirtschaftlichkeitsfragen . . . . .</b>	<b>154</b>
<b>A. Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Ofens . . . . .</b>	<b>154</b>
1. Grenzstrompreis auf Grund des Wärmekostenvergleichs . . . . .	155
a) Strompreisermittlung . . . . .	155
$\alpha$ ) Die Benutzungsstundenzahl 156. — $\beta$ ) Höhe der Stroment- nahme 157. — $\gamma$ ) Die Berücksichtigung des Leistungsfaktors 157. — $\delta$ ) Zeit der Entnahme 157.	
b) Vergleich der Wärmekosten elektrischer und brennstoffgefeuer- ter Öfen . . . . .	158
2. Grenzstrompreis auf Grund des Betriebskostenvergleichs . . . . .	162
a) Lohnkosten . . . . .	162
b) Nebenkosten . . . . .	162
3. Grenzstrompreisermittlung unter Berücksichtigung ideeller Vor- teile . . . . .	164
<b>B. Vergleich verschiedener Öfen . . . . .</b>	<b>165</b>
1. Abgeleitete Kennzahlen . . . . .	165
a) Wirkungsgrad . . . . .	165
b) Leistungsfähigkeit . . . . .	166
2. Unmittelbare Kennzahlen . . . . .	166
<b>C. Wirtschaftliche Betriebsführung . . . . .</b>	<b>168</b>
1. Die Herabsetzung des Wärmeverbrauchs . . . . .	169
2. Die Herabsetzung des Wärmepreises . . . . .	169

## Zweiter Teil.

## Ausführungsformen.

	Seite
<b>I. Einzelteile . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>A. Widerstände . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>1. Metallische Widerstände . . . . .</b>	<b>173</b>
a) Freistrahkende Widerstände . . . . .	173
$\alpha$ ) Rahmenwiderstände 173. — $\beta$ ) Wendelwiderstände 175. —	
$\gamma$ ) Kernwiderstände 178. — $\delta$ ) Mäanderförmige Widerstände 178.	
b) Eingebettete Widerstände . . . . .	180
$\alpha$ ) Glimmerumpreßte Elemente 180. — $\beta$ ) Plattenheizkörper	
180. — $\gamma$ ) Stabförmige Heizkörper 180. — $\delta$ ) Schniewindgitter	
181. — $\epsilon$ ) In die innere Ofenwand eingebettete Widerstände 181.	
c) Zur Frage der Auswechselbarkeit der Widerstände . . . . .	181
$\alpha$ ) Ein Stück der beheizten Wand wird entfernt 182. — $\beta$ ) Ein	
Teil der zur beheizten Wand senkrechten Fläche wird entfernt	
182.	
<b>2. Nichtmetallische Widerstände . . . . .</b>	<b>184</b>
<b>B. Ofenwand . . . . .</b>	<b>188</b>
<b>1. Niedertemperaturöfen . . . . .</b>	<b>188</b>
a) Wand und Decke . . . . .	188
b) Türen . . . . .	189
<b>2. Mitteltemperaturöfen . . . . .</b>	<b>190</b>
a) Wand . . . . .	190
b) Ofendecke . . . . .	191
c) Türen . . . . .	194
<b>3. Hochtemperaturöfen . . . . .</b>	<b>199</b>
<b>C. Beschickungseinrichtungen . . . . .</b>	<b>199</b>
<b>1. Beschickungseinrichtungen, die gar nicht in den Ofen kommen . . . . .</b>	<b>200</b>
<b>2. Beschickungseinrichtungen, die dauernd im Ofen bleiben . . . . .</b>	<b>202</b>
a) Hubbrücken. . . . .	202
b) Rollenherde . . . . .	203
c) Ringherdöfen . . . . .	203
d) Trommelöfen . . . . .	204
e) Endloses Band . . . . .	204
f) Vergleich der Beschickungseinrichtungen dieser Gruppe . . . . .	205
<b>3. Beschickungseinrichtungen, die nur kurzzeitig in den Ofen kommen . . . . .</b>	<b>206</b>
a) Tragholme in den Ofenschlitzen . . . . .	206
b) Wagen mit Hubplattform . . . . .	207
c) Beschickmaschine mit Greiferarmen . . . . .	208
d) Vergleich der Beschickungseinrichtungen dieser Gruppe . . . . .	208
<b>4. Beschickungseinrichtungen, die ebenso lange im Ofen bleiben wie</b>	
<b>das Gut. . . . .</b>	<b>209</b>
a) Ketten . . . . .	209
b) Wagen . . . . .	210
c) Hängebahnen . . . . .	212
<b>5. Beschickungseinrichtungen, die mehreren der unter 1—4 genannten</b>	
<b>Gruppen angehören . . . . .</b>	<b>212</b>
<b>6. Vergleich der verschiedenen Beschickungseinrichtungen . . . . .</b>	<b>213</b>
<b>D. Schalt- und Regeleinrichtung . . . . .</b>	<b>214</b>
<b>1. Temperaturmessung und Regelung . . . . .</b>	<b>214</b>
a) Fühlorgane und Übertragungsorgane . . . . .	215

	Seite
α) Temperaturen bis etwa 600°, 215. — β) Temperaturen bis etwa 1000°, 219. — γ) Temperaturen über 1000°, 222. — δ) Temperatur-Zeitregelung 223.	
b) Schaltorgane . . . . .	224
2. Schaltanlagen . . . . .	225
<b>II. Ganze Öfen . . . . .</b>	<b>225</b>
<b>A. Niedertemperaturöfen . . . . .</b>	<b>226</b>
1. Anlaß- und Anwärmöfen . . . . .	226
a) Öfen mit absatzweiser Beschickung . . . . .	226
α) Öfen ohne Luftbewegung 226. — β) Öfen mit Luftbewegung 227.	
b) Fließöfen . . . . .	229
2. Trockenöfen . . . . .	229
a) Öfen mit absatzweiser Beschickung . . . . .	231
b) Fließöfen . . . . .	234
<b>B. Bäder. . . . .</b>	<b>237</b>
<b>C. Mitteltemperaturöfen . . . . .</b>	<b>241</b>
1. Öfen mit natürlicher Atmosphäre . . . . .	241
a) Öfen ohne besondere Beschickungs- und Transporteinrichtung 241	
α) Gewöhnliche Öfen mit vertikaler Öffnungsebene 241. —	
β) Gewöhnliche Öfen mit horizontaler Öffnungsebene 243. —	
γ) Sonderöfen: Härteöfen mit selbsttätiger Haltepunktsanzeige 246.	
b) Öfen mit besonderer Beschickungs- und Transporteinrichtung .	250
2. Öfen mit künstlicher Atmosphäre . . . . .	261
a) Blankglühöfen . . . . .	261
α) Blankglühen nach Stassinot-SSW 261. — β) Ungedichtete Blankglühöfen 264. — γ) Blankglühöfen mit Schutzhaube 265. —	
δ) Schwarzglühöfen 266. — ε) Grünwald-Brown Boveri-Ofen 266. — ζ) Blankglühen über Wasserdampf 268. — η) Hedderheimer Blankglühverfahren 268. — θ) Blankglühöfen mit senkbarem Boden 269.	
b) Nitrieröfen . . . . .	270
c) Kupferlötofen . . . . .	270
d) Einsatz mit gasförmigen Zementationsmitteln . . . . .	271
3. Durchziehöfen . . . . .	272
<b>D. Hochtemperaturöfen. . . . .</b>	<b>276</b>
1. Schmiedeöfen . . . . .	276
2. Öfen mit Schutzatmosphäre . . . . .	277
3. Unmittelbar beheizte Salzbäder . . . . .	278
<b>E. Induktionsöfen für Weiterverarbeitung. . . . .</b>	<b>281</b>
<b>F. Gesichtspunkte zur Ofenauswahl . . . . .</b>	<b>282</b>
<b>Nachwort.</b>	
1. Fortentwicklung der bestehenden Konstruktionen . . . . .	284
a) Erhöhung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	284
b) Erhöhung der Betriebssicherheit . . . . .	286
c) Verbesserungen sonstiger Art . . . . .	287
2. Erschließung neuer Anwendungsgebiete . . . . .	288
<b>Zeitschriftenverzeichnis (ZV). . . . .</b>	<b>291</b>
<b>Bücherverzeichnis (BV) . . . . .</b>	<b>293</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>294</b>

# Einleitung.

## I. Einteilung der Öfen.

Die Widerstands- und Induktionsöfen für Weiterverarbeitung, mit denen sich dieses Buch ausschließlich beschäftigt, bilden einen Teil des großen Gebietes der elektrischen Industrieöfen.

Die Einteilung dieser Öfen kann sich nach dem Anwendungsgebiet (Trocknen, Härten, Schmelzen usw.) richten oder nach wärmetechnischen Gesichtspunkten (unmittelbare oder mittelbare Beheizung) oder nach der Art der Energieumsetzung. Wir wählen diese letzte Art der Einteilung, weil die Art der Energieumsetzung den Bau des Ofens besonders stark beeinflusst. Wir unterscheiden demnach:

Lichtbogenöfen.

Widerstandsöfen (Öfen mit festem oder flüssigem Widerstand).

Bei den Widerstandsöfen sind zwei sehr wichtige Untergruppen zu unterscheiden: je nachdem, ob besondere Heizwiderstände vorgesehen sind oder ob das Gut selbst als Heizwiderstand dient, kann man mittelbar und unmittelbar beheizte Widerstandsöfen unterscheiden<sup>1</sup>. Die Energieübertragung auf das Gut bei den unmittelbar beheizten Widerstandsöfen kann durch Induktion erfolgen, wenn das Gut in sich einen vollständig geschlossenen Stromkreis bildet; oder das Gut wird durch Elektroden in den Primärstromkreis eingefügt: Elektrodenöfen.

Die Induktionsöfen kann man noch in eisengeschlossene und eisenlose Induktionsöfen gliedern, so daß sich schließlich die folgende endgültige Einteilung für elektrische Industrieöfen ergibt (siehe Abb. 1):

A. Lichtbogenöfen:

1. unmittelbar beheizte,
2. mittelbar beheizte;

---

<sup>1</sup> Man kann bei den Lichtbogenöfen eine analoge Unterscheidung vornehmen; als unmittelbar beheizt sind sie anzusehen, wenn das Gas, in dem der Lichtbogen brennt, erwärmt werden soll, als mittelbar beheizt, wenn, wie z. B. bei der Stahlherstellung, feste oder flüssige Stoffe erwärmt werden sollen.

## B. Widerstandsöfen:

1. unmittelbar beheizte,
  - a) mit induktiver Koppelung (Induktionsöfen),
    - $\alpha$ ) eisengeschlossene,
    - $\beta$ ) eisenlose,
  - b) primärverbundene (Elektrodenöfen),
2. mittelbar beheizte.

Selbstverständlich sind auch Kombinationen der verschiedenen Beheizungsarten möglich.

Für die Zwecke der Weiterverarbeitung scheiden die Lichtbogenöfen aus, weil die im Lichtbogen auftretenden Temperaturen etwa

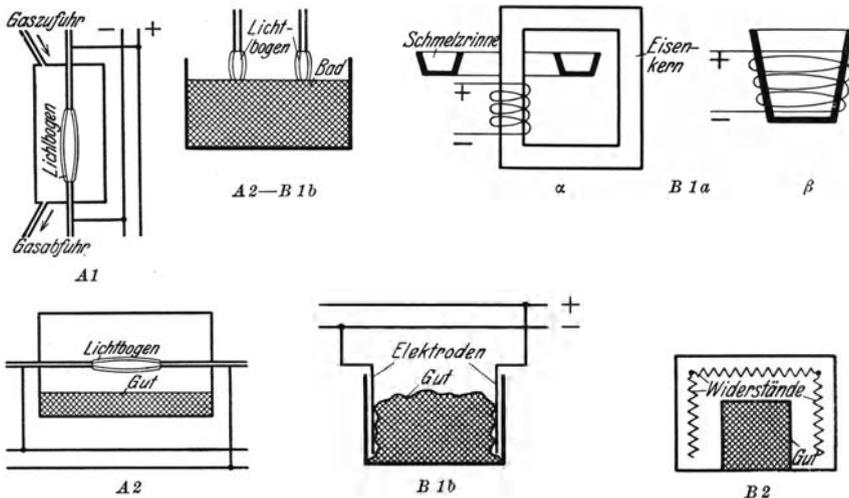


Abb. 1. Übersicht über die Ofenarten.

A 1 Unmittelbar beheizter Lichtbogenofen, A 2 Mittelbar beheizter Lichtbogenofen (Strahlungsheizung), A 2—B 1 b Kombiniertes mittelbar beheiztes Lichtbogen- und unmittelbar beheiztes Widerstandsöfen. (Der Strom fließt durch das Gut von einem Lichtbogenfußpunkt zum anderen.) B 1 a Unmittelbar beheizte Widerstandsöfen mit induktiver Koppelung (Induktionsöfen),  $\alpha$  eisengeschlossen,  $\beta$  eisenlos, B 1 b Unmittelbar beheizter Widerstandsöfen (Elektrodenöfen), B 2 Mittelbar beheizter Widerstandsöfen (Strahlungsheizung).

2...4 mal so hoch als die bei der Weiterverarbeitung meist benötigten und zulässigen sind und eine Herabsetzung der Temperatur auf den gewünschten Wert mit unnötigen Wärmeverlusten verbunden wäre. Die eisengeschlossenen Induktionsöfen haben in unserem Zusammenhang fast gar keine Bedeutung, weil bei ihnen das Gut einen geschlossenen, ringförmigen Stromkreis bilden muß, was praktisch nur mit flüssigen Leitern (geschmolzenem Metall) erzielbar ist und daher für die Weiterverarbeitung nicht in Frage kommt<sup>1</sup>. Die eisenlosen

<sup>1</sup> Eine Ausnahme hiervon bilden Tauchbäder. S. 281.

Induktionsöfen und die Elektrodenöfen finden bei der Weiterverarbeitung ein begrenztes Anwendungsgebiet, während die größte Rolle die mittelbar beheizten Widerstandsöfen spielen.

## II. Grundsätzlicher Aufbau der Öfen.

Wir wollen uns zunächst ein Bild über den grundsätzlichen Aufbau eines Ofens<sup>1</sup> machen. Jeder Ofen besteht im wesentlichen aus einem Hohlkörper, in dessen Hohlraum das „Gut“, wie wir fortan das zu erwärmende Material nennen wollen, untergebracht werden kann. Der Hohlraum wird von der „inneren Ofenwand“ begrenzt. Je nach der verlangten Temperatur kann diese aus Metall oder aus keramischen Baustoffen bestehen. Gehen wir von innen nach außen weiter, so kommen wir zu einem sehr wesentlichen Bestandteil der elektrischen Öfen: dem Wärmeschutz; wesentlich, weil der hohe Preis der aus Strom erzeugten Wärme eine besonders sorgfältige Isolierung erforderlich macht. Vom Bau brennstoffgefeuerter Öfen her war man gewöhnt, die Ofeninnenwand mit Schamotte auszukleiden und diese als Wärmeschutz anzusehen. Diese Anschauung mußte verlassen werden, weil Schamotte die Wärme zu gut leitet, und man „isoliert“ die elektrischen Öfen — nach den guten Erfahrungen an diesen heute vielfach auch die brennstoffgefeuerten Öfen — mit einem Material, das eine größenordnungsmäßig schlechtere Wärmeleitfähigkeit hat als Schamotte. Der ganze Ofen sitzt dann noch in einem Mantel, der den Wärmeschutz gegen mechanische Beschädigungen schützt. Die Energiezufuhr geschieht entweder durch Elektroden oder Widerstände oder auch durch eine Induktionsspule. Die Heizeinrichtung wird durch Regler oder Schaltorgane gesteuert werden müssen, und schließlich muß für die Beschickung und Entleerung des Ofens gesorgt werden. In jedem Falle gibt es irgendeine Art von Beschickungsvorrichtung, auch wenn es sich nur um eine Türe nebst einer Türbetätigung handelt.

---

<sup>1</sup> Unter „Öfen“ sollen ohne besonderen Hinweis immer nur die in diesem Buch behandelten verstanden werden.

Erster Teil.

# Die Grundlagen des Ofenbaues.

## I. Berechnung.

### A. Übersicht über die Berechnung

(gültig für alle elektrischen Industrieöfen).

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

- $t$  Durchwärmungszeit,
- $v$  Fassungsvermögen des Nutzraums,
- $k$  Konstanten (mit den Indizes 1 . . . 4),
- $n$  Ofenzahl zur Bewältigung einer vorgeschriebenen Produktion,
- $Q_v$  Verluste im Beharrungszustand (Leerverluste),
- $E$  gesamter Arbeitsaufwand (Wärmeverbrauch) zur Deckung der Verluste bei Bewältigung einer vorgeschriebenen Produktion.

Die Berechnung von elektrischen Industrieöfen, gleich welcher Beheizungsart, sollte sich nach Meinung des Verfassers auf eine Überlegungsreihe stützen, die auf den folgenden Seiten dargestellt ist. Das heute übliche Vorgehen beruht nicht auf diesen Überlegungen, wodurch häufig für eine bestimmte Aufgabe nicht der wärmewirtschaftlich günstigste Ofen gefunden wird. Der Verfasser ist sich jedoch, wie aus dem Folgenden ersichtlich, darüber klar, daß betriebliche Gründe dazu führen können, trotz richtiger Erkenntnis bei der endgültigen Bemessung der Öfen den Ergebnissen dieser Überlegungsreihe nicht ausschlaggebendes Gewicht beizumessen.

In den nachfolgenden Abschnitten (S. 10 bis 91) werden diese Überlegungen zu Berechnungsvorschriften für Widerstandsöfen ausgebaut. In ganz ähnlicher Weise kann man auch für die anderen Ofenarten Berechnungsverfahren festlegen, was aber nicht zur Aufgabe dieses Buches gehört.

Zuerst müssen wir uns die grundsätzliche Aufgabenstellung des Ofenbaues klarmachen, die oft, ja meist, nur verschleiert auftritt, auf die zurückzugehen aber bei jeder Ofenberechnung lohnt. Die Aufgabe lautet:

(1) „Eine gegebene Menge von Gut soll mindestens auf eine vorgeschriebene Temperatur erwärmt werden, wobei kein Teil des Gutes eine bestimmte, ebenfalls vorgeschriebene Höchsttemperatur überschreiten darf und das zu erwärmende Gut in einer bestimmten Form (Stücke bestimmter Abmessungen) anfällt; die Erwärmung muß längstens innerhalb einer vorgeschriebenen Zeit vollendet sein.“

Für diese Aufgabe gibt es unendlich viele Lösungen. Sie wird eindeutig, sobald wir die zweite (erste wirtschaftliche) Forderung dazu erheben:

(2) „Die in der Aufgabe (1) beschriebene Erwärmung soll mit dem kleinsten Wärmeverbrauch erfolgen.“

Hierzu ist zu bemerken, daß im allgemeinen der Kleinstwert des Wärmeverbrauchs um so niedriger wird, je länger der betrachtete Zeitabschnitt ist; mit seiner Länge wächst die Gutmenge selbstverständlich proportional. Da das Gut immer mit kleinen Unregelmäßigkeiten anfällt, kann man über größere Zeiträume einen Ausgleich schaffen. Diese Forderung wird man in der Praxis oft nicht verwirklichen können, wenn z. B. betriebliche Gründe dagegen sprechen.

In vielen Fällen wird der Ofen niedrigsten Wärmeverbrauchs nicht zugleich auch der Ofen niedrigster Wärmekosten sein (S. 169). Es wird sich unter Umständen trotz des bei schlechterer Ausnützung des Ofens erhöhten Wärmeverbrauchs billigerer Betrieb ermöglichen lassen, wenn man dem Entwurf des Ofens statt der Aufgabe (2) die Aufgabe (2a) (zweite wirtschaftliche Forderung) zugrunde legt:

(2a) „Die in der Aufgabe (1) beschriebene Erwärmung soll unter Berücksichtigung des Stromtarifs mit geringsten Wärmekosten erfolgen.“

Nun müssen schließlich noch die Anschaffungskosten berücksichtigt werden; weiter ist zu bedenken, daß der Betrieb außer den Wärmekosten und Amortisation der Anschaffungskosten noch Nebenkosten und Löhne verursacht, so daß man die allgemeinste (dritte wirtschaftliche) Forderung für den Bau des Ofens stellen muß:

(3) „Die in der Aufgabe (1) beschriebene Erwärmung soll mit kleinsten Gesamtbetriebskosten ausgeführt werden.“

Die letztbeschriebene Aufgabe führt uns allerdings von der Eindeutigkeit, die wir bei der Berechnung nach geringsten Wärmekosten (2a) erreicht hatten, wieder fort, da für die gleiche Ofenform die Belastung des Materials und für die gleiche Aufgabe die Ofenform (die ihrerseits Löhne, Nebenkosten und sogar Wärmekosten — Beschickungseinrichtung! — beeinflußt) verschieden gewählt werden kann. Eine eindeutige Lösung der Aufgabe (3) werden wir daher nicht erwarten dürfen.

Bei der Einführung der Aufgabe (1) war erwähnt worden, daß sie unendlich viele Lösungen zuläßt: man kann nämlich das zu erwärmende Gut in der vorgeschriebenen Zeit in einem großen oder in vielen kleinen

Öfen erhitzen. Ziel der vorher erwähnten Überlegungsreihe ist die Ermittlung der wirtschaftlichsten Ofengröße für eine verlangte Produktion, durch die erst die Ofenzahl bedingt wird. Den Gang der Berechnung kann man sich an Hand eines Diagramms klarmachen, das man zweckmäßig bei jeder Ofenberechnung aufstellt. Das Schema eines solchen Grunddiagramms ist in Abb. 2 dargestellt; es soll den grundsätzlichen Verlauf der Berechnung zeigen und bezieht sich stets auf eine bestimmte Ofenform (Kammerofen, Wanderofen oder dgl.). Da selbstverständlich für jede Aufgabe verschiedene Ofenformen herangezogen werden können, müßte das Diagramm mehrere Male gezeichnet werden: das Ergebnis jedes einzelnen Diagramms ist eine Ofengröße mit kleinsten Kosten (Wärme- und eventuell Amortisationskosten). Man muß dann die verschiedenen Kleinstwerte einander gegenüberstellen, um die wirtschaftlichste Ausführungsform zu bestimmen.

Wir tragen zunächst (Abb. 2) auf der Abszissenachse das Fassungsvermögen des Nutzraums des Ofens (Ofengröße) auf. Über dieser gemeinsamen Grundlinie werden dann eine Reihe von Kurven gezeichnet.

Als erste Kurve tragen wir die Durchwärmungszeit des Gutes auf (Kurve 1). Die Durchwärmung des Gutes von außen (mittelbar beheizte Widerstandsöfen!) setzt auch im Inneren des Gutes ein Temperaturgefälle voraus, unter dessen Einfluß die Durchwärmung des Kernes des Gutes erfolgt. Auch bei unmittelbar beheizten Öfen tritt ein solches Temperaturgefälle im Gut auf, z. B. wird bei Induktionsöfen bekanntlich infolge der Hautwirkung und induktiver Erscheinungen ein großer Teil der Energie in den äußeren Schichten des Schmelzgutes umgesetzt. Der Temperaturunterschied zwischen Oberfläche und Kern strebt einem Ausgleich zu; die Zeit, die erforderlich ist, um (vom Beginn der Erwärmung an gerechnet) einen gewünschten Ausgleich zu erzielen, nennen wir Durchwärmungszeit.

Die Durchwärmungszeit wächst stets mit zunehmender Schichtstärke, und zwar konkav zur Abszissenachse. Als Beispiel für den Verlauf der Kurve sei die Gleichung genannt  $t = \sqrt[3]{v} \cdot k_1$ . Hierin ist  $t$  = Durchwärmungszeit,  $v$  = Fassungsvermögen des Nutzraums und  $k_1$  eine Konstante.

Aus der Durchwärmungszeitkurve (Kurve 1) kann man nun die zweite Kurve, die Ofenzahllinie, ableiten (Kurve 2). Es ist klar, daß die Zahl  $n$  von Öfen, die zur Bewältigung einer vorgeschriebenen Produktion erforderlich ist, proportional der Durchwärmungszeit und umgekehrt proportional dem Fassungsvermögen des einzelnen Ofens ist ( $n = k_2 \cdot \frac{t}{v}$ ).

Bei der Ableitung der Durchwärmungszeit- und Ofenzahllinie ist zu beachten, daß bei verschiedener Zunahme der einzelnen Kantenlängen

die Verhältnisse sich ändern können, da z. B. eine einseitige Vergrößerung der Schichthöhe ohne gleichzeitige Vergrößerung der Grundfläche trotz größeren Fassungsvermögens des einzelnen Ofens zu einer höheren erforderlichen Ofenzahl führen kann als eine kleinere Schichthöhe, s. Beispiel S. 29. Muß das Gut nach beendeter Durchwärmungszeit längere Zeit stehen, wie dies bei Schmelzöfen sehr häufig vorkommt (Feinen), so erhält die Kurve naturgemäß einen etwas anderen Charakter.

Es folgt die Verlustkurve (Kurve 3). Durch die Ofenwand fließt infolge des Temperaturunterschiedes zwischen innen und außen ein Wärmestrom, der nach dem Grundgesetz der Wärmeübertragungslehre u. a. proportional der Oberfläche des Ofens ist und den wir als Verlust buchen müssen (Wärmeabgabe/Zeiteinheit). Aus konstruktiven Gründen, auf die wir unten zurückkommen werden, kann nicht der ganze Hohlraum des Ofens mit Gut gefüllt werden, sondern nur ein Teil desselben, den wir als Nutzraum bezeichnen. Da auch bei unendlich kleinem Nutzraum noch ein endlicher Hohlraum im Ofen vorhanden ist, geht die Verlustkurve nicht durch den Nullpunkt. Selbstverständlich steigt der Wärmeverlust mit zunehmendem Fassungsvermögen, aber die Verluste sind nicht proportional dem Nutzrauminhalt, sondern der Fläche<sup>1</sup>; die Verlustkurve muß daher ebenfalls konkav gegen die Abszisse verlaufen. Sie müßte zweifellos punktweise ermittelt werden; als Beispiel für den Verlauf der Kurve sei die Gleichung genannt  $Q_v = (k_4 + k_3 \sqrt[3]{v^2})$ , die eine Kurve ähnlichen Verlaufs ergibt wie die tatsächlich auftretenden Verluste. ( $Q_v$  = Verluste in Wärmeeinheiten/Zeiteinheit,  $k_4$  und  $k_3$  sind Konstanten.)

Die vierte Kurve stellt die Wärmeverluste eines Ofens während der Durchwärmungszeit (Kurve 4) dar, wird also als Produkt der Kurven 1 und 3 gefunden ( $t \cdot Q_v$ ). Sie gibt die Wärmeverluste in Wärmeeinheiten an.

Die gesamten Energieverluste  $E$  für eine bestimmte Produktion (Kurve 5) ergeben sich als Produkt der Ofenzahl und der Wärmeverluste eines Ofens während der Durchwärmungszeit (Kurve 2  $\times$  Kurve 4). Da für alle Abszissenwerte (Fassungsvermögen) die Gesamtproduktion voraussetzungsgemäß die gleiche ist und daher auch die Nutzwärme gleich ist, genügt zur Ermittlung der Ofengröße mit kleinstem Wärmeverbrauch die Bestimmung der Verlustwärme. Für das gewählte Beispiel gilt dann:

$$E = Q_v \cdot t \cdot n = \frac{Q_v \cdot t^2}{v} \cdot k_2 = \frac{(k_4 + k_3 \sqrt[3]{v^2})^2 \sqrt[3]{v^2} \cdot k_1^2 \cdot k_2}{v}.$$

<sup>1</sup> Welche Fläche in jedem Falle einzusetzen ist, wird später besprochen werden (S. 41).

Faßt man  $k_1^2 \cdot k_2$  zu einer gemeinsamen Konstanten  $K$  zusammen, so findet man durch Differentiation (nur für das Beispiel gültig):

$$E_{\min} = 2K \sqrt{k_3 \cdot k_4},$$

$$v_{E_{\min}} = \sqrt{\left(\frac{k_4}{k_3}\right)^3}.$$

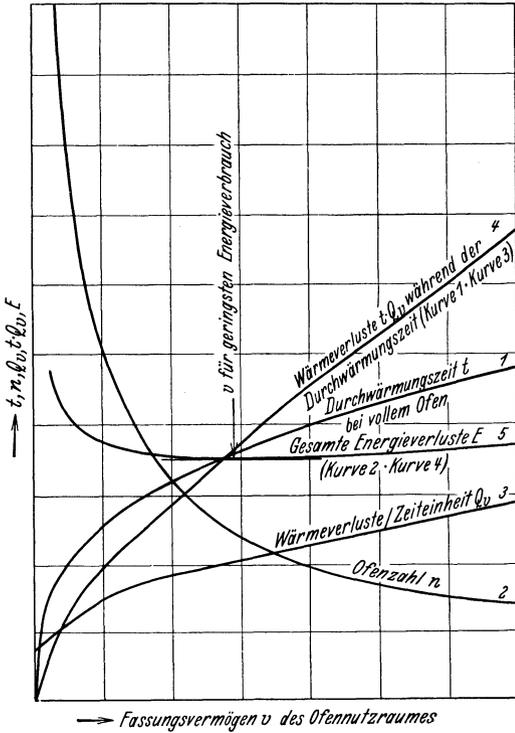


Abb. 2. Grunddiagramm der Berechnung. Ermittlung der wirtschaftlichsten Ofengröße (Ofen geringsten Wärmeverbrauchs — Aufgabe 2). Gleicher Durchsatz für alle Ofengrößen vorgeschrieben.

Das Diagramm in der hier besprochenen Form gilt für Dauerbetrieb. Will man für unterbrochenen Betrieb die wirtschaftlichste Ofengröße bestimmen, so können die Kurven 1, 3, 4 ohne weiteres Verwendung finden. Die Ofenzahllinie (Kurve 2) muß dagegen mit dem Verhältnis (Betriebszeit + Ruhezeit): Betriebszeit erweitert werden.

Das Diagramm Abb. 2 gibt die Lösung für die Aufgabe (2).

Zur Erledigung der Aufgabe (2a) muß man den Stromtarif kennen. Die vom Fassungsvermögen abhängige Länge der Durchwärmungszeit und die Notwendigkeit, unter Umständen das Gut nach beendeter Durchwärmungszeit auf Temperatur zu halten, können eine so verschiedene

Belastung des Kraftwerkes mit sich bringen, daß, je nach der Ofengröße, sehr verschiedene Strompreise zustande kommen können (S. 155). Diese wären über der gleichen Abszisse aufzutragen und ergäben, mit den jeweiligen Werten der Kurve 5 multipliziert, die gesamten Wärmekosten<sup>1</sup> (Wärmekostenlinie).

Daß die Lösung der Aufgabe (3) nicht eindeutig sein kann, wurde oben schon betont. Die Kapitaldienstkosten, die auch zu der

<sup>1</sup> Von der kurvenmäßigen Wiedergabe eines Beispiels wurde abgesehen, weil der Verlauf der Strompreislínie je nach Tarif so verschieden sein kann, daß ein solches Beispiel vollkommen willkürlich wäre.

Gruppe Nebenkosten gehören, kann man noch in ähnlicher Weise berücksichtigen wie die Strompreise. Man würde dazu in der Abb. 2 noch die Kapitaldienstkosten abhängig von der Ofengröße auftragen, diese Kurve mit der Ofenzahllinie (Kurve 2) multiplizieren und die sich ergebende Linie zur Wärmekostenlinie zuzählen. Auch hier wird auf die Wiedergabe verzichtet, um die Abb. 2 nicht zu unübersichtlich zu gestalten. Zudem bilden die Kapitaldienstkosten nur einen Teil der Nebenkosten, deren übrige Anteile von Fall zu Fall verschieden sind und nur teilweise von der Ofengröße abhängen. Die in den Nebenkosten sich spiegelnden Betriebsverhältnisse sind auch die Ursache, warum manchmal die Wahl der Ofengröße und der Ofenzahl, wie erwähnt, nicht nach den Ergebnissen des hier gezeigten Verfahrens vorgenommen werden wird.

Zum Schluß sei folgendes, z. T. in Wiederholung von früher Gesagtem, hervorgehoben:

1. Die hier dargelegten Beziehungen gelten für alle elektrischen Öfen, gleich, welcher Beheizungsart.
2. Sie sollten jeder Ofenberechnung zugrunde gelegt werden.
3. Aus Gründen der Arbeitersparnis wird man die vollständige Berechnung nur bei größeren Projekten durchführen können; die Berechnung einzelner Punkte der Kurven und die Überlegungen sollte man aber tatsächlich stets durchführen.
4. Die Ausführung der Einzelrechnungen ist für den mittelbar beheizten Widerstandsofen im vorliegenden Buch auf den Seiten von 10 bis 91 durchgeführt; für die anderen Ofenarten steht sie z. T. noch aus. Bei den Induktionsöfen ist eine gewisse Verquickung mit elektrischen Berechnungen vorhanden.
5. Mit fortschreitender Kenntnis des Ofenbaues wird es in immer weiterem Maße möglich sein, die hier gebrachten qualitativen Überlegungen in feste Rechnungsform zu bringen und allgemein gültige Kurven für das Grunddiagramm aufzustellen.
6. Die Nebenkosten können und werden vielfach die Wahl einer Ofengröße entgegen den Ergebnissen des Grunddiagramms notwendig machen. Dieses sollte trotzdem in allen Fällen im Rahmen des eben Gesagten aufgestellt werden, um sich mit seiner Hilfe ein Bild über die auf dem Konto Wärmekosten entstehenden Verluste zu machen.

Die Berechnung eines Ofens sollte sich stets auf die Angabe der Produktion (Gewicht/Zeit), der Stückgröße und der Temperatur stützen; bezüglich der Temperatur ist zu bemerken, daß im Gegensatz zur bisherigen Gepflogenheit nicht eine Temperatur, sondern ein Temperaturbereich angegeben werden muß: eine obere Tempera-

tur, die am Gut nicht überschritten werden darf, und eine untere, die am Gut mindestens erreicht werden muß.

Der Gang der Berechnung ist kurz folgender (die Kurvennummern beziehen sich auf die entsprechenden Kurven des Grunddiagramms):

1. Durchwärmungszeit. Für mehrere gewählte Ofengrößen wird unter Zugrundelegung der bekannten Stückgröße die Durchwärmungszeit für einen bestimmten Temperaturunterschied im Gut gerechnet (Kurve 1).

2. Ofengröße und Ofenzahl. Aus der für verschiedene Ofengrößen ermittelten Durchwärmungszeit und der vorgeschriebenen Produktion ergibt sich der Zusammenhang zwischen Ofenzahl und Ofengröße (Kurve 2).

3. Nutzwärme. Sie berechnet sich aus der Durchwärmungszeit und dem Durchsatz (Zahl der Öfen).

4. Verluste. Aus der Ofengröße berechnet man unter Berücksichtigung der Betriebsart (tägliche Betriebszeit) die thermischen und elektrischen Verluste, wobei die sogenannte „wirtschaftlichste Wandstärke“ zu beachten ist (Kurve 3).

Die Berechnungen nach Punkt 1 bis 4 sollten für mehrere Ofengrößen ausgeführt werden, um die Unterlagen für das Grunddiagramm zu schaffen. Für die auf Grund dessen gewählte Ofengröße werden dann die folgenden Punkte 5 bis 7 berechnet.

Auch wenn nicht die vollständigen Kurven des Grunddiagramms gezeichnet werden, sollte man doch 2 oder 3 Ofengrößen rechnen, um zu sehen, wie man im Vergleich zum Kleinstwert liegt.

5. Energiequelle. Mit Verlusten und Nutzwärme ist die erforderliche mittlere Energie über die Dauer der Erwärmung gegeben. Daraus läßt sich nach Wahl der inneren Schaltung (Zahl und Art der Stromkreise) die Energiequelle (Widerstände, Induktionsspule usw.) entwerfen.

6. Äußere Schaltung. Berechnung und Entwurf der Regelanlage.

7. Wirtschaftlichkeits- und Betriebskostenrechnung<sup>1</sup>.

## B. Berechnung der mittelbar beheizten und Elektroden-Widerstandsöfen.

Heute noch werden in vielen Fällen die nachfolgend beschriebenen Berechnungsverfahren in der Praxis nur teilweise Anwendung finden können. Wenn trotzdem die Verfahren hier besprochen werden, so geschieht dies darum, weil das

<sup>1</sup> Diese wird gemeinsam mit den übrigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (S. 154) gebracht.

Durchdenken des Berechnungsganges bei einer Schätzung, die bei Verzicht auf Rechnung an deren Stelle treten muß, unerlässlich ist.

**Beispiel:** Es seien Schraubenbolzen schwarz zu glühen.

Die Monatsproduktion betrage 240 t.

Die Schrauben sollen höchstens eine Temperatur von 600°,  
wenigstens „ „ „ 575° erreichen.

Der Raumbedarf beträgt erfahrungsgemäß 0,055 bis 0,060 m<sup>3</sup>/100 kg.

Ein Ofen für diese Aufgabe wird als Beispiel in den entsprechenden Abschnitten des Kapitels „Berechnung“ durchgerechnet werden. Siehe die Fortsetzungen S. 29, 31, 36, 60, 78.

## 1. Die Durchwärmungszeit (Kurve 1 des Ofengrunddiagramms).

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

$\vartheta_0$ [° C]	Oberflächentemperatur des Gutes,
$\vartheta_i$ [° C]	Kerntemperatur des Gutes,
$\Delta\vartheta$ [° C]	Mindertemperatur,
$\vartheta_e$	relative Mindertemperatur,
$\vartheta_c$ [° C]	Ofentemperatur,
$t$ [h]	Durchwärmungszeit,
$\lambda$ [kcal/m, ° C, h]	Wärmeleitfähigkeit,
$c$ [kcal/kg, ° C]	spez. Wärme,
$\alpha$ [kcal/m <sup>2</sup> , ° C, h]	Wärmeübergangszahl,
$a$ [m <sup>2</sup> /h]	Temperaturleitfähigkeit,
$h$ [1/m]	relative Wärmeübergangszahl,
$Q$ [kcal] oder [kWh]	übertragene Wärmemenge,
$T_0$ [° Kelvin]	Oberflächentemperatur des Gutes,
$T_c$ [° Kelvin]	Ofentemperatur,
$F_r$ [m <sup>2</sup> ]	Gutoberfläche,
$F_{II}$ [m <sup>2</sup> ]	strahlende Ofeninnenfläche,
$C_1$	Strahlungszahl des Gutes,
$C_2$	Strahlungszahl der Ofeninnenwand,
$C_s$	Strahlungszahl des schwarzen Körpers,
$\Sigma$	Umrechnungszahl für die Temperaturpotenzen.

Wir wollen Durchwärmungszeit des Gutes im Ofen diejenige Zeit nennen, die erforderlich ist, um jeden Teil des Gutes auf einen für ihn gewünschten Temperaturbereich zu bringen.

Die Durchwärmung des Gutes im Ofen setzt eine Übertemperatur des Ofens über dem Gut voraus. Je höher diese Übertemperatur ist, um so schneller wird das Gut durchwärmt; unter ihrem Einfluß strömt Wärme auf die Oberfläche des Gutes, um von dort in das Innere des des Stückes weitergeleitet zu werden. Die Temperatur der Oberfläche wird der des Kerns vorausreisen.

Tragen wir für ein beliebig geformtes Gut den Temperaturverlauf im Kern und an der Oberfläche in einem Schaubild auf, so erhalten

wir stets ein Bild ähnlich der Abb. 3. In der Abbildung ist angenommen, daß die Ofentemperatur während der Durchwärmung des Gutes konstant bleibt; es geht aus ihr hervor, daß die Durchwärmungszeit

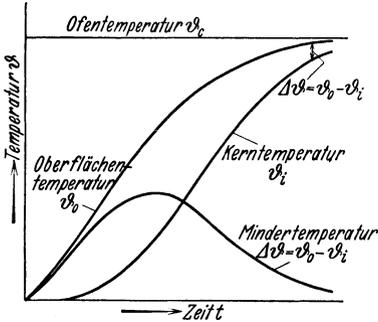


Abb. 3. Schema des Temperaturanstiegs im Gut (nach Bulle ZV 1).

von dem zulässigen Temperaturunterschied (Mindertemperatur  $\Delta\vartheta$ ) im Gut derart abhängig ist, daß zur Durchwärmung einer vorgeschriebenen Gutmenge eine um so längere Zeit erforderlich ist, je geringer die zulässige Mindertemperatur im Gut ist. Ist die Mindertemperatur 0, d. h. wird vorgeschrieben, daß Oberfläche und Kern die gleiche Temperatur haben sollen, so wird die Durchwärmungszeit unendlich.

Mit der Berechnung dieser Verhältnisse müssen wir uns zunächst beschäftigen; sie stützt sich auf die Untersuchungen von Kraus (BV 1) und Gröber (BV 2, 3)<sup>1</sup>, durch die die rechnerische Erfassung derartiger Zusammenhänge erst ermöglicht wurde. Beide Verfahren sind für die Zwecke der Ofenberechnung angewandt worden (Bulle ZV 1, Paschkis ZV 2, Schack ZV 3).

#### a) Berechnung der Durchwärmungszeit ohne Berücksichtigung des Temperaturverlusts bei Beschickung des Ofens.

Man nimmt zunächst an, daß die Ofentemperatur bei Beschickung des Ofens nicht sinkt und daß sich der Ofen im Wärmegleichgewicht befindet. Der Temperaturanstieg ist dann abhängig von der Wärmeübergangszahl, der Form des Gutes und seinen Materialwerten. Die mathematischen Ausdrücke für diese Zusammenhänge sind selbst für die einfachsten Grundformen, für die allein sie bisher entwickelt sind — die zweiseitig unendlich ausgedehnte Platte, den unendlich langen Zylinder, die Kugel, den Würfel —, sehr verwickelt.

Aus den grundlegenden Differentialgleichungen werden für die verschiedenen Körperformen Beziehungen abgeleitet, die die Temperatur in der Körpermitte (Kern) und an der Oberfläche in Bruchteilen der Umgebungstemperatur (Ofentemperatur) abhängig von Zeit, Werkstoffeigenschaften, Abmessungen der Stücke und Wärmeübergangszahl angeben. Diese Grundbeziehungen haben alle die charakteristische Form:

$$\vartheta_r = \vartheta_c \Phi_r \left( h R, \frac{a t}{R^2} \right).$$

<sup>1</sup> BV bedeutet das Bücherverzeichnis, ZV das Zeitschriftenverzeichnis am Ende des Buches.

$\vartheta_r$  ist dabei die Temperatur an der Stelle im Abstand  $r$  von der Oberfläche des Gutes (also z. B. entweder der Oberfläche  $\vartheta_0$ , oder des Kerns  $\vartheta_i$ ),  $\vartheta_c$  ist die Umgebungstemperatur (also Ofentemperatur),  $\Phi_r$  ist eine sehr komplizierte Funktion der Größen  $hR$  und  $\frac{at}{R^2}$ . Hierin bedeutet  $h$  die relative Wärmeübergangszahl ( $h = \frac{\alpha}{\lambda}$ , wobei  $\alpha$  die Wärmeübergangszahl und  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit ist).  $R$  ist die für die Durchwärmungszeit maßgebende Abmessung, z. B. Radius der Kugel, des Zylinders, halbe Stärke der Platte und dgl.),  $a$  die Temperaturleitfähigkeit ( $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ , wobei  $c$  die spezifische Wärme und  $\gamma$  das spezifische Gewicht ist);  $t$  ist die Zeit vom Beginn der Erwärmung an gerechnet.

In der Regel wird für alle Stellen des Gutes der gleiche Temperaturbereich verlangt: im Idealfall soll das Gut natürlich an allen Stellen die gleiche Temperatur haben; die Zulassung eines Temperaturbereichs dient nur zur Erzielung endlicher Durchwärmungszeiten. Für diesen Fall gelten die folgenden Ableitungen.

Indem man in der obigen Gleichung  $r = 0$  und  $r = R$  setzt, erhält man die Oberflächen- und Kerntemperatur des Gutes. Die Differenz dieser Temperaturen bezeichnet man nach Bulle (ZV 1) als Mindertemperatur; sie ergibt sich nach den Gröberschen Funktionen als Bruchteil der Ofentemperatur

$$\vartheta_0 - \vartheta_i = \vartheta_c (\Phi_0 - \Phi_i).$$

In den angegebenen Literaturstellen finden sich Diagramme, die für die verschiedenen Grundformen jeweils für Körpermitte und Oberfläche die Funktionen  $\Phi$  darstellen. Aus ihnen ergibt sich die gesuchte Durchwärmungszeit für eine bestimmte Mindertemperatur. Der Arbeit von Schack sind die Abb. 4 und 5 entnommen<sup>1</sup>. Die Abszissenteilung ist in verschiedenen Maßstäben gezeichnet. Da die Ofentemperatur meist nicht vorgeschrieben ist sondern nur die höchste Guttemperatur, so muß man zunächst eine Ofentemperatur<sup>2</sup> willkürlich annehmen.

Daraus ergibt sich die Ordinate als das Verhältnis  $\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c}$ . Darauf wird der Abszissenwert für die in Frage kommenden Eigenschaften des Werkstoffs, seine Abmessungen und Temperatur bestimmt ( $hR$ ). Aus Abszisse und Ordinate folgt der Kurvenparameter  $\frac{at}{R^2}$  (siehe Abb. 4).

<sup>1</sup> Die Kurven beziehen sich bei Schack in Anlehnung an Gröber auf Abkühlung; sie sind hier auf Erwärmung umgezeichnet.

<sup>2</sup> Als Ofentemperatur ist je nach der Ofenkonstruktion einzusetzen: bei direkter Heizung die Heizkörpertemperatur, bei indirekter Feuerung die Muffelwandtemperatur, bei Bädern die Badtemperatur.

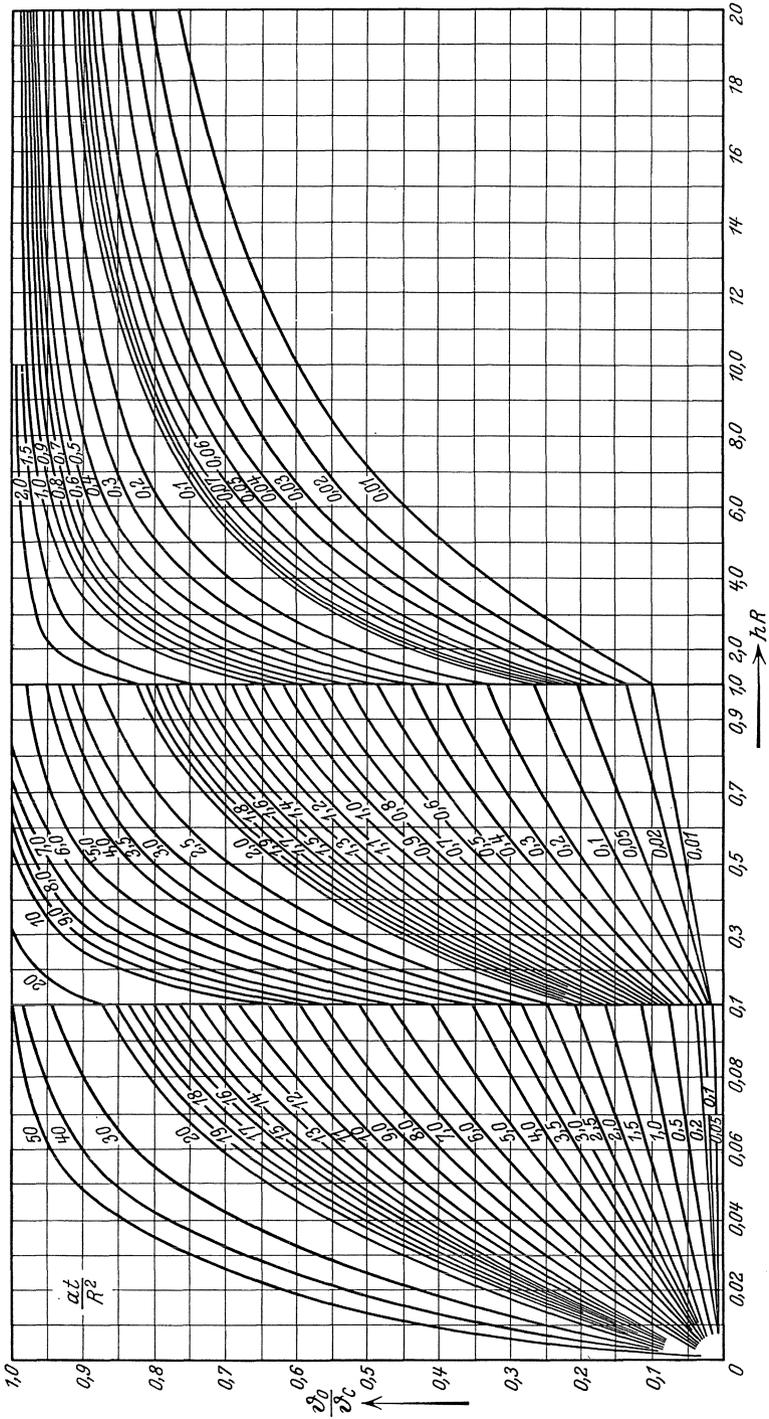


Abb. 4. Bestimmung der Oberflächentemperatur  $\phi_0$  aus  $\phi_c = f\left(h, R, \frac{\alpha L}{R^2}\right)$ . Unendlich ausgedehnte Platte (in Anlehnung an Gröber und Schack).

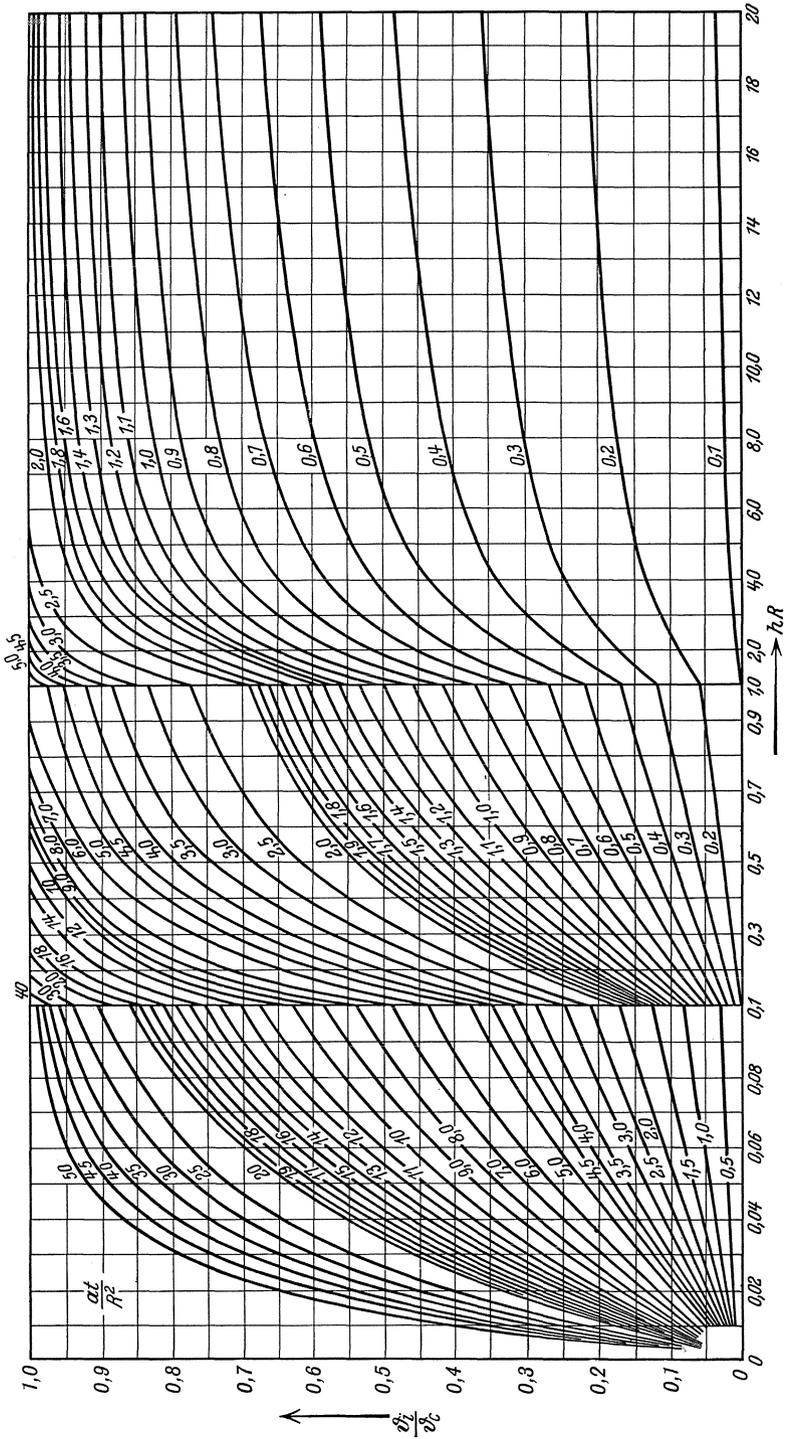


Abb. 5. Bestimmung der Kerntemperatur  $\vartheta_i$  aus  $\frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} = f\left(hR, \frac{\alpha t}{R^2}\right)$ . (In Anlehnung an Gröber und Schack.)

Mit dem gleichen Parameter findet man (Abb. 5) das Verhältnis  $\frac{\vartheta_i}{\vartheta_c}$ , und da  $\vartheta_c$  gewählt ist,  $\vartheta_i$ . Ist  $\vartheta_i$  zu niedrig, so war die Ofentemperatur  $\vartheta_c$  zu hoch angenommen; man wird dann mit einem niedrigeren Wert von  $\vartheta_c$  den Versuch wiederholen müssen und dieses Tasten so lange fortsetzen, bis der gewünschte Wert von  $\vartheta_c$  erreicht und nicht wesentlich überschritten ist.

Die beschriebene Rechnung kann durch ein Verfahren abgekürzt werden (Paschkis ZV 4), das auf der Erkenntnis beruht, daß Temperaturgleichmäßigkeit, Ofentemperatur und Durchwärmungszeit eindeutig miteinander verknüpft sind. Wir führen den Begriff der „relativen Mindertemperatur“<sup>1</sup> (Abb. 6 bis 8) ein:

$$\vartheta_e = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_i}{\vartheta_0} = \frac{\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c} - \frac{\vartheta_i}{\vartheta_c}}{\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c}} \quad (1)$$

Demnach ist  $\vartheta_e$  aus den von Gröber abgeleiteten Funktionen erhältlich.

In der Abb. 6, 7 und 8 ist  $\vartheta_e = f\left[hR, \frac{at}{R^2}\right]$  dargestellt. Um die mit zunehmender Zeit bessere Durchwärmung anschaulich zu machen, ist in den Abb. 6 bis 8 entgegen den Abb. 4, 5, 9, 10 die Zeitfunktion  $\frac{at}{R^2}$  auf der Abszisse, der Betrag  $hR$  jedoch als Kurvenparameter aufgetragen. Zunächst bestimmt man, wie beschrieben,  $\vartheta_e$  und  $hR$ . — Daraus folgt aus den Abb. 6 bis 8 (die für Kugel, Platte bzw. Zylinder gelten) der Betrag  $\frac{at}{R^2}$ . Da  $a$  und  $R$  bekannt sind, ist auch  $t$  eindeutig bestimmt. Mit dem gleichen Betrag von  $hR$  und dem gefundenen Betrag

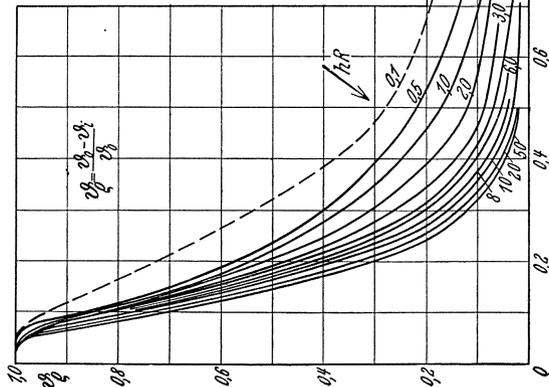


Abb. 6. Relative Mindertemperatur  $\vartheta_e = f\left(hR, \frac{at}{R^2}\right)$ . Unendlich ausgedehnte Kugel.

<sup>1</sup> Die „relative Mindertemperatur“ ist dimensionslos; die Bezeichnung ist in Anlehnung an den bekannten Begriff der „relativen Einschaltdauer“, der ebenfalls eine dimensionslose Größe bezeichnet, gewählt.

von  $\frac{at}{R^2}$  ergibt sich aus der für die gleiche Körperform gültigen Abb. 9, 4 oder 10 der Betrag  $\vartheta_o$  und daraus (da  $\vartheta_o$  bekannt)  $\vartheta_c$ .

Das bisher erforderliche Tasten entfällt dadurch. Für die seltenen Fälle, in denen nicht für alle Stellen des Gutes der gleiche Temperaturbereich verlangt wird, muß man auf die ursprünglichen Gleichungen von Gröber zurückgehen. Statt  $\vartheta_i$  zu benutzen, muß  $\vartheta_o$  für die betreffende Stelle, für die ein Temperaturbereich vorgeschrieben ist, als Funktion von  $\frac{at}{R^2}$  ermittelt werden. Das weitere Verfahren schließt sich sinngemäß an das hier gezeigte an.

Beim Erwärmen von Gut in Flüssigkeitsbädern (Blei- oder Salzbadern, Ölbadern usw.) kann man annehmen, daß die Gutoberfläche sofort die Badtemperatur erreicht, entsprechend  $\alpha = \infty$ . Die erforderliche Tauchzeit zum Erreichen einer bestimmten Kerntemperatur ergibt sich mit der Kennzahl  $\frac{at}{R^2}$  und ist für einige wichtige Körperformen in Abb. 11 dargestellt. Hierbei ist vorausgesetzt, daß das Bad ausreichendes Volumen hat, um beim Beschicken in der Temperatur nicht nennenswert abzusinken.

b) Berechnung der Durchwärmungszeit mit Berücksichtigung des Temperaturverlusts bei Beschickung des Ofens.

Beim Beschicken des Ofens tritt ein Temperaturabfall ein, bei Bädern sinkt die Badtemperatur ab. Den Temperaturverlauf im Gut kann man nach dem Verfahren von Schmidt (BV 4) und Nußbaum (ZV 5) graphisch, unter Zugrundelegung eines bestimmten Temperaturverlaufs im Ofen ermitteln, was natürlich nur angenäherte Werte ergibt. Die Berechnung unter Zugrundelegung der mittleren Ofentemperatur zwischen der normalen  $\vartheta_c$  und der



Abb. 7. Relative Mindertemperatur  $\vartheta_o = f\left(\frac{at}{hR}, \frac{at}{R^2}\right)$ . Unendlich ausgedehnte Platte.

nach Beschickung  $\vartheta'_c$  läßt sich oft nicht durchführen, weil diese mittlere Temperatur niedriger sein kann als die gewünschte Oberflächentemperatur des Gutes. Man kann dann den Einfluß des Temperaturabfalls bei Beschickung schätzen, indem man der Durchwärmungszeit einen Zuschlag zuzählt, der berücksichtigt, daß während der „Erholungszeit“  $t'$  (die Amerikaner nennen sie „come back“) nicht die volle Temperatur im Ofen herrscht. Man findet diesen Zuschlag durch eine Vergleichsrechnung mit voller und verminderter Temperatur: man betrachtet vorerst die Erholungszeit  $t'$  und sucht aus  $hR$  und  $\frac{a t'}{R^2}$  die Gutoberflächentemperatur für das Ende der Erholungszeit. Dieser Wert  $\vartheta'_0$  bezieht sich natürlich auf den Mittelwert  $\frac{\vartheta_c + \vartheta'_c}{2}$ . Er wird jetzt, wie im Beispiel durchgeführt, auf die volle Ofentemperatur umgerechnet. Mit diesem umgerechneten Werte  $\vartheta''_0$  und dem bekannten Betrag von  $hR$  findet man einen neuen Wert  $\frac{a t''}{R^2}$ ; die Differenz  $t' - t''$  ist der gewünschte Zuschlag, der ohne Berücksichtigung des Temperaturabfalls ermittelten Durchwärmungszeit zuzuzählen ist.

**Beispiel:**  $\vartheta'_c = 0,7 \vartheta_c$ .

Aus  $hR$  und  $\frac{a t'}{R^2}$  gefunden:  $\frac{2 \vartheta'_0}{\vartheta'_c + \vartheta_c} = 0,18$  (mit Hilfe einer der Abb. 4, 9 oder 10).

Umgerechnet auf  $\vartheta_c$ :

$$\frac{\vartheta''_0}{\vartheta_c} = 0,18 \frac{\vartheta'_c + \vartheta_c}{2 \vartheta_c} = 0,18 \cdot \frac{1,7}{2} = 0,153.$$

Aus  $\frac{\vartheta''_0}{\vartheta_c}$  und  $hR$ :  
 $\frac{a t''}{R^2}$  (mit Hilfe einer der Abb. 4, 9 oder 10),

$t' - t'' =$  Zuschlag.

Aus  $\vartheta_c$  und  $hR$ :  $t$  (mit Hilfe der Abb. 4, 6 bis 10),

Durchwärmungszeit  
 $= t + t' - t''$ .

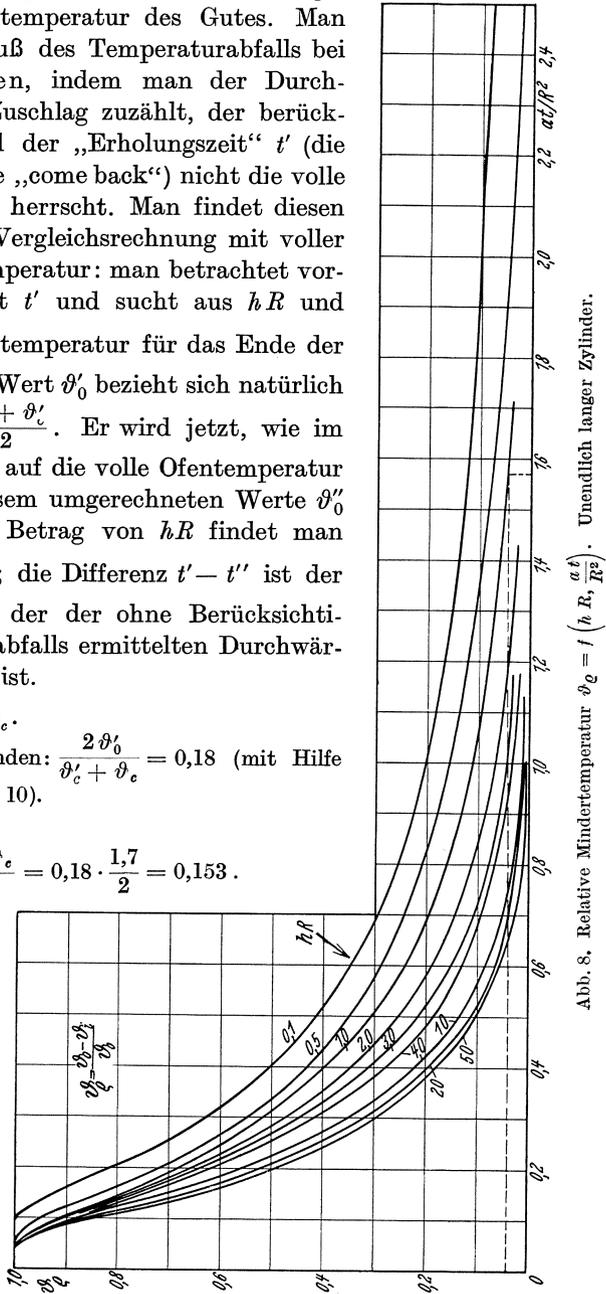


Abb. 8. Relative Mindertemperatur  $\vartheta_0 = f \left( \frac{a t}{h R, R^2} \right)$ . Unendlich langer Zylinder.

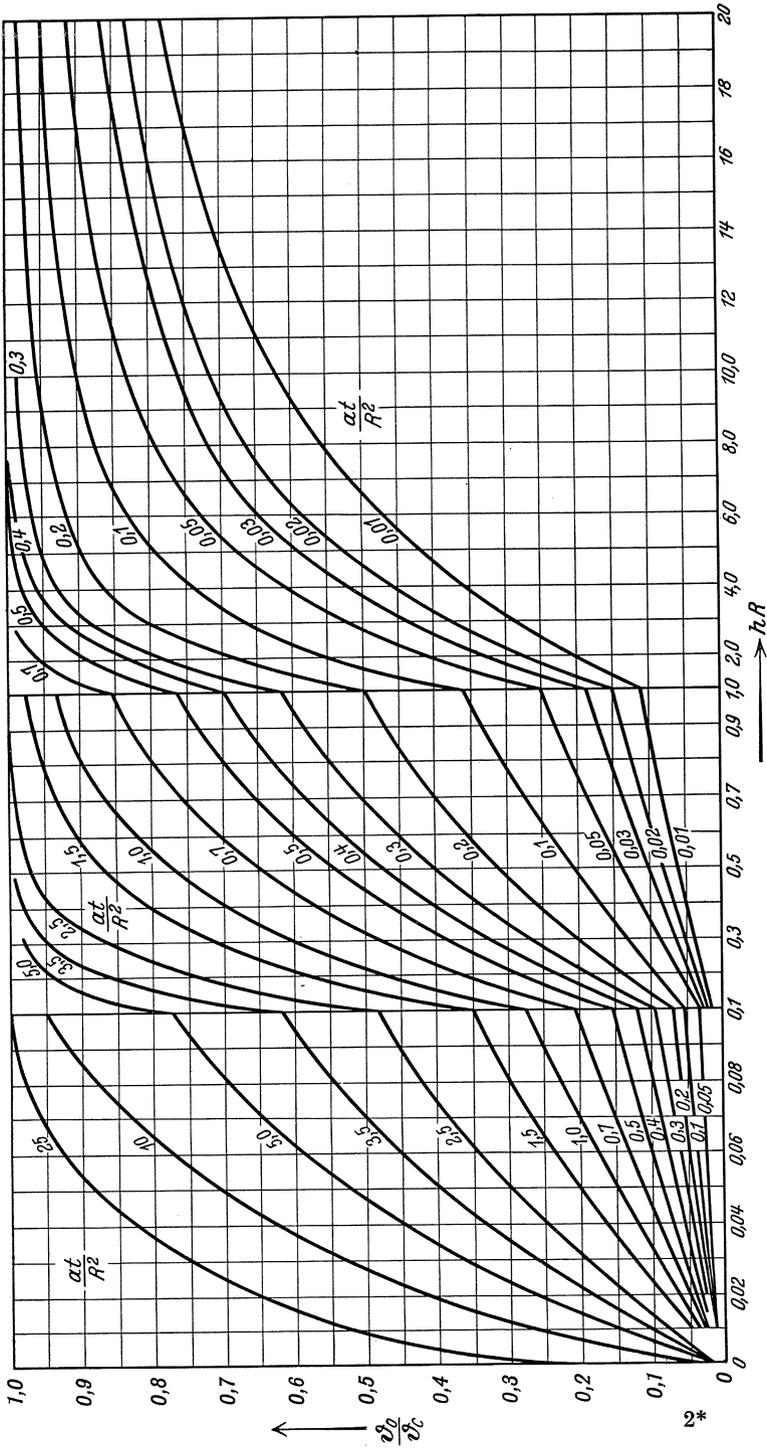


Abb. 9. Bestimmung der Oberflächentemperatur aus  $\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c} = f\left(hR, \frac{\alpha t}{R^2}\right)$ . Kugel. (In Anlehnung an Gröber und Schack.)

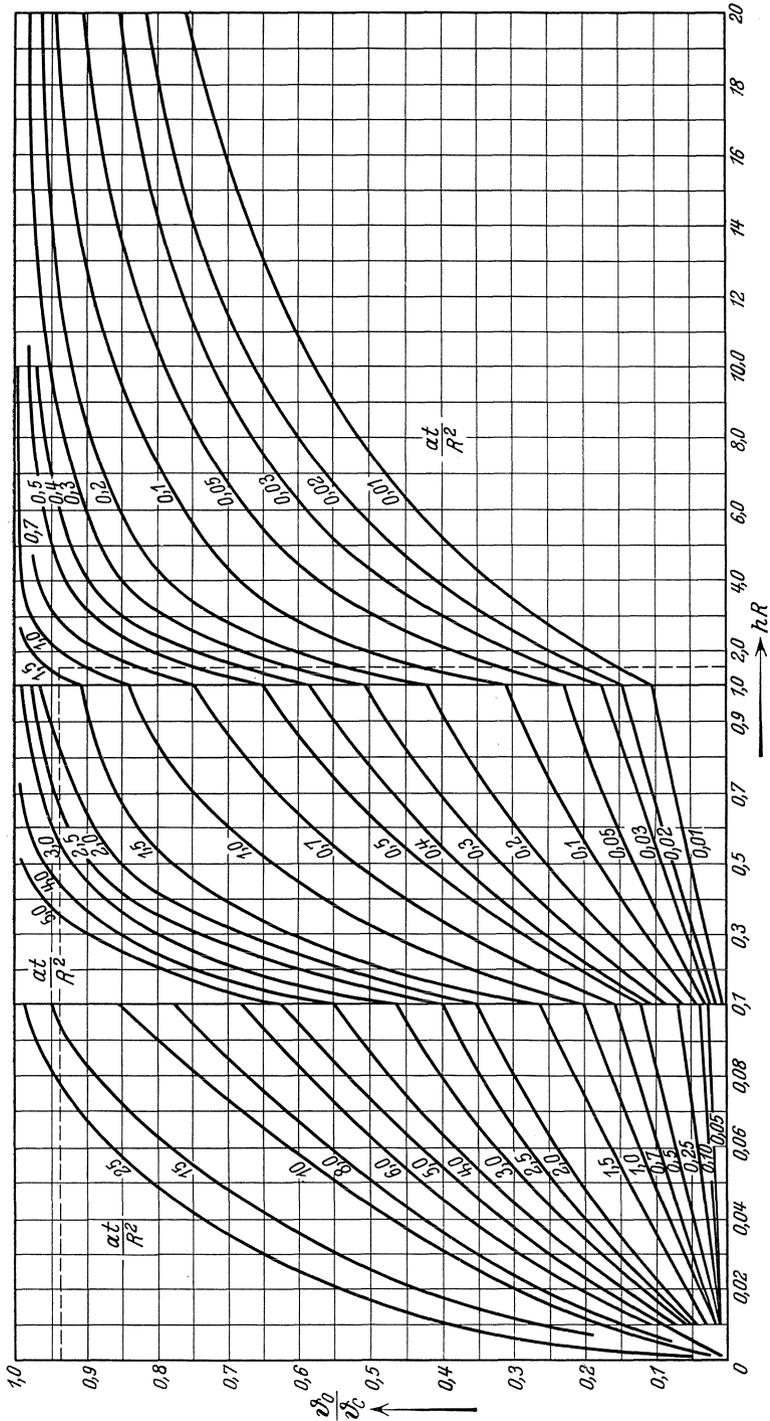


Abb. 10. Bestimmung der Oberflächentemperatur aus  $\frac{\theta_0}{\theta_c} = f\left(hR, \frac{\alpha t}{R^2}\right)$ . Unendlich langer Zylinder. (In Anlehnung an Gröber und Schack.)

Ist der Temperaturverlauf an der Gutoberfläche bekannt, so kann man ein Näherungsverfahren von Schack (ZV 3 und 6) verwenden.

c) Bedeutung der Wärmeübergangszahl und der anderen in den Gleichungen auftretenden Größen für die Durchwärmungszeit.

Die vorstehend entwickelten Kurven ermöglichen auf einfache Weise die Berechnung der verschiedensten Fälle, sind aber nicht anschaulich. Auch kann man aus ihnen den Einfluß der einzelnen in den Gleichungen auftretenden Größen nicht erkennen. Es wurde daher eine Reihe von Beispielen durchgerechnet (Paschkis ZV 2) siehe

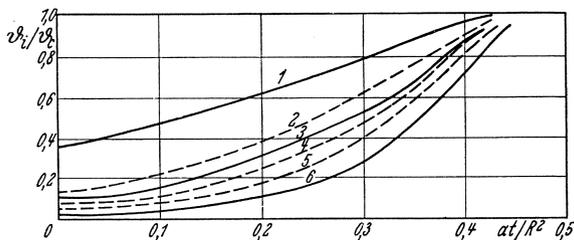


Abb. 11. Erwärmung verschiedener Körper in einem Bad (Anstieg der Kerntemperatur bei  $\alpha = \infty$ ). (In Anlehnung an Gröber und Williamson und Adams.)  
 1 unendlich ausgedehnte Platte, 2 quadratischer Balken, Länge =  $\infty$ , 3 Zylinder, Länge =  $\infty$   
 4 Würfel, 5 Zylinder, Länge = Durchmesser, 6 Kugel.

Abb. 12 bis 14, aus denen hervorgeht, daß die Wärmeübergangszahl auch bei verhältnismäßig großen Gutstärken von 200 mm einen außerordentlich großen Einfluß auf die Durchwärmungszeit hat. Eine Beeinflussung der physikalischen Konstanten „ $\alpha$ “ ist natürlich ausgeschlossen, eine solche der Gutstärke nur in engsten Grenzen möglich (Schich-

Zahlentafel 1.

	0°		200°		400°		600°		800°		900°	
	$\lambda$	$a$	$\lambda$	$a$	$\lambda$	$a$	$\lambda$	$a$	$\lambda$	$a$	$\lambda$	$a$
Aluminium	162	0,27	137	0,22	155	0,25	205	0,32	geschmolzen		—	—
Blei . . .	30	0,078	28	0,073	27*	0,070*	geschmolzen		—	—	—	—
Eisen . . .	38	0,057	36	0,040	34	0,030	31	0,024	27	0,019	25	0,018
Kupfer . .	340	0,400	320	0,36	310	0,33	300	0,31	290	0,31	280	0,30
Messing (30% Zn)	80	0,12	94	0,13	100	0,13	—	—	—	—	—	—
Nickel . .	48	0,043	47	0,042	42	0,038	47	0,042	50	0,045	51	0,046
Zink . . .	97	0,15	92	0,14	80	0,11	geschmolzen		—	—	—	—
Zinn . . .	57	0,11	51	0,10	geschmolzen		—	—	—	—	—	—
Glas . . .	0,6	0,0011	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Porzellan .	0,9	0,0017	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

\* Werte für 300°.

tung des Gutes im Ofen!)<sup>1</sup>. Dagegen kann man die Wärmeübergangszahl wesentlich erhöhen.

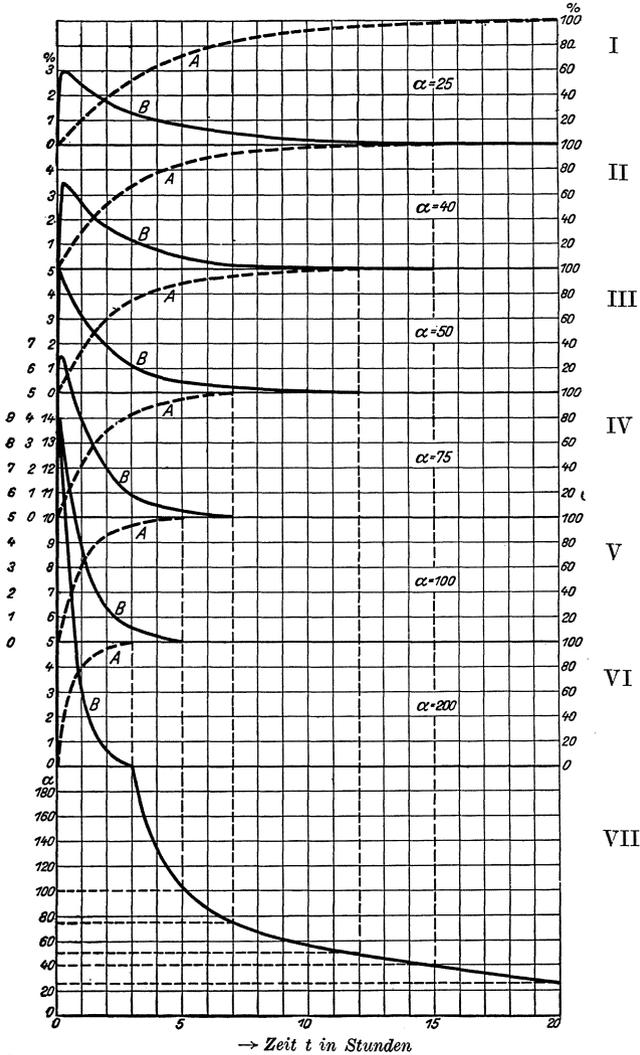


Abb. 12. Abhängigkeit der Durchwärmungszeit  $t$  von der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  (Paschkis ZV 2). (Das Bild ist wegen Platzersparnis so gezeichnet, daß die Linien B der Schaubilder III . . . VI jeweils in den Bereich der darüberliegenden Schaubilder ragen.)

A Temperatur der Plattenmitte ( $\vartheta_z$ ) in % von der Ofentemperatur ( $\vartheta_0$ ), abhängig von der Zeit  $t$  (rechte Skalen Bild I . . . IV), B Temperaturunterschied Plattenrand—Plattenmitte ( $\vartheta_0 - \vartheta_z$ ) in % der Ofentemperatur ( $\vartheta_0$ ), abhängig von der Zeit  $t$  (linke Skalen Bild I . . . IV), Bild VII zeigt  $\alpha = f(t)$ ,  $\alpha$  Wärmeübergangszahl [ $\text{kcal/m}^2, \text{h}, ^\circ \text{C}$ ].

Schack (ZV 3) weist nach, daß bei großen Werten der Wärmeübergangszahl die Durchwärmungszeit proportional dem Quadrat

<sup>1</sup> Gilt nur bedingt; siehe hierzu S. 26.

der Wandstärke, bzw. des Durchmessers ist. Ist dagegen die Wärmeübergangszahl sehr klein, so ändert sich die Durchwärmungszeit annähernd proportional der ersten Potenz der Wandstärke.

Die Werte für  $\lambda$  und  $\alpha$ , die nebst denen für  $c$  (Abb. 19) für die Berechnung der Durchwärmungszeit notwendig sind, sind für einige technisch wichtige Stoffe in der Zahlentafel I (S. 21) zusammengestellt.

Bekanntlich ist die Wärmeübergangszahl keine Konstante. Man rechnet trotzdem mit ihr in dem Wunsche nach einer Analogie zu den Gesetzen der Wärmeleitung<sup>1</sup> und weil sie sich für die Rechnung als praktisch erwiesen hat.

Von den drei Arten des Wärmeüberganges: Leitung, Strahlung und Konvektion, scheidet die Leitung für die Wärmeübertragung auf das Gut im Ofen, abgesehen von Bädern, aus.

Die Strahlung spielt besonders bei hohen Temperaturen eine große Rolle. Sie folgt dem Gesetz (vgl. Gröber BV 3 S. 131):

$$Q = \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F_I \cdot t \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_I}{F_{II}} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)}. \quad (2)$$

Da die strahlende Oberfläche des Ofens meist wesentlich größer ist als die des Gutes, so wird in unserem Falle das Verhältnis  $\frac{F_I}{F_{II}}$  — und somit auch das dieses Verhältnis enthaltende Glied — vernachlässigbar

<sup>1</sup> Daher auch die irreführende frühere Bezeichnung: äußere Wärmeleitfähigkeit.

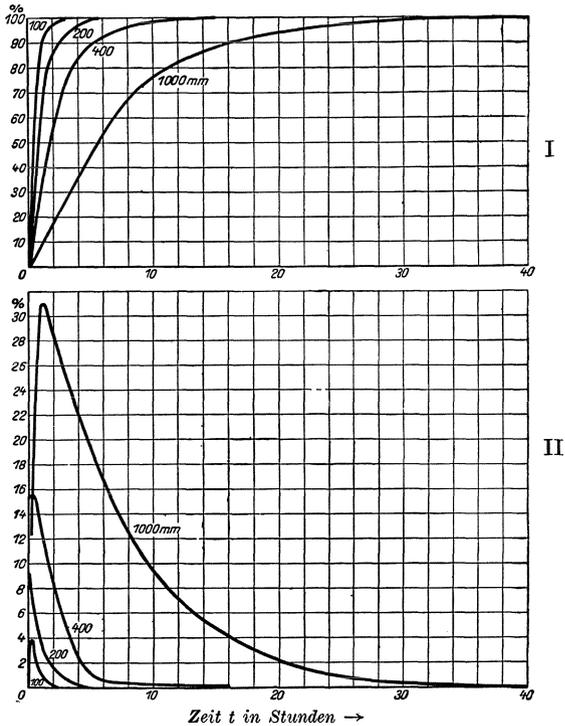


Abb. 13. Abhängigkeit der Durchwärmungszeit von der Plattenstärke (Paschkis ZV 2).

I Temperatur der Plattenmitte ( $\vartheta_i$ ) in % der Ofentemperatur ( $\vartheta_c$ ), abhängig von der Zeit  $t$ , II Temperaturunterschied Plattenrand — Plattenmitte ( $\vartheta_e - \vartheta_i$ ) in % der Ofentemperatur ( $\vartheta_c$ ), abhängig von der Zeit  $t$ . Die Angaben beziehen sich auf Platten aus Eisen für eine Wärmeübergangszahl  $\alpha = 100$ .

klein. Um die umständliche Rechnung mit den vierten Potenzen zu vermeiden, ist die Gleichung in die folgende Form gebracht worden:

$$Q = (\vartheta_c - \vartheta_0) \mathcal{E} \cdot F_I \cdot t \cdot C_1. \quad (2a)$$

Aus dem folgenden Schaubild (in Anlehnung an Gröber BV 3) Abb. 15 kann man die Werte für  $\mathcal{E}$  zwischen 0 und 1400° entnehmen.

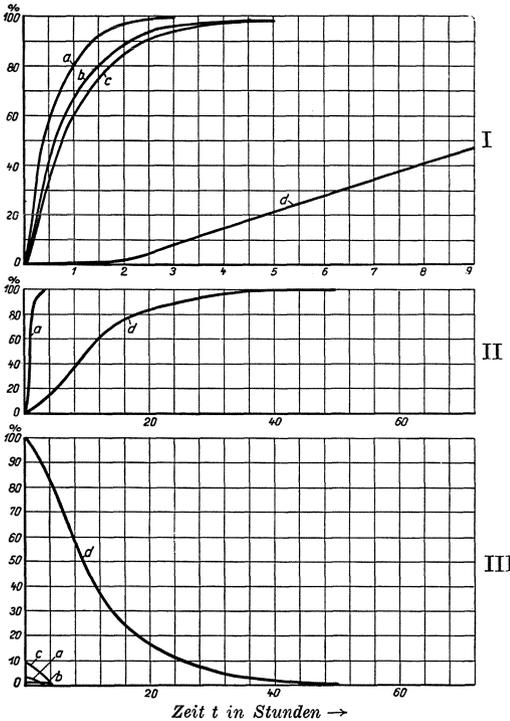


Abb. 14. Abhängigkeit der Durchwärmungszeit von dem Material (Paschis ZV 2).

a Aluminium, b Kupfer, c Eisen, d Isolierstein, I Temperatur der Plattenmitte ( $\vartheta_i$ ) in % der Ofentemperatur ( $\vartheta_0$ ), II Teil der Kurven I in verändertem Maßstab, III Temperaturunterschied Plattenrand — Plattenmitte ( $\vartheta_0 - \vartheta_i$ ) in % der Ofentemperatur ( $\vartheta_0$ ). Die Angaben beziehen sich auf Platten von 200 mm Stärke für eine Wärmeübergangszahl  $\alpha = 100$ .

Die Strahlungszahlen sind in der folgenden Zahlentafel 2 zusammengestellt (nach BV 5 Bd. 1 S. 463).

Im geschlossenen Ofen kann man meist „schwarze“ Strahlung annehmen, so daß die Strahlungszahl 4,96 betragen würde. Mit Rücksicht auf die oben erwähnte Vernachlässigung ( $\frac{F_I}{F_{II}}$ ) und zur Vereinfachung der Rechnung kann man oft die Strahlungszahl mit 4,0 einführen, so daß die Wärmeübergangszahl bei reiner Strahlung im Ofen =  $4 \cdot \mathcal{E}$  ist. Nur in Ausnahmefällen, wenn die Flächen genau festliegen, und die Materialeigenschaften (Strahlungszahl) des Gutes im einzelnen genau bekannt sind, kann man durch genauere Rechnungen zum Ziel gelangen (vgl. Junker ZV 7 und S. 84).

Die Wärmeübertragung auf das Gut im Ofen durch Strahlung läßt sich nicht

wesentlich beeinflussen. Es sind zwar Patente angemeldet worden, die durch besondere Formgebung oder vergrößerte Fläche der Ofenwand den Wärmeübergang verbessern sollen, aber in die Praxis ist von diesen Versuchen noch nicht viel eingedrungen. Ebenso ist es nicht ohne weiteres möglich, die Strahlungszahl durch die Auswahl des Materials zu beeinflussen, weil bei Ofenform und Auswahl des Materials auch auf andere Verhältnisse (z. B. Haltbarkeit, Festigkeit und dergl.) Rücksicht genommen werden muß.

Wesentlich mehr Erfolg darf man sich dagegen von dem Versuch versprechen, die Wärmeübertragung durch eine Erhöhung der Konvektion zu verbessern. In den Formeln, die man hierfür in der Literatur findet, erscheint überall die Luftgeschwindigkeit. Daß diese die Wärmeübertragung erheblich beeinflussen kann, geht aus der folgenden Abb. 16 hervor; sie bezieht sich auf einen zylindrischen Ofen mit einem Anschlußwert von 3,8 kW und einem Nutzdurchmesser

Zahlentafel 2. Strahlungszahlen  $C$ , bezogen auf die des schwarzen Körpers  $C_s = 1$  (Absolutwert von  $C_s = 4,96$ ).

$\frac{C}{C_s}$	Werkstoff
1,00	schwarzer Körper
0,94	Gußeisen, rauh, stark oxydiert
0,96	Eisen, matt, stark oxydiert
0,29	Eisen, hochblank poliert
0,13	Kupfer, blank poliert
0,17	Kupfer, schwach poliert
0,64	Kupfer, gewalzt
0,76	Kupfer, gerauht
0,22	Messing, matt poliert
0,21	Zink, matt
0,05	Zinn
0,95	Ruß
0,93	Glas

von 250 mm. Die rechnerische Erfassung dieser Zusammenhänge stößt zur Zeit noch auf erhebliche Schwierigkeiten<sup>1</sup>. Einmal ist auch bei

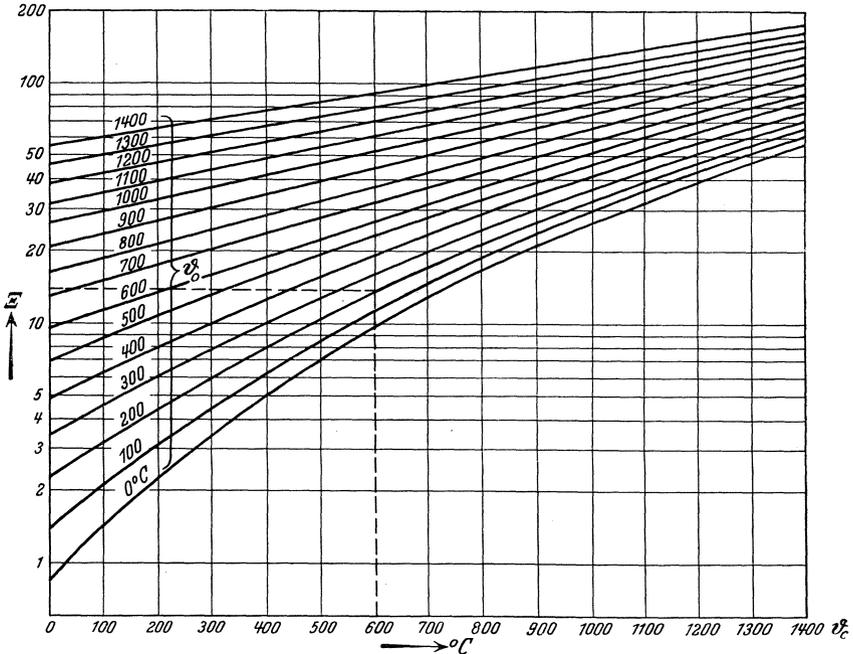


Abb. 15. Schaubild zur Bestimmung des Wertes  $\mathcal{E}$  aus  $\vartheta_c$  (Abszisse) und  $\vartheta_0$  (Kurvenparameter).

<sup>1</sup> Zur Berechnung der Wärmeübergangszahl sind eine große Zahl von Formeln bekannt (siehe z. B. Gröber BV 3). Diese Formeln sind für Rohrleitungen auf-

künstlicher Luftbewegung die Luftgeschwindigkeit nicht bekannt, da die Schichtung des Gutes für diese eine ausschlaggebende Rolle spielt, Auftrieb und künstliche Bewegung sich unterstützen oder einander entgegenwirken können; oft führt die Luft wirbelnde Bewegung aus. Dann ist aber auch die Höhe der Temperatur und die Beschaffenheit der Ofenwand von Einfluß. Wird die Luft durch gestapeltes Gut hindurchgeleitet, so erhöht sich nicht nur die Wärmeübergangszahl mit Rück-

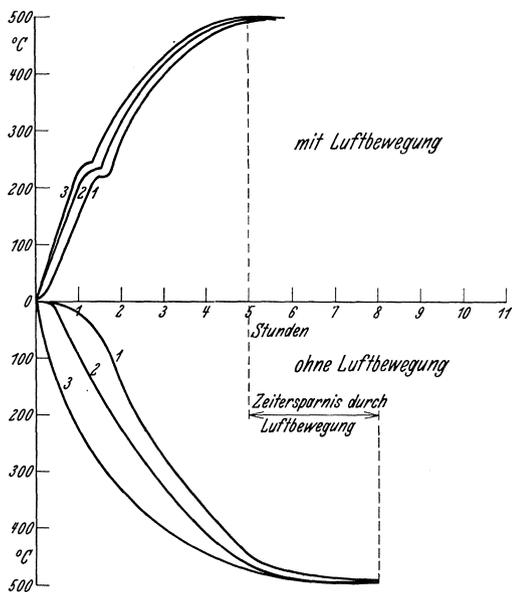


Abb. 16. Temperaturanstieg im Gut bei ruhender und bewegter Luft<sup>1</sup>.

Die drei Kurven zeigen den Temperaturanstieg im Gut, und zwar bei beiden Aufnahmen an den gleichen Stellen. Anschlußwert des Ofens 3,8 kW, Durchmesser des Ofens 250 mm, Tiefe des Ofens 300 mm, Gutgewicht 50 kg.

Gut nicht homogen ist oder wenn zwischen Gut und Heizquelle eine Trennwand liegt. Die rechnerische Behandlung dieser Fälle soll im folgenden kurz erörtert werden.

Verhalten bei nicht einfachen Grundformen. Solange nicht Auswertungen der Grundgleichungen von Gröber (BV 2, 3) auch für andere Körper als die angenommenen Idealkörper vorliegen,

gestellt und daher für Öfen nicht ohne weiteres zu brauchen; denn der in ihnen vorkommende Durchtrittsquerschnitt für die Luft sowie die für den Wärmeübergang maßgebende Fläche sind beide im Ofen undefiniert. Näherungsformeln wie die von Stansel (ZV 8) sind nicht anwendbar, wenn nicht sämtliche Versuchsbedingungen, die bei Stansel nicht einmal näher beschrieben sind, gleich bleiben.

<sup>1</sup> Der Verfasser dankt der Firma W. C. Heraeus G. m. b. H. für die freundliche Durchführung der Messungen.

sicht auf die Konvektion, sondern die bewegte Luft bringt die Wärme zu den im Innern des Gutstapels liegenden Stücken, wodurch die für die Durchwärmung maßgebende Abmessung vom Durchmesser des Gutstapels auf den Durchmesser des einzelnen Stücks vermindert wird.

#### d) Anwendung auf die Praxis.

Die in den vorhergehenden Abschnitten wiedergegebenen Schaubilder sind nur für die Grundformen angegeben, die praktisch nicht als Form des Gutes auftreten. Außerdem werden die Gesetze des Temperaturanstiegs gestört, wenn das

muß in jedem Falle überlegt werden, welcher dieser Idealformen der jeweils betrachtete Körper am nächsten kommt. Rechnet man z. B. für einen Zylinder mit allseitig endlichen Abmessungen nach dem Schaubild für den einseitig unendlich ausgedehnten Zylinder, für eine Platte entsprechend mit dem für die zweiseitig unendlich ausgedehnte Platte, so rechnet man sicher — d. h. am Ende der errechneten Durchwärmungszeit wird die tatsächliche Mindertemperatur kleiner sein als die der Rechnung zugrunde gelegte. In einem gleichmäßig beheizten Ofen wird jeweils die kleinste Abmessung der Durchwärmungsrechnung zugrunde zu legen sein (Abb. 17). Die Wärme wird in der Richtung  $a-a$  früher zum Kern (Mittelpunkt) gedrungen sein, als in der Richtung  $b-b$ . Rechnet man also mit einer unendlich ausgedehnten Platte von der Stärke  $\overline{AA'}$ , so wird der zusätzliche Wärmestrom in den beiden anderen Richtungen  $b-b$  und  $c-c$  den Temperatenausgleich verbessern, aber keinesfalls kann der Ausgleich schlechter sein (oder bei vorgeschriebener Mindertemperatur die Durchwärmungszeit größer) als bei dem

der Rechnung zugrunde liegenden Grenzfall des unendlich ausgedehnten Körpers. — Ist die Beheizung nicht gleichmäßig, so sind die den Heizflächen gegenüberliegenden Flächen in der Rechnung als Grenzflächen des unendlich ausgedehnten Körpers zu betrachten. Da der Ofen (Abb. 18) nur Seitenbeheizung hat, ist nicht die kleinste Abmessung  $a-a$ , sondern die größere  $b-b$  der Durchwärmungsrechnung zugrunde zu legen. Umgekehrt kann man sagen, daß es, homogenes Gut vorausgesetzt, vom Standpunkt der Durchwärmung aus richtiger wäre, bei diesem Ofen statt der Seiten Decke und Boden zu beheizen.

Hat der Körper überhaupt keine einfache Form, dreht es sich also z. B. um quaderähnliche Körper mit abgerundeten Kanten oder um kegelförmiges Gut usw., so nimmt man die Kurven für denjenigen der drei Grundkörper zur Unterlage, bei dem das Verhältnis Fläche:Umfang des Querschnitts dem des zu erwärmenden Körpers am nächsten kommt und interpoliert eventuell zwischen zwei Werten; z. B. zwischen denen des Zylinders und der Platte oder zwischen Zylinder und Kugel.

Das Gut ist nicht homogen. Dieser Fall, der in der Praxis von besonderer Bedeutung ist, bereitet der Berechnung leider die größten Schwierigkeiten. Man denke an die Erwärmung von Blechstapeln, von Drahringen, aber auch von vielem anderen Gut, z. B. körnigem Material, Nieten, kleinen Schmiede- und Gußstücken. Fast stets wird zwischen

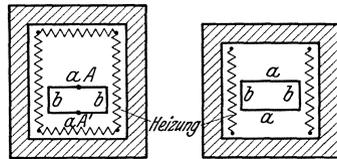


Abb. 17 und 18. Schematische Ofenschnitte. Festlegung der für die Durchwärmungszeit maßgebenden Abmessungen.

Für die Berechnung der Durchwärmungszeit ist die Abmessung  $a-a$ , Abmessung  $b-b$  einzuführen.

den einzelnen Gutstücken Luft eingeschlossen sein. Bei der Durchwärmung spielt nicht mehr nur die reine Wärmeleitung im Gut, sondern auch die Wärmeübertragung von Gutelement auf Gutelement eine Rolle. Und diese ist u. a. abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Gutes selbst, von Größe und Gestalt der Luftzwischenräume, so daß die Mannigfaltigkeit der Formen zu groß ist, als daß eine einheitliche Lösung denkbar wäre. Bei körnigem Gut kann man ohne weiteres eine mittlere Wärmeleitfähigkeit bestimmen, ähnlich wie bei Isolierstoffen. Und dieses Verfahren wird man notgedrungen auch auf andere Stoffe mit größeren Luftzwischenräumen anwenden müssen, wobei es jedoch an Genauigkeit verliert. Man wird hierzu die Wärmeleitfähigkeit durch einen Vorversuch ermitteln müssen. Je größer die einzelnen Stücke des Gutes sind, um so größer muß die Menge sein, an der der Versuch vorgenommen wird, um Randeinflüsse zu vermeiden. So langwierig das Verfahren auch ist, so dringend muß es dennoch empfohlen werden; durch die Vorbestimmung der Wärmeleitfähigkeit (statt eines unmittelbaren Versuchs über die Durchwärmungszeit) erleichtert man sich die Umrechnung von den Versuchsergebnissen auf verschiedene Chargengrößen.

Theoretisch könnte man für einige einfache Fälle, die aber von großer praktischer Bedeutung sind (vor allem Blechstapel), eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit aus der Materialstärke (Dicke der Blechtafeln) und dem mittleren Luftzwischenraum, der sich aus dem spezifischen Gewicht, dem Raumgewicht und der Dicke der Blechtafeln (Zahl der Bleche) ergibt, errechnen. Doch stehen praktisch dieser Berechnungsart mannigfache Schwierigkeiten entgegen: einmal bestehen zwischen den verschiedenen Blechen „Wärmekurzschlüsse“, die je nach Welligkeit des Materials mehr oder weniger ins Gewicht fallen können; weiter kann die Oxydhaut des Gutes, die sich unter Umständen erst während der Erwärmung bildet, die Richtigkeit der Berechnung beeinträchtigen. Schließlich hat man auch keinen Anhalt, ob die Luftzwischenräume gleichmäßig sind und welchen Einfluß Ungleichmäßigkeiten haben. In diesem Zusammenhang seien die Arbeiten von Bulle (ZV 1), Schack (ZV 6) und Stäbler (ZV 9) erwähnt.

Der Fall, daß zwischen Gut und Heizkörper eine Trennschicht eingeschaltet ist, tritt z. B. beim Erwärmen von Gut in Behältern auf. Die Temperatur der Luftschicht, die z. B. zwischen Behälter und Gut bleibt, wächst mit der des Gutes mit, was den Erwärmungsvorgang sehr unübersichtlich macht. So liegen u. a. die Verhältnisse beim „Kistenglühen“<sup>1</sup>. Erfahrungswerte für die durch die Kisten ent-

---

<sup>1</sup> Bei der Einsatzhärtung, die scheinbar unter ähnlichen Bedingungen arbeitet, tritt infolge des innigen Kontaktes zwischen Härtepulver und Kistenwandung Wärmeleitung auf.

stehenden Verzögerungen in der Durchwärmung, allerdings meist aufgenommen an unregelmäßig, brennstoffgefeuerten Öfen, finden sich in den angezogenen Literaturstellen (Bulle ZV 1 und Stäbler ZV 9).

**Beispiel:** (Anfang siehe S. 11) Es sei die Durchwärmungszeit von geschichtetem Gut (Schraubenbolzen) mit einem Raumbedarf von 0,055 bis 0,060 m<sup>3</sup>/100 kg zu bestimmen, wobei das Gut höchstens 600°, mindestens 575° erreichen soll.

Die Wärmeleitfähigkeit von geschichtetem Gut ist, wie eben erwähnt, noch nicht bekannt. Mit Rücksicht auf die große in Betracht kommende Produktion wären unbedingt Vorversuche zur Feststellung der Wärmeleitfähigkeit zu empfehlen. — Diese Versuche können entweder in den üblichen, zur Feststellung der Wärmeleitfähigkeit dienenden Apparaten vorgenommen werden (siehe ZV 38) oder durch Aufschieben von Bolzen auf einer großen gleichmäßig beheizten Platte. In der Mitte wird an zwei nicht zu nahe aneinander liegenden Stellen die Temperatur bestimmt. Da die Platte groß ist, kann man den seitlichen Wärmeabfluß vernachlässigen und aus der Energiedichte, dem gemessenen Temperaturunterschied und der Entfernung der Meßstellen die Wärmeleitfähigkeit bestimmen. — Schließlich kann man in einem Ofen eine nicht zu kleine Probe erwärmen und die Temperatur in der Mitte der Probe genau verfolgen. Aus dem gemessenen Temperaturverlauf kann man die Wärmeleitfähigkeit zurückrechnen, wenn die Wärmeübergangszahl bekannt ist, womit man bei reiner Strahlung meist rechnen kann.

Die Wärmeleitfähigkeit sei also durch Vorversuche ermittelt und als Mittelwert habe sich ergeben

$$\lambda = 4,0 \text{ [kcal/m, } ^\circ\text{C, h]}.$$

Aus der Aufgabenstellung ergibt sich als Mindertemperatur

$$600 - 575 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Dann ist die relative Mindertemperatur

$$\vartheta_0 = 25 : 600 = 0,0416 \text{ (rd. 0,042)}.$$

Die mittlere Temperaturleitfähigkeit beträgt

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{4,0}{1740 \cdot 0,15} = 0,0154 \text{ m}^2/\text{h}$$

( $\lambda = 4,0 \text{ kcal/m, } ^\circ\text{C, h}$ ,

$\gamma = \text{reziproker Wert des Raumbedarfs} = 1660 \dots 1820$ , d. i. im Mittel  $1740 \text{ kg/m}^3$ ,  
 $c = 0,15 \text{ kcal/kg, } ^\circ\text{C}$ ).

Zur Bestimmung von  $h = \frac{\alpha}{\lambda}$  suchen wir  $\alpha$  (Abb. 15).

Für eine Ofentemperatur von 600° und eine mittlere Guttemperatur von 300° ist

$$\Xi = 15.$$

Daraus folgt

$$\alpha = 60 \text{ kcal/m}^2, \text{ } ^\circ\text{C, h}; \quad h = 15 \text{ m}^{-1}.$$

Die Form des Behälters, in dem das Gut in den Ofen gebracht wird, ist nicht vorgeschrieben; bei Quaderform kommt entweder — was die gleichmäßigste Erwärmung ergibt — nur Decken- und Bodenheizung in Betracht oder Heizung von Decke, Boden und beiden Seitenwänden. Die Stirnwände des Ofens dürften dabei,

um eine Überhitzung des dort befindlichen Gutes zu verhindern, nicht Wärme abgeben<sup>1</sup>.

Da sich die Durchwärmungszeit für Quader zur Zeit nicht berechnen läßt, wird die zylindrische Grundform und die unendlich ausgedehnte Platte verglichen.

Die Rechnung muß für verschiedene Schichtdicken durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in der unten stehenden Zahlentafel zusammengefaßt und sollen für das Beispiel des Zylinders für  $R = 0,1$  hier durchgeführt werden.

Die Linie  $hR = 15 \cdot 0,1 = 1,5$  ist im Schaubild Abb. 8 nicht enthalten; wir suchen daher die Werte für  $hR = 1$  und  $hR = 2$ .

$$\text{für } \vartheta_e = 0,042 \text{ und } \left. \begin{array}{l} hR = 1 \\ hR = 2 \end{array} \right\} \text{ ist } \frac{at}{R^2} = \left\{ \begin{array}{l} 1,57 \\ 1,19 \end{array} \right. \text{ und daraus } \left. \right\} t = \begin{array}{l} 1,02 \\ 0,78 \end{array} \text{ [h]}$$

Für  $hR = 1,5$  ist daher schätzungsweise

$$\frac{at}{R^2} = 1,38$$

$$\text{und } t = 0,9 \text{ [h].}$$

Aus Abb. 10 findet man

$$\left. \begin{array}{l} \text{für } hR = 1,5 \\ \text{und } \frac{at}{R^2} = 1,38 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \vartheta_0 \\ \vartheta_e \end{array} \right\} = 0,94.$$

Da  $\vartheta_0 = 600^\circ$  gegeben ist, ergibt sich damit eine Ofentemperatur  $\vartheta_e = 635^\circ$ .

Eine Korrektur des Wertes  $\alpha$  erübrigt sich daher, weil  $\vartheta_e$  nahe dem angenommenen Wert ( $600^\circ$ ) liegt.

Nach demselben Verfahren sind die übrigen Werte der Durchwärmungszeit  $t$  und der zugehörigen Ofentemperaturen gefunden und in der folgenden Zahlentafel zusammengestellt:

	Zylinder			Platte		
	$R$ [m]	$\vartheta_e$ [ $^\circ$ C]	$t$ [h]	$R$ [m]	$\vartheta_e$ [ $^\circ$ C]	$t$ [h]
A	0,05	675	0,28	0,05	680	0,596
B	0,10	635	0,90	0,10	640	1,810
C	0,20	620	2,54	0,20	625	5,05
D	0,30	605	5,40	0,30	610	10,65

Mit Rücksicht auf Temperaturabfall bei Beschickung werde ein Zuschlag von 0,15 [h] zur Durchwärmungszeit gemacht.

Falls keine betrieblichen Gründe zu einer der beiden Ofenformen zwingen, müßten die sämtlichen weiteren Rechnungen für Zylinder und Quader (Platte) durchgeführt werden. Trotz der größeren Durchwärmungszeit wird im Beispiel nur mit quaderförmigen Ofenformen weiter gerechnet, da diese stärker verbreitet sind als zylindrische.

(Fortsetzung des Beispiels siehe S. 31.)

<sup>1</sup> Eine eventuell an ihnen angebrachte Heizung darf nur die Leerverluste decken; eine derartige Heizung ist für die Gleichmäßigkeit der Durchwärmung von Vorteil.

## 2. Ofengröße und Ofenzahl

(Kurve 2 des Ofengrunddiagramms).

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

$t$	[h]	Durchwärmungszeit,
$n$		Ofenzahl,
$q$	[kg/h]	verlangte Produktion,
$v$	[m <sup>3</sup> ]	Fassungsvermögen des Nutzraums,
$\delta$		räumliche Ausnützung (Chargengröße: Fassungsvermögen <sup>1</sup> ),
$\gamma$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Raumgewicht des Gutes,
$t_B$	[h]	tägliche Betriebsdauer,
$t_H$	[h]	Zeit vom Ende der Durchwärmung bis Entnahme des Gutes aus dem Ofen (ergibt sich aus dem verlangten Arbeitsprozeß),
$m$		Chargenzahl/Ofen und Tag.

Ein Ofen leistet bei einer Charge:

$$1000 \cdot v \cdot \delta \cdot \gamma \text{ [kg]}.$$

Es muß selbstverständlich

$$t_B \geq t_H + t. \quad (3)$$

sein. Jeder Ofen erledigt am Tag  $m$  Chargen, wobei  $m$  bei nicht durchgehendem Betrieb eine ganze Zahl sein muß und aus der Gleichung

$$m \geq \frac{t_B}{t_H + t} \quad (3a)$$

gefunden wird.

Die Tagesproduktion ist  $24q$  und die Zahl der Öfen ergibt sich zu

$$n = \frac{24q}{1000 \cdot v \cdot \gamma \cdot m \cdot \delta}. \quad (4)$$

Bei den vorstehenden Gleichungen ist angenommen, daß das Gut nicht im Ofen abkühlt; sollte dies der Fall sein, so müßten die Gleichungen sinngemäß umgeformt werden. Selbstverständlich kann man auch nicht mit Bruchteilen von Öfen rechnen, sondern muß dann untersuchen, ob ein kleinerer oder größerer Nutzraum wirtschaftlicher ist. Man muß auch immer in Erwägung ziehen, ob man einen Teil der Chargenzeit (u. U. nur einen Teil der Kühlzeit) in die Betriebspausen legen will, was beim Elektroofen durch Verwendung von Schaltuhren ohne Bedienung des Ofens möglich ist. Eine mathematische Untersuchung über die Wahl der Ofengröße bei genau bekanntem Fabrikationsprogramm (namentlich für Stoßöfen) findet sich bei Stassinot (ZV 10).

**Beispiel:** (Fortsetzung von S. 30) Es sollen die Ofenzahl und Ofengröße für eine monatliche Produktion von 240 t Schraubenbolzen bestimmt werden. Der Raumbedarf beträgt 0,055 bis 0,060 m<sup>3</sup>/100 kg. Die Öfen sollen durchgehend be-

<sup>1</sup>  $v \cdot \delta$  ist die Chargengröße in m<sup>3</sup>, die durch den Wert  $R$  in der Durchwärmungszeitrechnung berücksichtigt ist.

etrieben werden. Die Durchwärmungszeit für verschiedene Schichtstärken findet sich in der Zusammenstellung S. 30.

Bei 25 Arbeitstagen/Monat ist die Tagesproduktion  $240 : 25 = 9,6$  t/Tag. Bei durchgehendem Betrieb ergeben sich nach Formel (3a) für

Ofen mit Schichtstärke	$A$	32	}	Chargen/Tag.
„ „ „	$B$	12,2		
„ „ „	$C$	4,6		
„ „ „	$D$	2,2		

Bei durchgehendem Betrieb kann mit Bruchteilen von Chargen gerechnet werden; auch bei der Ofengröße  $D$  braucht man nicht auf 2 Chargen abzurunden; nur auf die Woche bezogen kann man nicht mit Teilen von Chargen rechnen. Bei Ofen  $D$  z. B. kann man  $6 \times 2,2 = 13,2$  Chargen/Woche nicht fahren, sondern nur 13 oder 14. Fängt der Ofenbetrieb Montag 6 Uhr früh an, so ist die Charge 13 in der Nacht von Sonnabend auf Sonntag um 2 Uhr 24, die eventuelle Charge 14 am Sonntag um 13 Uhr 12 fertig. Falls man 14 Chargen fahren will, so wird die letzte Charge durch Schaltuhr abgeschaltet. Nach dieser Überlegung reduziert, findet man für

Ofen mit Schichtstärke	$A$	32	}	Chargen/Tag.
„ „ „	$B$	12,16		
„ „ „	$C$	4,67		
„ „ „	$D$	2,33		

Zur Wahl der Ofenzahl ist die Abmessung der Herdfläche zu bestimmen.

In der folgenden Zahlentafel ist der Durchsatz/Charge für die Schichtstärken  $A-D$  für verschiedene Ofengrundflächen und die erforderliche Ofenzahl  $n$  angegeben.

Nutzbare Grundfläche <sup>1</sup>	0,5 [m <sup>2</sup> ]		1,0 [m <sup>2</sup> ]		2,0 [m <sup>2</sup> ]		3,0 [m <sup>2</sup> ]	
	kg	$n$	kg	$n$	kg	$n$	kg	$n$
$A \dots \dots$	83	4 (3,7)	166	2 (1,8)	333	1 (0,9)	500	1 (0,6)
$B \dots \dots$	166	5 (4,7)	333	3 (2,3)	667	2 (1,1)	1000	1 (0,7)
$C \dots \dots$	332	7 (6,2)	665	4 (3,1)	1333	2 (1,6)	2000	2 (1,03)
$D \dots \dots$	500	9 (8,2)	1000	5 (4,1)	2000	3 (2,1)	3000	2 (1,4)

Zu dieser Zahlentafel sei folgendes bemerkt:

1. Bei gleicher Grundfläche steigt die erforderliche Ofenzahl mit zunehmender Schichtstärke (längere Durchwärmungszeit, also trotz größeren Fassungsvermögens mehr Öfen als bei kleiner Schichthöhe). Man wird aber zweckmäßig nie die Schichtstärke allein vermehren, sondern stets auch die Grundfläche. Erhöht man die Schichtstärke immer mehr, so müßte man allseitig beheizen und würde die Durchwärmungszeit nicht mehr nach der Plattenformel allein berechnen dürfen.

Es wird daher die Schichtstärke  $A$  gewählt und es bleibt noch die Grundfläche zu bestimmen. Die Zahlen der Zahlentafel verdienen besondere Beachtung, weil sie die vorliegenden Verhältnisse sehr klar beleuchten. Eine Erhöhung der Schichtstärke bringt keinen Vorteil, eine Verringerung dagegen unter allen Umständen. — Wenn man das Verfahren bis ins Extrem fortsetzt, so verliert es allerdings seine Berechtigung, da z. B. einzelne Schraubenbolzen die Wärmeleitfähigkeit von Eisen haben und die experimentell für den besonderen Fall bestimmte Wärmeleitfähigkeit nicht mehr zutrifft.

<sup>1</sup> Man kann keine Bruchteile von Öfen ausführen. In den Klammern stehen die genauen Zahlen, damit man die Rechnung verfolgen kann.

2. Man wird natürlich stets die Grundfläche der Ofenzahl anpassen; z. B. würde man bei Schichtstärke  $A$  statt einer nutzbaren Grundfläche von  $2,0 \text{ m}^2$  eine solche von  $1,8 \text{ m}^2$  wählen, wodurch der Ofen voll ausgenützt wird.  
(Fortsetzung siehe S. 36).

### 3. Nutzwärme.

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

- $Q_N$  [kWh] oder [kcal] Nutzwärme,  
 $G$  [kg] Gutgewicht, für das  $Q_N$  gilt,  
 $c$  [kcal/kg, °C] spezifische Wärme des Gutes,  
 $\vartheta_0$  [°C] Oberflächentemperatur des Gutes,  
 $\vartheta_a$  [°C] Umgebungstemperatur (Ausgangstemperatur des Gutes),  
 $\vartheta_i$  [°C] Kerntemperatur des Gutes,  
 $r$  [kcal/kg] Verdampfungs- oder Schmelzwärme des Gutes.

Wir bezeichnen als Nutzwärme diejenige Wärmemenge, die nötig ist, um das Gut auf den vorgeschriebenen Temperaturbereich zu erwärmen.

Die Nutzwärme  $Q_N$  ergibt sich für ein bestimmtes Gutgewicht  $G$  aus der verlangten Temperaturzunahme und den Materialkonstanten:

$$Q_N = G \cdot c \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_a) \frac{1}{860} \text{ [kWh]}, \quad (5)$$

wobei  $\vartheta_a$  die Ausgangstemperatur des Gutes ist<sup>1</sup>. Für  $c$  ist die mittlere spezifische Wärme des Gutes zwischen den Temperaturen  $\vartheta_a$  und  $\vartheta_0$  einzusetzen.

Liegt in dem betrachteten Bereich für den zu untersuchenden Körper eine Aggregatzustandsänderung, so ist die Schmelz-, bzw. die Verdampfungswärme  $r$  zu berücksichtigen:

$$Q_N = G \cdot c \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_a) \frac{1}{860} + G \cdot r \cdot \frac{1}{860} \text{ [kWh]}. \quad (6)$$

Die Materialkonstanten  $c$  und  $r$  sind Handbüchern zu entnehmen. — Für die hier vorliegenden Rechnungen ist es zweckmäßig, die Wärmemenge  $Q_N$  als das Produkt des Wärmeinhalts von 1 kg und dem zu erwärmenden Gewicht darzustellen. In Abb. 19 ist der Wärmeinhalt von 1 kg verschiedener Metalle, abhängig von der Temperatur, dargestellt; man sieht, daß bei Schmelz- und Umwandlungspunkten (siehe z. B. bei Nickel und Eisen) eine deutliche Unstetigkeit in der Wärmeinhaltskurve auftritt.

<sup>1</sup> Hierbei ist die am Ende der Durchwärmung noch vorhandene Mindertemperatur vernachlässigt, was in der Regel zulässig ist. Will man sie berücksichtigen, so müßte statt  $(\vartheta_0 - \vartheta_a)$ :  $\left(\frac{\vartheta_0 + \vartheta_i}{2} - \vartheta_a\right)$  eingeführt werden.

In der **Zahlentafel 3** finden sich die spezifischen Wärmen einiger sonstiger technisch wichtiger Stoffe zwischen 0 und 100° C.

Zahlentafel 3.

Asche . . . . .	0,20	Magnesium . . . . .	0,25
Beton . . . . .	0,21	Olivenöl . . . . .	0,40
Eichenholz . . . . .	0,57	Petroleum . . . . .	0,50
Fichtenholz . . . . .	0,65	Porzellan . . . . .	0,22
Glas . . . . .	0,20	Steinkohle. . . . .	0,30
Glyzerin . . . . .	0,58	Schwefelsäure . . . . .	0,33
Koks . . . . .	0,20		

Diese Werte können nur einen Anhalt geben, da Schüttgewicht, Verunreinigungen u. a. einen starken Einfluß ausüben können.

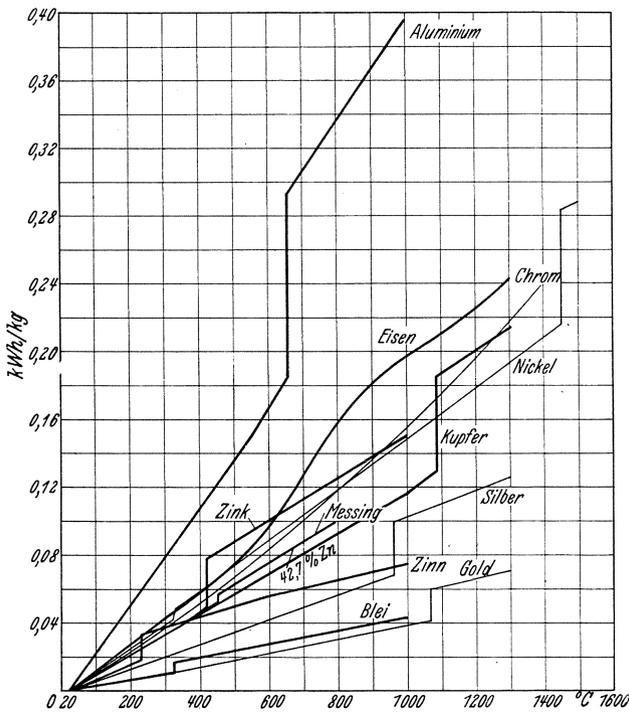


Abb. 19. Wärmeinhalt einiger technisch wichtiger Metalle in Abhängigkeit von der Temperatur.

Bei der Ermittlung der Nutzwärme sind Beschickungs- und Verpackungseinrichtungen, die mit erwärmt werden müssen, als „Gut“ einzusetzen. Schon hier ist also ersichtlich, daß es unbedingt wünschenswert sein wird, dieses „tote Gewicht“ möglichst klein zu halten. Da die Stärke der Beschickungs- und Verpackungseinrichtungen vielfach eine Frage der Festigkeit ist, wird es sich oft lohnen, für diese Zwecke ein hochwertiges Material (z. B. hitzebeständige Legierungen) zu ver-

wenden, das dank seiner höheren Festigkeit in geringeren Stärken, also mit geringeren „toten“ Gewichten, ausgeführt werden kann.

Kennt man die gesamte Nutzwärmemenge, so ist als nächstes der Wärmeverbrauch je Zeiteinheit für die Nutzwärme zu ermitteln. Hierbei darf man aber nicht einfach die Wärmemenge durch die im vorigen Abschnitt ermittelte Durchwärmungszeit teilen; denn stünde nicht mehr Wärme zur Verfügung, als so errechnet, so würden die ermittelten Durchwärmungszeiten nicht einzuhalten sein. Denn sie setzen voraus, daß die Ofentemperatur während der ganzen Durchwärmungszeit konstant bleibt oder wenigstens sehr bald den Anfangswert wieder erreicht. Je größer der gewünschte Durchsatz eines Ofens ist, um so kleiner ist bei gleichbleibenden Anforderungen an den Temperaturausgleich im Gut der für die Bestimmung der Leistung einzusetzende Teil der Durchwärmungszeit. Dies sei an einem Beispiel dargelegt. Eine Eisenplatte von 200 mm werde in einem Ofen erwärmt. Wir nehmen zunächst an, die Leistungszufuhr zu dem Ofen werde durch feinfühligere Regelung in jedem Augenblick gleich dem Verbrauch gemacht: dann wird der Ofen zwangsläufig auf seiner Ausgangstemperatur gehalten. Bei einer Wärmeübergangszahl von  $75 \text{ kcal/m}^2, ^\circ\text{C}, \text{h}$  würden sich dann folgende Verhältnisse ergeben: wenn der Temperaturausgleich auf 0,55% getrieben wird, d. h., daß Oberflächen- und Kerntemperatur des Gutes am Ende der Durchwärmung um 0,55% des Wertes der Ofentemperatur voneinander abweichen, so sind (ermittelt aus Abb. 12)

in der ersten Stunde etwa	42%	der gesamten Wärmemenge zuzuführen
„ „ zweiten „ „	35%	„ „ „ „
„ „ dritten „ „	15%	„ „ „ „
„ „ vierten „ „	8%	„ „ „ „

Wird der Ausgleich dagegen nur auf 1% getrieben, so ist die Erwärmung nach etwa 3 Stunden beendet und der Anteil der einzelnen Stunden am Wärmebedarf wäre der folgende:

in der ersten Stunde etwa	48%	der gesamten Wärmemenge
„ „ zweiten „ „	39%	„ „ „ „
„ „ dritten „ „	13%	„ „ „ „

Würde man die gesamte Durchwärmungszeit in die Berechnung der Nutzwärme/Zeiteinheit einführen, so würde im ersten Beispiel in der ersten Stunde nur 25% (statt 42%), im zweiten Beispiel nur 33% (statt 48%) der gesamten Wärmemenge zur Verfügung stehen; der Ofen würde langsamer auf Temperatur kommen, wodurch naturgemäß auch die Durchwärmungszeit des Gutes vergrößert würde.

Es würde aber nicht lohnen, nun bei jedem Ofen die Durchwärmung nach diesem Verfahren zu verfolgen, um die Nutzwärme je Zeiteinheit zu bestimmen. Aus Gründen, die im Abschnitt „Wider-

stände“ besprochen werden sollen, pflegt man nie den Anschlußwert so knapp zu bemessen, daß diese Zeitunterschiede eine Rolle spielen. Es wird stets mit Wärmeüberschuß<sup>1</sup> gearbeitet. Und wir können mit großem Wärmeüberschuß arbeiten, weil durch die selbsttätige Regelung trotz großer Wärmezufuhr eine übermäßige Steigerung der Temperatur verhindert wird. Der Regler schaltet in bestimmten Zeitabständen aus und ein, so daß der mittlere Verbrauch von Viertelstunde zu Viertelstunde sinkt, trotzdem der Anschlußwert des Ofens gleich bleibt. In der Abb. 20 ist eine Messung an einem Ofen von ca. 170 dm<sup>3</sup> Nutzraum und einem Anschlußwert von 50 kW wiedergegeben, in den ein Rundeisen von 110 kg Gewicht (das sind 14 dm<sup>3</sup>) eingeschoben

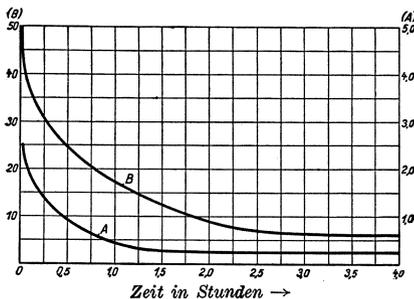


Abb. 20. Wärmeverbrauchskurven für das Durchwärmen eines Eisenblocks (Paschkis ZV 2).  
A Einschaltdauer durch Ausschaltdauer, B mittlerer Verbrauch [kWh/h].

wurde, nachdem der Ofen im Beharrungszustand war. Der Regler beginnt, weil der große Wärmeüberschuß einen Temperaturabfall verhindert, hier sofort nach Beschickung zu arbeiten und vermindert so stetig den mittleren Verbrauch, bis das Gut voll durchwärmt ist und der mittlere Verbrauch dauernd den Leerverlusten des Ofens (etwa 7 kW; s. S. 38) gleich ist.

**Beispiel** (Fortsetzung von S. 33):

Es sei die Nutzwärme für eine Monatsproduktion von 240 t Schraubenbolzen zu bestimmen. Die in Frage kommenden Ofengrößen siehe S. 32.

Die eigentliche Nutzwärme beträgt einheitlich für alle Ofengrößen

$$9600 \cdot 0,095 = 910 \text{ kWh/Tg. (aus Abb. 19).}$$

Zu diesem Betrag kommt die Wärme für das „tote Gewicht“: die Behälter, in denen die Bolzen in den Ofen kommen. Diese Behälter mögen mit Rücksicht auf mechanische Festigkeit und Ausführbarkeit bei dem gewählten Ofen mit Schichthöhe  $A$  30 kg/m<sup>2</sup> nutzbare Grundfläche wiegen. Demnach beträgt die Nutzwärme einschließlich totem Gewicht für die Schichthöhe  $A$  1092 kWh.

(Fortsetzung siehe S. 60.)

#### 4. Wärmeverluste

(Kurve 3 des Ofengrunddiagramms).

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

- $Q_v$  [kW] oder [kcal/h] Leerverluste,  
 $F$  [m<sup>2</sup>] Fläche für Verlustberechnung,  
 $\lambda$  [kcal/m, °C, h] Wärmeleitfähigkeit,

<sup>1</sup> Wärmeüberschuß = Aufnahme — Energieverbrauch im betrachteten Augenblick. — In den Kapiteln „Schaltung und Regelung“ und „Wirtschaftlichkeitsfragen“ wird auf die Bedeutung eines derartigen Wärmeüberschusses noch besonders eingegangen werden.

$s$ [m]	Wandstärke,
$\vartheta_1$ [°C]	Temperatur der Innenwand des Ofens,
$\vartheta_2$ [°C]	„ „ Außenwand des Ofens,
$\vartheta_c$ [°C]	Ofeninnentemperatur,
$\vartheta_a$ [°C]	Werkstattraumtemperatur,
$\alpha_i$ [kcal/m <sup>2</sup> , °C, h]	Wärmeübergangszahl innen,
$\alpha_a$ [kcal/m <sup>2</sup> , °C, h]	Wärmeübergangszahl außen,
$F_i$ [m <sup>2</sup> ]	Verlustfläche des Ofens,
$l$ [m]	Summe der Kantenlängen bei quaderförmigem Ofen,
$a, b, c,$ [m]	Kantenlängen des Ofens,
$d_i$ [m]	Innendurchmesser des Ofens (zylindrisch),
$d_1, d_2, d_3$ usw. [m]	äußere Durchmesser der einzelnen Isolierschichten eines zylindrischen Ofens,
$d_a$ [m]	Außendurchmesser des Ofens (zylindrisch),
$F_a$ [m <sup>2</sup> ]	Oberfläche der Ofenaußenwand,
$\vartheta_L$ [°C]	Temperatur an der Stelle $L$ eines einseitig beheizten Stabes,
$U$ [m]	Umfang eines einseitig beheizten Stabes,
$F$ [m <sup>2</sup> ]	Querschnitt eines einseitig beheizten Stabes,
$L$ [m]	Länge des einseitig beheizten Stabes,
$s_m$ [m]	Wandstärke der Muffel (Ofen mit außen beheizter Muffel),
$\lambda_m$ [kcal/m, °C, h]	Wärmeleitfähigkeit der Muffel,
$q$ [kW/m <sup>2</sup> ] oder [kcal/h, m <sup>2</sup> ]	Wärmeverbrauch für Gut und zur Deckung von Verlusten an unbeheizten Flächen, bezogen auf die beheizte Muffelfläche,
$\vartheta_{ma}$ [°C]	Muffelaußentemperatur,
$\vartheta_{mi}$ [°C]	Muffelinnentemperatur,
$F_n$ [m <sup>2</sup> ]	Oberfläche des Nutzraums (Muffelinnenfläche bei Öfen mit außen beheizter Muffel),
$F_V$ [m <sup>2</sup> ]	Verlustfläche bei Öfen mit innen beheizter Muffel.
$\lambda_i$ [kcal/m, °C, h]	Wärmeleitfähigkeit des Wärme- } innen beheizter Muffel,
$\lambda_a$ [kcal/m, °C, h]	schutzes bei Öfen mit: } außen „ „ „
$Q_i$ [kW] oder [kcal/h]	Leerverluste des Ofens bei innen beheizter Muffel,
$Q_a$ [kW] oder [kcal/h]	„ „ „ „ außen „ „
$Q_{sp}$ [kWh] oder [kcal]	Speicherwärme,
$c$ [kcal/°C, kg]	spezifische Wärme,
$\gamma$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	spezifisches Gewicht,
$V$ [dm <sup>3</sup> ]	Volumen,
$\zeta$	relative Einschaltdauer.

Schalten wir einen leeren kalten Ofen ein, so wird die Temperatur im Ofeninneren sehr schnell zu steigen beginnen, während man an der Außenseite längere Zeit hindurch keinen Temperaturanstieg wahrnimmt. In der Abb. 21 ist der Anheizvorgang dargestellt. Sie enthält 3 Kurven, die abhängig von der Zeit die Temperaturen im Ofeninneren und an der Ofenaußenwand ( $\vartheta_c$  bzw.  $\vartheta_2$ ) und die Leistung darstellen. Ist die gewünschte Temperatur (Betriebstemperatur) im Ofeninneren erreicht, so wird der Betriebsmann geneigt sein, den Anheizvorgang als beendet zu betrachten. Der Verfasser schlägt vor, die Zeit bis zur Erreichung dieser Temperatur „praktische Anheizzeit“ zu nennen. Tatsächlich ist der Anheizvorgang noch nicht beendet, da die Tem-

peratur an der Ofenaußenwand noch steigt. Soll die Temperatur im Ofeninneren jetzt nicht mehr weiter steigen, so muß die Leistung herabgesetzt werden (abhängig von der Zeit nach der in der Abb. 21 gezeigten Kurve). Die Ofenmanteltemperatur wird hierbei trotzdem noch weiter steigen. Nach einer Zeit, die unter normalen Verhältnissen ein Vielfaches der praktischen Anheizzeit beträgt, werden auch Leistung und Ofenmanteltemperatur einen Beharrungszustand erreicht haben. Die hierfür erforderliche Zeit soll „theoretische Anheizzeit“ genannt werden.

Leistung und Ofenmanteltemperatur nähern sich ihrem Beharrungszustand asymptotisch, so daß die theoretische Anheizzeit nur angegeben werden kann, wenn eine bestimmte Genauigkeit der Annäherung an die Asymptote vorgeschrieben ist (Paschkis BV6).

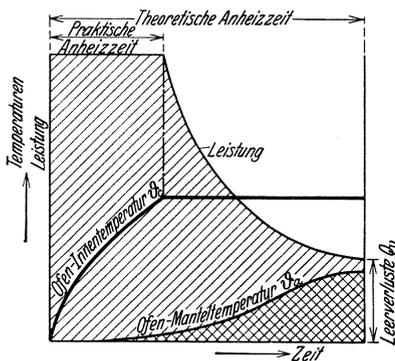


Abb. 21. Anheizen eines kalten Ofens (Paschkis BV 6).

Der Asymptotenwert der Leistung ist notwendig, um die Ofeninnentemperatur im Beharrungszustand bei leerem Ofen aufrechtzuerhalten. Er wird deshalb „Leerverlust“ genannt und ist einer Ofeninnentemperatur zugeordnet. Jede Ofeninnentemperatur hat ihren Leerverlust.

Die Fläche unter der Leistungskurve vom Anfang bis zum Erreichen des Beharrungszustandes ist proportional der gesamten während des Anheizvorgangs zugeführten Arbeit. Diese dient

1. zur Deckung der Speicherwärme,
2. zur Deckung der Strahlungsverluste usw. während des Anheizens.

„Speicherwärme“ ist die im Ofen und seinen Konstruktionsteilen im Beharrungszustand gespeicherte Wärme. Die Strahlungsverluste während des Anheizens kann man in erster Annäherung proportional der Fläche unter der Ofenmanteltemperatur-Zeit-Kurve setzen. Der Umrechnungsfaktor ist gleich dem Verhältnis der Ordinate der Leistungskurve zu der Ordinate der Ofenmanteltemperaturkurve, beide im Beharrungszustand.

Die während der praktischen Anheizzeit zugeführte Arbeit darf nicht mit der Speicherwärme verwechselt werden. Bei den Leistungs-, Arbeits- und Zeitangaben ist es notwendig, die Umgebungstemperatur, auf die sie sich beziehen, anzugeben.

Die theoretische Anheizzeit beträgt bei großen Öfen viele Tage, während die praktische für den gleichen Ofen im allgemeinen nur wenige Stunden beträgt.

Wir werden uns zunächst mit den Verlusten bei ununterbrochenem Betrieb (Leerverluste) beschäftigen, uns dann der Berechnung der Verluste unter Berücksichtigung einmaligen Aufheizens (Speicherwärme) zuwenden, um endlich den Fall des unterbrochenen Betriebes zu betrachten. Schließlich wird die Bestimmung der wirtschaftlichsten Wandstärke kurz zu erörtern sein.

a) Verluste bei ununterbrochenem Betrieb (Leerverluste).

**α) Die reinen Wärmedurchgangsverluste.** Wir betrachten zunächst allseitig wärmeisolierte Öfen (im Gegensatz zu Bädern oder dgl., die meist eine nicht isolierte Fläche hoher Temperatur haben). Ehe wir uns den einzelnen Ofenformen (Quader, Zylinder oder dgl.) zuwenden, wollen wir kurz die Grundgesetze, auf denen sich die Verlustrechnung aufbaut, erörtern.

αα) Die Grundformel und ihre Vereinfachungen (siehe Cammerer BV 7). Im Beharrungszustand läßt sich der Wärmestrom durch eine ebene Platte nach einem Gesetz berechnen, das vollkommen dem Ohmschen Gesetz entspricht. Wir bezeichnen (Abb. 22) die Stärke der Platte mit  $s$ , sie habe die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ ; ihre beiden Oberflächen haben die Temperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2^*$ . Dann fließt nach der Grundformel (7) durch die Fläche  $F$  der Platte die Wärmemenge

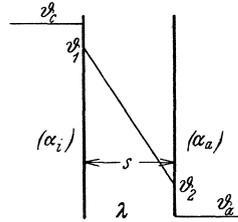


Abb. 22. Übersicht über die Bezeichnungen.

$$Q_v = F \frac{\lambda}{s} (\vartheta_1 - \vartheta_2). \tag{7}$$

Mißt man  $F$  in  $m^2$ ,  $s$  in  $m$ ,  $\lambda$  in  $\frac{kcal}{m, h, ^\circ C}$ , so erhält man  $Q_v$  in  $[kcal/h.]$

Meist sind nicht die Oberflächentemperaturen, sondern die Umgebungstemperaturen (Ofeninnentemperatur  $\vartheta_c$  und Werkstatttraumtemperatur  $\vartheta_a$ ) bekannt. Dann verfährt man so, daß man den Begriff eines Wärmeübergangswiderstandes  $\left(\frac{1}{\alpha_i} \text{ und } \frac{1}{\alpha_a}\right)$  einführt; da der Wärmestrom die Übergangswiderstände und den Materialleitwiderstand überwinden muß, so erhält man als durchgehende Wärmemenge:

$$Q_v = F (\vartheta_c - \vartheta_a) \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a}}. \tag{8}$$

Aus verschiedenen Gründen — z. B., weil die Ofeninnenwand mechanisch fest sein soll, oder weil ein Wärmeschutzmittel, das man verwenden will, nur bis zu einer bestimmten Höchsttemperatur bestän-

\*  $\vartheta_2$  entspricht der Manteltemperatur des Ofens.

dig ist, wird die Ofenwandung oft aus mehreren Schichten aufgebaut. Die durchgehende Wärmemenge ergibt sich dann aus der Gleichung

$$Q_v = F (\vartheta_c - \vartheta_a) \frac{1}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a}}. \quad (9)$$

Hierin bedeuten  $s_1, s_2, \dots, s_n$  die Wandstärken,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten.

Es bedeutet eine große Erleichterung, wenn man auf die Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände verzichten kann. Dies ist in der Tat oft möglich.

Bei Glühöfen zum Beispiel (Temperatur etwa  $800^\circ$ ) wird der Wert von  $\alpha_i$  kaum unter 75 sinken. — Bei Trockenöfen (Temperatur etwa  $200^\circ$ , metallische Innenwand) ist die Strahlung erheblich geringer, aber dafür ist meist durch erzwungene Luftbewegung die Konvektion besser. Man kann mit etwa  $\alpha_i = 40$  als niedrigstem Wert rechnen. Der obere Wert von  $\frac{1}{\alpha_i}$  schwankt daher etwa zwischen den Grenzen 0,025 und 0,013.

An der Ofenaußenwand herrschen, dank des Wärmeschutzes, wesentlich niedrigere Temperaturen. Erfahrungsgemäß kann man mit einem Wert  $\alpha_a = 10$  rechnen ( $\frac{1}{\alpha_a} = 0,1$ ).

Läßt man in der Wärmeverlustrechnung einen Fehler von  $p = 10\%$  zu, so ist die Vernachlässigung von  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  zulässig, solange

$$\frac{s}{\lambda} \geq \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} \right) \frac{100}{p} = 0,125 \cdot 10 = 1,25 \quad (10)$$

ist.

In der Abb. 23 ist für verschiedene Wärmeleitzahlen die Mindestwandstärke angegeben, bei der die Vernachlässigung von  $\alpha$  für verschiedene  $p$  zulässig bleibt. Um sich über den Einfluß der zugelassenen Ungenauigkeit ein Bild machen zu können, ist in der rechten oberen Ecke eine  $p$ -Skala aufgetragen. Durch Verbindung des Nullpunktes mit einem Punkt der  $p$ -Skala erhält man die Grenzgerade, die für die auf der Skala angegebene Zahl von Prozenten als Fehler gilt. Berücksichtigt man, daß die  $\alpha$ -Werte besonders niedrig eingesetzt wurden, so daß der Fehler normalerweise unter dem angegebenen bleibt, so darf man daraus schließen, daß im allgemeinen die Werte  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  vernachlässigt werden dürfen.

Bei der Auswertung der Grundformel für die verschiedenen Körperformen werden wir immer von einer „Innenfläche“ zu sprechen haben. Als Innenfläche ist hierbei die Oberfläche der inneren Ofenwand anzusehen, die nicht immer mit der Oberfläche des „Nutzraums“ zusammenfällt. Soll z. B. ein Ofen mit innen beheizter Muffel für Gut

bestimmter Größe gebaut werden, so muß je nach Konstruktion des Ofenraums und der Widerstände ein bestimmter Schutzabstand zwischen Gut und Widerständen eingehalten werden, und auch die Widerstände nehmen für sich Platz in Anspruch. Man muß also in solchen Fällen zwischen „Nutzraumoberfläche“ und „Verlustfläche“ unterscheiden.

Vielfach werden diese beiden Begriffe durcheinander geworfen, wodurch z. B. auch die Vergleichbarkeit von Angeboten leidet. In die Verlustrechnung ist stets die „Verlustfläche“ einzusetzen, z. B. bei Elektrodenöfen (Bädern) die Oberfläche des Badraums, bei Öfen mit außenbeheizter Muffel die innere Muffelwandoberfläche.

αβ) Anwendung auf den rechteckigen und zylindrischen Ofen. Bei Öfen rechteckiger Grundform hat man es mit Hohlquadern zu tun. Wir nehmen zunächst an, daß es sich um homogene Körper handelt, sehen also von allen von Bau-rücksichten aufgezwungenen Unregelmäßigkeiten ab. Dann ist als Erstes zu entscheiden, welche Fläche (Innen-, Außenfläche oder dgl.) man in den Verlustformeln (7) bis (9) für den Wert  $F$  einsetzen soll. Eine mathematisch genaue Formel konnte bisher nicht aufgestellt werden; man muß sich mit Näherungsgleichungen begnügen, die bei Hechler

und Langmuir (ZV 11 und 12) zusammengestellt sind. Es hat sich gezeigt, daß man zu guter Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Werten kommt, wenn man mit dem geometrischen Mittel der Innen- und Außenfläche rechnet. Der Ausdruck  $\frac{F}{s}$  läßt sich dann wie folgt darstellen:

$$\frac{F}{s} = \frac{\sqrt{F_i \cdot F_a}}{s} = \frac{F_i}{s} \sqrt{1 + \frac{2l \cdot s}{F_i} + \frac{24 s^2}{F_i}} \quad (11)$$

Hierin ist  $l$  die Summe der Kantenlängen  $l = 4(a + b + c)$ . Zur weite-

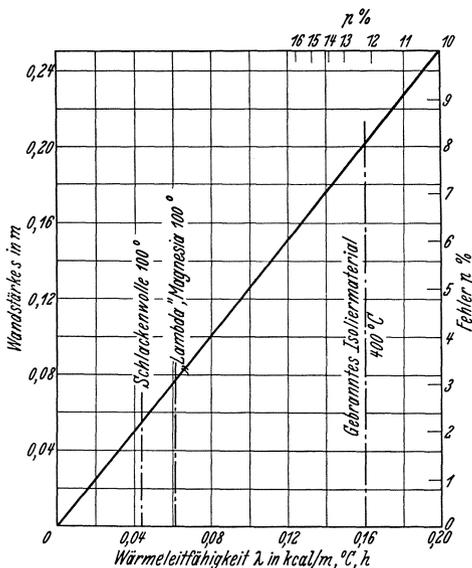


Abb. 23. Einfluß der Vernachlässigung von  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  auf die Wärmeverlustrechnung.

$s$  [m] = Wandstärke,  $\lambda$  [kcal/m, °C, h] = Wärmeleitfähigkeit der Ofenwand,  $p$  [%] = Fehlerprozent nach Formel (10). — Verbinde den Nullpunkt mit dem zugelassenen Wert von  $p$  auf der  $p$ -Skala. Dann geben zusammengehörige Abszissen- und Ordinatenwerte zu jedem Wert von  $\lambda$  die kleinste zugelassene Wandstärke von  $s$ .

ren Vereinfachung wird  $l$  als Funktion von  $F_i$  dargestellt nach der Beziehung:  $l = f \sqrt{F_i}$ . Der Betrag des Wertes  $f$  hängt dabei von der Größe der Kantenverhältnisse des „Quaders“ (Ofens) ab. In Abb. 24 ist  $f$  abhängig von den beiden Kantenverhältnissen  $\frac{b}{a}$  und  $\frac{c}{a}$  dargestellt. Um das Schaubild richtig zu benutzen, ist für  $a$  die kleinste, für  $b$  die

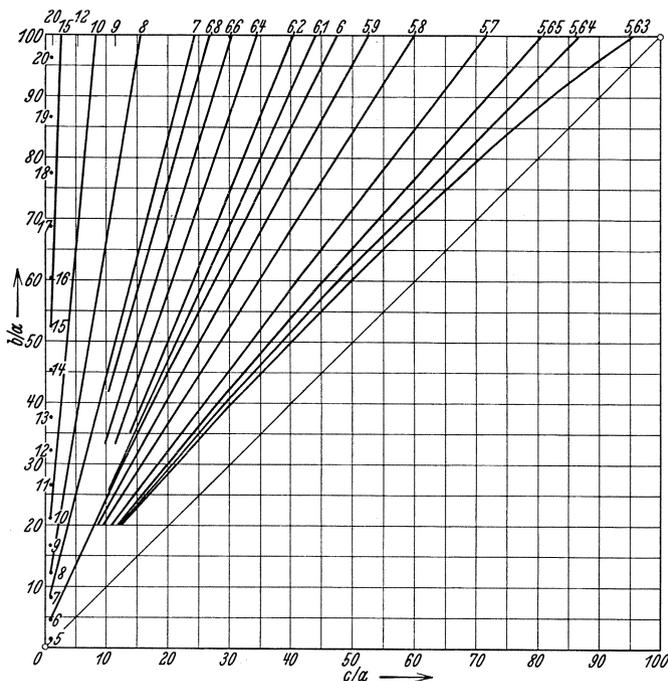


Abb. 24. Beiwert  $f$  in Abhängigkeit von den Kantenverhältnissen  $\frac{b}{a}$  und  $\frac{c}{a}$ ;  $\frac{b}{a} > \frac{c}{a} > 1$ .

größte Kantenlänge einzusetzen. Unter Verwendung von  $f$  kann man  $\frac{F}{s}$  wie folgt schreiben:

$$\frac{F}{s} = \frac{F_i}{s} \sqrt{1 + 2f \cdot \frac{s}{\sqrt{F_i}} + 24 \left( \frac{s}{\sqrt{F_i}} \right)^2}. \quad (11a)$$

Mit Rücksicht auf die große Wichtigkeit der Berechnung der Wärmeverluste von rechteckigen Öfen empfiehlt es sich, die Formeln zu graphischen Rechenhilfsmitteln auszuwerten. Dazu stehen grundsätzlich zwei Wege zur Verfügung, die in den nachfolgenden beiden Abbildungen angedeutet sind (Abb. 25 und 26).

Bei dem ersten Verfahren (Abb. 25) wird der Wert  $f$  konstant gesetzt. Der dadurch entstehende Fehler ist nicht sehr groß und ist in der Abb. 27 in Abhängigkeit von  $f$  aufgetragen. Als Kurvenparameter findet man

den Wert  $f$ , auf der Ordinate die Wurzelwerte für die verschiedenen Beträge von  $f$ , ausgedrückt als Vielfache des Wertes für  $f = 6$ . Als Abszisse ist  $\frac{s}{\sqrt{F_i}}$  aufgetragen.

Begrenzt man den zulässigen Fehler auf 10%, so kann man nach  $f = 6$  für alle gebräuchlichen Öfen rechnen, falls nicht ungewöhnliche Isolationsverhältnisse vorliegen.

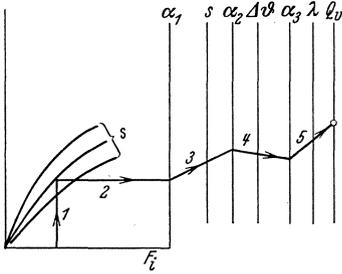


Abb. 25. Schema eines Nomogramms zur Berechnung der Leerverluste rechteckiger Öfen.

$f$  konstant gesetzt. 3 Hilfsachsen, 6 Ablesungen. Ausgeführt in Tafel 1.

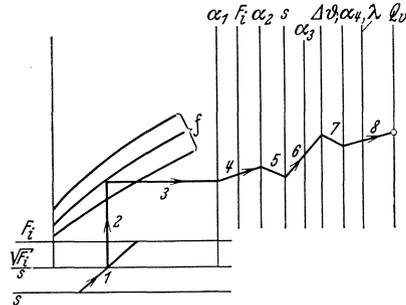


Abb. 26. Schema eines Nomogramms zur Berechnung der Leerverluste rechteckiger Öfen.

$f$  variabel. 5 Hilfsachsen, 8 Ablesungen. Die gegen Abb. 25 größere Genauigkeit erfordert umständlichere Rechnung.

Im folgenden sind die in Betracht kommenden Formeln für die Berechnung der Wärmeverluste eines Quaders in der Reihenfolge ihrer Genauigkeit zusammengestellt.

$$\left. \begin{aligned}
 (\alpha) \quad Q_v &= \frac{(\vartheta_c - \vartheta_a) F_i}{\frac{s}{\lambda} \sqrt{\frac{F_i}{F_a}} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} \frac{F_i}{F_a}}, \\
 (\beta) \quad Q_v^* &= \frac{(\vartheta_c - \vartheta_a) \sqrt{F_i F_a} \cdot \lambda}{s}, \\
 (\gamma) \quad Q_v &= \frac{(\vartheta_c - \vartheta_a) \lambda F_i}{s} \sqrt{1 + 12 \frac{s}{\sqrt{F_i}} + 24 \left( \frac{s}{\sqrt{F_i}} \right)^2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (11b)$$

Die Berechnung der Verluste nach Formel (11b,  $\gamma$ ) kann durch Verwendung der Tafel 1 (Anhang) erspart werden. Hier ist auf der Abszissenachse in logarithmischem Maßstabe die Innenfläche aufgetragen; als Kurvenparameter ist die Wandstärke gewählt, auf der Ordinatenachse findet sich, ebenfalls in logarithmischem Maßstab, der Wert  $\frac{F}{s}$ . Man geht zur ersten Hilfsskala, die zugleich Bestandteil eines Nomogramms ist; auf den anderen Skalen des Nomogramms sind die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturdifferenz aufgetragen. Die Hilfs-

\* Man kann natürlich als Zwischenstufe der Genauigkeit auch nur  $\alpha_i$  vernachlässigen, was darin seine Berechtigung hätte, daß  $\alpha_a < \alpha_i$  ist.

skalen sind mit  $\alpha_1, \alpha_2$  bezeichnet. Den Pfeilen in der Reihenfolge ihrer Nummern folgend, findet man die gesuchten Wärmeverluste. Als Temperaturbereich ist nur der von 1 bis 100° gewählt; dieser ist dafür in besonders großem Maßstab aufgetragen. Werte über 100° werden durch Ablesung der Verluste für den 10. Teil und nachträgliche Multiplikation mit 10 gefunden: der Verlust für eine Temperatur von 760°

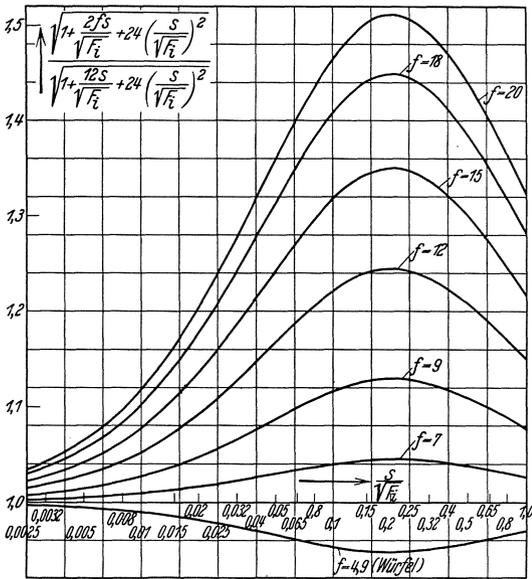


Abb. 27. Formfaktoren nach Gleichung (11a) für  $f = \text{konstant} = 6$  und  $f = \text{veränderlich}$ .

wird also z. B. so gefunden, daß man den für 76° abliest und den abgelesenen Wert mit 10 multipliziert.

Berücksichtigung zusammengesetzter Schichten: In vielen Fällen, namentlich bei Öfen für höhere Temperaturen, wird die Innenwand des Ofens aus Schamotte bestehen und erst außerhalb dieser Schicht wird die eigentliche Isolierschicht angeordnet sein.

Bei unendlich ausgedehnten ebenen Flächen könnte man mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit

rechnen, die sich aus den beiden Wandstärken  $s_1$  und  $s_2$  und den zugehörigen Wärmeleitfähigkeitswerten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  nach der Formel

$$\lambda = \frac{s_1 + s_2}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} \tag{12}$$

ergibt. Beim Hohlquader stellt diese Berechnungsweise nur eine Annäherung dar, während die genaue Rechnung die größere Fläche für den Wärmedurchgang, also den verhältnismäßig geringeren Widerstand der außen liegenden Schichten in Rechnung setzen muß. Bezeichnet man mit  $F'_a$  die äußere Fläche der inneren Schicht (also die Oberfläche der Grenzschicht zwischen den beiden Materialien), so wäre der Wärmeverlust zu berechnen aus

$$Q_v = \frac{(\vartheta_c - \vartheta_a)}{\frac{s_1}{F_i \lambda_1 \sqrt{1 + 12 \frac{s}{\sqrt{F_i}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F_i}}\right)^2}} + \frac{s_2}{F'_a \lambda_2 \sqrt{1 + 12 \frac{s}{\sqrt{F'_a}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F'_a}}\right)^2}}}. \tag{13}$$

Die beiden Teile des Nenners können je für sich nach Tafel 1 berechnet werden. Es ist lediglich die Kenntnis von  $F'_a$  nötig. Um das Aufsuchen von  $F'_a$  zu erleichtern, ist in Abb. 28 das Verhältnis von  $\frac{F_a}{F_i} = f(F_i, s)$  bei  $f = 6 = \text{konst}$  aufgetragen.

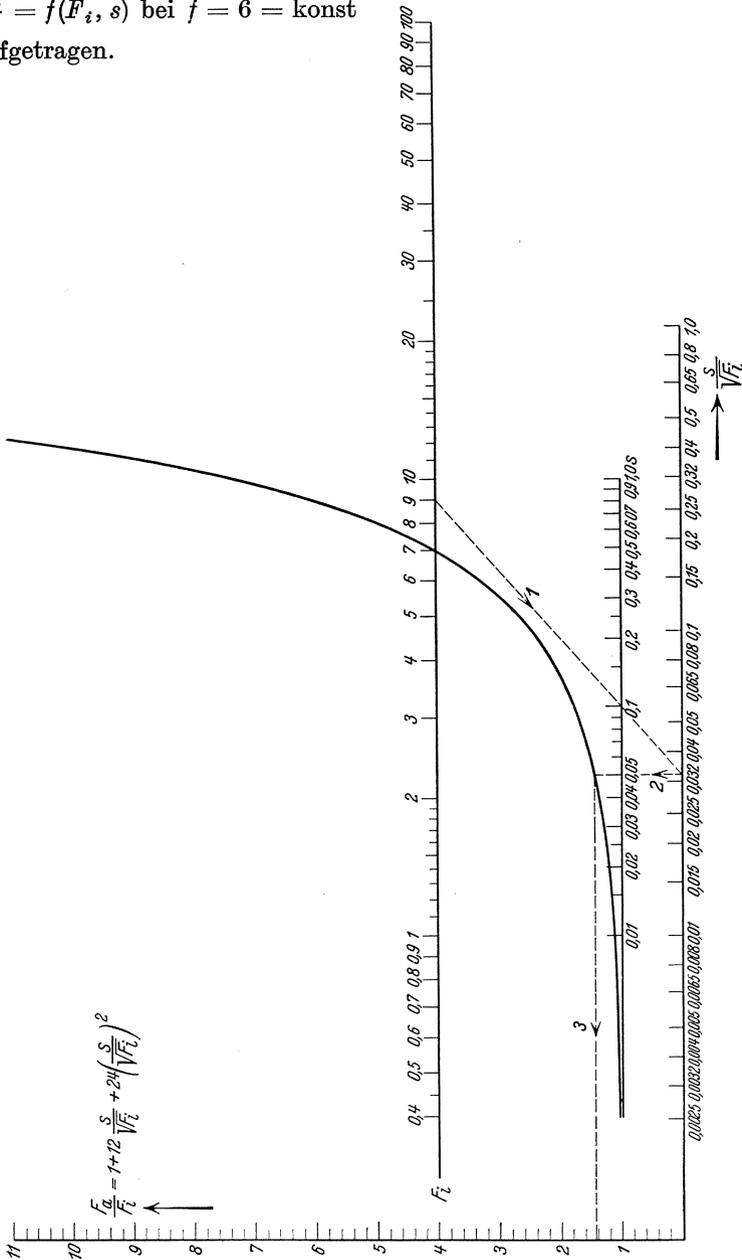


Abb. 28. Ermittlung der Außenfläche eines Quaders aus Innenfläche und Wandstärke für  $f = \text{konst} = 6$ .

Trotzdem ist die Berechnung noch verhältnismäßig umständlich; bei großen Werten der Innenfläche und bei kleinen Schamottestärken wird die Berechnung mit mittlerer Wärmeleitfähigkeit nach [Gl. (12)] natürlich kleinere Fehler ergeben als bei kleinen Flächen und bei großen Schamottestärken. Ebenso ist die Berechnung mit mittlerer

Zahlentafel 4.

$F_i$ [m <sup>2</sup> ]	$\lambda_2$ [ $\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}}$ ]		$s_1 = 0,04$ [m]			$s_1 = 0,12$ [m]			$s_1 = 0,24$ [m]		
			$s_2$ [m]			$s_2$ [m]			$s_2$ [m]		
			0,035	0,26	0,46	0,035	0,26	0,46	0,035	0,26	0,46
0,4	0,05	$Q_v$ getr.	139	42,0	34,5	227	70,6	56,1	309	114	88,8
		$Q_v$ komb.	104	30,8	25,4	136	35,8	28,3	162	43,2	32,5
	0,1	$Q_v$ getr.	255	81,9	67,6	352	130	105	404	190	154
		$Q_v$ komb.	197	61,2	50,5	237	70,2	55,8	258	80,8	63,3
	0,2	$Q_v$ getr.	439	156	130	486	222	185	476	287	243
		$Q_v$ komb.	359	121	100	377	135	109	367	151	121
	Verhältn.	0,05	1,33	1,37	1,36	1,67	1,98	1,98	1,91	2,64	2,73
		0,1	1,29	1,34	1,34	1,49	1,85	1,88	1,56	2,36	2,43
		0,2	1,22	1,29	1,29	1,29	1,65	1,69	1,30	1,89	2,02
4,0	0,05	$Q_v$ getr.	846	181	132	1030	238	171	1220	323	230
		$Q_v$ komb.	763	162	118	815	178	127	871	200	140
	0,1	$Q_v$ getr.	1590	357	262	1720	454	331	1770	587	430
		$Q_v$ komb.	1450	321	235	1420	348	251	1390	384	273
	0,2	$Q_v$ getr.	2830	696	513	2590	836	622	2290	993	758
		$Q_v$ komb.	2630	633	466	2270	666	490	1970	703	520
	Verhältn.	0,05	1,11	1,12	1,12	1,27	1,34	1,34	1,40	1,61	1,64
		0,1	1,10	1,11	1,11	1,21	1,31	1,32	1,28	1,53	1,57
		0,2	1,07	1,10	1,10	1,14	1,26	1,27	1,16	1,41	1,46
40	0,05	$Q_v$ getr.	6940	1170	755	7050	1300	839	6760	1400	912
		$Q_v$ komb.	6710	1130	727	6480	1170	756	6190	1240	795
	0,1	$Q_v$ getr.	13100	2320	1500	12100	2520	1650	10500	2650	1760
		$Q_v$ komb.	12700	2240	1450	11300	2300	1490	9850	2370	1550
	0,2	$Q_v$ getr.	23700	4550	2970	18900	4770	3170	14500	4770	3270
		$Q_v$ komb.	23100	4410	2880	18000	4400	2910	14000	4340	2950
	Verhältn.	0,05	1,03	1,03	1,04	1,09	1,11	1,11	1,09	1,14	1,15
		0,1	1,03	1,03	1,04	1,07	1,10	1,10	1,07	1,12	1,13
		0,2	1,03	1,03	1,03	1,05	1,08	1,09	1,04	1,10	1,11
200	0,05	$Q_v$ getr.	32800	5060	3080	31400	5300	3240	30700	5890	3640
		$Q_v$ komb.	32300	4990	3020	30100	5050	3090	27700	5150	3160
	0,1	$Q_v$ getr.	62200	10000	6130	54300	10300	6370	47900	11200	7050
		$Q_v$ komb.	61300	9890	6030	52600	9900	6090	44000	9860	6160
	0,2	$Q_v$ getr.	114000	19700	12100	85800	19600	12400	66600	20300	13200
		$Q_v$ komb.	111000	19500	12000	83900	18900	11900	62600	18100	11700
	Verhältn.	0,05	1,02	1,02	1,02	1,04	1,05	1,05	1,11	1,14	1,15
		0,1	1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,05	1,09	1,13	1,14
		0,2	1,02	1,01	1,01	1,02	1,04	1,04	1,06	1,12	1,13

Wärmeleitfähigkeit nach [Gl. (11) und (12)] um so eher zulässig, je näher die Werte der Wärmeleitfähigkeit für die beiden Materialien liegen. Zur Beurteilung dieser Verhältnisse diene die Zahlentafel 4.

Die Zahlentafel gibt die Wärmeverluste in W/1000° C, und zwar in der Reihe „getrennt“ gerechnet nach der genaueren Formel (13), in der Reihe „kombiniert“ gerechnet nach Formel (11) mit  $\lambda$  nach Formel (12). In den mit „Verhältnis“ bezeichneten Zeilen ist der Quotient dieser beiden Ausdrücke angegeben. Für die Schamotte ist durchwegs mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda_1 = 1$  gerechnet, während für das Wärmeschutzmaterial mit drei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten gerechnet wurde:  $\lambda_2 = 0,05; 0,1; 0,2$ .

Man sieht, daß man bis zu Ofengrößen von 40 m<sup>2</sup> herunter im allgemeinen einfacher [nach Formel (11) und (12)] rechnen darf, ohne mit dem Fehler über 10% zu kommen, bei kleineren Öfen wird man dagegen, namentlich bei besserem Isolationsmaterial und größeren Schamottestärken, genauer rechnen müssen.

Noch ein Zweites ist durch diese Zahlentafel deutlich gemacht: bei kleinen Öfen und nicht zu kleinen Isolierstärken bewirkt eine Vergrößerung der Schamotteschicht bei gleichbleibender Isolierstärke eine Vergrößerung der Wärmeverluste. Diese Tatsache kann gar nicht genug betont werden, denn sie führt uns auf die Forderung — die immer wieder gestellt werden muß —, Elektroöfen mit der kleinsten möglichen Schamottestärke auszuführen. Eine gewisse Mindeststärke darf natürlich nicht unterschritten werden, einmal mit Rücksicht auf die erforderliche Festigkeit und zweitens, weil man in der Schamotteschicht ein bestimmtes Temperaturgefälle erzielen muß, um eine gewisse Höchsttemperatur in der Isolierschicht nicht zu überschreiten. Über diese Mindeststärke soll im folgenden noch einiges gesagt werden.

Bezeichnet man mit  $s_1, s_2, s_3$  usw. die Teilwandstärken verschiedener Materialien, mit  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  usw. deren Wärmeleitfähigkeiten, mit  $\Delta\vartheta$  das gesamte Temperaturgefälle in der Ofenwand und mit  $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \Delta\vartheta_3$ , usw. die Temperaturgefälle in den einzelnen Schichten, so gilt, da die Temperaturabfälle in den einzelnen Schichten den Widerständen proportional sind:

$$s_1 = \frac{\left(\frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots\right) \lambda_1 \cdot \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta}}{1 - \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta}}, \quad (14)$$

$$s_2 = \frac{\left(\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots\right) \lambda_2 \cdot \frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta}}{1 - \frac{\Delta\vartheta_2}{\Delta\vartheta}}. \quad (14a)$$

Liegen die Ofeninnentemperatur, die Temperaturen an den Berührungsflächen der einzelnen Schichten ( $\Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1$ ,  $\Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2$  usw.) und die Wärmeleitfähigkeiten für z. B. drei zu verwendende Materialien fest, so erhält man, wenn man eine Wandstärke ( $s_3$ ) wählt, die übrigen Wandstärken eindeutig aus den Gleichungen:

$$s_1 = \frac{\Delta \vartheta_1 \cdot \lambda_1 \cdot s_3}{(\Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2) \cdot \lambda_3}, \quad (15)$$

$$s_2 = \frac{\Delta \vartheta_2 \cdot \lambda_2 \cdot s_3}{(\Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2) \cdot \lambda_3}. \quad (15a)$$

Dabei ist  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  vernachlässigt, so daß  $\Delta \vartheta$  gleich der Übertemperatur des Ofens über der Umgebung ist.

Aus den oben gegebenen Formeln läßt sich also die erforderliche Mindestwandstärke errechnen, die notwendig ist, um einen vorgeschriebenen Temperaturabfall in einer Schicht zu erzielen; hierbei ist allerdings angenommen, daß die zur Innenwand parallelen Flächen Isothermen sind, was nicht zutrifft, da gegen die Kanten hin die Temperatur abnimmt. — In der Praxis liegt der Fall meistens so, daß der Wert  $\Delta \vartheta_1$  gegeben ist dadurch, daß die Ofeninnentemperatur und die zulässige Grenztemperatur für die erste Isolierschicht bekannt ist. Treten höhere Temperaturen auf und will man dennoch mit dem gleichen Material isolieren, so muß die Schamotteschicht um so stärker gewählt werden, je besser der Ofen isoliert werden soll, je niedriger also seine Außentemperatur sein muß. Die Forderung nach möglichst geringen Schamottestärken wird also um so schwieriger zu erfüllen sein, je höher die Betriebstemperatur ist, und um so geringer werden auch die Wärmersparnisse durch Isolation. Man kann sich in solchen Fällen dadurch helfen, daß man zwischen Schamotte und Isolierung eine Zwischenschicht fügt, deren Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit in der Mitte zwischen denen von Schamotte und Isolierung liegen.

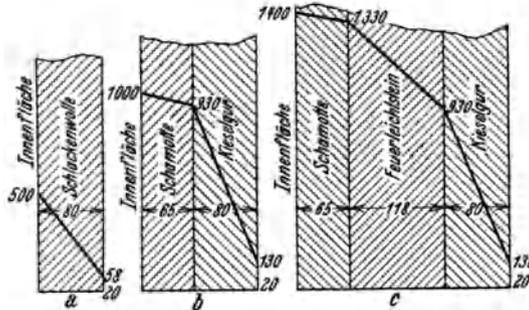
In der Abb. 29 (Paschkis ZV 13) ist unter Verwendung der Gleichungen (14) und (15) die Wandstärke und das Temperaturgefälle für einen Ofen mit den Innenabmessungen [m]  $1 \times 1 \times 1$  berechnet, und zwar gilt

Abb. 29a für eine Innentemperatur von 500°	}	wobei das Isoliermittel keine höhere Temperatur als 950° C annehmen darf.
„ 29b „ „ „ „ 1000°		
„ 29c „ „ „ „ 1400°		

Die Schamottestärken ergeben sich nach den Gleichungen (15) kleiner als in der Abb. 29 angegeben, zu etwa 45 mm; sie sind mit 65 mm gewählt, um der Forderung nach Festigkeit Genüge zu leisten. Für die Abb. 29c ist dann, um keine zu großen Schamottestärken zu erhalten, auf Grund der gewählten Schamottestärke (auch 65 mm) die Stärke der mit „Feuerleichtstein“ bezeichneten Zwischenschicht errechnet. Bei allen 3 Abbildungen ist das Maß der eigentlichen Isolierung

mit 80 mm konstant gehalten, so daß der Einfluß der Temperatur auf die Wärmeverluste, die Wandstärke und das Temperaturgefälle deutlich wird (vgl. hierzu ZV 13, wo der Einfluß der Gebrauchsgrenze von Isoliermaterialien auf die Wärmeverbrauchsangaben erläutert wird).

Öfen mit zylindrischer Grundform. Auch beim Zylinder, ebenso wie beim Hohlquader, nimmt nach außen hin die für den Wärme-



Verlust/100°	1,28 kW	2,27 kW	2,04 kW
Speicherwärme/100°	1,42 kWh	24,80 kWh	42,0 kWh
Grenztemperatur	500 ... 600°	1000 ... 1100°	1400 ... 1500°

Abb. 29 (Paschkis ZV 13).

durchgang zur Verfügung stehende Fläche zu. Im Gegensatz zum Hohlquader gelingt es aber beim Zylinder — allerdings unter Vernachlässigung der Randeinflüsse, d. h. also unter der Annahme eines unendlich langen Zylinders — eine genaue Formel für den Wärmedurchgang zu finden (Cammerer BV 7). Sie lautet:

$$Q_v = \frac{(\vartheta_c - \vartheta_a) \pi \cdot l}{\frac{1}{d_i \alpha_i} + \frac{1}{2 \lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_i} + \frac{1}{2 \lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} + \dots + \frac{1}{2 \lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} + \frac{1}{d_n \alpha_a}} \quad (16)$$

Hierin bedeuten:

- $\vartheta_c - \vartheta_a$  das Temperaturgefälle.
- $l$  Länge des betrachteten Zylinderstücks,
- $d_i, d_n = d_a$  die Innen- bzw. Außendurchmesser des Zylinders,
- $d_1, d_2, d_3$  die äußeren Durchmesser der einzelnen Isolierschichten,
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  die zugehörigen Wärmeleitzahlen,
- $\alpha_i, \alpha_a$  Wärmeübergangszahlen.

Selbstverständlich können auch hier die Vereinfachungen wie beim Hohlquader gemacht werden ( $\frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{\alpha_a} = 0$ ).

Für die Berechnung des Wärmedurchgangs durch Hohlzylinder gibt es ausgedehnte Tafelwerke, die allerdings selten die Werte auch für größere Durchmesser bringen, da sie sich auf Dampfleitungen beziehen. Einige solcher Tafeln sind bei Cammerer (BV 7, 9) und Grünzweig

und Hartmann (BV 8) zusammengestellt. — Da die Bedeutung zylindrischer Öfen gegenüber quaderförmigen stark in den Hintergrund tritt, ist hier auf die Wiedergabe derartiger Tafeln verzichtet. Die Stirnflächen des Ofens werden zweckmäßig so berücksichtigt, daß sie nach der Formel für ebene Wände als geometrisches Mittel der übrig bleibenden Innen- und Außenfläche berechnet werden. Das sei an Hand der untenstehenden Abb. 30 gezeigt: der Mantel (schräg schraffiert) wird als Hohlzylinder [Formel (16)] berechnet; die Stirnflächen (senkrecht schraffiert) werden nach der Formel (11 b,  $\beta$ ) berechnet; dabei ist einzusetzen

$$\text{für } F_i \quad d_i^2 \frac{\pi}{4},$$

$$\text{für } F_a \quad d_a^2 \frac{\pi}{4} + d_a \pi s.$$

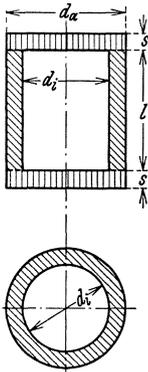


Abb. 30. Zur Berechnung der Leerverluste zylindrischer Öfen.

**$\beta$ ) Berücksichtigung der Wärmekurzschlüsse.** Beim Bau von Öfen treten niemals die unserer bisherigen Rechnung zugrunde gelegten einfachen Körperformen auf. Zunächst hat der Ofen naturgemäß immer eine Öffnung (Türe oder dgl.), die Anlaß zu Störungen der Grundform gibt. Abgesehen von der durch Vorsprünge oder Einschnitte meist vergrößerten Oberfläche werden auch Undichtigkeiten an der Türe auftreten.

Außer der Türe sind die Heizwiderstände eine der Hauptquellen der Wärmekurzschlüsse. Denn die Heizwiderstände müssen notwendigerweise mit elektrisch gut leitenden Verbindungen durch die Ofenwand geführt werden und diese leiten auch gleichzeitig die Wärme gut. Da außerdem diese Durchführungen wegen der verschiedenen Längendehnungen von Ofenwand und Heizkörper nicht ganz dicht gemacht werden können, kommen noch Wärmeverluste durch Konvektion hinzu. Man könnte versucht sein, Wärme dadurch sparen zu wollen, daß man die Heizkörperenden (Durchführungen) außerhalb der Ofenwand noch besonders abdeckt. Dies ist mit Rücksicht auf einwandfreien elektrischen Kontakt unzulässig.

Bei nicht metallischen Widerständen wird sogar unter Umständen künstliche Kühlung angewendet: bei Wasserkühlung ist der zusätzliche Verlust aus Wassertemperatur und Menge zu errechnen; dieser beträgt<sup>1</sup> 40 W/cm<sup>2</sup> Querschnitt der Durchführung bei 1000° C; bei Kühlung durch verstärkte Enden allein rechnet man nach Formel (17) (S. 52). Die erforderliche Wassermenge und Temperatur hängt sehr

<sup>1</sup> Nach freundlicher Mitteilung der Deutschen Carborundum-Werke, Abteilung Globar.

stark von der Konstruktion der Elemente ab; es empfiehlt sich daher, sich die entsprechenden Angaben von den Lieferfirmen der Widerstände machen zu lassen.

Schließlich muß aus Gründen der Festigkeit die innere Ofenwand mit der kalten äußeren meist durch feste und die Wärme verhältnismäßig gut leitende Baustoffe verbunden sein. Bei Niedertemperaturöfen wird die metallische Innenwand durch eiserne Träger mit der Außenwand verbunden, bei Hochtemperaturöfen mit Schamotteinnenwand muß das Gewölbe vielfach durch Widerlager, die auch aus Schamotte bestehen, abgestützt werden. (Siehe Ausführungsformen S. 192.)

Eine rechnerische Erfassung jedes einzelnen Wärmekurzschlusses ist nicht üblich, weil hierzu die Berechnungsgrundlagen noch zu unsicher sind.

Wieviel Wärme durch diese Wärmekurzschlüsse tatsächlich verlorengehen kann, beleuchten die folgenden Zahlen: eine Schamottebrücke von  $0,3 \cdot 0,3 \text{ m}^2$  bewirkt etwa den gleichen Wärmeverlust wie eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  Kieselgurisolierung ( $\lambda$  etwa  $0,10 \dots 0,12$ ); oder: eine Chromnickelbrücke von  $85 \text{ cm}^2$  (entsprechend 100 Durchführungen von je  $10 \text{ mm } \varnothing$ ) leitet gleich viel Wärme, wie  $1 \text{ m}^2$  Kieselgurisolierung.

Statt der Einzelberechnung, die, wie gesagt, meist nicht durchgeführt werden kann, werden die errechneten Wärmeverluste mit einem Erfahrungswert multipliziert, der für technisch gleich gebaute Öfen der gleiche ist. (Dagegen kann man z. B. einen Ofen mit Hängedekke nicht mit den gleichen Zuschlägen berechnen wie einen Ofen mit Gewölbe; oder es kann ein Niedertemperaturofen, dessen einzelne Widerstandselemente im Inneren durch Schraubverbindungen geschaltet sind, nicht mit gleichen Zuschlägen berechnet werden wie ein Ofen, dessen Widerstände einzeln nach außen durchgeführt sind und außen geschaltet werden.)

Mit Hilfe dieses Erfahrungswertes kann man zu recht genauen Vorausberechnungen kommen. Die Höhe des Beiwerts hängt wesentlich von der Sorgfalt der Konstruktion ab und davon, ob Schamottebrücken nötig sind oder nicht. (Gewölbeabstützung). Bei Mittel- und Hochtemperaturöfen (Öfen mit keramischer Innenwand) wird seine Höhe also von der Größe (Breite) des Ofens mit abhängig sein. Der Zuschlag soll sich erfahrungsgemäß etwa zwischen 50 % und 150 % der gerechneten Leerverluste bewegen. Bei einheitlicher Konstruktion gelingt es so, wenn für einen Ofen der Zuschlag durch Versuch ermittelt<sup>1</sup> ist, die Wärmeverluste von Öfen der verschiedensten Formen und Größen, aber der gleichen Bauart auf etwa 10 bis 15 % genau im voraus zu berechnen; dies ist in Anbetracht der Toleranzen in den Angaben über die Wärmeleitfähigkeit als recht gut zu betrachten.

<sup>1</sup> Bestimmung der Leerverluste siehe S. 147; der gemessene Wert, geteilt durch die nach Formel (11) bzw. (13) gefundenen Verluste, gibt den Zuschlag.

**γ) Verluste durch unbedeckte heiße Flächen.** Durch den oben erwähnten Beiwert sind nicht Verluste durch Strahlung von heißen Oberflächen (wie Bäder usw.) sowie durch Strahlung aus offenen Ofentüren abgedeckt. Die Wärmeabgabe von diesen heißen Flächen erfolgt durch Strahlung und Konvektion.

Die Berechnung der Strahlung geschieht nach dem auf S. 23 wiedergegebenen Kirchhoffschen Gesetz. Die Strahlungszahlen für verschiedene Oberflächen sind der Zahlentafel 2, S. 25 zu entnehmen.

Auch bezüglich der Konvektion sei auf den erwähnten Abschnitt (über Durchwärmungszeit) hingewiesen. Bei unbedeckten Flächen ist durch natürlichen Auftrieb der warmen Luft starke Luftbewegung zu erwarten, die, wie erwähnt, auf den Wärmeübergang durch Konvektion großen Einfluß hat.

In diesem Zusammenhange muß auch der Fall besprochen werden, daß aus einem geschlossenen Ofen Teile des Gutes, z. B. Stäbe, herausragen. Um den durch solche Wärmekurzschlüsse verursachten Wärmeverlust berücksichtigen zu können, muß man zunächst die Temperaturverteilung längs des Stabes zu berechnen suchen. Ist

$L$  die Länge des Stabes außerhalb des Ofens,  
 $U, F$  Umfang und Querschnitt des Stabes,  
 $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des Stabes,  
 $\alpha_L$  Wärmeübergangszahl an der Stelle  $L$ ,  
 $\vartheta_L$  die Temperatur an der Stelle  $L$ ,

so gilt nach Gröber (BV 3):

$$\frac{\vartheta_L}{\vartheta_c} = \frac{1}{\coth\left(\sqrt{\frac{\alpha_L U}{\lambda F}} \cdot L\right) + \sqrt{\frac{\alpha_L F}{\lambda U}} \operatorname{ctn}\left(\sqrt{\frac{\alpha_L U}{\lambda F}} \cdot L\right)}. \quad (17)$$

Die so errechneten Temperaturen sind mit den jeweiligen Wärmeübergangszahlen zu multiplizieren und die Summe über die Länge des Stabes zu bilden. Um den Gebrauch der Formel zu erleichtern, ist sie in Abb. 31 in Kurvenform dargestellt.

**d) Einige wichtige Sonderfälle.**  $\delta\alpha$ ) Bäder. (Elektrodenöfen.) Bei der Berechnung von Wärmeverlusten von Elektrodenöfen ist darauf zu achten, daß die Ausmauerung häufig nicht dicht ist; die Badflüssigkeit sickert durch die Ausmauerung nach außen durch und bildet infolge ihrer guten Wärmeleitfähigkeit einen erheblichen Wärmekurzschluß.

Es empfiehlt sich, in diesem Sonderfall so zu rechnen, als sei die Verlustfläche größer als die Nutzraumbofläche des Bades. In der Abb. 32 ist ein Querschnitt durch ein Salzbad angedeutet. Wenn damit zu rechnen ist, daß Salz bis zur Zone  $a$  durchsickert, dann legt man der Verlustrechnung zweckmäßig den Durchmesser  $d$  zugrunde, an Stelle des Baddurchmessers  $d_b$ . Das Verhältnis  $\frac{d_b}{d}$  hängt u. a. von dem Abso-

lutwert von  $d_b$ , vom Ausmauerungsmaterial, der Temperatur und der Sorgfalt der Ausmauerung ab. Es kann für eine gegebene Konstruktion nur durch Erfahrung gefunden werden. Diese Ungenauigkeit spielt im Rahmen der gesamten Verlustberechnung eines Bades eine verhältnismäßig unwichtige Rolle, weil die Strahlung an der Badoberfläche außerordentlich groß ist.

$\delta\beta$ ) Öfen mit außen beheizter Muffel. Die Heizwicklung bei diesen Öfen ist auf der Außenseite einer Muffel aufgebracht oder im Inneren einer feuerfesten Wand angeordnet, die beide aus einem elektrisch nicht leitenden Material bestehen. Es liegt auf der Hand, daß der Nachteil dieser Art von Öfen in der notwendigerweise verhältnismäßig hohen Heizkörpertemperatur zu suchen ist. Damit sind im Verhältnis zu Öfen mit innen beheizter Muffel höhere Verluste unvermeidlich. Die wärmetechnischen Vorteile solcher Öfen liegen einmal in der durch Fortfall der Schutzabstände verringerten Verlustfläche und dann in der Möglichkeit, besser isolierendes Material (Isolierpulver) zu verwenden<sup>1</sup>.

Die Berechnung der Wärmeverluste solcher Öfen unterscheidet sich von der für Öfen mit innen beheizter Muffel, und zwar durch die Abhängigkeit der Verluste von der Nutzlast. In der Abb. 33 ist ein Querschnitt durch einen Ofen mit außen beheizter Muffel schematisch gezeichnet. Sieht man von den Wärmeverlusten an den unbeheizten Stirnwänden ab, so können im Beharrungszustand, wenn keine Nutzwärme verbraucht wird, im Inneren der Muffel (schwarze Strahlung!) keine Temperaturunterschiede bestehen. Dann tritt auch in der Muffelwand kein Temperaturgefälle auf und die Heizkörpertemperatur ist

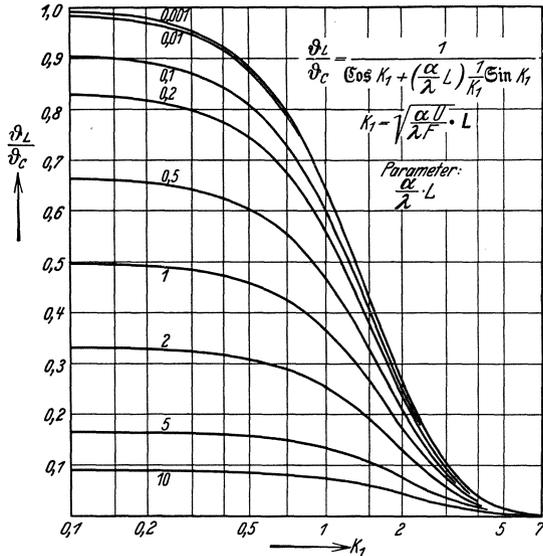


Abb. 31. Darstellung der Formel (17).

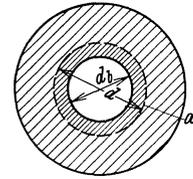


Abb. 32. Schematischer Schnitt durch ein Salzbad.

<sup>1</sup> Diese Beziehungen sowie die Abb. 34 wurden von dem Verfasser in einem Vortrag vor dem Elektrotechn. Verein Berlin am 28. 4. 1931 besprochen.

nicht höher als die Ofentemperatur, d. h. die Temperatur im Muffelinneren. Sobald durch die Muffelwand Wärme fließt, muß die Außenseite heißer sein als die Innenseite. Soll sie dieselbe Temperatur haben wie die Ofeninnenwand bei Öfen mit innen beheizter Muffel, so muß die Außenwand um so heißer sein, je größer der (Nutz-)Wärmestrom ist.

Für die weiteren Betrachtungen mögen die folgenden Bezeichnungen gelten:

$s_m$	Stärke der Muffel,
$\lambda_m$	Wärmeleitfähigkeit der Muffel,
$q$	Wärmeverbrauch für das Gut und für Deckung von Verlusten an unbeheizten Flächen bezogen auf die beheizte Muffelfläche,
$\vartheta_{ma}$	Muffelaußentemperatur,
$\vartheta_{mi}$	Muffelinnentemperatur,
$F_N$	Oberfläche des Nutzraums (bei Öfen mit außen beheizter Muffel) = Muffelinnenfläche,
$F_V$	Verlustfläche bei Öfen mit innen beheizter Muffel,
$\lambda_i$	Wärmeleitfähigkeit des Wärmeschutzes bei Öfen mit innen beheizter Muffel,
$\lambda_a$	Wärmeleitfähigkeit des Wärmeschutzes bei Öfen mit außen beheizter Muffel,
$Q_i$	Leerverluste des Ofens bei innen beheizter Muffel,
$Q_a$	Leerverluste des Ofens bei außen beheizter Muffel.

Dann ist

$$q = \frac{\lambda_m}{s_m} (\vartheta_{ma} - \vartheta_{mi}). \quad (18)$$

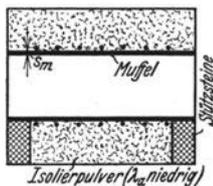


Abb. 33. Schema eines Ofens mit außen beheizter Muffel.

Die Berechnung der Verluste für Öfen mit außen beheizter Muffel geht nach den gleichen Formeln vor sich wie die Berechnung der Öfen mit innen beheizter Muffel, nur daß an Stelle der Ofeninnentemperatur  $\vartheta_c$  in die Verlustrechnung die Muffelaußentemperatur  $\vartheta_{ma}$  einzuführen ist. Den Wert  $\vartheta_{ma}$  findet man aus der vorstehenden Gleichung (18) ( $\vartheta_{mi} = \vartheta_c$ ).

Die Entscheidung, welche der beiden Bauarten gewählt werden soll (Ofen mit außen oder innen beheizter Muffel), muß auch das Verhältnis der Leerverluste<sup>1</sup> berücksichtigen; dieses beträgt, gleiche Stärke der Isolationsschicht vorausgesetzt:

$$\frac{Q_i}{Q_a} = \frac{F_V \cdot \lambda_i \cdot \vartheta_{mi}}{F_N \cdot \lambda_a \cdot \vartheta_{ma}}. \quad (19)$$

$\lambda_i$  und  $\lambda_a$  können sehr verschieden voneinander sein.  $F_V/F_N$  nimmt mit zunehmendem Wert von  $F_N$  ab, weil der Schutzabstand nicht proportional der Ofengröße wächst. Bei kleinen Öfen werden die Verluste bei Öfen mit außen beheizter Muffel kleiner sein als bei Öfen mit innen

<sup>1</sup> Die Bezeichnung „Leerverluste“ verliert bei den Öfen mit außen beheizter Muffel ihre wörtliche Bedeutung, da, wie erwähnt, die Höhe der Verluste von der Größe der Nutzwärme abhängig ist.

beheizter Muffel, bei großen stark beanspruchten ( $q$  groß!) Öfen liegen die Verhältnisse umgekehrt. Die Verluste werden gleich sein, wenn

$$\frac{F_V}{F_N} = \frac{\lambda_a \vartheta_{ma}}{\lambda_i \vartheta_{mi}} \quad (19a)$$

ist. Für  $\vartheta_{ma}$  folgt aus der Gleichung (18)

$$\vartheta_{ma} = q \frac{s_m}{\lambda_m} + \vartheta_{mi}.$$

Es ist demnach

$$\frac{F_V}{F_N} = \frac{\lambda_a}{\lambda_i} \left( q \frac{s_m}{\lambda_m} \cdot \frac{1}{\vartheta_{mi}} + 1 \right). \quad (19b)$$

Diese Gleichung ist in Abb. 34 dargestellt; auf der Abszisse ist  $\frac{s_m}{\lambda_m}$ ,

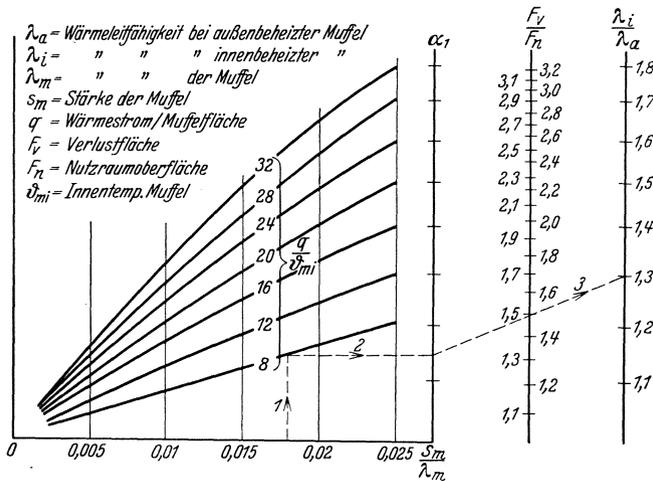


Abb. 34. Vergleich der Leerverluste von Öfen mit außen- und innen beheizter Muffel.

als Kurvenparameter  $\frac{q}{\vartheta_{mi}}$ , auf der Hilfsachse  $\alpha_1$  ist ohne Bezifferung  $\left( q \frac{s_m}{\lambda_m} \cdot \frac{1}{\vartheta_{mi}} + 1 \right)$  aufgetragen. Mit Hilfe der Skala für  $\frac{\lambda_i}{\lambda_a}$  kann man dann auf der zweiten Skala  $\frac{F_V}{F_N}$  ablesen.

Bei dem Vergleich zwischen Öfen mit innen und außen beheizter Muffel war vorausgesetzt, daß die Formfaktoren (Beiwert von  $\frac{F_i}{s}$ ) in Gleichung (11) bei beiden Bauarten gleich sind. Mit kleinerer Verlustfläche, wie sie bei Öfen mit außen beheizter Muffel gegenüber solchen mit innen beheizter Muffel möglich wird, wird dieser Beiwert allerdings größer. Diesem Nachteil (Vergrößerung der Leerverluste, für die Öfen mit außen beheizter Muffel steht als Vorteil die dünnere feuerfeste Schicht gegenüber, die nach Zahlentafel 3 einen kleineren Leerverlust gewär-

tigen läßt, als bei dem mit stärkerer feuerfester Innenwand versehenen Ofen mit innen beheizter Muffel.

Um sich ein Bild über die ungefähre Grenze der Wirtschaftlichkeit dieser Beheizungsart machen zu können, soll der folgende Fall betrachtet werden:

$$\frac{s_m}{\lambda_m} = 0,01, \quad \frac{q}{\vartheta_{mi}} = 10, \quad \frac{\lambda_a}{\lambda_i} = 1,5.$$

Dann sind die Wärmeverluste gleich bei

$$\frac{F_V}{F_N} = 1,65.$$

Setzt man z. B. einen würfelförmigen Ofen voraus, so entspricht dieses Verhältnis einem Kantenverhältnis von 1,28; rechnet man für Schutzabstand und Widerstandskonstruktion beim Ofen mit innen beheizter Muffel 100 mm, so ist die Kantenlänge der Nutzraumfläche etwa 0,35 m. Das heißt: unter den angenommenen Verhältnissen, denen praktische Werte zugrunde liegen, arbeitet ein Ofen mit außen beheizter Muffel bis etwa 0,75 m<sup>2</sup> Nutzraumoberfläche (oder etwa 450 l Inhalt) wirtschaftlicher als ein Ofen mit innen beheizter Muffel.

#### b) Die Berechnung der Speicherwärme.

Die gesamte bei Erreichen des Beharrungszustandes in einem Ofen gespeicherte Wärmemenge ist mit großer Genauigkeit vorher zu berechnen. Sie setzt sich zusammen aus den Wärmemengen in der inneren Ofenwand, in den Heizwiderständen, der Isolierung und der äußeren Ofenwand.

Für jeden Teil gilt:

$$Q_{sp} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \cdot c \cdot \gamma \cdot V [\text{kcal}], \quad (20)$$

worin bedeutet:

$Q_{sp}$  die Speicherwärme,  
 $\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}$  die mittlere Temperatur in dem betreffenden Teil,  
 $c$  die spezifische Wärme }  
 $\gamma$  das spezifische Gewicht<sup>1</sup> } des betreffenden Teils.  
 $V$  das Volumen }

Die mittlere Temperatur  $\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}$  in dieser Formel ist nicht völlig sicher zu ermitteln, weil, wie oben gesagt (S. 48) die Flächen parallel zur Wand keine Isothermen sind; sie sind Isothermen ähnlicher in der innen liegenden Schamotte als in der außen liegenden Isolierung. Und da die Schamotte auch einen Hauptteil der Wärme speichert, ist der Einfluß dieser Unsicherheit nicht allzu groß.

Daß die Schamotte einen so großen Anteil der Speicherwärme aufnimmt, geht aus der folgenden Überlegung hervor: von den 4 Faktoren der Gleichung (20) ist die spez. Wärme für Schamotte und Isolierung

<sup>1</sup> Bei keramischen Körpern ist statt dessen das Raumgewicht einzusetzen; s. S. 131.

rung fast gleich, kann also bei einem Vergleich außer acht gelassen werden. Das Raumgewicht der Isolierung beträgt etwa  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{5}$  von dem der Schamotte. Ebenso ist der Wert der mittleren Temperatur in der Schamotte, die nur einen kleinen Teil des Temperaturgefälles umfaßt, fast doppelt so groß als in der Isolierung (siehe hierzu Abb. 29, S. 49). Nur der vierte Faktor, das Volumen, ist bei der Isolierung größer als bei der Schamotte; denn erstens liegt die Isolierung außen und zweitens wird sie meist mit größerer Wandstärke ausgeführt als die Schamotte. Da aber hohe Wandstärke die Mitteltemperatur in der Schamotte im Vergleich zu der der Isolierung heraufsetzt, wird der Einfluß des größeren Volumens dadurch wieder vermindert: Gleichung (20) wird also für Schamotte höhere Werte ergeben als für die Isolierung. — Bei Öfen mit metallischen Innenwänden unterstützt die Metallwand die Annäherung an die Isotherme.

Zur Benutzung der Formel (20) für die Ofenwand müssen die Temperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  für die einzelnen Schichten ermittelt werden. Wir nennen sie allgemein  $\vartheta_{1,n}$  bzw.  $\vartheta_{2,n}$  und beginnen an der Ofeninnenseite.

Aus Gleichung (8) (S. 39) findet man

$$q = \frac{Q}{F},$$

den Wärmestrom durch 1 m<sup>2</sup> Wandfläche [siehe hierzu auch die Formeln (14) und (15)]. Dieser Wärmestrom geht im Beharrungszustand durch jede der einzelnen Schichten in gleicher Stärke, so daß man schreiben kann:

$$\begin{aligned} q &= (\vartheta_c - \vartheta_{1,1}) \alpha_i = (\vartheta_{1,1} - \vartheta_{2,1}) \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot \cdot \cdot = (\vartheta_{1,n} - \vartheta_{2,n}) \frac{\lambda_n}{s_n} \\ &= (\vartheta_{2,n} - \vartheta_a) \alpha_a. \end{aligned} \quad (21)$$

Aus Gleichung (21) kann man  $\vartheta_{1,1}$ ;  $\vartheta_{2,1} = \vartheta_{1,2}$ ;  $\vartheta_{2,2} = \vartheta_{1,3}$  usw. berechnen.

Wie zu Beginn dieses Abschnitts hervorgehoben wurde, dauert der Durchwärmungsvorgang eines Ofens außerordentlich lange. Größere Öfen (etwa von der Größe 2 m  $\varnothing$ , 1 m Tiefe) erfordern viele Tage, ehe sie voll durchwärmt sind oder voll abkühlen. Der Fall, daß die ganze Speicherwärme zugeführt werden muß, ist aber verhältnismäßig selten; nur, wenn nach langen Betriebsperioden lange Pausen eintreten, kommt dies vor.

Wichtiger ist der Fall des intermittierenden Betriebs, der jetzt besprochen werden soll.

### c) Unterbrochener Betrieb.

In der Praxis werden Öfen fast stets intermittierend betrieben; denn meistens werden sie mindestens an Sonntagen ausgeschaltet. Bei jedem

intermittierenden Betrieb spielen die Anheiz- und Abkühlverluste eine Rolle, denn der Wärmebedarf infolge einer Auskühlung ist in keinem Falle mit dem Verbrauch während der nach der Wiedereinschaltung einsetzenden praktischen Anheizzeit (S. 37) erschöpft.

Jeder regelmäßig unterbrochene Betrieb ist durch 2 Größen gekennzeichnet:

die relative Einschaltdauer,  
die Spieldauer.

Bezeichnet man mit  $ED$  die Einschaltdauer,  
 $AD$  die Ausschaltdauer,

so ist die relative Einschaltdauer

$$\zeta = \frac{ED}{ED + AD} = \frac{ED}{SD} \quad (22)$$

und die Spieldauer

$$SD = ED + AD. \quad (22a)$$

Der Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch, relativer Einschaltdauer und Spieldauer ist in den nachstehenden beiden Abb. 35a und 35b

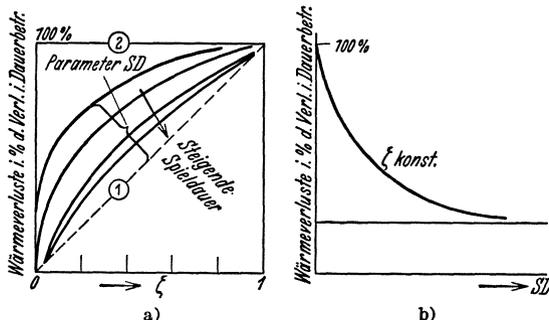


Abb. 35. Relative Einschaltdauer  $\zeta$ , Spieldauer  $SD$  und Wärmeverluste bei intermittierendem Betrieb.

① für Spieldauer unendlich: die Speicherwärme wird nur einmal aufgebracht und kann gegenüber den Leerverlusten vernachlässigt werden; diese sind  $\zeta$ -mal kleiner als die Verluste im Dauerbetrieb. ② bei Spieldauer unendlich klein: der Ofen verliert während  $AD$  nicht an Temperatur; die Verluste sind ebenso groß wie bei Dauerbetrieb.

schematisch dargestellt. Abb. 35a zeigt den Wärmeverbrauch, abhängig von  $\zeta$  bei verschiedenen Werten von  $SD$ , ausgedrückt durch Bruchteile desjenigen Wärmeverbrauchs, der bei Dauerbetrieb über die betreffende Beobachtungsperiode auftritt. Abb. 35b zeigt den Wärmeverbrauch, abhängig von  $SD$  bei konstantem  $\zeta$ . Eine zahlenmäßige Berechnung

dieser Kurven ist leider z. Z. noch nicht möglich. Es können lediglich zwei Grenzwerte für die Wärmeverluste bei intermittierendem Betrieb angegeben werden:

sie müssen größer sein als die Wärmeverluste im Beharrungszustand während  $ED$  (Linie ① in Abb. 35a);

sie müssen kleiner sein als die Wärmeverluste im Beharrungszustand während  $SD$  (Linie ② in Abb. 35a).

d) Bemerkung zur Frage der wirtschaftlichsten Isolierstärke.

Wir haben bei sämtlichen Überlegungen über die Wärmeverluste bisher die Isolationsstärke als gegeben angesehen; über ihre Bemessung ist nur unter dem Gesichtspunkt des erforderlichen und zulässigen Temperaturgefälles gesprochen worden (S. 47). Bei sonstigen isoliertechnischen Berechnungen spielt der Begriff der „wirtschaftlichsten Wandstärke“ eine erhebliche Rolle und dient zur Bestimmung der Isolationsstärke (Cammerer BV 10). Wir müssen uns mit diesem Begriff ebenfalls befassen und untersuchen, wieso er im Ofenbau bisher nicht Fuß zu fassen vermocht hat.

Die Überlegungen werden dem Leser, der sie nicht von anderen Anwendungsgebieten her kennt, leichter verständlich sein, wenn er sich vorher den Gedankengang des Abschnitts über das Ofengrunddiagramm ins Gedächtnis zurückruft.

Die Isolation eines Ofens ist in doppelter Beziehung mit den Betriebskosten des isolierten Objekts verknüpft:

einmal durch die Wärmekosten, die mit wachsender Isolationsstärke fallen und dann

durch die Kapitaldienstkosten, die mit wachsender Isolationsstärke steigen.

Die Funktion, die die Betriebskostenanteile (Wärme- und Amortisationskosten) des isolierten Objekts, abhängig von der Isolationsstärke darstellt, wird daher ein Minimum haben. Die Isolationsstärke, bei der dieses Minimum auftritt, heißt die „wirtschaftlichste Isolier- oder Wandstärke“.

Trotzdem man im allgemeinen von einer isoliertechnisch einwandfreien Berechnung auch die Ermittlung der wirtschaftlichsten Wandstärke fordert, müssen wir im Ofenbau meist auf ihre Ermittlung verzichten, und zwar aus folgenden Gründen:

1. die Wärmekosten haben zwei Anteile des Wärmeverbrauches zu decken;

a) den Wärmeverbrauch im Beharrungszustand (Leerverlust). Diesen kann man genau genug bestimmen. Er sinkt mit zunehmender Isolierung.

b) den Anheiz- und Auskühlverbrauch. Ist die Intermittenz so groß, daß jeweils die ganze Speicherwärme verlorengeht und wieder zugeführt werden muß, dann lassen sich die Verluste ebenfalls genau berechnen: sie sind dann gleich der Speicherwärme (Stassinot ZV 14). Der eben erwähnte Fall wird aber die Ausnahme bilden. In der Regel wird, wie im vorigen Abschnitt besprochen, der Ofen wieder angeheizt, ehe er seine Speicherwärme vollständig abgegeben hat. Der Anteil der Speicherwärme, der im Augenblick des Wiedereinschaltens noch im Mauerwerk enthalten ist, ist eine Funktion der Isolierstärke, kann

aber nicht berechnet werden. Und damit fällt die Grundlage zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Wandstärke weg.

2. In den Leerverlusten ist, wie aus den entsprechenden Abschnitten hervorgeht, auch die durch Wärmekurzschlüsse verlorengelungene Wärmemenge enthalten. Ein Teil derselben sinkt umgekehrt proportional mit der Wandstärke (z. B. die Verluste durch die Ausführungsenden der Widerstände), ein Teil ist jedoch unabhängig von der Wandstärke (z. B. die Türverluste). Die Aufteilung der Wärmekurzschlüsse auf die „Wandstärke empfindlichen“ und „Wandstärke unempfindlichen“ ist zur Zeit noch nicht möglich.

3. Die Beschaffungskosten des Ofens, die naturgemäß auch für die Kapitaldienstkosten maßgebend sind, hängen nicht nur von dem Isoliermaterial ab, sondern auch von der Konstruktion der äußeren Ofenwand. Die äußere Ofenwand wird mit zunehmender Isolierstärke teurer. Die Abhängigkeit läßt sich aber nicht in formelmäßiger Darstellung geben. Man wäre daher gezwungen, eine größere Zahl von Öfen wenigstens in großen Umrissen durchzukonstruieren, um an Hand der Konstruktionen die Abhängigkeit der Kosten der äußeren Ofenwand von der Isolierstärke zu finden. Dabei muß noch besonders darauf hingewiesen werden, daß diese Arbeit nicht etwa eine einmalige wäre, da jede Bauart von Öfen die Bestimmung von neuem erforderlich macht.

Man wird also im allgemeinen zur Zeit wohl darauf verzichten müssen, die Isolierstärke gleich der „wirtschaftlichsten Wandstärke“ zu wählen. Meistens werden heute sowohl in Deutschland als auch in Amerika sämtliche Öfen dünner, als der wirtschaftlichsten Wandstärke entspricht, isoliert. Man sollte sie, wenn irgend möglich, so stark isolieren, als es den Beschaffungskosten nach noch tragbar ist.

**Beispiel.** (Fortsetzung von S. 36.) Es seien die Verluste für die auf S. 32 genannten Ofengrößen und die auf S. 30 genannten Ofentemperaturen zu bestimmen. Bei den in Frage kommenden Ofengrößen darf man annehmen, daß über Sonntag eine volle Auskühlung nicht erfolgt.

1. Berechnung der Leerverluste. Für die Berechnung der Wärmeverluste sind zunächst die Schutzabstände zu den Nutzabmessungen zuzuschlagen. Für Boden- und Deckenheizung sind erfahrungsgemäß bei dem gegebenen Nutzraum 0,2 m nötig, für die Seitenheizung in der Breite 0,18 m, in der Länge, wegen des unvermeidlichen Temperaturabfalls an der Türe, 0,2 m.

Folgende Ofenabmessungen sind als Grundlage für die Verlustberechnung gewählt:

Nutzbare Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	<i>c</i> [m]	<i>l</i> [m]	<i>F<sub>i</sub></i> [m <sup>2</sup> ]
0,5	0,90	0,90	0,30	8,40	2,70
1,0	1,00	1,42	0,30	10,88	4,30
2,0	1,00	2,64	0,30	14,76	7,46
3,0	1,50	2,49	0,30	12,87	9,88

Die Wand besteht aus 2 Teilen, einer inneren Schamottewand von 80 mm und einer Isolierschicht von 270 mm.

Die Isolierschicht bestehe z. T. aus Pulver, z. T., namentlich am Boden, aus Steinen.

Das Pulver ( $\lambda = 0,080$ ) nehme 35%, } des Isolierolumens  
 die Steine ( $\lambda = 0,115$ ) nehmen 65% } in Anspruch.

Die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Isolierung ist daher

$$0,080 \cdot 0,35 + 0,115 \cdot 0,65 = 0,103;$$

die mittlere Wärmeleitfähigkeit der ganzen Ofenwand ist

$$\lambda = \frac{0,350}{\frac{0,080}{1} + \frac{0,270}{0,103}} = 0,13 \text{ [kcal/m, } ^\circ\text{C, h].}$$

Für den Vergleich der verschiedenen Ofengrößen wird auf eine Bestimmung nach Formel (13) verzichtet.

Nach Formel (11 b,  $\gamma$ ) ergeben sich für die Verluste folgende Werte:

Nutzbare Grundfläche . . [m <sup>2</sup> ]	0,5	1,0	2,0	3,0
Verluste je Ofen . . . . [kW]	3,25	4,64	7,45	8,15
Verluste insgesamt . . . [kW]	13,00	9,28	7,45	8,15
(Verluste/Ofen $\times$ Ofenzahl)				

Mit Rücksicht auf die Reservehaltung und um bei geringer Produktion die Verluste herabsetzen zu können, wird die Ofengröße mit 1 m<sup>2</sup> Grundfläche gewählt, von der 2 Öfen erforderlich sind.

In das Verlustnomogramm (Tafel 1) sind die Linien für diesen Wert eingetragen.

2. Es interessiert nun noch die Auskühlung des Ofens während der Sonntagspausen. Eine genaue Ermittlung ist nach dem Obenstehenden nicht zu erwarten. Die Auskühlung kann nur in sehr weiten Grenzen geschätzt werden.

Wir bestimmen dazu zunächst die Speicherwärme.

Das Volumen der Schamotteschicht ist

$$(1 + 2 \cdot 0,08) (1,42 + 2 \cdot 0,08) (0,30 + 2 \cdot 0,08) - 1 \cdot 1,42 \cdot 0,3 = 0,42 \text{ m}^3.$$

Raumgewicht der Schamotte 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Gewicht der Schamotte 840 kg.

Das Volumen der Isolierschicht ist

$$(1,16 + 0,54) (1,58 + 0,54) (0,46 + 0,54) - 0,845 = 2,755 \text{ m}^3.$$

Raumgewicht des Isolierpulvers = 290 kg/m<sup>3</sup>.

Raumgewicht der Isoliersteine = 650 kg/m<sup>3</sup>.

Mittleres Raumgewicht  $290 \cdot 0,35 + 650 \cdot 0,65 = 525 \text{ kg/m}^3$ .

Gewicht der Isolierung 1420 kg.

Temperaturgefälle. Wir setzen die Wärmeleitwiderstände der einzelnen Schichten zum Gesamtwiderstand (evtl. unter Berücksichtigung der Wärmeübergangszahl) in Beziehung.

Der Widerstand der Schamotteschicht ist  $\frac{0,08}{1}$  ( $\lambda = 1$ ),

der Gesamtwiderstand  $\frac{0,08}{1} + \frac{0,270}{0,103} + 0,1 = 2,80$ .

(Der Wert 0,1 stellt den Betrag  $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{10}$  dar.)

$$\frac{0,08}{2,80} = \frac{\Delta\vartheta_1}{660}; \Delta\vartheta_1 = 19^\circ \text{ Temperaturabfall in der Schamotte.}$$

$$\frac{0,270}{0,103 \cdot 2,80} = \frac{\Delta\vartheta_2}{660}; \Delta\vartheta_2 = 618^\circ \text{ Temperaturabfall in der Isolierung.}$$

Die Ergebnisse der Temperaturgefällerechnung sind in die Abb. 36 eingezeichnet.

#### Speicherwärme.

Mittlere Temperatur der Schamotte  $670^\circ$

Speicherwärme (Ausgangstemperatur  $20^\circ$ )  $650 \cdot 840 \cdot 0,2 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 127 \text{ kWh.}$

Mittlere Temperatur der Isolierung  $352^\circ$

Speicherwärme (Ausgangstemperatur  $20^\circ$ )  $332 \cdot 1420 \cdot 0,2 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 110 \text{ kWh.}$

Gesamte Speicherwärme (Zuschläge für Mantel und Widerstände geschätzt):  $250 \text{ kWh.}$

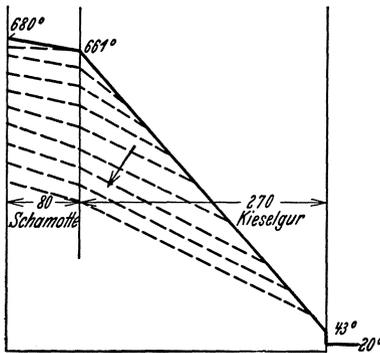


Abb. 36. Temperaturverlauf und Darstellung des Auskühlvorgangs in der Ofenwand. (Schema zum Beispiel.)

Die einzelnen strichlierten Linien geben die Darstellung des Temperaturverlaufs, und zwar für Zeitabschnitte, die in der Pfeilrichtung aufeinander folgen.

Aus der Speicherwärme ist nun der Wärmeverlust über Sonntag zu schätzen.

Nach der Ausschaltung des Ofens wird zunächst die Manteltemperatur praktisch unverändert sein; die Leerverluste werden in voller Höhe weiterbestehen. Die Wand wird nun langsam auszukühlen beginnen, und zwar von innen nach außen fortschreitend (Abb. 36), so daß nach einer gewissen Zeit auch an der Ofenaußenwand die Temperatur merklich fällt; die Wärmeabgabe wird dadurch kleiner Man kann durch mühselige graphische Berechnung nach Schmidt (BV 4) den Betrag der Abkühlung am Ende der Betriebspause finden, wenn der Ofen anfänglich im Beharrungszustand war. Ist der Ofen aber nicht im Beharrungszustand gewesen, wie es bei täglich unterbrochenem Betrieb der Fall sein kann, dann versagt diese Methode.

Dann kann man nur, ebenso wie es im folgenden für die Abkühlung über Sonntag geschieht, schätzen.

Man geht davon aus, daß die Abkühlung je Zeiteinheit gleich den Leerverlusten ist. Diese betragen in unserem Beispiel  $4,64 \text{ kW}$ . — Die Abkühlungszeit ist 24 Stunden. Die Wärmeabgabe würde — bei unveränderter Oberflächentemperatur —  $4,64 \cdot 24 = 111 \text{ kWh}$  betragen oder mehr als 46% der Speicherwärme. Bei einem derartigen Verlust wäre die Oberflächentemperatur am Montag morgen aber schon gesunken, so daß die Grundlage zur Errechnung der  $111 \text{ kWh}$  nicht mehr stimmt. Man kann allenfalls noch eine untere Grenze des Wärmeverlusts feststellen; er muß auf alle Fälle größer sein, als wenn die Wärmeabgabe die ganze Zeit nur 46% der Leerverluste betragen hätte. Also er muß größer sein als  $0,46 \cdot 111 = 51 \text{ kWh}$ . Zwischen diesen beiden Grenzen (111 und 51 kWh) liegt der wahre Wert, und man kann nur willkürlich einen Betrag, z. B. das arithmetische Mittel, also  $81 \text{ kWh}$ , annehmen. Diese Unsicherheit macht in unserem Beispiel nicht allzu viel aus, da dieser Wärmeverlust gegenüber dem Wärmeverbrauch der Woche nicht ins Gewicht fällt. Sie ist aber sehr viel unangenehmer, wenn der Ofen jeden Tag (z. B. während 8 oder 16 Stunden) abkühlt und so der Anheizverbrauch einen erheblichen Anteil an dem gesamten Wärmeverbrauch hat. Man begegnet oft dem Vorschlag, die Verringerung der Wärmeabgabe von den Ofenaußenwänden proportional der

Minderung der Speicherwärme zu setzen. Bei einer derartigen Berechnung setzt man den Temperaturverlauf in der Ofenwand in jedem Augenblick als geradlinig voraus, was er nicht ist. Das Verfahren bietet nur den Vorteil, stets mit der gleichen Art von Fehler zu arbeiten.

(Fortsetzung des Beispiels siehe S. 78).

## 5. Widerstände.

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

$\nu$ [W/cm <sup>2</sup> ]	Oberflächenbelastung,
$N_0$ [kW]	Anschlußwert des Ofens,
$l_0$ [m]	Heizkörperlänge für den gesamten Ofen,
$u$ [mm]	Heizkörperumfang,
$q$ [mm <sup>2</sup> ]	Heizkörperquerschnitt,
$\varrho$ [ $\frac{\text{Ohm m}^2}{\text{m}}$ ]	spezifischer Widerstand bei der Arbeitstemperatur,
$\varepsilon > 1$	Kantenverhältnis bei rechteckigem Widerstandsmaterial,
$a$ [mm]	kürzere Seite des Rechtecks bei rechteckigem Widerstandsmaterial,
$d$ [mm]	Durchmesser bei Kreisform,
$G_0$ [kg]	Gewicht des Heizkörpers eines Ofens,
$\gamma$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	spezifisches Gewicht des Heizkörpermaterials,
$R_0$ [Ohm]	Widerstand des Ofens,
$U_0$ [V]	Klemmenspannung des Ofens.

Für die Widerstandsberechnung geht man zweckmäßig von einer „Gruppe“ aus; wir verstehen darunter alle in Reihe befindlichen Widerstände einer Phase.

Wir nennen

$N$ [kW]	die Leistung einer Gruppe,
$U$ [Volt]	die Spannung einer Gruppe,
$l$ [m]	die Länge des Heizkörpers einer Gruppe,
$G$ [kg]	Gewicht des Heizkörpers einer Gruppe,
$R$ [Ohm]	den Widerstand des Heizkörpers einer Gruppe,
$O$ [cm <sup>2</sup> ]	die Heizkörperoberfläche einer Gruppe.

### a) Anschlußwert.

Kennt man die Wärmeverluste und die Nutzwärme eines Ofens, so ist nunmehr der Anschlußwert zu bestimmen. Er ist größer zu wählen als  $\frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Durchwärmungszeit}} + \text{Verluste}$ . Hierfür sind außer den im Abschnitt „Nutzwärme“ (S. 35) angeführten Gründen noch folgende maßgebend:

a) Es müssen für den Bau der Widerstände Toleranzen gegeben werden (Materialtoleranzen und Toleranzen beim Wickeln).

b) Die Aufnahme ändert sich quadratisch mit der Spannung. Spannungsschwankungen bis zu 10% sind nach den Vorschriften des VDE als normal zugelassen; häufig treten aber noch höhere Schwankungen auf.

c) Das Altern der Widerstände (Oxydation) wirkt sich in einer Widerstandszunahme aus, die die für die Nutzwärme zur Verfügung stehende Leistung zu stark vermindern würde, wenn der Anschlußwert

zu niedrig gewählt worden wäre. Andererseits soll der Ausschlußwert nicht zu hoch gewählt werden, da sonst die Regelgenauigkeit leidet (siehe S. 102).

Wir verstehen unter Anschlußwert die größte von einem Ofen bei Nennspannung aufgenommene Leistung. Man muß zwischen Anschlußwert in kaltem und betriebswarmem Zustand unterscheiden, da sich durch die Temperaturabhängigkeit der Widerstände der Anschlußwert während der praktischen Anheizzeit ändert (meistens sinkt). Diese Änderung ist klein und beträgt in der Regel nur 10 bis 15 %.

Im Gegensatz zum Anschlußwert, der für jeden Ofen für eine bestimmte Temperatur eindeutig ist, steht die Aufnahme, die durch Änderung der Schaltung der Widerstände herabgesetzt werden kann. (Hierzu siehe „Schaltung und Regelung“ S. 92.) Hier muß nur besonders betont werden, daß der Anschlußwert für jeden Ofen bis auf die oben erwähnten Schwankungen festliegt, während es eine große Anzahl von Werten der Aufnahme geben kann. Lediglich, wenn keinerlei Umschaltmöglichkeiten bestehen, ist der Anschlußwert stets gleich der Aufnahme.

Man wird in der Regel mit dem Anschlußwert wesentlich über den als mittleren Verbrauch errechneten Betrag hinausgehen — wenigstens um 40 % —, um auch bei 10 % Unterspannung<sup>1</sup> noch mit einem gewissen Wärmeüberschuß arbeiten zu können.

#### b) Typen der Widerstände.

Die Berechnung der Widerstände hängt zum Teil von ihrer Bauweise ab. Wir besprechen hier folgende 3 Haupttypen<sup>2</sup>:

Widerstände aus Draht und Band (metallische Widerstände).

Heizstäbe (meist, aber nicht immer, unmetallisch),  
direkt beheizte Bäder.

Die Bauformen der Widerstände werden hier als bekannt vorausgesetzt. Sie sind in diesem Buch auf S. 172 beschrieben.

#### c) Bemessung.

**α) Metallische Widerstände.** αα) Bestimmung der Oberflächenbelastung. Vom Heizwiderstand muß die Wärme auf das Gut übertragen werden. Die Widerstände werden daher stets eine Übertemperatur über dem Gut aufweisen, die schon bei der Berechnung der Durchwärmungszeit berücksichtigt werden mußte. Stansel (ZV 16) hat versucht, auf Grund der Wärmeübergangsverhältnisse die Übertemperatur der Widerstände über dem Gut zu berechnen. Sie muß, wie aus ein-

<sup>1</sup> Ist man sicher, daß die Spannung nicht unter Nennspannung heruntergeht, so kommt man mit einem Zuschlag von 20 bis 25 % aus.

<sup>2</sup> Für die Berechnung ummantelter Widerstände, die gelegentlich auch im Ofenbau Verwendung finden, siehe Belgeri (ZV 15).

fachen Überlegungen hervorgeht, von der Energiedichte (Energie/Oberflächeneinheit = Oberflächenbelastung) abhängen. Wenn auch die von Stansel verwendete Konvektionsformel unsicher ist und die Werte zweifellos von der Art des Einbaus der Widerstände wesentlich mit abhängen, so sollen doch — mit Rücksicht auf die Wichtigkeit, für diese Aufgabe überhaupt irgend eine Lösung zu finden — die Ergebnisse von Stansel gebracht werden. Dabei ist die Darstellung so gewählt, daß als Abszisse nicht, wie bei Stansel die Widerstandstemperaturen, sondern die Guttemperaturen gewählt worden sind. In Abb. 37 sind die Werte der Oberflächenbelastung, abhängig von der Guttemperatur und der Übertemperatur der Widerstände über dem Gut ( $\dot{U}T$ ), dargestellt.

Diese Werte bedürfen einer Korrektur, die die Verminderung der Wärmeabgabe durch benachbarte Teile des Heizkörpers berücksichtigt. Solche Korrekturfaktoren sind in der Abb. 38 dargestellt (gleichfalls nach Stansel). Mit den Ordinatenwerten dieses Diagramms sind die aus Abb. 37 erhaltenen Zahlen zu multiplizieren, um zu den richtigen Oberflächenbelastungen zu kommen. Die Kurven gelten für Schlaufenanordnung; für Wendel und Rahmen darf nur die nach außen liegende Seite der Widerstände, also die Hälfte der Oberfläche in die Rechnung eingeführt werden. Verfährt man so mit den Zahlen der Abb. 37 und 38, die lediglich eine Umrechnung der Werte von Stansel aus dem amerikanischen Maßsystem in das deutsche darstellen, so kommt man zu Zahlen, die mit den Werten der deutschen Praxis gut übereinstimmen. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Abbildungen keinen

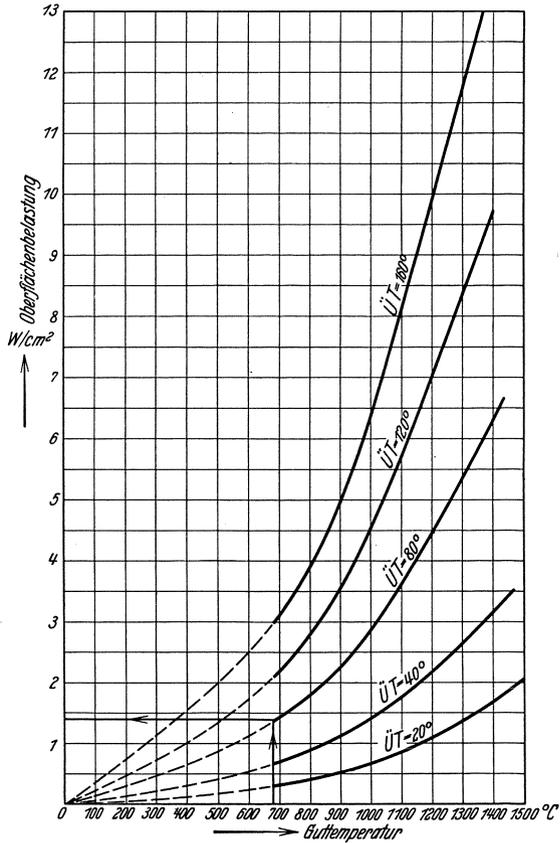


Abb. 37. Oberflächenbelastung, Guttemperatur und Temperaturgefälle  $\dot{U}T$  (in Anlehnung an Stansel).

paschkis, Elektroöfen.

Aufschluß über die zulässige Belastung mit Rücksicht auf Lebensdauer der Widerstände geben. Sie bieten nur Anhaltspunkte über die zu erwartende Übertemperatur der Widerstände über dem Gut.

Mit Rücksicht auf die Haltbarkeit der Widerstände empfiehlt es sich, keinesfalls die folgenden Werte der Oberflächenbelastung zu überschreiten:

bis 600° C	Ofentemperatur	.....	3 W/cm <sup>2</sup> *
„ 750° C	„	.....	2 „
„ 900° C	„	.....	1,4 „
„ 1000° C	„	.....	0,9 „
„ 1100° C	„	.....	0,7 „
„ 1150° C	„	.....	0,4 „

Wenn irgend möglich, sollte man aber in der Belastung etwa 0,8 der

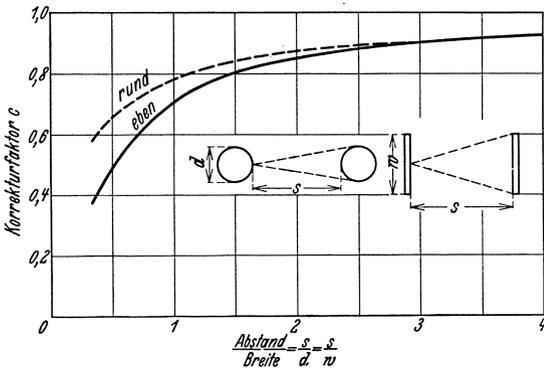


Abb. 38. Korrekturfaktoren der Oberflächenbelastung (nach Stansel, ZV 16).

genannten Beträge innehalten. Der richtige Wert der Oberflächenbelastung hängt natürlich noch sehr stark von der Einbauweise der Widerstände ab. Die angegebenen Werte setzen voraus, daß die Widerstände ungemuffelt und sicher strahlen können.

αβ) Bestimmung der Abmessungen (Nomogramme). Es gilt:

$$N = \frac{U^2}{R \cdot 10^3}, \quad R = \frac{\rho \cdot l}{q}, \quad v = \frac{N \cdot 10^3}{O}, \quad O = u \cdot l \cdot 10, \quad G = \gamma \cdot q \cdot l \cdot 10^{-3}.$$

Daraus folgt:

$$q \cdot u = \frac{10^5 N^2 \rho}{U^2 v}, \tag{23}$$

$$G = \gamma \cdot q \cdot \frac{N}{v \cdot u} 10^{-1}, \tag{24}$$

$$l = 10^2 \cdot \frac{N}{v \cdot u}. \tag{25}$$

Für Widerstände mit kreisförmigem Querschnitt wird

$$u = \pi d \quad \text{und} \quad q = \frac{d^2 \pi}{4}$$

\* Hierbei muß, im Gegensatz zur Abb. 37 auch für Wendel und Rahmen die ganze Oberfläche in die Rechnung eingeführt werden.

und die Gleichungen (23) bis (25) werden zu

$$d = \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho \cdot 4}{U^2 \cdot \nu \cdot \pi^2}}, \tag{23a}$$

$$G = \gamma \cdot \frac{N}{4\nu} \cdot d \cdot 10^{-1} = \frac{\gamma N}{4\nu \cdot 10} \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho \cdot 4}{U^2 \cdot \nu \cdot \pi^2}}, \tag{24a}$$

$$l = 10^2 \frac{N}{\nu d \pi} = \frac{10^2 N}{\nu \pi} \sqrt[3]{\frac{U^2 \cdot \nu \cdot \pi^2}{10^5 \cdot N^2 \rho \cdot 4}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot N \cdot U^2}{\nu^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot 4}}. \tag{25a}$$

Für Widerstände mit rechteckigem Querschnitt wird

$$u = 2a(1 + \varepsilon)$$

und

$$q = a^2 \varepsilon$$

und die Gleichungen (23) bis (25) werden zu

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 \cdot N^2 \rho}{U^2 \cdot \nu \cdot 2\varepsilon(1 + \varepsilon)}}, \tag{23b}$$

$$G = \frac{\gamma \cdot \varepsilon N}{2\nu(1 + \varepsilon)} \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho}{U^2 \nu \cdot 2\varepsilon(1 + \varepsilon)}} \cdot \frac{1}{10}, \tag{24b}$$

$$l = 10^2 \cdot \frac{N}{2a\nu(1 + \varepsilon)} = \sqrt[3]{\frac{10 N U^2 \varepsilon}{\rho \cdot 4 \cdot \nu^2 (1 + \varepsilon)^2}}. \tag{25b}$$

Aus diesen Gleichungen<sup>1</sup> ist zu ersehen:

1. Länge, Durchmesser (bei kreisförmigem Querschnitt), Seitenlänge (bei rechteckigem Querschnitt und angenommenem Kantenverhältnis) und Gewicht des Widerstands sind durch Leistung, Spannung, Energiedichte und spezifisches Gewicht des Widerstandsmaterials eindeutig gegeben.

2. Die Verhältnisse der Längen, Kantenlänge (bzw. Durchmesser) und Gewichte von rundem Draht zu solchem mit rechteckigem Querschnitt sind durch das „Kantenverhältnis“ bestimmt. In der Abb. 39 sind diese Werte als Funktion des Kantenverhältnisses gezeigt.

3. Das je Leistungseinheit verbrauchte Gewicht ist proportional dem an sich wieder von der Leistung abhängenden Durchmesser bzw. der Kantenlänge.

Gehen wir nun zur Betrachtung von Widerständen für Drehstrom über, so finden wir, daß bei Sternschaltung die Leistung der Gruppe

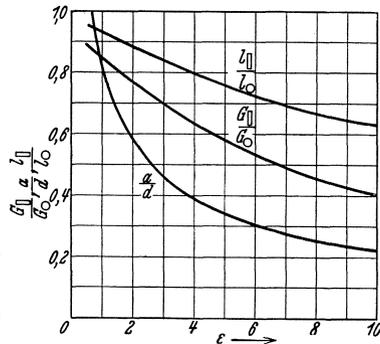


Abb. 39. Verhältnis von Kantenlänge zu Durchmesser, der Längen und der Gewichte bei rechteckigem und rundem Draht, abhängig vom Kantenverhältnis.

<sup>1</sup> Ähnlich bei Stassinot (ZV 17).

auf  $\frac{1}{3}$ , die Spannung der Gruppe auf  $\frac{1}{\sqrt[3]{3}}$  der Werte bei einphasigem Anschluß und gleicher Leistung heruntergeht. — Für Widerstandslänge und Gewicht ist zu berücksichtigen, daß für die gleiche Gesamtleistung für Drehstrom drei Gruppen erforderlich sind. Daraus ergibt sich für Sternschaltung:

$$d_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}} d_1 \quad (26 \text{ a})$$

bzw.

$$a_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}} a_1, \quad (26 \text{ b})$$

und

$$G_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}} \cdot G_1, \quad (27)$$

$$l_{\lambda} = \sqrt[3]{3} l_1. \quad (28)$$

Der Index „1“ bedeutet, daß diese Werte sich auf die entsprechenden Werte bei einer Gruppe [Gleichung (23 a) bis (25 a), (23 b) bis (25 b)] beziehen.

Drehstromwiderstände in Dreieck müssen sich naturgemäß so verhalten, wie drei parallelgeschaltete Gruppen von Widerständen. Schaltet man  $\mu$  Gruppen parallel, so sinkt — bei gleicher Gesamtleistung — der Durchmesser bzw. die Kantenlänge auf den Wert  $\frac{1}{\sqrt[3]{\mu^2}}$ , weil auf jeden Zweig nur  $\frac{1}{\mu}$  des Ausschlußwerts entfällt. Da die Gesamtleistung (Anschlußwert) gleich bleibt, sinkt das Gesamtgewicht in gleichem Verhältnis  $\frac{1}{\sqrt[3]{\mu^2}}$  und die Gesamtlänge steigt in gleichem Maße.

In der Abb. 40 sind Durchmesser (bzw. Kantenlängen) und Gewichte sowie Widerstandslängen für die verschiedenen Schaltungen angegeben.

Wir wollen jetzt an Hand der Gleichungen (23) bis (25), (23 a) bis (25 a), (23 b) bis (25 b) den Einfluß der einzelnen Größen auf  $d$ ,  $a$ ,  $l$  und  $G$  untersuchen.

Zunächst ist ersichtlich, was auf den ersten Blick verwundert, daß mit wachsendem spezifischen Widerstand  $\rho$  das erforderliche Gewicht des Widerstandsmaterials wächst. Das könnte zunächst auf die Forderung nach einem Widerstandsmaterial mit möglichst kleinem spezifischen Widerstand führen. Es muß aber beachtet werden, daß die erforderliche Länge der Widerstände zugleich wächst, wodurch die Unterbringung auf gegebenen Wickelraum erschwert wird. Hoher spezifischer Widerstand ermöglicht also die Unterbringung hoher Leistung auf gegebenem Raum, bringt aber größere Gewichte mit sich.

Mit Zunahme der spezifischen Belastung  $\nu$  sinkt der Durchmesser (Kantenlänge) im Verhältnis der dritten Wurzel, das Gewicht im Verhältnis der Potenz  $4/3$ , die Länge im Verhältnis der Potenz  $2/3$  von  $\nu$ .

Dem spezifischen Gewicht  $\gamma$  ist das Gesamtgewicht direkt proportional; die Abmessungen werden nicht beeinflusst.

Mit wachsendem Kantenverhältnis  $\varepsilon$ , das im allgemeinen aus Festigkeitsgründen nicht größer als 10 gewählt werden soll, sinkt die

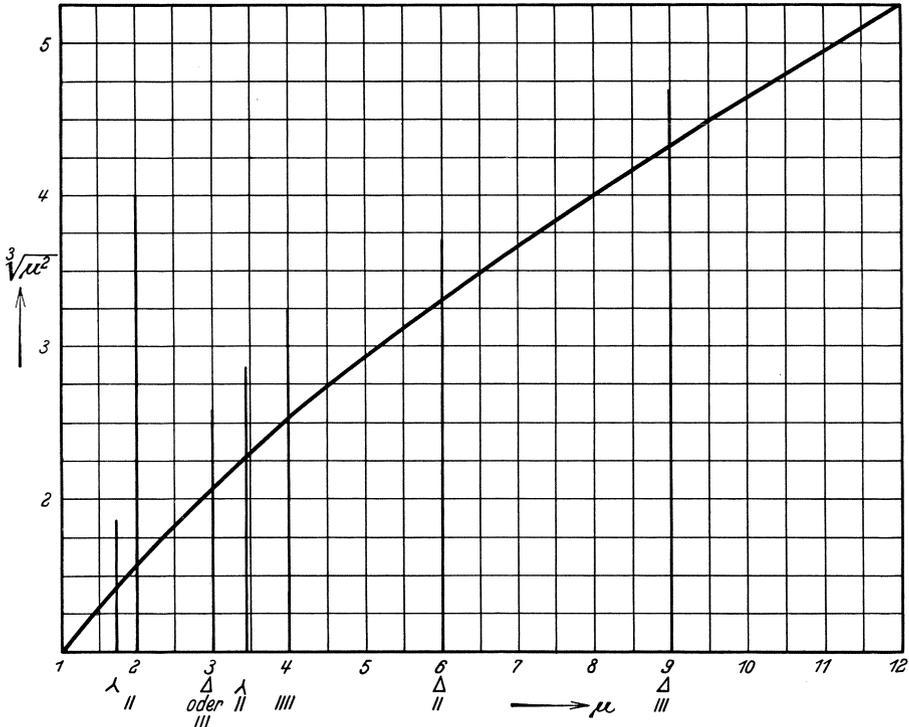


Abb. 40. Ermittlung von Länge, Durchmesser (Kantenlänge), Gewicht bei mehreren ( $\mu$ ) parallelen Zweigen aus den Werten für einen Zweig. Durchmesser und Gewicht für 1 Zweig sind durch den Ordinatenwert zu teilen. Länge für einen Zweig ist mit dem Ordinatenwert zu multiplizieren.

Länge  $a$  der kleineren Kante etwas stärker als im Verhältnis  $2/3$ , die Heizkörperlänge  $l$  sinkt etwas stärker als in der Potenz  $1/3$ , das Gewicht etwas stärker als in der Potenz  $4/3$ .

Mit wachsender Spannung  $U$  sinken Durchmesser bzw. Kantenlänge sowie Gewicht mit der Potenz  $2/3$ , in der gleichen Potenz steigt die Heizkörperlänge. Hohe Spannungen führen demnach auf dünne und deswegen mechanisch unzuverlässige Heizleiterquerschnitte, namentlich — wie aus dem folgenden Absatz hervorgeht — bei kleinen Leistungen. Man wird deswegen bei kleinen Öfen eine eventuelle höhere

Netzspannung durch Transformatoren herabsetzen müssen; von welcher Grenze an dies erfolgen muß, hängt von dem Querschnitt ab, den man noch als mechanisch zuverlässig ansieht. Es wird empfohlen

für Rahmenwiderstände	bis	300° C	nicht unter	1,0 mm Ø
„ „	über	300° C	„ „	2,0 mm Ø
für Wendel bei Temperatur	bis	600° C	„ „	2,0 mm Ø
„ „ „ „	„	1000° C	„ „	5—3,5 mm Ø
„ „ „ „	über	1000° C	„ „	7—6,0 mm Ø
für bandförmige Heizleiter	bis	600° C	„ „	1,0 mm Stärke
„ „ „ „	„	800° C	„ „	2,0 mm „
„ „ „ „	„	1000° C	„ „	3,0 mm „

zu gehen.

Mit wachsender Leistung  $N$  steigt Durchmesser bzw. Kantenlänge mit der Potenz  $^{2/3}$ , die Länge mit der Potenz  $^{1/3}$ , und das Gewicht mit der Potenz  $^{5/3}$ . Große Anschlußwerte werden deswegen aus Gründen der Materialersparnis (übrigens auch wegen der Schaltmöglichkeit) auf mehrere Gruppen von Widerständen aufgeteilt. Die Grenzen sind einmal in der Unterbringungsmöglichkeit und dann in der Drahtstärke gegeben, über die im vorhergehenden Absatz gesprochen ist.

Es ist klar, daß sich die Berechnung von  $d$ ,  $l$ ,  $G$  und  $a$  leicht mit Hilfe von Nomogrammen durchführen lassen muß. Diese Nomogramme sollen im folgenden entwickelt und zunächst ihr Bereich abgegrenzt werden.

Für die Leistung  $N$  einer Gruppe reicht als obere Grenze 150 kW aus, weil bei größerer Leistung der Drahtdurchmesser oder die Spannung so hoch werden, wie sie praktisch nicht vorkommen. Braucht der Ofen größere Leistung, so muß diese auf mehrere Gruppen verteilt werden.

Die Spannung  $U$  wird nicht über 500 V gesteigert, und zwar, um bei unachtsamer Berührung die Bedienung nicht zu gefährden und weil bei Spannungen über 500 V und den hohen Temperaturen die feuerfesten Baustoffe (z. B. Schamotte) nicht mehr ausreichend isolieren.

Als spezifischer Widerstand  $\rho$  kommt für Metalle der Bereich 0,5 bis 1,5  $\Omega$  je m, mm<sup>2</sup> in Frage.

Die spezifische Belastung  $\nu$  des Widerstandes ist, wie oben dargelegt, in erster Reihe eine Frage der Haltbarkeit. Es ist klar, je dünner das Widerstandsmaterial ist, um so niedriger muß die Belastung sein<sup>1</sup>. Mit Rücksicht auf die zulässigen Grenztemperaturen hat sich der Brauch ausgebildet, Heizwiderstände aus Metall bis zu höchstens 3 W/cm<sup>2</sup> zu belasten.

<sup>1</sup> Kleine, an sich unvermeidliche Schwankungen in der Materialstärke verursachen bei gleichem, absolutem Betrag prozentual bei dünnem Material erheblich größere Querschnittsveränderungen. Diese haben örtliche Überhitzung zur Folge; die eingeschnürte Stelle wird noch heißer und so steigern sich die beiden Einflüsse bis zur Zerstörung des Widerstandskörpers.

Das Nomogramm Tafel 2 (Anhang) ist für band- und drahtförmigen Widerstand bestimmt. Man geht bei seiner Benützung von Leistung und Oberflächenbelastung aus und kommt so zu der Hilfsachse  $\alpha_1$ . Die Verbindungslinie des so gefundenen Punktes auf der Hilfsachse  $\alpha_1$  mit dem entsprechenden Punkt auf der Spannungslinie schneidet die Hilfsachse  $\alpha_2$ . Die Verbindung dieses Schnittpunktes mit dem entsprechenden Punkt auf der Linie des spezifischen Widerstands gibt im Schnitt mit der Durchmesserlinie den gesuchten Drahtdurchmesser an. Dieser Weg ist durch die Nummernfolge der Pfeile angedeutet. Sollen die Kanten eines bandförmigen Widerstands berechnet werden, so ermittelt man nach Tafel 2 zunächst für die gleichen Bedingungen den Durchmesser  $d$  eines kreisförmigen Heizdrahts. Der Abb. 39 entnimmt man für ein (gewähltes) Kantenverhältnis  $\varepsilon$  (Abzisse) auf der Ordinate das Verhältnis  $\frac{a}{d}$ , worin  $a$  die Länge der kleineren Kante ist.

Hat man den Durchmesser für Runddraht gefunden, so ergibt sich aus dem zweiten Nomogramm [Tafel 3 (Anhang)] wiederum in der Nummernfolge der Pfeile Länge und Gewicht des Widerstandes ohne weiteres.

Für bandförmigen Widerstand wird die Länge auch wieder im Umweg über diejenige für Runddraht für die gleichen Bedingungen gefunden. Der dazugehörige Durchmesser ist aus der Bestimmung der Kantenlänge bekannt. Die Länge für bandförmigen Widerstand ergibt sich aus der für Runddraht wieder aus Abb. 39.

$\alpha\gamma$ ) Praktische Anwendung. Die Nomogramme sind, wie bereits erwähnt, für Leistung und Spannung einer Gruppe gezeichnet. Aus dem nach a) errechneten Anschlußwert ergibt sich bereits, ob man mit einer Gruppe auskommen kann oder ob man mehrere Gruppen vorsehen muß: denn mit Rücksicht auf gleichmäßige Belastung des Netzes wird man Öfen mit mehr als 10 kW meist an Drehstrom anschließen<sup>1</sup>, und definitionsgemäß muß ein Drehstromofen mindestens drei Gruppen (für jede Phase eine) haben. Sollen die Widerstände in  $\wedge$  geschaltet werden, so ist darauf zu achten, daß für die Spannung einer Gruppe nicht die Klemmenspannung, sondern die Sternspannung einzusetzen ist.

Zweckmäßig ist es, die Bestimmung der Wicklung zunächst für eine Gruppe bei Wechselstrom oder Gleichstrom bzw. drei Gruppen bei Drehstrom auszuführen. Will man aus Gründen der Materialersparnis — größere Zahl paralleler Gruppen führt auf kleinere Gewichte — oder aus Gründen der Schalt- und Regeltechnik (siehe nächsten Ab-

<sup>1</sup> In der amerikanischen Praxis werden Öfen bis zu 40 kW meist einphasig angeschlossen.

schnitt) mehr parallele Gruppen oder Sternschaltung vorsehen, so bedient man sich zur Umrechnung der Abb. 40. Lediglich, wenn man mit Durchmesser oder Länge auf Werte kommt, die nicht mehr in den Nomogrammen verzeichnet sind, muß man von vornherein eine größere Zahl von Gruppen wählen.

Die gezeigten Nomogramme sind für den Fall gerechnet, daß Länge und Durchmesser nach den Formeln (23 a) bis (25 a) und (23 b) bis (25 b) berechnet werden. Man geht, wie erwähnt, meist mit der Draht- bzw. Bandstärke aus Festigkeitsgründen nicht unter ein bestimmtes Maß. Das heißt aber, daß man bei gewählter Belastung bei einer Spannung für jeden Draht- bzw. Banddurchmesser eine bestimmte Leistung nicht unterschreiten kann. Diese Leistungen ergeben sich aus den Gleichungen (29)

$$N = U \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{d^3 v}{\rho \cdot 10^5}}, \quad (29a)$$

$$N = U \sqrt{\frac{v \cdot a^3 \cdot 2 \varepsilon (1 + \varepsilon)}{\rho \cdot 10^5}}. \quad (29b)$$

Ist eine Wicklung für eine kleinere Leistung, als hier angegeben, zu ermitteln, so ergibt sich — da der Querschnitt durch die gewählte Stärke bestimmt ist — die Länge aus der einfachen Widerstandsformel. Statt diese zu benutzen, kann man auch in dem Durchmesser-nomogramm (Tafel 2) von Durchmesser und Leistung ausgehen und die Belastung als Unbekannte suchen. Für diese Belastung kann man dann aus dem Längen-Gewichtsnomogramm (Tafel 3) die übrigen Angaben entnehmen.

Auf die gleiche Weise ist zu verfahren, wenn man statt des gefundenen Durchmessers einen abgerundeten Wert ausführen soll.

αδ) Ermittlung der Wickelvorschrift. Haben wir nun Länge und Querschnitt der Widerstände festgelegt, so müssen die Heizelemente im einzelnen bestimmt werden. Diese Bestimmung richtet sich nach der Art der Elemente.

Im folgenden sind die für die einzelnen Bauarten wesentlichen Abmessungen zusammengestellt und überall beigelegt, worauf bei Wahl der betreffenden Abmessung zu achten ist (vgl. auch S. 173ff.).

#### Rahmenelement.

Länge des Rahmens	auf möglichst gute Ausnützung der jeweiligen Ofenabmessung achten.
Breite des Rahmens	mit Rücksicht auf Temperatur und Festigkeit des Rahmenbaustoffs bestimmte Abmessungen nicht überschreiten.
Stärke des Rückens des Isolators	Kriechweg von Windung zu Windung, Abscherfestigkeit beim Bewickeln, Herstellungsmöglichkeit beachten.

Höhe des Rückens	Herstellungsmöglichkeit beachten, zulässigen Krümmungshalbmesser für Draht oder Band beachten.
Dicke des Isolators	
Randabstand	Befestigungsmöglichkeit des Rahmens an der Ofenwand und des Widerstands am Isolator beachten.
Windungszahl	ergibt sich aus Rahmenlänge, Randabstand und Stärke des Isolatorrückens.
Heizkörperlänge je Rahmen	folgt aus Windungszahl und Isolatorstärke.
Schlaufenanordnung.	
Schlaufenabstand	Die Schlaufen dürfen sich auch bei Verwerfung nicht berühren; Oberflächenbelastung beachten (siehe S. 65, 66).
Abstand der Schlaufen von der Ofenwand	folgt aus der Aufhängekonstruktion.
Windungszahl	folgt aus Länge der Ofenwand und Schlaufenabstand.
Heizkörperlänge je Ofenwand	folgt aus Windungszahl, Höhe der Ofenwand und Abstand der Schlaufen von der Ofenwand.
Wendelanordnung.	
Lichter Wendeldurchmesser	wird als Vielfaches des Heizdrahtdurchmessers ausgedrückt. Sehr große Wendeldurchmesser (etwa bis 10fachen Drahtdurchmesser) ergeben leichte Arbeit bei dem Wickeln des Wendels, sehr kleine Wendeldurchmesser (etwa 4 bis 5facher Drahtdurchmesser) geben große Sicherheit gegen Umsinken der Wendel bei hohen Temperaturen. Je nach Bearbeitbarkeit des Materials und Höhe der Temperatur wird man in den angegebenen Grenzen das Verhältnis wählen. Bei Temperaturen oberhalb etwa 950° C 4 bis 5facher Drahtdurchmesser. Bei Temperaturen von etwa 750 bis 950° C 5 bis 7facher Drahtdurchmesser. Bei Temperaturen unter 750° C 7 bis 10facher Drahtdurchmesser.
Mittlerer Windungsabstand	folgt aus der Berechnung (Annahme der Oberflächenbelastung) und sollte mit 2fachem Drahtdurchmesser oder etwas kleiner gewählt werden.
Wendelachslänge	folgt aus der Ofenabmessung unter Berücksichtigung entsprechender Abstände von den Wänden quer zur Wendelachse.
Drahtlänge/Wendel	folgt aus mittlerem Windungsdurchmesser, Wendelachslänge und mittlerem Windungsabstand.
Wendelabstand	folgt aus äußerem Wendeldurchmesser und erforderlicher Steinstärke zwischen 2 Wendeln.
Drahtlänge/Flächeneinheit Ofenwand	folgt aus Drahtlänge/Wendel und Wendelabstand.
Leistung/Flächeneinheit Ofenwand	folgt aus Drahtlänge/Flächeneinheit Ofenwand, Drahtdurchmesser bzw. Umfang, und Energiedichte.

Unter der Voraussetzung, daß der lichte Windungsabstand gleich der Drahtstärke gewählt wird, gilt

$$\text{Leistung/Wendel [kW]} = \text{Wendelachslänge [mm]} \times \text{mittleren Wendelhalbmesser [mm]} \times 10^{-4} \times \text{spez. Belastung [W/cm}^2\text{]}.$$

Z. B. sind bei einem Wendelhalbmesser von 14 mm, einem Wendelabstand von 50 mm und einer spez. Belastung von 1,3 W/cm<sup>2</sup> (dies sind für kleinere Öfen bei 900° gute Mittelwerte) je m<sup>2</sup> Ofenwand 20 Wendel je 1 m Länge mit insgesamt 36 kW unterzubringen; bei einem Wendelhalbmesser von 20 mm, einem Wendelabstand von 100 mm und einer spezifischen Belastung von 1 W/cm<sup>2</sup> (für größere Öfen bei 900° gute Mittelwerte) wären je m<sup>2</sup> Ofenwand 10 Wendel je 1 m Länge mit insgesamt 20 kW unterzubringen.

**β) Siliziumkarbidwiderstände.** Die theoretischen Grundlagen für die Berechnung derartiger Widerstände sind selbstverständlich die gleichen wie die für die Berechnung der metallischen Widerstände. Wenn die Hilfsmittel hierzu hier weniger ausführlich gebracht werden, so hat dies einmal seinen Grund darin, daß, wie im Abschnitt „Ofenbaustoffe“ besprochen wird, die Eigenschaften dieses Materials noch wenig bekannt sind. Ferner ist man in der Bemessung nicht frei, da man sich an genormte Größen halten muß.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, daß Siliziumkarbid nicht einen einheitlichen spezifischen Widerstand hat, sondern mit Werten des spezifischen Widerstands etwa zwischen 100 und 8000 zu rechnen ist.

Für Siliziumkarbidwiderstände kommt heute nur rundes Material in Frage. Für solche Rundstäbe ist das Durchmesser-nomogramm in Abb. 41, das Längennomogramm in Abb. 42, beide in wesentlich kleinerem Maßstab als für metallische Widerstände, gezeichnet.

Man rechnet bis zu Temperaturen von 1000° mit Oberflächenbelastungen von etwa 30 bis 35 W/cm<sup>2</sup>, für Temperaturen bis 1300° mit Belastungen von etwa 20 bis 25 W/cm<sup>2</sup> und für noch höhere Temperaturen mit Belastungen von etwa 15 bis 20 W/cm<sup>2</sup>. Der Durchmesserbereich des Nomogramms beträgt 6 bis 70 mm. Sind die Heizkörper gemuffelt (z. B. durch nichtmetallische Herdplatten), so sollte die Belastung erheblich — auf etwa 0,3 bis 0,5 der angegebenen Werte — herabgesetzt werden.

Man geht bei der Berechnung einerseits von der Belastung und Leistung aus, andererseits muß man einen runden (für das gewählte Fabrikat normalen) Wert für den Stabdurchmesser wählen. Man gelangt dann als Ergebnis zu einem Wert des spezifischen Widerstands und überzeugt sich, ob dieser in den Grenzen liegt, die für das gewählte Fabrikat ausgeführt werden. Ist dies der Fall, so geht man in das Längennomogramm, ist jedoch der spezifische Widerstand außerhalb

der Grenzen, so muß der Durchmesser neu gewählt werden. Aus der sich ergebenden Länge folgt die Stabzahl (Stablänge : Ofenbreite), und da Bruchteile von Stäben nicht ausgeführt werden können, wird die Belastung von dem zunächst angenommenen Wert etwas abweichen, und muß daher am Ende kontrolliert werden. Bei der großen auf engem

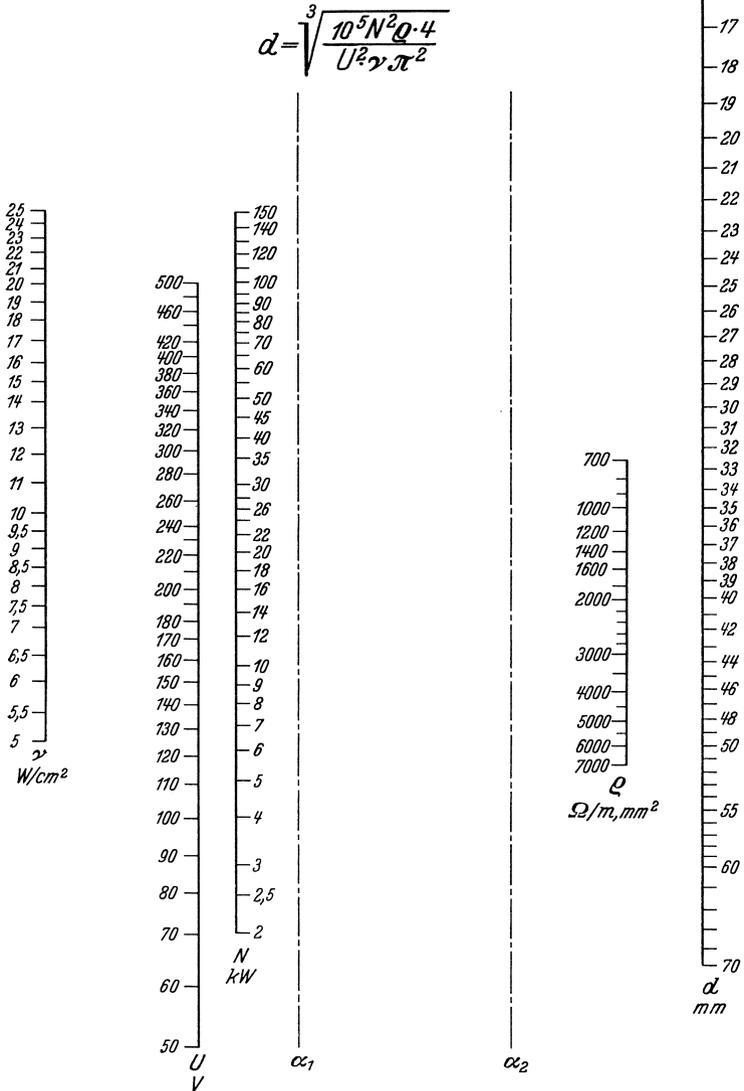


Abb. 41. Nomogramm zur Berechnung des Durchmessers von stabförmigen Widerständen (Siliziumkarbidwiderstände). Benutzung nach den Vorschriften zu Tafel 2.

Raum unterbringbaren Leistung wird man häufig gezwungen sein, im Interesse der Temperaturngleichmäßigkeit die Belastung herabzusetzen. Wie weit man aber schließlich mit der Stabzahl gehen kann, ohne daß die einzelnen Stäbe sich wieder gegenseitig durch Anstrahlung erwärmen, ist noch nicht geklärt. Siemens Plania empfehlen, die Stabzahl aus der folgenden Beziehung — die rein empirisch gefunden ist — zu bestimmen:

$$\frac{\text{Oberfläche aller Stäbe in cm}^2}{\text{Ofeninhalte in cm}^3} = \frac{1}{10}$$

Bei der Berechnung derartiger Widerstände ist man etwas frei in der Wahl der Spannung: da nämlich die Stäbe altern, empfiehlt es sich, regelbare Spannung vorzusehen, z. B. durch Verwendung von Stufen-

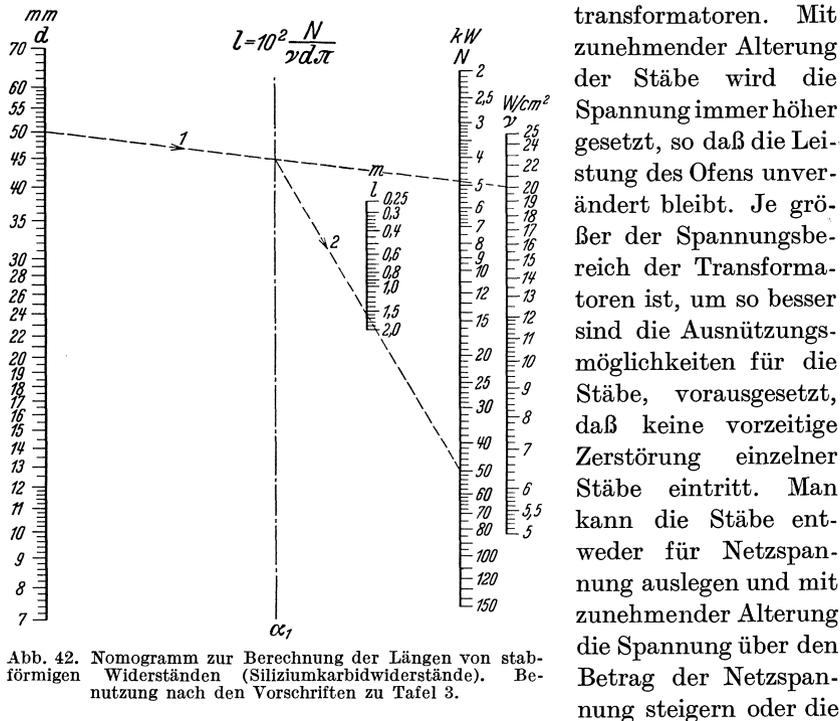


Abb. 42. Nomogramm zur Berechnung der Längen von stabförmigen Widerständen (Siliziumkarbidwiderstände). Benutzung nach den Vorschriften zu Tafel 3.

transformatoren. Mit zunehmender Alterung der Stäbe wird die Spannung immer höher gesetzt, so daß die Leistung des Ofens unverändert bleibt. Je größer der Spannungsbereich der Transformatoren ist, um so besser sind die Ausnutzungsmöglichkeiten für die Stäbe, vorausgesetzt, daß keine vorzeitige Zerstörung einzelner Stäbe eintritt. Man kann die Stäbe entweder für Netzspannung auslegen und mit zunehmender Alterung die Spannung über den Betrag der Netzspannung steigern oder die

Stäbe zunächst mit Hilfe des Transformators an kleinere Spannung legen und dann diese der Netzspannung allmählich immer näher bringen. Am günstigsten wird es in der Regel sein, die Stäbe so auszulegen, daß sie in der Mitte der voraussichtlichen Lebensdauer gerade am Netz liegen können. Selbstverständlich kann man statt der verlustlosen Regelung durch Transformatoren auch Vorschaltwiderstände benutzen, wobei diese am Anfang die Spannung im vollen Verhältnis der voraussichtlichen Alterung herabsetzen müssen, wodurch

viel Energie vernichtet wird. Bei einer Alterung um 30% (Widerstandszunahme) muß die Spannung um 30% gesteigert werden können. Der Verlust beträgt daher rund 30%, da die Stäbe, um bei der herabgesetzten Spannung die volle Leistung umsetzen zu können, für entsprechend höheren Strom ausgeführt sein müssen, der ebenfalls den Vorschaltwiderstand durchfließen muß. Nimmt man gleichmäßige Alterung bis auf 30% an, so muß im Widerstand im Mittel 15% der zugeführten Energie vernichtet werden.

γ) **Bäder.** Im Gegensatz zu den mittelbar beheizten Widerstandsöfen, bei denen die Abmessungen des Widerstandes für die vorgegebene Netzspannung zu bestimmen sind, sind bei den unmittelbar beheizten Elektrodenöfen die Abmessungen des Widerstandes, der ja zugleich „Nutzraum“ ist, gegeben und es ist die Spannung zu ermitteln, die zur Aufbringung der erforderlichen Leistung notwendig ist.

Bei Drehstromöfen ist dabei nicht ohne weiteres klar, welche Größe als Querschnitt und welche als Länge in die Widerstandsformel einzusetzen ist. Nehmen wir z. B. ein Bad mit sechseckigem Querschnitt, dessen 3 Elektroden symmetrisch an 3 Seitenflächen verteilt sind, so wird der Strom z. T. nach Art eines „Dreieckwiderstandes“ von Elektrode zu Elektrode fließen, z. T. aber zur Mitte des Bades in „Sternschaltung“.

Bezeichnet man die Tiefe des Bades mit  $l$  und die mittlere Stromlänge im Querschnitt mit  $d$ , so ist der Widerstand des Bades

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{q} = \varrho \frac{d}{l \cdot d} = \frac{\varrho}{l}.$$

D. h. es müßte der Widerstand unabhängig vom Sechseckquerschnitt und umgekehrt proportional zur Badtiefe sein.

Hat man die Spannung für eine Leistung ermittelt, so ist weiter noch der Spannungsbereich zu wählen: die Elektrodenbäder arbeiten in der Regel mit sehr niedrigen Spannungen von etwa 10 bis 30 V und müssen daher über einen Transformator an das Netz angeschlossen werden; die Verwendung von Gleichstrom scheidet wegen der Gefahr elektrolytischer Wirkungen aus. Da man bisher kein Material für Fühlorgane (Thermoelementschutzrohre und dgl.), das für Dauermessungen in Salzbädern geeignet ist, kennt, werden Salzbäder, an die man ja in diesem Abschnitt in erster Reihe zu denken hat, bis heute noch nicht mit selbsttätiger Temperaturregelung ausgeführt. Man regelt die Temperatur daher durch Änderung der Spannung am Transformator und muß mit Rücksicht auf die Möglichkeit von schwankendem Durchsatz den Spannungsbereich bestimmen. Da weiter der spezifische Widerstand von Salzen außerordentlich temperaturabhängig ist, tut man gut daran, den Bereich nicht zu knapp zu wählen.

Eine etwaige Ungenauigkeit in der obigen Formel ist daher nicht von allzu großer praktischer Bedeutung.

Es empfiehlt sich, die größte Spannung etwa 4 bis 6 mal so groß zu wählen als die kleinste. Die nach vorstehendem ermittelte normale Arbeitsspannung soll etwa in der Mitte des Spannungsbereiches liegen.

Eine gewisse Schwierigkeit bei der Bemessung des Widerstandes von Salzbadern entsteht auch durch die Änderung des Widerstandes bei Einbringen von Gut: dadurch steigt der Badspiegel und sinkt der Widerstand; oft hat das Gut einen kleineren spez. Widerstand als das Salz, wodurch die Temperaturen am Gut sich nur schwer beherrschen lassen. Man hat u. a. als Ausweg versucht, die Form des Bades so zu gestalten, daß das Gut auf keinen Fall von Stromlinien erreicht werden kann<sup>1</sup>.

Bezüglich der Bemessung der Elektroden ist zu sagen, daß die Grundlagen hierfür noch nicht bekannt sind. Große Elektrodenoberflächen verringern den Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Bad, erhöhen aber auch die Angriffsfläche für das Salz. Zweifellos werden bei gleicher Oberfläche stärkere Elektroden länger halten als schwächere. Aber inwieweit bei dieser Tatsache auch der geringere Eigenwiderstand stärkerer Elektroden eine Rolle spielt, weiß man noch nicht. Auch fehlt der Vergleich über die Abnutzung der Elektroden in flachen oder tiefen Bädern, die nicht gleich sein muß, da die Stromdichte in verschiedenen Tiefen des Bades nicht gleich ist. Man kann erfahrungsgemäß die Elektroden mit etwa 0,5 . . . 0,8 A/mm<sup>2</sup> Elektrodenquerschnitt belasten.

**Beispiel** (Fortsetzung von S. 63). Es seien die Widerstände für einen Ofen zu bestimmen, dessen Nutzwärme in 24 h 546 kWh betragen soll (siehe S. 36; Produktion in 2 Öfen, siehe S. 61). Die Verluste im Beharrungszustand betragen 4,6 kW. Der Ofen bleibt die Woche über eingeschaltet. Die Dauer der einzelnen Chargen beträgt etwa 40 min. Der Ofen hat die Nutzaabmessungen 1 × 1 m<sup>2</sup> Grundfläche und 0,1 m Nutzhöhe.

Der mittlere Verbrauch je Stunde beträgt:

Nutzwärme einschließlich totes Gewicht	$\frac{546}{24} = 22,75 \text{ kW}$
Wärmeverluste . . . . .	$= 4,6 \text{ ,,}$
Summe	<u>27,35 kW.</u>

Der kleinste notwendige Anschlußwert, um bei 10% Unterspannung noch richtiges Arbeiten zu gewährleisten, beträgt

$$\frac{27,35}{0,81} = 33,7 \text{ kW.}$$

Um nach Beschickung sicher einen schnellen Wiederanstieg der Temperatur zu erreichen, auch wenn Unterspannung herrscht, wird der Anschlußwert auf 40 kW festgelegt. Dabei wird bei normaler Spannung der Regler in sehr kurzer

<sup>1</sup> Hultgren: D.R.P. Anm. 21 h 15 — H 32930.

Zeit zu arbeiten beginnen, und es wird daher wünschenswert sein, die Leistung auch stufenweise herabsetzen zu können.

Die Spannung betrage 380 V.

Bei der Bestimmung der Widerstände aus dem Nomogramm gehen wir von Leistung und Spannung einer Gruppe aus: Spannung 380 V; Leistung 40 : 3 = 13,3 kW. Die spezifische Belastung ergibt sich aus Abb. 37 zu 1,4 W/cm<sup>2</sup>. Der Betrag von 1,4 muß noch wegen der gegenseitigen Anstrahlung der Heizdrähte nach Abb. 38 reduziert werden. Ist der lichte Abstand = Drahtdurchmesser, so ist der Korrekturbeiwert 0,78, die Belastung beträgt dann 1,1 W/cm<sup>2</sup>.

Man wird oft erheblich höhere Belastungen von 1,4 bis 1,5 W/cm<sup>2</sup> finden<sup>1</sup>, würde aber dabei zweifellos an den Widerständen höhere Übertemperaturen erhalten, als in unserem Beispiel gewünscht. Wieweit sich diese Übertemperaturen auf die Gutoberfläche selbst übertragen würden, ist eine Frage des Wärmeübergangs, hängt also im wesentlichen davon ab, ob die Wärmeübergangszahl richtig geschätzt wurde.

Wir berechnen zunächst die Widerstände als Wendel. Aus dem Nomogramm Tafel 2 erhält man für die angegebenen Grundwerte bei einem spezifischen Widerstand von 1,3 einen Drahtdurchmesser von 3,89 (rd. 3,90) mm, aus Tafel 3 ergibt sich die Länge/Phase zu 99 m.

Wie ersichtlich würde der Pfeil 2 (Tafel 2), von 380 V aus gezogen, die  $\alpha_2$ -Achse nicht mehr schneiden. Um das Nomogramm dennoch verwenden zu können, ist ein einfacher Kunstgriff angewendet worden: als Spannung wurden 220 V gewählt und der so sich ergebende Durchmesser (5,60) mit Hilfe der Abb. 40 reduziert (220 V entspricht Sternspannung); so findet man 5,60 : 1,44 = 3,89.

Ehe das Gewicht ermittelt wird, muß festgestellt werden, wie die Unterbringungsmöglichkeit im Ofen ist.

Wir wählen: Dorndurchmesser = 8facher Drahtdurchmesser. . . = 31 mm  
 mittlerer Windungsdurchmesser = Dorndurchmesser + Draht-  
 durchmesser . . . . . = 34,9 mm  
 Windungslänge 34,9 ·  $\pi$  . . . . . = 109,5 mm  
 erforderliche Windungszahl . . . . .  $\frac{3 \times 99}{0,1095} = 2710$   
 erforderliche Wendelachslänge bei 3,9 mm lichtem Abstand = 7,8 mm  
 mittlerem Abstand . . . . .  $7,8 \times 2710 = 21200$  mm  
 = 21,2 m

Mit Schutzabständen betragen die Ofenabmessungen

$$1,2 \times 1,3 \text{ m Grundfläche,}$$

$$0,3 \text{ m Höhe.}$$

Die Tiefe des Ofens mit 1,3 m gibt zugleich die Länge des einzelnen Wendels. Es wären daher insgesamt 16,5 Wendel unterzubringen.

Da man halbe Wendel nicht unterbringen kann, und die Wendelzahl — wegen des Anschlusses an Drehstrom — durch 3 teilbar sein soll, werden 18 Wendel ausgeführt. Der Windungsabstand wird entsprechend der vergrößerten Wendelzahl im Verhältnis 18 : 16,5 größer; er beträgt also  $\frac{18}{16,5} \cdot 7,8 = 8,5$  mm; der lichte Abstand daher 4,6 mm. Von den 18 Wendeln werden an jeder Seitenwand je 2 angeordnet, am Boden 8 und an der Decke 6. Die ungleiche Aufteilung zwischen Boden und Decke wird einmal gewählt, um dem natürlichen Auftrieb der warmen

<sup>1</sup> Bei der Bestimmung der Oberflächenbelastung haben wir sogar die ganze Drahtoberfläche eingesetzt, nicht, wie auf S. 65 für Wendel nach der amerikanischen Berechnungsweise angegeben, die halbe.

Luft Rechnung zu tragen, die bewirkt, daß oben stets etwas höhere Temperaturen herrschen als unten und dann, um zu ermöglichen, daß stets 2 Wendel in einem gewickelt werden, so daß alle Anschlüsse des Ofens an einer Seite liegen (z. B. alle an der Rückwand).

Das Gewicht der Heizkörper ergibt sich ebenfalls aus dem Nomogramm Tafel 3 zu 28,5 kg. [Gewicht je Phase 9,5 kg; daher hier die ganze Wicklung 28,5 kg.]

Man könnte statt der eben beschriebenen Wicklung auch 2 Kreise parallel schalten und hätte hierfür nach Abb. 40 Durchmesser und Gewicht durch 1,59 zu teilen und die Länge mit derselben Zahl zu multiplizieren. Es ergeben sich dann:

Durchmesser 2,45 mm,

Drahtlänge 473 m (für alle 3 Phasen zusammen),

Gewicht ca. 17,9 kg.

Diese Wicklung hätte den Vorteil des geringeren Gewichts (Ersparnis nach den gegenwärtigen Preisen etwa 75 bis 90 M.), weiter wäre die Umschaltmöglichkeit größer, aber der Drahtdurchmesser wäre sehr dünn.

Es wird also noch eine 3. Möglichkeit geprüft: Anschluß in Stern, aber 2 Gruppen parallel. Diese Art der Wicklung muß in bezug auf Gewicht, Durchmesser und Länge zwischen den beiden anderen liegen. Man findet ihre Werte aus den letztgenannten (für 2 Gruppen parallel) mit Hilfe des Beiwerts 1,44 (Abb. 40):

Durchmesser  $2,45 \cdot 1,44 = 3,53$  mm,

Drahtlänge  $473 : 1,44 = 328$  m,

Gewicht  $17,9 \cdot 1,44 = 25,8$  kg.

Diese Wicklung wird gewählt, die Aufteilung in einzelne Wendel kann sinngemäß erfolgen, wobei man wegen der kleinen Unterschiede zwischen dem ursprünglich gerechneten Durchmesser und dem endgültig gewählten die Zahl der Wendel nicht ändern muß.

Die Schaltung erfolgt nach Abb. 54 und man könnte eventuell die Umschaltung auf 0,75 Leistung selbsttätig machen, siehe S. 108.

Es soll im folgenden noch kurz die Berechnung der Wicklung für den Fall besprochen werden, daß mäanderförmige Heizkörper aus bandförmigem Material verwendet werden.

Wir wählen zunächst das Kantenverhältnis  $\varepsilon = 10$ . Für diesen Wert ergeben sich aus der Abb. 39 die Umrechnungsfaktoren:

Für die kleinere Kante: 0,23,

„ „ Länge: 0,63.

Daraus würde sich eine Stärke des Bandes von:

$$0,23 \cdot 3,9 \text{ mm} = 0,90 \text{ mm}$$

ergeben. Da man die Bandstärke zweckmäßig nicht unter 1 mm ausführt, müßte man entweder  $\varepsilon$  verringern oder die Energiedichte heruntersetzen. Wir beschreiten diesen letzteren Weg wegen der allgemein größeren Empfindlichkeit der Bandwicklung im Vergleich zu Wendeln; dann, weil die Abstände nach Abb. 38 bei Bandwicklung voraussichtlich kleiner werden als bei Wendelanordnung, wodurch ohnedies eine Korrektur der Belastung zu erwarten ist. — Wir wählen also die Bandstärke mit 1 mm, finden demnach die längere Kante mit 10 mm. Die Berechnung geht nun nach S. 72 weiter: Wir suchen die Belastung zu diesem Querschnitt, und dann mit dieser Belastung die Länge des Bandes. Der der Bandstärke 1 mm entsprechende Durchmesser ist  $\frac{1}{0,23} = 4,35$  mm. Für diesen Betrag und die Leistung von 13,3 kW findet man, den strichpunktierten Pfeilen nachgehend (Tafel 2), als Belastung

$$\nu = 0,78 \text{ W/cm}^2.$$

Dabei konnte hier mit der richtigen Spannung von 380 V gearbeitet werden, so daß sich die Umrechnung des Durchmessers erübrigt. Aus der Belastung von 0,78 ergibt sich aus der Tafel 3 (strichpunktierte Linien) die Länge (für Runddraht von 4,35 mm) zu 125 m/Phase. Für Band mit  $\varepsilon = 10$  findet man die Länge zu

$$125 \cdot 0,63 = 78,8 \text{ m.}$$

Aus der Abb. 38 erhält man dann den Korrekturbeiwert zu

$$\frac{0,78}{1,4} = 0,555;$$

das Verhältnis  $\frac{s}{w}$  darf daher 0,625 werden oder  $s = 6,25$  mm, d. h., man darf die Bänder auf 6,25 mm einander nähern. Das Gewicht der Heizwicklung ergibt sich zu:

$$3 \cdot 15,1 \text{ kg}$$

für Runddraht von 4,35 mm  $\varnothing$  und zu:

$$45,3 \cdot 0,41 = 18,5 \text{ kg}$$

für Flachband. Dabei sieht man, daß die kleinere Belastung zunächst eine Erhöhung des Gewichts zur Folge hat (45,3 kg gegen 28,5 kg), daß aber dann die Verwendung von Band statt Draht eine ganz erhebliche Verringerung an Gewicht mit sich bringt. Die Unterbringbarkeit der Länge von

$$3 \cdot 78,8 = 236,4 \text{ m}$$

Band ergibt sich aus folgenden Überlegungen: Wenn Decke, Boden und Seitenwände beheizt werden, so können an den Seiten Schlaufen von 0,2 m Länge, an Boden und Decke solche von 1 m Länge untergebracht werden. Bei gleichem Schlaufenabstand an den verschiedenen Seiten ergeben sich:

$$\frac{236,4}{(1,0 + 0,2) \cdot 2} = 99 \text{ Schlaufen.}$$

Bei einer Ofenlänge von 1,3 m beträgt der Schlaufenabstand 13,1 mm; da dieser Betrag größer ist als der errechnete Mindestabstand von 6,25 mm, ist die Wicklung unterbringbar.

## 6. Einige wichtige Sonderfälle.

**Bezeichnungen.** In diesem Abschnitt werden folgende Formelzeichen benutzt:

$C_s$ [kcal/m <sup>2</sup> , h, °C <sup>4</sup> ]	Strahlungszahl des schwarzen Körpers,
$C_s'$ [kcal/m <sup>2</sup> , h, °C <sup>4</sup> ]	Ersatzstrahlungszahl,
$C_I$ [kcal/m <sup>2</sup> , h, °C <sup>4</sup> ]	Strahlungszahl der Ofenwand,
$C_{II}$ [kcal/m <sup>2</sup> , h, °C <sup>4</sup> ]	Strahlungszahl des Gutes,
$F_{II}$ [m <sup>2</sup> ]	strahlende Fläche des Ofens,
$F_I$ [m <sup>2</sup> ]	angestrahlte Fläche des Gutes,
$G$ [kg/h]	Durchsatzgewicht,
$L$ [m <sup>3</sup> /h]	Luftmenge,
$N$ [kW]	zugeführte Energie,
$Q_{v1}$ [kW]	Leerverluste im Vorwärmeraum,
$Q_{v2}$ [kW]	Leerverluste im Heizraum,
$Q_{v3}$ [kW]	Leerverluste im Abkühlraum,
$c$ [kcal/kg, °C]	spezifische Wärme des Gutes,
$c_p$ [kcal/m <sup>3</sup> , °C]	spezifische Wärme der Luft,
$O$ [m <sup>2</sup> ]	Oberfläche des Gutes je Zone, die für die Wärmeübertragung in Betracht kommt,
$\Theta$ [°C]	höchste vorkommende Temperatur,
$\alpha$ [kcal/m <sup>2</sup> , °C, h]	Wärmeübergangszahl.

Im folgenden Abschnitt sind zwei wichtige Sonderfälle der Berechnung erörtert, die zwar auf den in den vorhergehenden Abschnitten dargelegten Überlegungen aufbauen, aber dennoch eine gewisse Sonderbehandlung erfordern. Eine solche Sonderbehandlung wird in der Praxis in sehr vielen Fällen notwendig sein; sie dürfte aber auf Grund der im vorliegenden Buch gebrachten allgemeinen Berechnungsgrundlagen für die weitaus meisten Fällen unschwer gefunden werden.

#### a) Wanderöfen.

In Wanderöfen ist die Ofentemperatur über die Ofenlänge im allgemeinen nicht konstant; damit wird die Voraussetzung, auf die sich die Berechnung der Durchwärmungszeit (S. 12) stützte, hinfällig. Vielmehr wird oft für die verschiedenen Zonen des Ofens durch Verwendung mehrerer Temperaturregler eine verschiedene Temperatur erzwungen. Aber auch, wo bei Wanderöfen nur ein Regler verwendet wird, wo also die Temperatur nur an einer Stelle zwangsläufig gleich gehalten wird, ergibt sich nach Leistungsverteilung und Durchsatz eine bestimmte Temperaturverteilung oder, anders ausgedrückt: um eine bestimmte Durchwärmungszeit zu erzielen, wird man die Leistung nach bestimmten Gesetzen über die Länge des Ofens verteilen müssen. Die Berechnung der Wanderöfen muß einer der drei folgenden Forderungen Genüge leisten:

1. es wird eine möglichst schnelle Durchwärmung des Gutes angestrebt. Man sucht also, sich möglichst den idealen (praktisch nie verwirklichten) Erwärmungsbedingungen des Kammerofens zu nähern.
2. Es wird ein vorgeschriebener Zeitemperaturverlauf verlangt.
3. Es ist Wärmerückgewinnung vorgeschrieben.

Allen 3 Forderungen liegen folgende Beziehungen zugrunde:

$$(a) \frac{\text{Produktion}}{\text{Stunde}} \cdot \frac{1}{\text{spez. Gew.}} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Stunde}},$$

$$(b) \frac{\text{Volumen}}{\text{Stunde}} \cdot \frac{1}{\text{Schichthöhe}} = \frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Stunde}}.$$

Zu (a) ist zu bemerken, daß vielfach — z. B. oft bei Lack- und Kerntrockenöfen — von vornherein die  $\frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Stunde}}$  angegeben wird.

$$(c) \frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Stunde}} \cdot \frac{1}{\text{Zahl der Lagen auf dem Transportmittel}} = \frac{\text{Herdfläche}}{\text{Stunde}}.$$

Zu (c): bei Verwendung von Horden und dgl. ergeben sich bei einer Herdfläche von 1 m<sup>2</sup> für  $n$  Lagen  $n \cdot [\text{m}^2]$  Nutzfläche.

$$(d) \frac{\text{Herdfläche}}{\text{Stunde}} = \text{Herdbreite} \times \text{Herdgeschwindigkeit.}$$

$$(e) \text{Herdgeschwindigkeit} \times \text{Ofenzeit}^1 = \text{Herdlänge.}$$

<sup>1</sup> Ofenzeit ist die Zeit, die das Gut im Ofen bleibt, also: Durchwärmungszeit + Warmhaltezeit.

a) **Berechnungsverfahren für Forderung 1.** Die unterbringbare Leistung (also Widerstandsberechnung), Temperaturverteilung im Gut (also Durchwärmungszeitberechnung) und streng genommen also auch die Verlustberechnung sind beim Wanderofen in einem solchen Maße zu einer Einheit verwoben, wie wir dies vom Kammerofen her nicht kennen. Zur Erfüllung der Forderung nach einer möglichst schnellen Durchwärmung müßte in jedem Abschnitt der Ofenlänge eine Leistung von solcher Größe in Wärme umgesetzt werden, daß die Oberfläche des Gutes die höchst zulässige Temperatur des Gutes  $\vartheta_0$  sofort erreicht und dauernd hält. Diese Grenzforderung kann nicht erfüllt werden, weil namentlich in den ersten Abschnitten der Ofenlänge die so errechnete Leistung in den meisten Fällen nicht unterzubringen sein wird.

Solange es unmöglich ist, den Temperaturverlauf im Gut als Funktion der freigemachten Leistung zu berechnen, muß man als Aushilfe die Ofentemperatur des ersten Abschnitts schätzen, für diese geschätzte Temperatur den Temperaturverlauf im Gut rechnen und hierauf überprüfen, ob die auf Grund dieser Rechnung sich ergebende Nutzwärme zuzüglich der Verluste für den betreffenden Abschnitt mit Rücksicht auf die Widerstandsbemessung noch unterzubringen ist. Die Berechnung des Temperaturverlaufs im ersten Abschnitt muß punktweise nach Kraus oder Gröber (BV 1, 2, 3) erfolgen; die Temperatur in der Mitte des Gutes am Ende des ersten Zeitabschnittes kann aus den Abb. 4 bis 10 errechnet werden, da der Wert  $t$  für die Kenngröße  $\left(\frac{at}{R^2}\right)$  voraussetzungsgemäß bekannt ist.

Bei sehr dünnem Gut, z. B. für Durchziehöfen, wird man die mühsame Berechnung der Temperaturgleichmäßigkeit im Gut entbehren können, da bei der üblichen Durchziegeschwindigkeit ein vollkommener Temperatenausgleich innerhalb des Gutes angenommen werden darf (Junker ZV 7). Zahlen über Durchziegeschwindigkeit siehe z. B. Hütte für Eisenhüttenleute (BV 11).

Dadurch gewinnt aber die Frage der Wärmeübertragung für diese Öfen ausschlaggebende Bedeutung. Der Durchsatz des Ofens wird nur von der übertragbaren Leistung bedingt, und diese ist abhängig von der Temperatur, die die Heizkörper annehmen dürfen, sowie von der Strahlungskonstante des Gutes. Nachdem Junker (l. c.) die Grundlagen für diese Berechnung veröffentlicht hat, hat Mertens (ZV 18, 19) graphische Rechenhilfsmittel hierfür ausgearbeitet. Die Abb. 43 (nach Mertens) gibt die übertragbare Nutzwärme für eine Höchsttemperatur der Ofenwand von 1050° für verschiedene Guttemperaturen und verschiedene Strahlungszahlen. Dabei ist die Wärmeübertragung durch Konvektion und Leitung vernachlässigt (was nach der erwähnten Arbeit von Junker auch zulässig ist, da die Übertragung durch Strahlung schon bei den

für Messing gültigen niedrigen Glühtemperaturen von etwa 600° 91% der gesamten Wärmeübertragung erreicht). In Gleichung (2) (S. 23) werden hierfür die Strahlungszahlen  $C_I$  und  $C_{II}$  sowie die Flächen ersetzt durch eine Ersatzstrahlungszahl  $C_g$ , die sich aus der Formel ergibt:

$$C_g = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_I}{F_{II}} \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)}. \quad (30)$$

Man muß berücksichtigen, daß bei der Aufstellung der Kurven als strahlende Fläche die der Ofenwand eingesetzt wurde. Die wirkliche

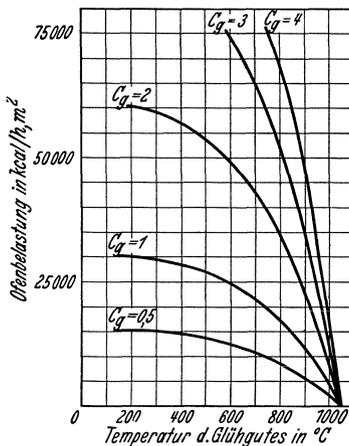


Abb. 43. Ofenbelastung in kcal/m<sup>2</sup>, h in Abhängigkeit der Glühtemperatur und der Strahlungszahl  $C_g$ . Die Belastung bezieht sich auf die Muffelinnenfläche (Mertens ZV 19).

Belastung der Heizkörper wird unter den Werten der Abbildung bleiben müssen, weil je m<sup>2</sup> Wandfläche meist weniger als 1 m<sup>2</sup> Heizkörperoberfläche untergebracht wird. Bei häufiger Benutzung der Abb. 43 zeichnet man sie zweckmäßig je nach der verwendeten Heizkörperkonstruktion um. Bringt man z. B. je m<sup>2</sup> Ofenwand 0,6 m<sup>2</sup> Heizkörperoberfläche unter, so wird man die Ordinaten der Abbildung mit 0,6 multiplizieren usw.

Aus der Oberflächenbelastung kann man bei bekannter Materialstärke und Durchzugsgeschwindigkeit die Ofenlänge errechnen (wobei die Leerverluste des Ofens zu berücksichtigen sind). Darf man z. B. je m<sup>2</sup> 60000 W unterbringen und betragen die Leerverluste je m<sup>2</sup> 2500 W, so bleiben für die Erwärmung 57500 W.

Bei starkem Gut darf bei den üblichen Durchziehggeschwindigkeiten Temperaturgleichmäßigkeit über den Gutquerschnitt nicht angenommen werden. Man muß dann für den zweiten Ofenabschnitt mit der Temperaturverteilung vom Ende des ersten Abschnitts die für diesen auf S. 83 angegebene Rechnung ein zweites Mal durchführen, wobei man sich wieder der Berechnungsverfahren von Kraus, Gröber (l. c.) bedienen muß.

Ergibt sich, daß am Ende der letzten Zone die geforderte Temperaturgleichmäßigkeit nicht erreicht ist, so war der Ofen zu kurz angenommen und es müssen weitere Zonen angesetzt werden.

β) Berechnungsverfahren für Forderung 2. Das Verfahren unterscheidet sich grundsätzlich nicht von dem unter 1 beschriebenen. Ist

β) Berechnungsverfahren für Forderung 2. Das Verfahren unterscheidet sich grundsätzlich nicht von dem unter 1 beschriebenen. Ist

langsamer Temperaturanstieg vorgeschrieben, so werden Schwierigkeiten bezüglich Unterbringung der geforderten Heizleistung nicht entstehen. Ist langsame Abkühlung vorgeschrieben, so wird in der Kühlzone eine Hilfsheizung vorgesehen werden müssen, die die Differenz zwischen Verlustwärme und der vom Gut freiwerdenden Wärme zu decken imstande ist. Ist schnelle Abkühlung gefordert, so wird künstliche Kühlung vorgesehen, wobei an Stelle einer Durchwärmungszeitrechnung die Berechnung der Abkühlungszeit zu treten hat. Es sei an dieser Stelle auf die Möglichkeit hingewiesen, die Wärmeübergangszahl durch hohe Geschwindigkeit des Kühlmittels (Luft oder Wasser) zu steigern.

**γ) Berechnungsverfahren für Forderung 3.** Bei Öfen mit Fließbetrieb läßt sich die Wärmerückgewinnung verhältnismäßig einfach bewerkstelligen. Sei es, daß zwei Warenströme in entgegengesetztem Sinne durch den Ofen, von dem nur der Mittelteil beheizt ist, wandern, sei es, daß nur ein Warenstrom vorgesehen ist und, wie es z. B. bei Wandertrockenöfen leicht auszuführen ist, Luft zur Wärmerückgewinnung herangezogen wird. Dabei wird an den Enden des Ofens von dem aus der Heizzone tretenden Gut Wärme an das frisch eintretende Gut abgegeben, so daß dieses schon vorgewärmt in die Heizzone gelangt. Im Falle des Wandertrockenofens mit Gegenstrombewegung der Luft tritt der Luftstrom an Stelle des einen Gutstroms.

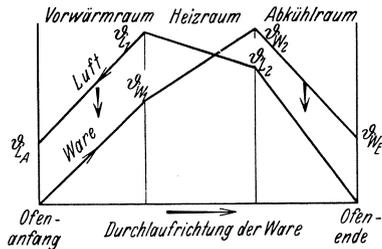


Abb. 44. Schema des Temperaturverlaufs eines Ofens mit Gegenstrom.

Die folgenden Ableitungen und Bemerkungen beziehen sich auf Öfen mit Luftbewegung im Gegenstrom; sie gelten sinngemäß für alle Öfen mit Wärmerückgewinnung.

Bei Öfen mit Gegenstromprinzip ist nur der mittlere Teil (Heizzone) mit Heizkörpern versehen, während die beiden Randzonen unbeheizt sind. Der schematische Temperaturverlauf ist in Abb. 44 gezeigt, aus der zu ersehen ist, daß das Gut bereits vorgewärmt in die Heizzone gelangt und den Ofen (die Kühlzone) mit einer Temperatur, die erheblich unter der Gebrauchstemperatur des Ofens liegt, verläßt. Ein Teil der Wärme fließt im Kreislauf im Ofen von dem Gutstrom A (z. B. Luft) auf den Gutstrom B und von diesem zurück auf den Gutstrom A. Dies kommt anschaulich auch in dem Sankey-Schaubild des Ofens zur Geltung, das die Wärmebilanz der Heizzone darstellt (Abb. 45). Es ist klar, daß die Summe von Wärmeinhalt des Gutes und Luft am Ende der Heizzone, ja sogar der Wärmeinhalt des Gutes

allein größer sein kann als die zugeführte Energie. D. h. mit anderen Worten: es ergibt sich ein Wirkungsgrad (auf die höchste Guttemperatur bezogen), der größer sein kann als 1, wodurch sich anschaulich die Verwendung von Wirkungsgraden zur Kennzeichnung der Wirtschaftlichkeit von Öfen als unbrauchbar erweist (siehe hierzu S. 165).

Wir werden jetzt die Leistung berechnen. Die arbeitende Luftmenge ist meistens frei wählbar. Dreht es sich um Trockenöfen, so ist eine gewisse Mindestluftmenge für den Trockenprozeß vorgeschrieben; die theoretische Mindestluftmenge ist jedoch meistens so klein, daß man aus Gründen der Wärmeübertragung eine größere wählt, die dann in gewissem Sinne wieder „frei wählbar“ ist.

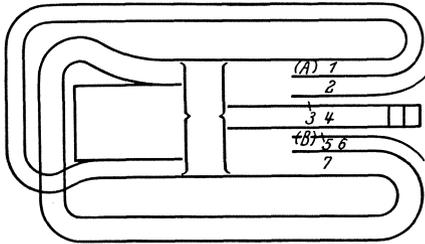


Abb. 45. Wärmeschaubild eines Wandertrockenofens nach dem Gegenstromprinzip (Paschkis ZV 71).

Der Querschnitt zwischen den beiden Klammern stellt den gesamten Wärmeinhalt des Heizraums dar. Die Wärme wird ihm zugeführt durch Umlaufwärme aus dem Vorwärmeraum (1), Umlaufwärme aus dem Abkühlraum (7) und durch Zufuhr elektrischer Energie (Rechteck links von der Klammer). — Die Wärme des Heizraums wird teilweise verbraucht zur Deckung seiner Leerverluste (4); der Rest wird teilweise mit der Luft (A 1, 2, 3), teilweise mit der Ware (B 5, 6, 7) aus ihm abgeführt. Von der in Luft bzw. Ware enthaltenen Wärme geht je ein Teil (1 bzw. 7) dem Heizraum wieder zu; je ein weiterer Teil (2 bzw. 6) ist in Luft bzw. Ware gebunden, und der Rest (3 bzw. 5) dient zur Deckung der Strahlungsverluste des Vorwärmer- bzw. Abkühlraums.

1 Umlaufwärme aus Vorwärmeraum, 2 durch Luft gebundene Wärme (Verlust), 3 Strahlungsverlust Vorwärmeraum, 4 Strahlungsverlust Heizraum, 5 Strahlungsverlust Abkühlraum, 6 in Gut gebundene Wärme (Verlust), 7 Umlaufwärme aus Abkühlraum.

folgende 5 Beziehungen (an den Rand sind zu jeder Gleichung die neu hinzutretenden Unbekannten geschrieben):

$$(\vartheta_{L1} - \vartheta_{LA}) c_p \cdot L = \vartheta_{W1} \cdot c \cdot G + Q_{v1} \quad (\vartheta_{LA}, L) \quad (31a)$$

$$\left( \frac{\vartheta_{L1} + \vartheta_{LA}}{2} - \frac{\vartheta_{W1}}{2} \right) \cdot O \cdot \alpha = \vartheta_{W1} \cdot c \cdot G + Q_{v1} \quad (\vartheta_{W1}) \quad (31b)$$

$$(\vartheta_{W2} - \vartheta_{WE}) c \cdot G = \vartheta_{L2} \cdot c_p \cdot L + Q_{v3} \quad (\vartheta_{WE}, \vartheta_{L2}) \quad (31c)$$

$$\left( \frac{\vartheta_{W2} + \vartheta_{WE}}{2} - \frac{\vartheta_{L2}}{2} \right) \cdot O \cdot \alpha = \vartheta_{L2} \cdot c_p \cdot L + Q_{v3} \quad (31d)$$

$$(\vartheta_{L1} - \vartheta_{L2}) c_p \cdot L + (\vartheta_{W2} - \vartheta_{W1}) c \cdot G + Q_{v2} = N. \quad (N) \quad (31e)$$

Bei der Bestimmung der Luftmenge ist auch auf die Betriebssicherheit Rücksicht zu nehmen: die Dämpfe mancher Lacke bilden in bestimmten Mischungsverhältnissen mit Luft explosive Gase. Die Luftmenge muß entweder so groß gewählt werden, daß infolge von Luftüberschuß eine Explosion ausgeschlossen ist, oder sie muß so klein sein, daß infolge von Luftmangel keine Explosionsgefahr besteht. Der erste Weg ist der sicherere, führt aber zu höherem Wärmeverbrauch.

Bezeichnet man die Temperaturen nach Abb. 44, so gelten mit den Bezeichnungen von S. 81

folgende 5 Beziehungen (an den Rand sind zu jeder Gleichung die neu hinzutretenden Unbekannten geschrieben):

Bei der Aufstellung der Gleichungen mußten folgende vereinfachende Annahmen gemacht werden:

1.  $\vartheta_{L1} = \vartheta_{W2} = \Theta$  der höchstzulässigen Arbeitstemperatur, im weiteren mit  $\Theta$  bezeichnet.

2.  $Q_{v1}, Q_{v2}, Q_{v3}$  seien unabhängig von  $L$ , d. h. bei der Verlustberechnung wird  $\alpha_i$  vernachlässigt; außerdem werden die Unterschiede in den Verlusten, die durch Änderung der Temperaturen in dem Vorwärm- und Abkühlraum auftreten, vernachlässigt.

3. Die Temperaturunterschiede im Gut sind vernachlässigt, d. h. es wird angenommen, daß das Gut jeweils völlig gleichmäßig durchwärmt sei, eine Annahme, die bei dünnem Gut, etwa in Trockenöfen für lackiertes Blech, zulässig ist.

4. Die spez. Wärme ist als temperaturunabhängig angenommen.

5. Die Wärmeübergangszahl ist als unabhängig von der Luftmenge angenommen, eine Annahme, die die Genauigkeit der Rechnung sehr erheblich beeinflußt. Man könnte statt dessen auch überall da, wo  $\alpha$  in den Gleichungen vorkommt, statt dieses konstanten Wertes eine Funktion der Luftmenge (die für die Luftgeschwindigkeit maßgebend ist) einführen, erhielte dann allerdings noch kompliziertere Gleichungen.

Aus den nebenstehenden Gleichungen (31) folgt zunächst  $L = f(N)$  und aus der Differentiation folgt eindeutig die Luftmenge, die die geringste Leistungszufuhr erfordert. Bei der Aufstellung der Gleichungen ist vorausgesetzt, daß die Gutmenge in den 3 Zonen gleich ist, daß also die 3 Zonen gleich lang sind. Andernfalls müssen statt  $O$  und  $G$  Werte entsprechend den Zonenlängen eingesetzt werden. Mit anderen Worten: es müßte die Dauer der Behandlung in jeder Zone in die Rechnung eingeführt werden.

Für den einfachen Fall der gleichen Länge der 3 Zonen ergibt sich:

$$L = \frac{1}{c_p(2K_1 + K_2)} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{\Theta} [4K_1 K_2 \Theta - 2K_1(2Q_{v1} + Q_{v3}) - K_2(Q_{v1} + Q_{v3})]} - \frac{K_1 K_2}{c_p(2K_1 + K_2)} \quad (32)$$

In dieser Gleichung ist der Kürze wegen geschrieben

$$cG = K_1, \quad O\alpha = K_2.$$

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß Luftmenge, Gutmenge und Leistung aufs engste miteinander verknüpft sind. Man müßte, um den kleinstmöglichen Wärmeverbrauch zu erzielen, die Luftmenge bei Betrieb des Ofens dem jeweils geänderten Gutdurchsatz anpassen. Eine Bestätigung dieser Überlegung lieferte die Praxis: ein Wandertrocken-

ofen lief mit vollem Anschlußwert leer, aber mit für großen Durchsatz bestimmter Luftmenge; er erreichte nicht die verlangte Temperatur. Als er dann normal beschickt wurde, arbeitete er einwandfrei. Die Ablufttemperatur lag erheblich niedriger als beim Leerversuch und das Gut wurde wunschgemäß getrocknet.

Man wird gut daran tun, beim Entwurf des Ofens nicht nur die Luftmenge für das Minimum der Leistung zu errechnen, sondern die Kurve Leistung =  $f$  (Luftmenge) aufzustellen. Soweit sie ein flaches Minimum hat, wird die Luftmenge zweckmäßig kleiner gewählt, als dem Minimum entspricht.

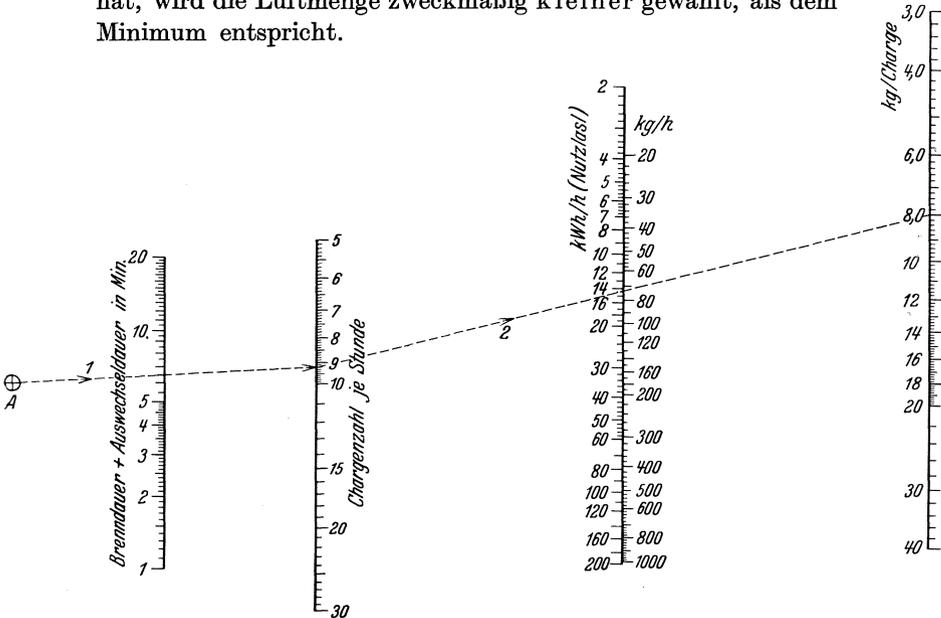


Abb. 46. Nomogramm zur Ermittlung der Nutzwärme bei Emailieröfen für 900°. Die Angabe „kg/Charge“ kann aus Abb. 47 entnommen werden.

Es folgt die Bestimmung des Ventilators. Er muß mit Rücksicht auf die Falschlufmenge (er steht notwendigerweise an einem Ende des Ofenkanals) erheblich größere Luftmengen fördern als die, die durch den Ofen gehen sollen. Der absolute Betrag der gesamten Luftmenge läßt sich — theoretisch — aus den Luftbewegungswiderständen rechnen, praktisch wird die Rechnung nicht zum Ziele führen. Man wird bei der Schätzung den erfahrenen Ventilatorfachmann zuziehen und eine Regelung der Luftmenge vorsehen.

b) Emailieröfen.

Beim Brennen von Emaille wird das Gut kurzzeitig (etwa 2 bis 5 min) in den Ofen gebracht und erkaltet an freier Luft. Beim Brennen sehr

schwerer und großer Gegenstände, wie etwa Badewannen, beträgt die Brennzeit etwas länger, etwa 10 bis 20 min, das Brennen sehr kleiner Gegenstände gelingt in noch kürzerer Zeit. Zwecks schneller Arbeit und um die Emaile beim Beschieken nicht zu verletzen, wird das Gut im kalten Zustand auf eine „Rost“ bezeichnete Vorrichtung geladen

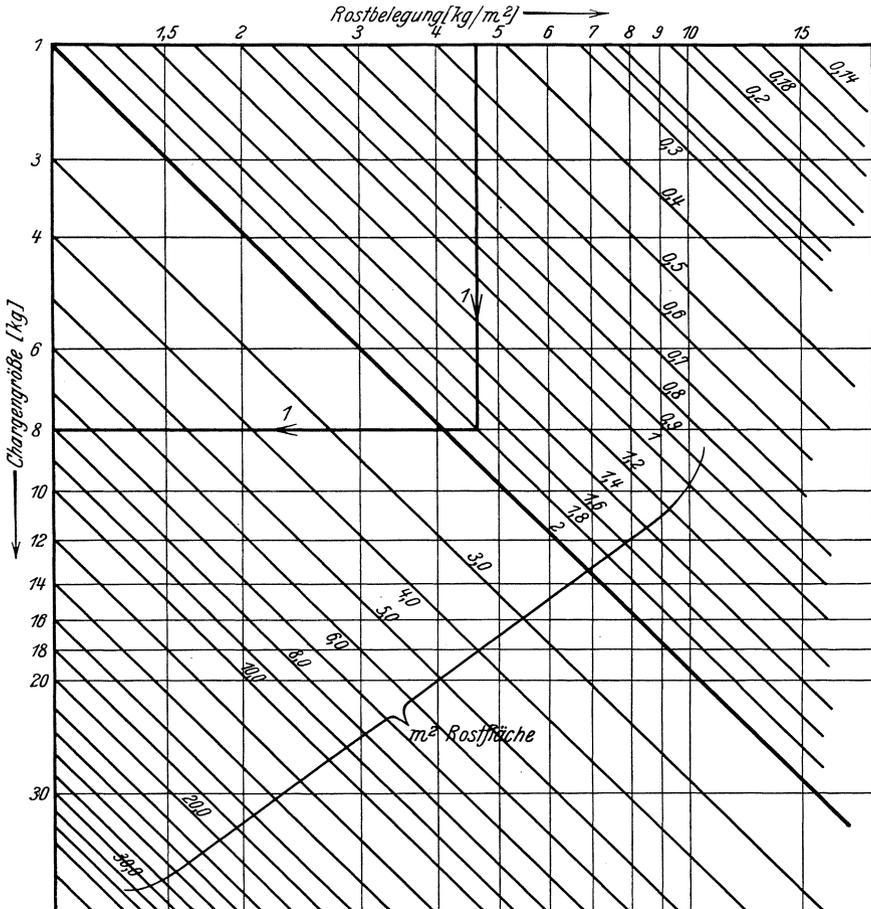


Abb. 47. Ermittlung der Chargengröße aus Rostbelegung und Rostfläche. (Logarithmische Skalen.)

und mit dieser in den Ofen gebracht. Trotz aller durch Materialverbesserungen erzielten Verminderungen des Rostgewichts beträgt dieses doch oft noch mehr als das eigentliche Gewicht des Gutes.

In der Regel arbeitet man mit ein oder zwei Rosten, die mit erwärmt werden, dann mit der Charge aus dem Ofen kommen. Beim Zweirostverfahren gelangt jeder Rost mit der zweitfolgenden Charge wieder frisch in den Ofen. Die Zeit, die der Rost außerhalb des Ofens ist, reicht

meist nicht zur vollen Auskühlung aus. Man darf also zur Bestimmung der Nutzwärme nicht das volle Rostgewicht einführen.

Die besondere Aufgabe bei der Berechnung eines Emailierofens besteht also in der Ermittlung der Nutzwärme unter Berücksichtigung der Beschickung mit einer Last, die zu einem beträchtlichen Teil noch Wärme gespeichert hat, und der Bestimmung der Verluste unter Berücksichtigung des häufigen Türöffnens.

Die eigentliche Nutzwärme (zur Erwärmung des Emailiergutes) ergibt sich nach den einfachen Formeln, die auf Seite 33 gebracht sind. Es ist zu beachten, daß häufig nicht der stündliche Durchsatz in kg, sondern statt dessen die spezifische Rostbelegung ( $\text{kg/m}^2$  Rostfläche) sowie die Brenndauer angegeben wird. Für eine häufig übliche Brenntemperatur von  $900^\circ$  findet man in einem Nomogramm Abb. 46 die

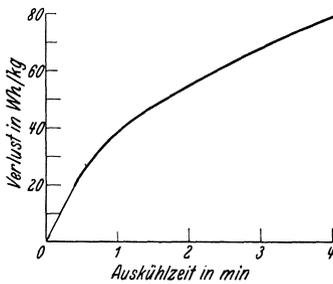


Abb. 48. Wärmeverluste eines dreieckigen Roststabes von 6,5 mm Kantenlänge bei Auskühlung von  $900^\circ$  in freier Luft.

eigentliche Nutzlast in kWh/h aus Brenndauer, Auswechseldauer und Chargengröße. Da vielfach die Rostbelegung und Rostgröße bekannt ist, wird die Chargengröße aus diesen beiden Werten zu ermitteln sein, was leicht mit Hilfe der Abb. 47 erfolgen kann. Die Art der Benutzung ergibt sich aus dem in die beiden Abbildungen (die auch zusammengezeichnet werden können) eingetragenen Beispiel.

Für die Berechnung der Rostwärme ist zunächst zu bestimmen,

wieviel Wärme von der Einheit der Roststaboberfläche in der Zeiteinheit abgegeben wird. Für einen Roststab mit dreieckigem Querschnitt mit 6,5 mm Kantenlänge ist in Abb. 48 eine entsprechende Kurve (Wärmeverluste bezogen auf Gewicht) gezeichnet, die sich auf hitzebeständiges Metall bezieht und nach den Gleichungen von Gröber (BV 2, 3) geschätzt ist. Die Kurve ist durch Versuche überprüft und stimmt mit der Praxis, ebenso wie die ganze hier vorliegende Berechnung gut überein. Die zusammengehörigen Werte der letztgenannten Kurve sind in einer Hilfskonstruktion des Nomogramms Abb. 49 aufgetragen. Weitere Kurven dieser Hilfskonstruktion gelten für andere Roststababmessungen. Unter Benutzung der übrigen Skalen (Rostgewicht, Chargenzahl und einer Hilfsachse) in der Nummernfolge der Pfeile kommt man zu dem Verbrauch in kWh/h für den Rost.

Bei der Berechnung der Verluste schließlich ist außer den Leerverlusten der Strahlungsverlust durch die Türe zu bestimmen. Die Türöffnungszeit ist dabei nicht immer gleich der Rostkühlzeit, und hängt außer vom Arbeitsverfahren von der Achtsamkeit der

Bedienung und von dem leichten Gang der Türe ab. Der Verlust durch die Türe ergibt sich aus der Strahlungsformel (2) unter der

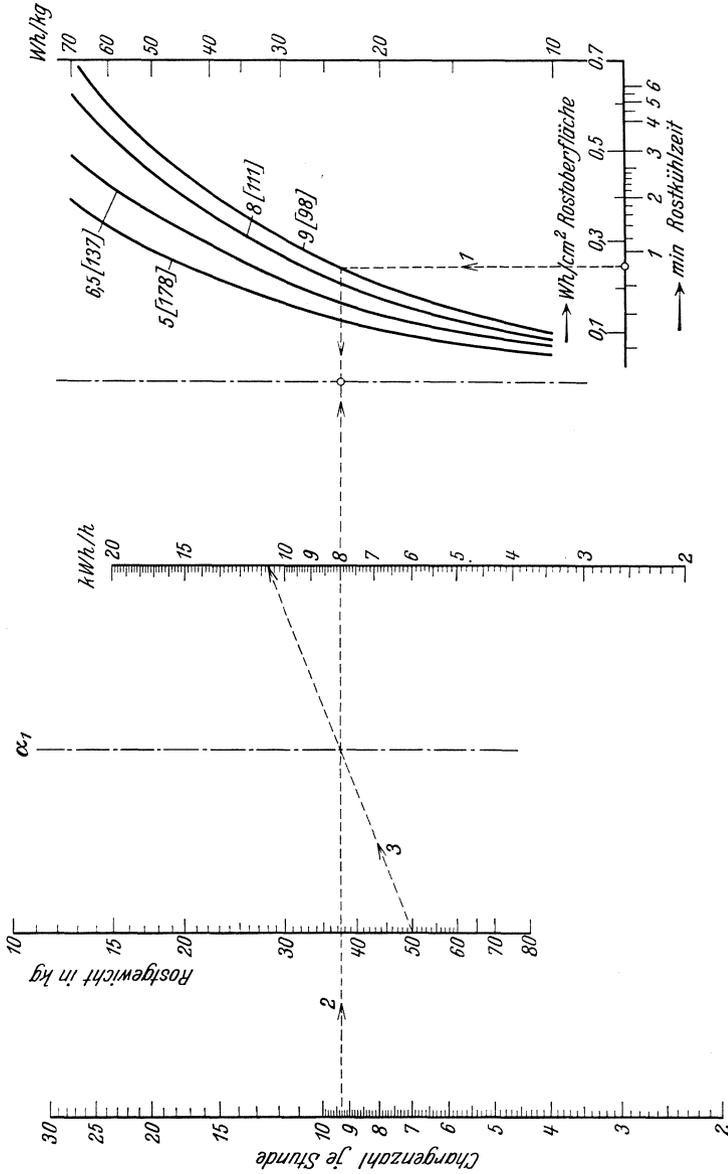


Abb. 49. Ermittlung der Rostwärme bei Emailieröfen für 900°. Die Zahlen an den Kurven der Hilfskonstruktion geben die Kantlänge der Roststäbe (Dreikantquerschnitt) in mm und in Klammern die Beträge g je m Stablänge an.

Annahme, daß die ganze Türfläche mit der Solltemperatur des Ofens strahlt.

## II. Schaltung und Regelung.

Es ist oben (S. 63) erwähnt worden, daß der Anschlußwert eines Ofens stets größer ausgeführt werden muß als der mittlere Verbrauch. Beim Anheizen — sei es des kalten Gutes, sei es des kalten Ofens — bleibt zunächst die volle Leistung eingeschaltet; ist aber dann die Ofensolltemperatur erreicht, so muß die mittlere Leistung herabgesetzt werden, wenn die Temperatur nicht noch weiter steigen soll.

Diese Herabsetzung der mittleren Leistung kann entweder durch Änderung der Einschaltdauer bei unveränderter Aufnahme oder durch Änderung der Aufnahme erfolgen.

Die erstgenannte Art erfolgt durch Ein- und Ausschalten der gegen den Anheizzustand unverändert gelassenen Wicklung.

Die Änderung der Aufnahme kann stufenweise oder kontinuierlich erfolgen; man kann entweder bei gleicher Anschlußspannung die Schaltung der Widerstände verändern oder die Anschlußspannung bei unveränderter Schaltung herabsetzen oder schließlich beide Maßnahmen verbinden.

Sämtliche vorbeschriebenen Regelverfahren können von Hand oder selbsttätig durchgeführt werden.

Wir werden uns im folgenden zunächst mit den Arten der Verminderung der Leistung beschäftigen, dann die Frage der Regelgenauigkeit besprechen.

### 1. Die Arten der Leistungsverminderung.

#### a) Änderung der Einschaltdauer.

Erreicht die Temperatur einen bestimmten Wert ( $\vartheta_{c_1}$  Abb. 50), so wird die Leistung abgeschaltet; die Temperatur beginnt zu sinken; wird der Wert  $\vartheta_{c_2}$  erreicht, so wird der Ofen wieder eingeschaltet usw. Dabei sinkt die mittlere Leistung nach einer Kurve ähnlich „a“ ab, die man z. B. aufnehmen könnte, indem man den Verbrauch des Ofens an einem Zähler viertelstündlich abliest (siehe S. 169). Statt die Umschaltung abhängig von der Temperatur vorzunehmen, kann man sie auch von der Zeit allein abhängig machen. Die relative Einschaltdauer muß dann dem jeweiligen Verbrauch entsprechen.

#### b) Änderung der Aufnahme.

Stufenweise Verminderung der Aufnahme  $N$  kann durch Umschaltung der Widerstände oder durch Anschließen des Ofens an niedrigere Spannung erzielt werden. Wird diese Maßnahme allein getroffen, d. h. arbeitet man ohne Wiederhochschalten nach kurzer Zeit, so erhält man einen Temperaturverlauf nach Abb. 51. Wie ersichtlich, sinkt nach

jeder Leistungsverminderung die Temperatur so weit, bis wieder Wärmegleichgewicht eingetreten ist, wobei je nach Art und Größe der Beschickung auch Wärme vom Gut in die Ofenwand zurückströmen kann. Je kleiner der Unterschied zwischen  $N_1$  und  $N_2$ , bzw.  $N_2$  und  $N_3$  usw. ist, um so geringer wird der Unterschied zwischen den Tempera-

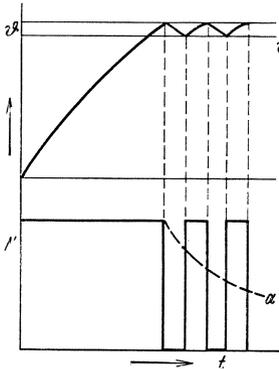


Abb. 50. Schema des Temperatur- und Leistungsverlaufs bei Änderung der Einschaltdauer.

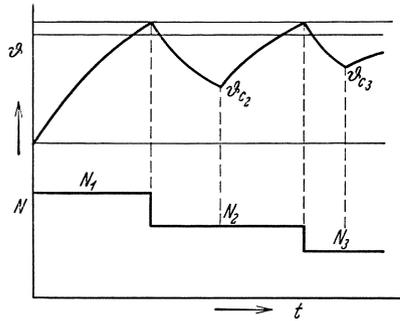


Abb. 51. Schema des Temperatur- und Leistungsverlaufs bei Änderung der Aufnahme.

turen  $\vartheta_{c1}$  und  $\vartheta_{c2}$  bzw.  $\vartheta_{c2}$  und  $\vartheta_{c3}$  usw. sein; um so mehr Schaltstufen werden aber dann auch benötigt. Macht man  $N_1 - N_2$ ,  $N_2 - N_3$  usw. immer kleiner, so gelangt man schließlich zur kontinuierlichen Verringerung der Aufnahme (siehe unten S. 98).

**$\alpha$ ) Änderung der Aufnahme durch Aus- oder Umschalten von Heizwiderständen.** Die stufenweise Regelung durch Umschaltung der Heizwiderstände kann entweder alle Widerstände gleichmäßig betreffen oder nur einen Teil derselben; in diesem Falle müssen Vorkehrungen getroffen werden, um vor und nach der Umschaltung die verlangte Temperaturverteilung im Ofen zu gewährleisten.

Die Grundformen der Umschaltung bei unveränderter relativer Energieverteilung sind die Stern-Dreieckumschaltung und Serien-Parallelumschaltung bei Drehstrom, die Serienparallelumschaltung bei Gleich- und Wechselstrom. In Dreieckschaltung nehmen Widerstände bekanntlich 3 mal so viel Energie auf als in Stern, bei Parallelschaltung

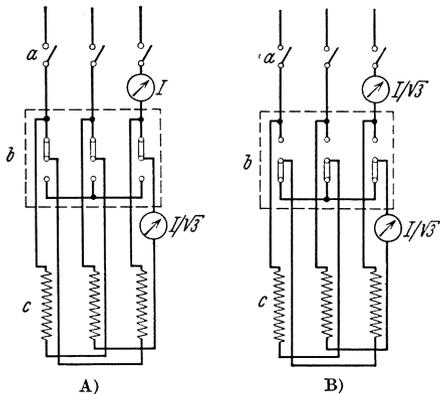


Abb. 52. Umschaltung der Heizwiderstände Dreieck-Stern. A) Dreieckstellung, B) Sternstellung.

*a* Dreipoliger Hauptschalter (für 1 Amp.),  
*b* Dreipoliger Umschalter (Stern-Dreieckschalter für  $I/\sqrt{3}$  Amp.), *c* Heizwiderstände.

zweier gleicher Kreise nehmen diese zusammen 4 mal so viel Energie auf als bei Serienschaltung. Es ist zu beachten, daß die zugehörigen Umschalter (dreipoliger Umschalter für die Stern-Dreieckschaltung, je ein 2poliger Umschalter für die Serienparallelschaltung für jede Leitung bzw. Phase) für einen kleineren Strom bemessen sein können als für den vollen Ofenstrom, wie aus den beiden Abb. 52 und 53 hervorgeht.

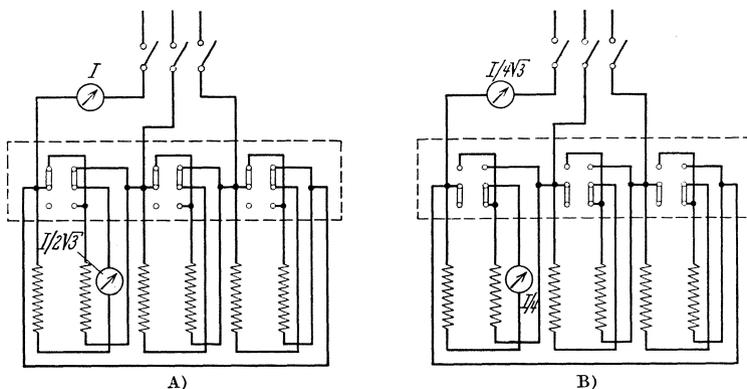


Abb. 53. Umschaltung der Heizwiderstände Parallelschaltung — Serienschaltung<sup>1</sup>. A) Parallelschaltung, B) Serienschaltung.

a dreipoliger Hauptschalter (für  $I$  Amp.), b zweipoliger Umschalter je Phase (für  $I/\sqrt{3}$  Amp.), c Heizwiderstände.

Die Leistungsabstufung 1:3 bzw. 1:4 ist verhältnismäßig grob; um eine feinere Abstufung zu erzielen, kann man eine Schaltung entsprechend Abb. 54 wählen: die Widerstände sind so bemessen, daß in Sternstellung, bei 2 Gruppen parallel, 100% der Leistung aufgenommen wird. Dann

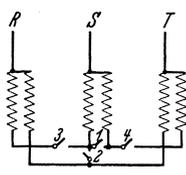


Abb. 54. Doppelsternschaltung.

erhält man folgende Leistungsabstufung<sup>2</sup>:

	∧	100%	Schalter 1, 2, 3, 4 eingeschaltet,
	Δ	75%	„ 1, 2 ausgeschaltet,
	∧	50%	„ 1, 3, 4 „
	∧	25%	„

Mit 4 einpoligen Schaltstellen (Schaltmessern) kann man die 3 ersten Stufen erreichen, wie aus der Abbildung und den Angaben hervorgeht. Zur 4. Schaltstellung braucht man mehr Schalter. Wählt man bei Serien-Parallelschaltung 2 Heizgruppen mit verschiedener Aufnahme (Widerstände  $R_I$  und  $R_{II}$ ), so kann man auch andere Leistungsstufen erreichen. Diese sind in Abb. 55 dargestellt. Es ist aber zu berücksichtigen, daß bei Serienschaltung das Verhältnis der in den beiden

<sup>1</sup> In der Abb. 53 B sind die Beschriftungen für die Stromstärken in der Hauptleitung und der Gruppenleitung zu vertauschen.

<sup>2</sup> || bedeutet 2 Gruppen parallel, | 2 Gruppen hintereinander, | nur 1 Gruppe eingeschaltet.

Heizkörpergruppen umgesetzten Energie verschieden ist von dem bei Parallelschaltung. Die erzielbare Verminderung der Leistung hängt davon ab, welches Verhältnis die Widerstände der beiden Gruppen haben. Dieses Verhältnis ist in Abb. 55 als Abszisse aufgetragen;  $R_{II}$  ist dabei der kleinere Widerstand, so daß das Verhältnis  $\frac{R_{II}}{R_I}$  immer ein echter Bruch ist

$$\left( \frac{R_{II}}{R_I} = \psi \leq 1 \right).$$

Auf der Ordinate ist die Leistung in Prozent derjenigen bei Parallelschaltung aufgetragen, und zwar für verschiedene Schaltungen. Bezeichnet man die Leistung in der Ausgangsschaltung mit  $N_a$ , die verminderte Leistung mit  $N_v$ , so erhält man:

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_v}{N_a} &= \frac{\psi}{\psi + 1}, & \text{wenn } R_{II} \text{ ausgeschaltet wird,} \\ \frac{N_v}{N_a} &= \frac{1}{\psi + 1}, & \text{wenn } R_I \text{ ausgeschaltet wird,} \\ \frac{N_v}{N_a} &= \frac{\psi}{(\psi + 1)^2}, & \text{wenn } R_I \text{ und } R_{II} \text{ in Serie geschaltet werden,} \\ \frac{N_v}{N_a} &= \frac{3\psi + 1}{3\psi + 3}, & \text{wenn } R_I \text{ in } \Delta \text{ bleibt und } R_{II} \text{ in } \lambda \text{ geschaltet wird,} \\ \frac{N_v}{N_a} &= \frac{\psi + 3}{3\psi + 3}, & \text{wenn } R_I \text{ in } \lambda \text{ geschaltet wird und } R_{II} \text{ in } \Delta \text{ bleibt.} \end{aligned} \right\} (33)$$

Diese Gleichungen liegen der Abb. 55 zugrunde. Diese Schaltmöglichkeiten führen nach der Umschaltung auf eine andere (Wärme-) Energieverteilung im Ofen, als sie bei der Ausgangsschaltung bestand. Das gleiche gilt für die in Abb. 56 gezeigte Schaltung, die eine Umschaltung auf 66, 50, 33% der Ausgangsleistung gestattet, wobei in den Schaltstellungen mit kleinerer Heizleistung ein Teil der Heizwicklung ausgeschaltet ist.

Die Wahl zwischen den verschiedenen Schaltungen (Abb. 52—54, 56) erfolgt z. T. unter Berücksichtigung der gerade passenden Stromstärken für die Schaltapparate. Die elektrische Energieverteilung auf die 3 Phasen bleibt bei den bisher besprochenen Schaltungen noch gleichmäßig.

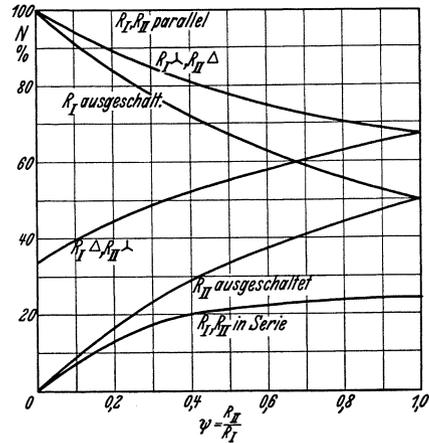


Abb. 55. Verminderung des Gesamtanschlußwerts bei verschiedenen Widerständen zweier paralleler Gruppen.

Verzichtet man nun noch auf gleichmäßige elektrische Belastung der 3 Phasen, so kann man durch Ausschalten einer Phase die Leistung auf 50% der ursprünglichen vermindern (Abb. 57).

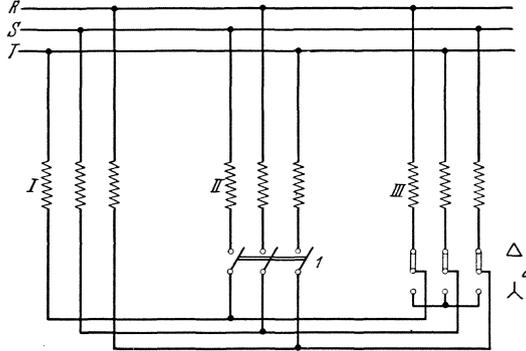


Abb. 56. Schaltung zur Leistungsverminderung.

	Schalter 1	Schalter 2	Leistung	Belastung d. Widerst.
Stellung A:	eingeschaltet	Δ	100%	100%
„ B:	„	λ	66,6%	100%
„ C:	ausgeschaltet	Δ	50%	75%
„ D:	„	λ	33,3%	100%

**β) Änderung der Aufnahme durch Änderung der Spannung.** Man bedient sich zur Änderung der Spannung der Spartransformatoren, soweit nicht in der Schaltanlage Transformatoren mit getrennten Wicklungen vorgesehen sind, die man zur Regelung mit verwenden kann. Bei Bemessung der Spannungsstufen der Spartransformatoren ist man ziemlich frei, und kann durch entsprechende Wahl die Spartransformatoren billiger gestalten (siehe Paschkis ZV 20).

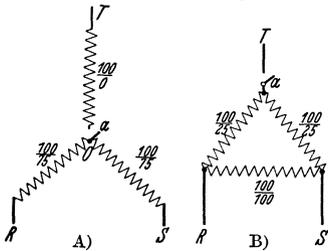


Abb. 57. Umschaltung von 100% auf 50% der Leistung; Phasenbelastung nach dem Umschalten ungleichmäßig. A) Sternschaltung, B) Dreieckschaltung. a eingeschaltet 100%, a ausgeschaltet 50%.

Die Oberflächenbelastung der Heizkörper vor und nach der Umschaltung sind über und unter dem Bruchstrich zu den einzelnen Zweigen geschrieben.

In der Abb. 58 ist eine Schaltung gezeigt, die es erlaubt, irgendeine Leistung zwischen 0,5 und der vollen Leistung zu erzielen, falls die Heizkörper in λ geschaltet sind. Je nach dem Übersetzungsverhältnis des einphasigen Spartransformators  $S_p$  wird die Leistung der 3 Phasen sich ändern.

Wir bezeichnen mit:

- $U_p$  die Phasenspannung des gleichmäßig belasteten Systems,
- $U_v$  die verkettete Spannung  $= \sqrt{3} U_p$ ,
- $U_1 = U_2$  die Sternspannung der Phasen R und S,
- $U_3$  die Sekundärspannung des Spartransformators (Sternspannung der Phase T),

$U_k$  die Primärspannung des Spartransformators,  
 $\ddot{u}$  das Übersetzungsverhältnis des Spartransformators,  
 $N_{ges}$  die gesamte Leistung.  
 $R$  Widerstand einer Phase.

Dann gilt (vgl. hierzu auch das Vektordiagramm Abb. 58a):

$$U_3 = \operatorname{tg} \alpha \cdot U_v, \quad U_1 = U_2 = \frac{U_v}{2 \cos \alpha},$$

$$N_{ges} = \frac{1}{R} [(U_1)^2 + (U_2)^2 + U_3^2] = [0,5 (U_v)^2 + 1,5 (U_3)^2] \frac{1}{R},$$

$$\frac{R \cdot N_{ges}}{(U_v)^2} = 0,5 + 1,5 \frac{(U_3)^2}{(U_v)^2} = \frac{R \cdot N_{ges}}{3 \cdot (U_p)^2} = 0,5 + 0,5 \frac{(U_3)^2}{(U_p)^2}. \quad (34)$$

Beachtenswert ist hierbei, daß, wenn  $U_3$  von 0 ...  $U_p$  steigt, die primäre Klemmenspannung  $U_k$  des Transformators sich ändert, weil der

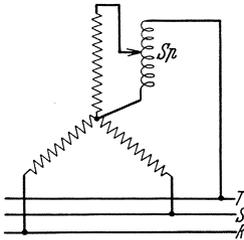


Abb. 58. Schaltung zur Leistungsverminderung (Spartransformator in einer Phase). Sternschaltung.

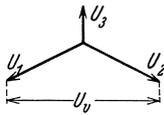


Abb. 58a. Vektordiagramm zu Abb. 58.

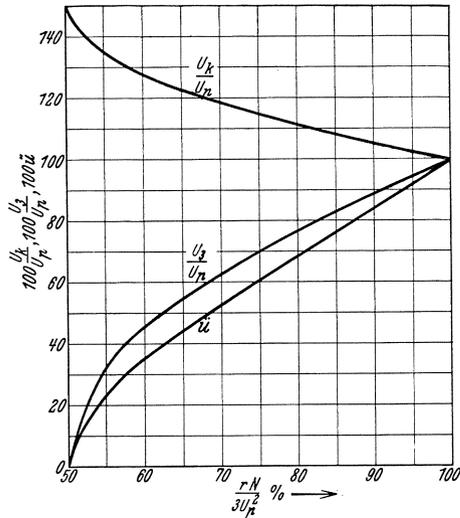


Abb. 59. Primärspannung, Sekundärspannung und Übersetzung für verschiedene Leistungen bei Schaltung nach Abb. 58.

Sternpunkt des Systems sich verschiebt. Es beträgt:

$$U_k = 1,5 U_p - U_1 \sin \alpha = 1,5 U_p - \frac{U_3}{2},$$

$$\frac{U_k}{U_p} = 1,5 - 0,5 \frac{U_3}{U_p}. \quad (34a)$$

Das Übersetzungsverhältnis folgt daraus zu

$$\ddot{u} = \frac{U_3}{U_k} = \frac{1}{1,5 \frac{U_p}{U_3} - 0,5}. \quad (34b)$$

In der Abb. 59 sind die Spannung  $U_3$ , die Primärspannung  $U_k$  Paschkis, Elektroöfen.

und das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  als Funktion des Verhältnisses

$$\frac{\text{Leistung mit Transformator}}{\text{volle Leistung}}.$$

aufgetragen.

Bei sämtlichen beschriebenen Schaltungen, bei denen die Energieverteilung vor und nach der Umschaltung anders ist, besteht die Gefahr einer ungleichen Temperaturverteilung. Um dieser Gefahr zu begegnen, müssen die Heizkörper mit hoher und niederer Leistung im Ofen räumlich gemischt vorgesehen werden. Man ordnet z. B. abwechselnd jeweils ein Wendel der Heizkörpergruppen *I* und *II* (Abb. 55), bzw. der Phasen *T* und *R, S* (Abb. 58) an.

Stufenlose Regelung kann entweder durch einen Drehtransformator erreicht werden oder durch Regelung mit Hilfe von Röhren, deren Gitterspannung abhängig von der Temperatur gesteuert wird.

## 2. Regelgenauigkeit<sup>1</sup>.

### a) Wahre und scheinbare Regeldifferenz.

Es war oben in den Abb. 50 und 51 stillschweigend vorausgesetzt, daß beim Regelvorgang die Temperaturbeobachtung eindeutig sei.

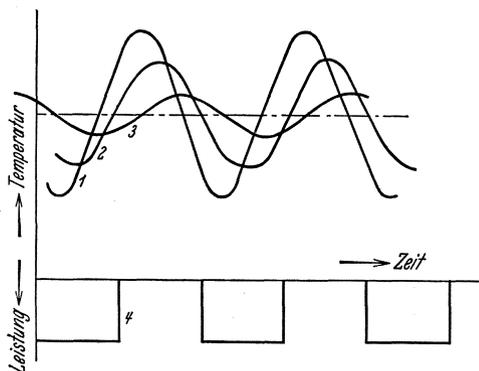


Abb. 60. Temperaturkurven bei regelmäßig gesteuerter Heizung und Messung der Temperaturen mit Meßgeräten verschiedener Trägheit.

Die Kurven sind in der Reihenfolge ihrer Bezifferung von 1...3 mit immer trägeren Meßgeräten aufgenommen. Man sieht, daß die Periodendauer stets die gleiche ist, daß aber Höhe des Ausschlags und Phasenverschiebung sich mit der Trägheit ändern. Die Linie 4 zeigt den Verlauf der Heizung. Sie steigt bei Einschaltung plötzlich auf ihren vollen Betrag, um bei Ausschaltung sofort wieder auf 0 abzusinken.

Fügt man in einen Ofen, der z. B. durch ein Zeitschaltwerk in regelmäßigen, gleichen Zeitabständen ein- und ausgeschaltet wird, mehrere Temperaturmeßgeräte (z. B. Thermoelemente mit verschiedenen Armierungen), so erhält man bei Aufzeichnung der Temperatur während der einzelnen Arbeitsperioden ein Bild nach Abb. 60.

Wir ersehen daraus, daß die Zahl der Regelperioden bei allen Armaturen gleich ist, daß aber Phasenverschiebung und Höhe der Extremwerte bei den einzelnen Armaturen verschieden ist. Man kann daraus

schließen, daß die Angabe der Regelgenauigkeit, oder besser der Regeldifferenz, wie wir fortan den Unterschied zwischen den Extremwerten der Temperatur während einer Regelperiode nennen wollen, nicht ausreicht,

<sup>1</sup> Paschkis ZV 21.

um einen Regelvorgang zu kennzeichnen. Je nach dem Fühlorgan<sup>1</sup>, mit dem der Vorgang aufgenommen wird, erhält man verschiedene (scheinbare) Regelkurven. Je „träger“ die Armatur die Temperatur leitet, um so verzerrter wird die scheinbare Kurve gegenüber einer „trägheitslos“ gemessenen wahren Kurve sein. Als wahre Regelkurve soll daher fortan die mit trägheitslosem Meßgerät aufgenommene bezeichnet werden. Da die Entfernung des Meßgeräts von den Heizkörpern einen Einfluß auf die zur Anzeige erforderliche Zeit und damit auf die Regeldifferenz ausübt, soll definitionsgemäß weiter die wahre Regeldifferenz mit einem trägheitslosen Meßgerät an der Regelstelle (Stelle des Fühlorgans) aufgenommen sein<sup>2</sup>.

Unter scheinbarer Regelkurve soll unter der großen Zahl der möglichen insbesondere die mit dem normalerweise zum Ofen gehörigen Meßgerät aufgenommene bezeichnet werden.

Wir können demnach festhalten, daß der Unterschied zwischen wahrer und scheinbarer Regeldifferenz auf 2 Bedingungen zurückgeführt werden kann:

- a) Trägheit des Fühlorgans.
- b) Räumliche Trennung der Stellen der Temperaturmessung und Regelung.

b) Die Unempfindlichkeit des Reglers (Übertragungsorgan).

Die Umschaltung, bzw. Ein- und Ausschaltung des Ofens beim Regeln erfolgt jeweils dann, wenn am Übertragungsorgan eine Niedrigst-, bzw. eine Höchsttemperatur erreicht ist. Diese Temperaturen, deren Differenz als „Unempfindlichkeit des Übertragungsorgans ( $D$ )“ bezeichnet wird, decken sich bei trägheitslosem Fühlorgan mit der Regeldifferenz. Bei trägheitsbehaftetem Fühlorgan wird dagegen die Regeldifferenz, und zwar sowohl die wahre wie die scheinbare, erheblich größer sein als die Unempfindlichkeit. Hierauf kommen wir weiter unten ausführlich zurück. Hier müssen wir uns zunächst mit der Unempfindlichkeit beschäftigen.

Die Unempfindlichkeit, die ohne Ausnahme allen Übertragungsorganen eigen ist, tritt bei manchen Regeleinrichtungen deutlich in Erscheinung, bei anderen ist ihr Auftreten weniger sinnfällig: unmittelbar sichtbar ist sie bei selbsttätigen Reglern mit 2 Kontakten, bei denen

<sup>1</sup> Jeder Regler besteht aus Fühlorgan, Übertragungsorgan und Schaltorgan. Näheres siehe S. 214.

<sup>2</sup> Annähernd ist die trägheitslose Messung verwirklicht für die Technik durch Gesamtstrahlungs-pyrometer ohne Glührohr, für wissenschaftliche Messungen durch photoelektrische Zellen. Mit guter Annäherung kann man auch die Messung mit dünnen nackten Thermo-elementen als „trägheitslos“ bezeichnen.

der Kontaktabstand (in Temperatureinheiten ausgedrückt) gleich der Unempfindlichkeit ist. Bei Reglern mit einem Kontakt und schleichender Kontaktbewegung muß der Kontakt einen bestimmten Weg zurücklegen, um das Schaltorgan zur Auslösung zu bringen. Z. B. wird erst bei einem bestimmten Weg der Abreißfunke verlöschen: im Augenblick der Öffnung des Kontakts entsteht ein kleiner Lichtbogen, der erst bei einer endlichen Länge abreißt; diese Länge entspricht einer bestimmten Kontaktentfernung und diese wieder einem bestimmten Temperaturunterschied (Unempfindlichkeit). Ein solches Verhalten tritt selbstverständlich auch bei anderen Übertragungsmitteln als dem elektrischen Strom auf; z. B. muß die Düse für Druckwasser eine bestimmte Öffnung aufweisen, ehe es wirken kann. Bei Schnappschaltung ist die Unempfindlichkeit offensichtlich durch die Temperaturdifferenz gegeben, die das Umschnappen bewerkstelligt. Bei allen Übertragungsorganen ist außerdem die Unempfindlichkeit durch mechanische Reibung und elastische Dehnung zu berücksichtigen.

Das Auftreten der Unempfindlichkeit bedeutet einen Zeitverlust; trotzdem die Solltemperatur erreicht ist, wird nicht sofort geschaltet, sondern es vergeht einige Zeit, bis die Umschaltung erfolgt. Hierbei ist es zunächst gleichgültig, ob die Schaltbewegung, wenn sie eingeleitet ist, eine endliche oder vernachlässigbar kleine Zeit zum Ablauf benötigt. Die Einleitung der Umschaltung wird verzögert.

### c) Charakteristik und Temperaturanstiegskurve.

Der Zeitverlust, der durch die Unempfindlichkeit bedingt ist, ist durch 2 Funktionen mit der Regeldifferenz verknüpft: Charakteristik und Temperaturanstiegskurve.

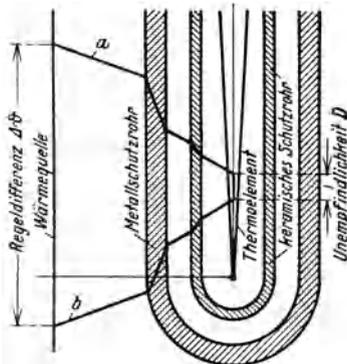


Abb. 61. Temperaturverlauf beim Regeln in einem Fühlorgan (Thermoelement). (Paschkis, ZV 21.)

Charakteristik. In der Abb. 61 ist ein Schnitt durch eine Thermoelementarmatur gezeichnet. Von innen nach außen fortschreitend finden wir das eigentliche Element, ein keramisches Innen- und ein metallisches Außenrohr. Zu Beginn irgendeiner beliebigen Regelperiode herrscht eine Temperaturverteilung, ähnlich der Linie *b*; vom Thermoelement erfolgt ein Temperaturabfall nach einer gebrochenen Linie bis zur Wärmequelle. Das Thermoelement hat gerade den unteren Grenzwert der Unempfindlichkeit erreicht.

Der Ofen wird eingeschaltet, und unter Einwirkung seiner Temperaturzunahme beginnt die Temperaturverteilung auch in der

Armatur sich zu ändern. Je schneller der Temperaturanstieg des Ofens ist, nach um so kürzerer Zeit wird eine Temperaturverteilung ähnlich Linie *a* sich einstellen und der Ofen wieder zur Ausschaltung kommen. Je schneller dieser Temperaturanstieg ist, um so höher wird auch am Ende der Anstiegszeit die Übertemperatur des Ofens über dem Fühlorgan sein. Je größer die zu erwärmenden Massen des Reglers sind, um so längere Zeit wird bei gleicher Übertemperatur des Ofens zum Durchlaufen des Intervalls von *b* nach *a* nötig sein. Trägt man für eine Armatur zu jeder Anstiegszeit (während dieser Zeit ist auch der Ofen eingeschaltet; Einschaltdauer = *ED*) die zugehörige Übertemperatur des Ofens auf, so erhält man eine für die Armatur charakteristische Kurve, die Charakteristik des Fühlorgans. Diese ist für jede Unempfindlichkeit verschieden. Solche Charakteristiken sind z. B. in der Abb. 62 dargestellt; es zeigt sich, daß sie mit genügender Annäherung als gleichseitige Hyperbeln aufgefaßt werden können, deren konstantes Koordinatenprodukt ( $K_2$ ) proportional der Unempfindlichkeit (*D*) ist ( $\Delta\vartheta \cdot ED = K_2 D$ ).

Die Größe  $K_2$  hängt ab: von dem Material, der Stärke, der Oberfläche des Fühlorgans sowie von den Wärmeübergangsverhältnissen zwischen Ofen und Fühlorgan. Weiter scheinen die wärmetechnischen Eigenschaften auch des Ofens den Wert von  $K_2$  zu beeinflussen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß das Verhältnis der  $K_2$ -Werte von mehreren Fühlorganen in verschiedenen Öfen das gleiche ist; man kann also, wenn man die Charakteristik mehrerer Fühlorgane in einem Ofen kennt, und das Verhalten eines Fühlorgans in anderen Öfen feststellt, auch die  $K_2$ -Werte der anderen Fühlorgane berechnen.

Wir greifen auf die Abb. 61 zurück. Aus ihr läßt sich auch der Unterschied zwischen wahrer und scheinbarer Regeldifferenz verstehen. Im Augenblick, wo die Temperaturverteilung „*b*“ erreicht ist, schaltet der Ofen ein und die Temperatur beginnt zu steigen. Diese Temperaturzunahme wirkt sich zunächst in den äußeren Schichten der Armatur aus; im Inneren herrscht noch immer ein Temperaturgefälle vom Element zur Armatur: die Ofentemperatur wird scheinbar noch weiter sinken.

Die Temperaturzunahme schreitet von außen nach innen langsam fort; hat das Minimum das Thermoelement erreicht, beginnt also auch dort die Temperatur zu steigen, so hat die scheinbare Temperaturkurve ihren Richtungswechsel. Die zeitliche Phasenverschiebung

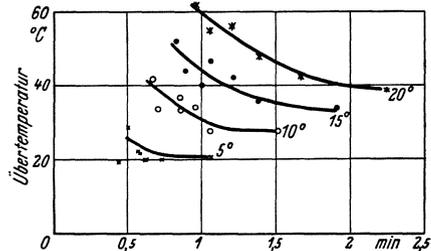


Abb. 62. Charakteristiken für die Unempfindlichkeitswerte 5, 10, 15, 20° C (Paschkis ZV 21).

zwischen der wahren und der scheinbaren Kurve hängt unter anderem von der Stärke der Armatur ab. Ein Beispiel zweier solcher Kurven ist in Abb. 67 a und b gezeigt.

Die Aufnahme der Kurven erfolgte an einem Röhrenofen. Die „wahre“ Regelkurve ist mit einem dünnen nackten Ni-Cr-Ni-Thermoelement, die „scheinbare“ mit einem ebensolchen stärkeren Thermoelement, das durch ein hitzebeständiges Metallschutzrohr (15/25 mm  $\varnothing$ ) geschützt war, aufgenommen.

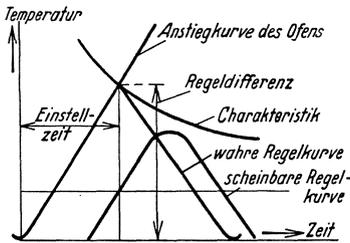


Abb. 63. Ermittlung der wahren Regeldifferenz und der Einschaltzeit (Einstellzeit) aus Charakteristik und Anstiegskurve.

Temperaturanstiegskurve. Solange der Ofen eingeschaltet ist, wird ihm eine bestimmte Wärmemenge je Zeiteinheit zugeführt. Ein Teil derselben wird zur Aufrechterhaltung des augenblicklichen Zustands benutzt; der Rest ist „Wärmeüberschuß“ ( $\dot{U}$ ). Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs ist in erster Annäherung, die aber bei

den verhältnismäßig kurzen Zeiten einer Regelperiode ausreichend genau ist, proportional dem Wärmeüberschuß. (Der Temperaturanstieg erfolgt wirklich nach einer Exponentialkurve).  $\frac{\Delta \vartheta}{ED} = K_1 \cdot \dot{U}$ . In der Abb. 63 ist eine Temperaturanstiegsgerade eingezeichnet.

#### d) Ermittlung der Regeldifferenz.

In der letzterwähnten Abbildung ist auch bereits angedeutet, wie man aus den beiden Kurven — Charakteristik und Temperaturanstiegsgeraden — die Regeldifferenz ermittelt. Die Skizze gilt für direkt gesteuerte Öfen, das sind solche, bei denen an der Stelle des Fühlorgans nach dem Ausschalten des Ofens ein wahrer Temperaturanstieg und nach dem Einschalten ein wahrer Temperaturabfall ausgeschlossen ist. Dies kann z. B. erzielt werden, wenn man das Fühlorgan unmittelbar neben die Heizung legt.

Trägt man über einer Abszisse, die durch den unteren Umkehrpunkt der wahren Regelkurve gehen soll, Temperaturanstiegsgerade und Charakteristik als Funktionen der Zeit auf, so sind die Koordinaten des Schnittpunkts Regeldifferenz und Einschaltzeit (= Einstellzeit für das trägheitslose Fühlorgan). Man kann schreiben:

$$\frac{\Delta \vartheta}{ED} = K_1 \dot{U}, \quad (35)$$

$$\Delta \vartheta \cdot ED = K_2 \cdot D. \quad (36)$$

Daraus folgt:

$$\Delta \vartheta = \sqrt{K_1 K_2 \dot{U} D}, \quad ED = \sqrt{\frac{K_2 D}{K_1 \dot{U}}}. \quad (36a)$$

Da  $\ddot{U}$  mit abnehmendem Wärmebedarf sich ändert, ist auch die Regeldifferenz  $\Delta\vartheta$  nicht konstant, sondern nimmt immer mehr zu, je geringer der Wärmebedarf ist, je höher also der Wärmeüberschuß wird.

e) Endliche Zeitverzögerung.

Bei unseren bisherigen Betrachtungen war vorausgesetzt, daß, sobald das Fühlorgan die Grenze der Unempfindlichkeit erreicht, die Schaltung eintritt (Zeitverzögerung = 0). Aus Ursachen, die im Bau der Regler (siehe S. 220) begründet sind, wird aber meist noch eine Zeitverzögerung nötig: es tritt dann eine Schaltung nicht jederzeit ein, sondern nur in bestimmten Zeitabständen, die vom Temperaturverlauf unabhängig sind. Die Regeldifferenz wird dann nicht nur von Ofen, Regler und Durchwärmungszustand des Gutes abhängen, sondern auch von der Größe dieser Zeitverzögerung. Als Beispiel sei auf Fallbügelgeräte hingewiesen, die später ausführlicher besprochen werden sollen. Hier sei nur kurz bemerkt, daß die Kontakte, die die Schaltung bewerkstelligen, durch einen Fallbügel dann betätigt werden, wenn der Zeiger über dem betreffenden Kontakt steht. Der Fallbügel wird in regelmäßigen Zeitabständen  $t_A$  gehoben und gesenkt. Je nachdem, wann der Zeiger die Grenze der Unempfindlichkeit erreicht, wird die Zeitverzögerung sich mit einem Wert zwischen 0 und  $t_A$  auswirken.

Bei einer Zeitverzögerung  $t_A$  ergibt sich die Regeldifferenz  $\Delta\vartheta_A$  aus folgenden Überlegungen: sie setzt sich aus drei Teilen zusammen:  $\Delta\vartheta_A = \Delta\vartheta + \vartheta_2 + \vartheta_3$ ;  $\Delta\vartheta$  ist die Regeldifferenz, die ohne Zeitverzögerung auftreten würde, und sich aus Gl. (36a) ergibt.  $\vartheta_2, \vartheta_3$  sind die Zuschläge zur Regeldifferenz, die dadurch bedingt sind, daß nicht aus-, bzw. eingeschaltet wird, trotzdem die obere, bzw. untere Grenze der Unempfindlichkeit erreicht ist. Nun beträgt definitionsgemäß die Temperaturzunahme in der Zeiteinheit:  $K_1\ddot{U}$ . In der Zeit  $t_A$  wird demnach die Temperatur um den Betrag  $\vartheta_2 = t_A \cdot K_1 \ddot{U}$  zunehmen. Für die Auskühlzeit (Ausschaltdauer)  $AD$  innerhalb der Regelperiode gilt der Wärmeverbrauch als negativer Wärmeüberschuß. Man kann daher schreiben:

$$\frac{\Delta\vartheta}{AD} = K_1 \cdot Q, \quad (35a)$$

worin  $Q$  den jeweiligen Wärmeverbrauch bedeutet. Dann wird

$$\begin{aligned} \vartheta_3 &= t_A \cdot Q \cdot K_1, \\ \Delta\vartheta_A &= \Delta\vartheta + \vartheta_2 + \vartheta_3 = \sqrt{K_1 K_2 \ddot{U} D} + t_A \cdot K_1 (\ddot{U} + Q) \\ &= \sqrt{K_1 K_2 \ddot{U} D} + t_A \cdot K_1 \cdot N_0. \end{aligned} \quad (37)$$

In jedem Augenblick ist die Aufnahme = Wärmeverbrauch( $Q$ ) + Wärme-

überschuß ( $\dot{U}$ ). Die gesamte Regeldifferenz wird zwischen den Werten der Gleichung (36a) und (37) schwanken, je nachdem die Zeitverzögerung näher an 0 oder  $t_A$  liegt, was bei jeder Regelperiode anders sein kann.

Auch die Zeitverzögerung kann verschleiert auftreten. Bei Millivoltmetern für Regelzwecke mit einem Kontakt wird zur Unterstützung der schwachen Richtkraft häufig periodisch eine zusätzliche Kraft vorgesehen, die die Annäherung bzw. Entfernung des Zeigers vom Kontakt unterstützt. Die Periode, in der diese Kraft einsetzt, ist die größte Zeitverzögerung  $t_A$ .

Der Einfluß der Zeitverzögerung geht aus den nachfolgenden Zahlen hervor, die sich auf einen Ofen und Regler mit folgenden Werten beziehen:  $N_0 = 4350 \text{ W}$ ;  $Q = 600 \text{ W}$ ;  $D = 10^\circ \text{ C}$ :

Zeitverzögerung [s]	Wahre gesamte Regeldifferenz [ $^\circ \text{ C}$ ]:
0	66
20	90
30	102
40	114

#### f) Indirekt gesteuerte Öfen.

Wir hatten oben die Voraussetzung gemacht, daß das Fühlorgan unmittelbar von der Heizung beeinflusst wird; es kann dann also keinen Teil im Ofen geben, dessen Temperatur zwischen der des Heizkörpers und der des Reglers liegt. Ob diese Bedingung erfüllt ist, hängt wesentlich von der Anordnung des Fühlorgans im Ofen ab.

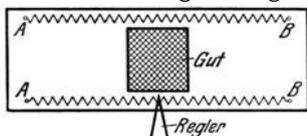


Abb. 64. Falsche Anordnung: Ein Regler ist für den langen Ofen und das kurze Gut zu wenig.

Liegt der Regler ganz nahe an dem Heizwiderstand, so wird er auf dessen Temperatur ansprechen, liegt er im Gut (wie es häufig in Verkennung der Erwärmungsvorgänge empfohlen wird), so wird die Außenseite des Gutes zu hohe Temperaturen annehmen.

Liegt er schließlich zwischen Heizung und Gut, so wird er auf eine nicht näher definierte Mitteltemperatur zwischen beiden ansprechen.

Es wäre wünschenswert, ihn an der Oberfläche des Gutes anzubringen und ihn so einzustellen, daß die für das Gut gerade noch zulässige Temperatur ( $\vartheta_0$  S. 11) eingehalten wird. Diese Anordnung ist aus praktischen Gründen meist nicht ausführbar, weil das Gut nicht so gleichmäßig anfällt, als daß nicht eine Gefährdung des Fühlorgans bei Beschickung zu befürchten wäre. Kann man das Fühlorgan nicht an der Oberfläche des Gutes anbringen, so ist der wünschenswerteste Platz unmittelbar an der Heizwicklung, wobei die Temperatur entsprechend dem Temperaturgefälle (s. Abb. 37; Kurvenparameter) höher einzustellen ist als  $\vartheta_0$ .

Bei Öfen großer Länge (bzw. Tiefe), empfiehlt es sich, mehrere Regler hintereinander über die Länge (bzw. Tiefe) des Ofens zu verteilen, nicht nur aus Gründen der Temperaturgleichmäßigkeit,

sondern auch, weil z. B. eine Anordnung des Gutes nach Abb. 64 zu einer Überhitzung der Widerstände bei *A* und *B* führen muß: der Regler schaltet bei Beschickung des Ofens diesen ein, weil die Temperatur des Reglers und

die der Heizkörper durch das kalte Gut gekühlt werden; zu einer Zeit, wo der Regler den Ofen noch eingeschaltet hält, wird die Temperatur bei *A* und *B* schon so hoch gestiegen sein, daß die Heizwicklung durchbrennt.

Die Raumverteilung macht es oft nötig, trotz der obengenannten Erkenntnisse das Fühlorgan an anderen Stellen unterzubringen. Es wird z. B. häufig an der unbeheizten Rückwand des Ofens angeordnet. Welchen Einfluß dies hat, ist an Hand der nebenstehenden Abbildungen zu erkennen. Abb. 65 ist ein Röhrenofen; die Regelung erfolgte mit Hilfe eines nackten Thermoelements, das durch einen Chromnickelreiter unmittelbar an die Heizung angepreßt wurde. Abb. 66 zeigt einen Kastenofen, bei dem ebenfalls ein nacktes Thermoelement zur Feststellung der wahren Regeldifferenz verwendet wurde; es war aber an der unbeheizten Rückwand untergebracht. Die Abb. 67a) bis c) zeigen scheinbare und wahre Regelkurven, die mit gleichen Meßgeräten an beiden Öfen aufgenommen sind. Man sieht bei dem Kastenofen, daß Einschaltdauer und Dauer des wahren Temperaturanstiegs nicht mehr zusammenfallen. Nach dem Ausschalten steigt auch die wahre Temperatur noch weiter,

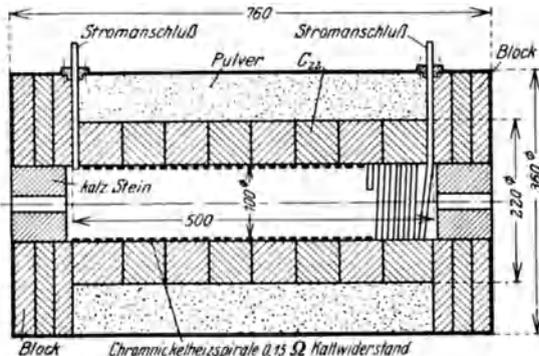


Abb. 65. Röhrenofen (Paschke ZV 21).

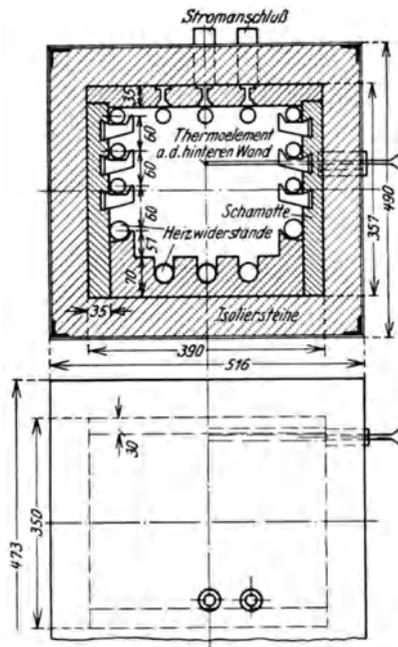


Abb. 66. Kastenofen (Paschke ZV 21).

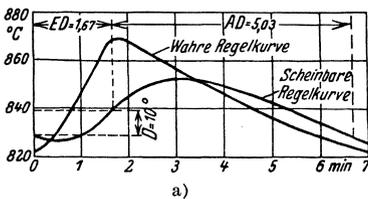
weil es Ofenteile gibt, deren Temperatur zwischen der des Heizkörpers und der des Fühlorgans liegt. In allen diesen Fällen ist die Regeldifferenz besonders stark abhängig vom Durchwärmungszustand des Ofens und des Gutes.

g) Öfen mit außen beheiztem Nutzraum  
(außen beheizte Muffeln).

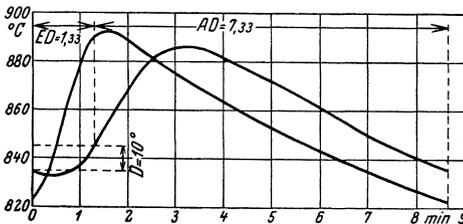
Die Erscheinungen, die wir bei indirekt gesteuerten Öfen kennen- gelernt haben, treten hier in verstärktem Maße auf. Der Nutzraum (z. B. ein Bad) ist durch eine Zwischenwand (z. B. Tiegel, Muffelwand) vom Heizraum, in dem die Widerstände liegen, getrennt.

Es gibt hier grundsätzlich zwei Mög- lichkeiten der Regelung:

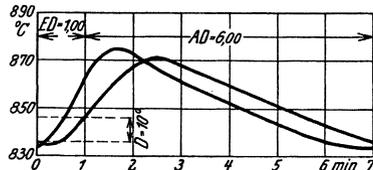
1. das Fühlorgan befindet sich in dem Nutzraum;
2. das Fühlorgan befindet sich in dem Heizraum.



a)



b)



c)

Abb. 67. Wahre und scheinbare Regelkurven. a), b) Röhrenofen, c) Kastenofen. (Paschkis ZV 21.)

Bei Abb. 67 a) betrug der Anschlußwert 2445 W ( $\bar{U} = 1861$  W).

Bei Abb. 67 b) betrug der Anschlußwert 4355 W ( $\bar{U} = 3685$  W).

Beachte die größere Regeldifferenz bei b), die auf größeren Wärmeüberschuß zurückzuführen ist.

Im ersten Falle wirkt die ganze Anordnung wie ein direkt gesteuer- ter Ofen mit außerordentlich träger Armatur: Muffelwand, Badflüssig- keit usw. wirken verzögernd auf die Anzeige. Im Augenblick, wo eine Belastungsänderung auftritt, etwa durch Eintauchen von mehr Gut in das Bad, wird z. B. die Temperatur sinken. Hat der Regler angesprochen, was nach verhältnismäßig kurzer Zeit erfolgt, weil die Trägheit der eigentlichen Armatur im Verhältnis zu der der Muffel (Tiegel) usw. klein ist, wird die Heizung eingeschaltet; aber die Badtemperatur sinkt weiter. Beginnt sie dann zu steigen, so ist schon zu viel Wärme von Wandung und Bad aufgenommen: die Temperatur steigt immer weiter, trotzdem schon ausgeschaltet ist.

Im zweiten Fall (Fühlorgan im Heizraum) wirkt die Anordnung ausgezeichnet, solange der Wärmeentzug aus dem Nutzraum gleich- mäßig ist. Dann könnte aber an sich der Temperaturregler durch ein

Zeitschaltwerk ersetzt werden, das einen höheren Anschlußwert auf eine kleinere mittlere Leistung herabsetzt. Im Augenblick aber, wo Belastungsänderungen auftreten, ist diese Anordnung ungünstiger als

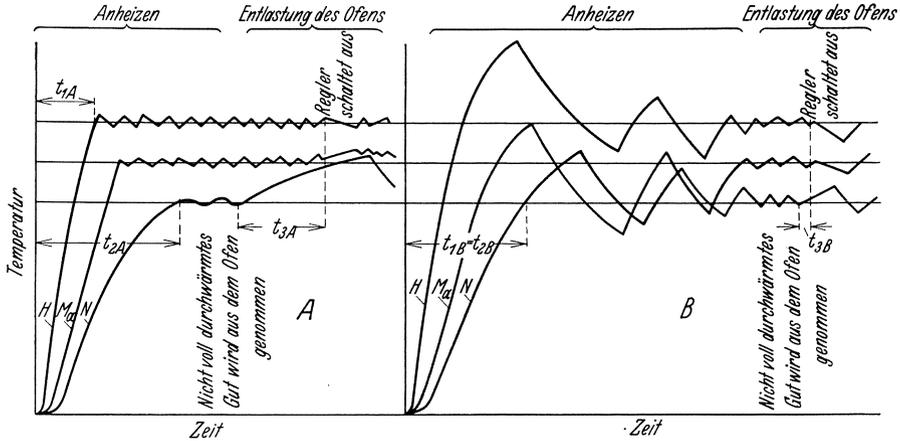


Abb. 68. Schema der Regelvorgänge bei einem Ofen mit außenbeheizter Muffel.  
Temperaturkurven:  $H$  des Heizraums,  $M_a$  der Muffelaußenwand,  $N$  des Nutzraums.

Betriebsperiode	Regler im Heizraum (A)	Regler im Nutzraum (B)
Anheizen	Regler beginnt früher zu arbeiten als bei B. ( $t_{1A} < t_{1B}$ ). Da durch den Regler eine, auch vorübergehende Erhöhung der Temperatur im Heizraum verhindert wird, tritt nur eine langsame Annäherung an den Sollwert der Temperatur im Nutzraum ein.	Regler beginnt später zu arbeiten als bei A. Die Muffelinnentemperatur erreicht früher den Sollbetrag als bei A, $t_{2B} < t_{2A}$ , aber überschreitet ihn erheblich, da die Muffel im Mittel eine für den Dauerbetrieb zu hohe Temperatur hat.
Beharrungszustand	Ist früher erreicht als bei B. Die Temperaturdifferenzen im Nutzraum sind kleiner als bei B. Der Regler dient sozusagen als Ersatz für eine Drosselvorrichtung, d. h. er setzt den mittleren Verbrauch unbekümmert und unbeeinflusst vom Nutzraum herunter.	Die Temperatursteigerung am Regler beeinflusst zwar sofort die Feuerung. Von der in der Muffel gespeicherten Wärme fließt aber noch Wärme vom oder in den Nutzraum. Die Muffel wirkt wie eine große Armatur.
Änderung des Wärmebedarfs im Nutzraum. Z. B. durch Beschickung oder Entleerung der Muffel	Der vermehrte oder verminderte Wärmebedarf muß sich erst durch eine Änderung der Muffeltemperatur bemerkbar machen; während der zur Fortpflanzung der Temperaturschwankung durch die Muffel erforderlichen Zeit wirkt noch der Einfluß der Heizung im gleichen Sinn weiter: Die Regelung wird gröber.	Der Regler wird schneller gekühlt als bei A. ( $t_{3B} < t_{3A}$ ) und wirkt schnell. Die Temperatur wird sich bald verändern.

die erst besprochene: es vergeht erst Zeit, bis der Regler anspricht und dann wieder Zeit, bis die Leistungsänderung sich fühlbar macht.

Diese Verhältnisse sind in Abb. 68 dargestellt.

Die Regeldifferenzen können niedrig gehalten werden durch Verwendung von Fühlorganen mit kleinen Charakteristikwerten ( $K_1$ ). Die Mittel, um die Regeldifferenz durch kleine Werte von  $K_2$  zu ermäßigen, werden in dem nächsten Abschnitt besprochen.

### 3. Regelschaltungen.

Alle Regelschaltungen enthalten als wesentlichen Bestandteil eine der Schaltungen, die in Abb. 69 bis 72 auf S. 110 dargestellt sind.

Es ist selbstverständlich, daß man die hier gezeigten Schaltungen verbinden kann mit den in Abb. 52ff. gezeigten Umschaltverfahren. Mit zunehmender Durchwärmung des Gutes steigt der Wärmeüberschuß des Ofens wie gesagt immer mehr und bringt außer der erwähnten Vergrößerung der Regeldifferenz eine Verkürzung der Spieldauer (häufigeres Schalten) mit sich. Diesen beiden Nachteilen sucht man dadurch zu begegnen, daß man bei vorgeschrittener Durch-

Zusammenstellung von

Nr.	Leistung bei Anheizen	Regeln zwischen Leistung	Fühlorganschaltung
1	voll	voll Null	1 oder 2 Kontakte
2	voll	voll vermindert	1 oder 2 Kontakte.
3	voll	vermindert Null	3 Kontakte oder 2 Kontakte und Hilfsrelais.
4	voll	a) voll Null b) vermindert Null	1 oder 2 Kontakte; Umschaltung „a“ auf „b“ nach einer eingestellten Zeit.
5	voll	a) voll Null b) vermindert Null	1 oder 2 Kontakte; Umschaltung „a“ auf „b“ nach Zähler. Durch einen Zähler mit Kontakten wird die Umschaltung eingeleitet, sobald der mittlere Arbeitsverbrauch / Stde. unter den Betrag der kleineren Leistungsstufe gesunken ist.
6	voll	a) voll Null b) vermindert Null	2 Thermoelemente (innen und außen am Gut); Umschaltung „a“ auf „b“ nach Thermoelementdifferenz.
7	voll	a) voll vermindert b) vermindert Null	3 Kontakte. — Es wird so lange nach „a“ geregelt, bis auch die verminderte Leistung Temperaturanstieg zur Folge hat.

wärmung des Gutes die Aufnahme des Ofens herabsetzt. Die folgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über einige Möglichkeiten, dies selbsttätig vornehmen zu lassen.

### III. Ofenbaustoffe.

Viele von den weiter unten genannten Werkstoffeigenschaften kann man heute noch nicht durch bestimmte Zahlen festlegen, sei es, daß ein formelmäßiger Ausdruck für die betreffende Eigenschaft nicht bekannt ist (z. B. Unempfindlichkeit von Widerstandsmaterial gegen

Schaltungen für stufenweise Regelung.

Vorteile	Nachteile	Anwendung bei
Einfache, billige Schaltung.	Abnutzung der Schalteinrichtung wegen häufiger Schaltung. Hohe Regeldifferenz.	kleinen, billigen Öfen
Einfache, billige Schaltung.	Wie vorstehend, wenn auch in geringerem Maße. Beschränkung im Anschlußwert, falls einstufige Umschaltung gewünscht wird. Die niedere Stufe muß kleiner als die Leerverluste sein.	Öfen mit genau vorgeschriebener Produktion.
Schonung der Schalteinrichtung trotz verhältnismäßig billiger Anordnung.	Zeitpunkt des Umschaltens entweder willkürlich oder bei dem ersten Ansprechen des Reglers, also ehe die Leistung auf den Betrag abgesunken ist, der auf der niederen Stufe zur Verfügung steht; daher Zeitverlust.	Öfen, bei denen die Anschaffungskosten den Ausschlag geben.
Abkürzung der Durchwärmungszeit, da auch nach Beginn der Regelung voll geheizt wird. — Einfache Schaltung.	Umschalten nach Zeit ist ungenau, da die richtige Zeit (wenn der Leistungsbedarf unter den Wert der kleineren Schaltstufe gesunken ist) u. a. vom Gut abhängt.	bei großen, durchautomatisierten Öfen.
Abkürzung der Durchwärmungszeit, da auch nach Beginn des Regels voll geheizt wird. — Umschaltung im theoretisch richtigen Moment.	Komplizierte Schaltung.	bei großen, durchautomatisierten Öfen.
	Anbringung des Thermoelements in der Charge schwer. Überhitzung der äußeren Teile der Charge.	bei großen, durchautomatisierten Öfen.
Einfache Schaltung, genaue Regelung.	Zeitverlust, da bis zum Ausschalten nicht mit höchst zulässiger Temperatur gearbeitet wird, sondern nur mit dem Mittelwert des Mittel- und Niedrigkontaktes.	bei großen, durchautomatisierten Öfen.

Abb. 69 bis 72. Elemente der Regelschaltung. Bemerkenswert ist, daß man auch bei Drehstromwiderständen nur zweipolige Schütze benötigt.

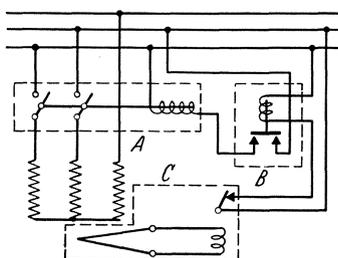


Abb. 69. Regler mit Maximalkontakt.  
A Schütz, B Ruhestromrelais, C Temperaturregler mit Maximalkontakt.

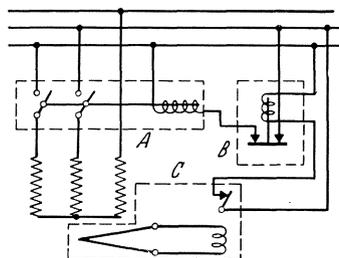


Abb. 70. Regler mit Minimalkontakt.  
A Schütz, B Arbeitsstromrelais, C Temperaturregler mit Minimalkontakt.

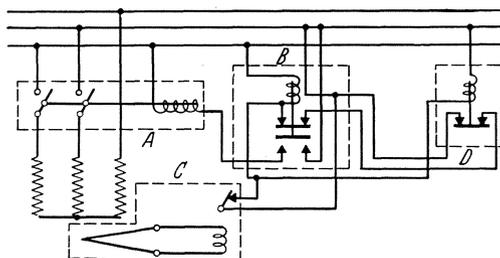


Abb. 71. Regler mit Maximalkontakt und verzögerter Einschaltung. Der Ofen schaltet bei Erreichen der Maximaltemperatur aus; gleichzeitig wird ein Zeitrelais *D* in Gang gesetzt, das die Wiedereinschaltung unabhängig von der Zeigerstellung an *C* erst nach Ablauf einer eingestellten Zeit erlaubt. Ist nach Ablauf der Zeit die Temperatur gesunken, so erfolgt Einschaltung, liegt sie noch über dem Maximum, so wird *D* wieder aufgezogen; der Ofen bleibt auf eine weitere Schaltperiode ausgeschaltet.  
— Eine ähnliche Schaltung gibt es entsprechend Abb. 70 (Regler mit Minimalkontakt).

A Schütz, B Ruhestromrelais mit Selbsthaltekontakten, C Temperaturregler mit Maximalkontakt, D Zeitrelais.

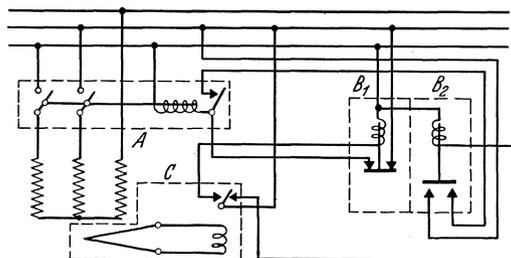


Abb. 72. Regler mit Maximal- und Minimalkontakt. Jeder Kontakt übernimmt nur eine Einschaltung, nie eine Ausschaltung. Die jeweilige Stellung des Schützes bleibt aufrechterhalten, bis ein gegenteiliger Schaltbefehl kommt.

A Schütz mit Selbsthaltekontakt, B<sub>1</sub> Arbeitsstromrelais; schaltet das Schütz ein, das sich durch den Selbsthaltekontakt auch hält, wenn B<sub>1</sub> unterbricht, B<sub>2</sub> Ruhestromrelais, unterbricht Selbsthaltestromkreis, C Temperaturregler; Maximal- und Minimalkontakt werden nur kurzzeitig geschlossen.

rauhe Behandlung), sei es, daß einwandfreie Untersuchungsbedingungen noch nicht gefunden sind (z. B. Beständigkeit von Widerständen gegen die Ofenatmosphäre bei Betriebstemperatur), sei es schließlich, daß die Zahlen als solche nicht ermittelt sind (z. B. Druckerweichungsverhalten von Isolierstoffen). Es wird daher bei Besprechung der Eigenschaften so weit als möglich auf Untersuchungsmethoden und Vergleichsverfahren hingewiesen werden, trotzdem die Anwendung der Verfahren dem Praktiker in vielen Fällen unmöglich sein wird und die Untersuchungen oft die Möglichkeit einer im Ofenprüffeld durchzuführenden Messung in Bezug auf die Anforderungen an Sauberkeit, Genauigkeit und Instrumentenbestand weit übersteigen werden.

Man findet die zahlenmäßigen Angaben der Eigenschaften (soweit dieselben bekannt sind) in den Abschnitten A 2 und C 2.

## A. Metallische Baustoffe.

### 1. Übersicht über die Baustoffe.

Die meisten hitzebeständigen Metalle werden im Ofenbau sowohl als Widerstände als auch als Konstruktionsteile, z. B. Beschickungsvorrichtungen und dgl., verwendet; die Besprechung wird deswegen nicht nach Anwendungsgebieten gegliedert. „Hitzebeständig“ ist hierbei natürlich relativ aufzufassen, indem Eisen z. B. für Temperaturen bis 400 oder 500° als hitzebeständig gelten kann; seine Verwendung als nicht hitzebeständiges Material, z. B. am Außenmantel von Öfen, braucht nicht weiter erörtert zu werden.

Als hitzebeständige Metalle wurden bis heute hauptsächlich folgende im Ofenbau verwendet:

Eisen gewalzt oder gegossen,  
Kupfer-Nickellegierungen,  
Chrom-Eisenlegierungen,  
Chrom-Nickellegierungen, eisenhaltig und eisenfrei,  
Nickel,  
Chrom,  
Molybdän.

Wie aus der Besprechung dieser Metalle, ihrer Eigenschaften und ihrer Prüfung hervorgehen wird, ist die Auswahl geeigneter Baustoffe auf Grund von Laboratoriumsversuchen noch nicht möglich; man ist heute vielmehr noch auf die Erfahrungen der Praxis angewiesen. Aus derartigen Erfahrungen ist auch die nachstehende Zusammenstellung hervorgegangen, in der die verschiedenen Baustoffe in der Reihenfolge ihrer Haltbarkeit für verschiedene Temperaturstufen angegeben sind.

Werkstoffe in ungefährender Reihenfolge ihrer Haltbarkeit mit den üblichen Verwendungszwecken.

	Widerstandsbaustoffe <sup>1</sup>	Konstruktionsstoffe (Innenwand, Beschickungseinrichtung usw.)
350°	Gewalztes Eisen; Gußeisen;	Gewalztes Eisen; Gußeisen.
500°	Cu-Ni-Leg.; Cr-Ni-Leg. Gußeisen; Cu-Ni-Leg.; Ni; Cr-Ni-Leg.	Gewalztes Eisen <sup>2</sup> ; Gußeisen; Cr-Fe-Leg.
600—700°	Ni; Cr-Ni-Leg.	Cr-Fe-Leg.; Cr-Ni-Leg.
700—1100°	Cr-Ni-Leg.	Cr-Ni-Leg.
1100—1200°*		Cr-Ni-Leg.

Reines Chrom<sup>3</sup> ist trotz seiner guten Oxydationsbeständigkeit wegen seiner schlechten mechanischen Eigenschaften (Sprödigkeit, ungenügende Bearbeitbarkeit und Verformbarkeit) im Widerstandsofenbau trotz vielfacher Versuche praktisch nicht verwendet worden; auch Heizkörper aus Chrom mit Wolfram- oder Molybdänzusatz<sup>4</sup> haben sich aus denselben Gründen nicht durchzusetzen vermocht. Molybdän ist bei hohen Temperaturen gegen Sauerstoff nicht beständig und kann deswegen nur in Schutzgas Verwendung finden, das entweder den ganzen Ofen erfüllt oder nur die Widerstände selbst umströmt (S. 288).

Auch bei niederen Temperaturen werden für Widerstände fast ausschließlich Chromnickellegierungen verwendet: Eisen wird wenig gebraucht wegen seines bei niedrigen Temperaturen geringen Widerstandes, Kupfer-Nickel-Legierungen wegen ihres gegenüber Chrom-Nickel nicht so erheblich niedrigeren Preises und ihrer verhältnismäßig geringen Temperaturbeständigkeit. Bei Chrom-Eisen-Legierungen bereitet die Verarbeitung zu Draht und Band größere Schwierigkeiten als bei Chromnickel, ohne daß der Preis erheblich kleiner ist. Nickel schließlich hat auch einen niedrigen spezifischen Widerstand. In Sonderfällen, in denen sein sehr hoher Temperaturkoeffizient des Widerstandes große Bedeutung hat, wird es dagegen gerne verwendet. Die als Widerstandsmaterial verwendeten Cr-Ni-Legierungen können ihrer Zusammensetzung (%) nach etwa in folgende Gruppen eingeteilt

<sup>1</sup> Für die Anwendbarkeit sind die Temperaturen am Heizkörper selbst maßgebend.

<sup>2</sup> Die Verwendung sollte möglichst beschränkt werden, da oberhalb 400 bis 450° die Lebensdauer schon stark heruntergeht; die Lebensdauer steigt durch Zulegieren kleiner Mengen anderer Metalle, z. B. Kupfer.

\* Oberhalb 1100° finden zur Zeit fast nur nichtmetallische Widerstände (Si-C) Verwendung.

<sup>3</sup> Westinghouse Co. D.R.P. 488472; Heraeus-Vakuumschmelze D.R.P. 508008.

<sup>4</sup> Heraeus-Vakuumschmelze D.R.P. 511097.

werden (die erste Reihe kommt nur bis etwa 600 bis 700° in Betracht):

Cr	Ni	Fe	Sonstiges	Hersteller
8 ... 20	7 ... 15	Rest	—	Krupp, Schöller-Bleckmann Heraeus-Vakuumschmelze, Krupp, Schöller-Bleckmann Heraeus-Vakuumschmelze, Krupp
15 ... 20	60	Rest	—	
20	78	höchstens 2		

In Amerika hat sich z. T. eine Chrom-Aluminium-Eisen-Legierung eingeführt, etwa mit der folgenden Zusammensetzung: Al 4 . . . 9% ; Cr 14 . . . 24% ; Rest Fe. Umfangreichere Erfahrungen mit diesem, wegen der billigen Bestandteile wohlfeilen Material sind noch nicht bekannt geworden.

Als Konstruktionsmaterial finden bis etwa 400° hauptsächlich Eisen, darüber in ausgedehntem Maße Chrom-Eisen-Legierungen Verwendung. Nur da, wo bei hohen Temperaturen auch sehr hohe Festigkeit, eventuell noch in Verbindung mit der Forderung nach chemischer Beständigkeit, auftritt, werden Chrom-Nickel-Legierungen verwendet, die vor allem durch Molybdän- und Manganzusatz für diese Zwecke geeignet gemacht werden (z. B. Legierung B 7 M der Heraeus-Vakuumschmelze: 15 Cr 60 Ni 16 Fe 2 Mn 7 Mo).

## 2. Eigenschaften und ihre Prüfung.

An Metalle als Ofenbaustoffe müssen folgende Anforderungen gestellt werden:

- |                                                           |                                    |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| a) Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre                 | } bei der Betriebs-<br>temperatur. |
| b) Beständigkeit gegen die Auflagematerialien             |                                    |
| c) Mechanische Festigkeit                                 |                                    |
| d) Unempfindlichkeit gegen rauhe Behandlung               |                                    |
| e) Möglichst kleine Alterung.                             |                                    |
| f) Leichte Bearbeitbarkeit.                               |                                    |
| g) Geringe Wärmeausdehnung.                               |                                    |
| h) Entsprechender spezifischer Widerstand.                |                                    |
| i) Temperaturkoeffizient des Widerstandes 0 oder positiv. |                                    |
| k) Leichte Reproduzierbarkeit.                            |                                    |

- a) Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre bei Betriebstemperatur.

Der Verwendbarkeit eines metallischen Baustoffes ist in der Regel nicht durch den Schmelzpunkt, sondern durch seine Reaktionsfähigkeit mit der Ofenatmosphäre (und mit den anderen Baustoffen des Ofens, siehe hierzu unter b) eine Grenze gesetzt; denn fast alle metallischen Baustoffe für Industrieöfen arbeiten betriebssicher nur bei Temperaturen, die

weit unterhalb ihres Schmelzpunktes liegen. Die Zerstörung erfolgt bei Verwendung in oxydierender Atmosphäre (Luft!) durch Oxydation des Metalls, so daß man geradezu als Maßzahl der Beständigkeit den Anfall an Zunder (Oxyden) in  $\text{mg/cm}^2$  Metalloberfläche und Stunde angibt. Die oxydierte Schicht blättert ab und gibt damit immer neue Schichten der weiteren Oxydation preis. Die Oxyde bestimmter Metalle jedoch haften bei nicht zu hohen Temperaturen auf dem Grundmetall fest und schützen dieses dann vor weiter gehender Oxydation. Man bezeichnet diese Metalle bis zu diesen Temperaturen als hitzebeständig; z. B. kann Eisen nur unterhalb  $500^\circ$  als hitzebeständig gelten, da der Zunder oberhalb dieser Temperatur verhältnismäßig schnell abblättert. Da, wo rein reduzierende Atmosphäre — auch während der Abkühlperiode — herrscht, wie bei bestimmten Bauformen von Blankglühöfen, kann man Eisen noch bei höheren Temperaturen verwenden. Bei gewissen anderen Ausführungen von Blankglühöfen tritt abwechselnd reduzierende und oxydierende Atmosphäre auf; hier ist Eisen oberhalb  $500^\circ$  nicht mehr zu verwenden. Aber auch Cr-Ni-Legierungen werden selten für diesen Zweck gebraucht, weil man befürchtet, daß die häufige Bildung von Oxyden mit nachfolgender Reduktion eine Zermürbung des Gefüges zur Folge haben würde. Für diese Zwecke eignen sich erfahrungsgemäß Nickel-Eisen-Legierungen (64% Fe, 36% Ni)<sup>1</sup>.

Die Prüfung auf Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre wurde bisher in überwiegendem Ausmaße auf Widerstandsmaterialien zugeschnitten. Trotzdem, wie vorher erwähnt, vielfach die gleichen Werkstoffe auch für Konstruktionsteile verwendet werden, wären für diese gesonderte Prüfverfahren durchaus wünschenswert, weil Form und Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Gußhaut<sup>2</sup> und dgl.) eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen dürften.

Im folgenden werden die Prüfverfahren für Widerstandsmaterial beschrieben, da außer für Metalle in Draht- und Bandform Prüfverfahren noch nicht bekannt geworden sind.

Zur Prüfung der Lebensdauer von Heizdrähten in gasförmigen Stoffen — weitaus in den meisten Fällen in Luft — stehen grundsätzlich drei verschiedene Gruppen von Verfahren zur Verfügung:

- α) Feststellung der Widerstandsänderung.
- β) Feststellung der Gewichtsänderung.
- γ) Feststellung der Lebensdauer unmittelbar.

<sup>1</sup> Laut freundlicher Mitteilung des Herrn Dr. Hiemenz liegen bei der Heraeus-Vakuumschmelze günstige Erfahrungen mit Cr-Ni-Legierungen als Heizwiderstände auch in Blankglühöfen mit abwechselnd reduzierender und oxydierender Atmosphäre vor.

<sup>2</sup> Es hat sich herausgestellt, daß für gegossene Metalle die Gußhaut einen guten Schutz gegen Angriffe der Ofenatmosphäre zu bieten vermag; man sollte daher vermeiden, die Gußstücke vor Verwendung abzuarbeiten.

Ehe auf die einzelnen Prüfverfahren eingegangen wird, muß betont werden, daß keine Prüfung die praktische Erprobung ersparen kann; denn beim Erreichen einer bestimmten Lebensdauer machen sich u. a. auch folgende Einflüsse geltend: Höhe der Temperatur, Belastung des Widerstandes, Bauart des Widerstandes, Stromdurchgang oder nicht, Gleichmäßigkeit der Temperatur und Spielverlauf bei nicht ununterbrochener Erwärmung (Ausschalt- und Einschaltdauer und Schalthäufigkeit). Die Haltbarkeit wird ganz einschneidend von der Behandlung im Betrieb, vor allem von der Sauberhaltung der Heizelemente beeinflusst. Da kein Prüfverfahren diese große Menge von Variationen erschöpfend erfassen kann, ist der Wert aller nachfolgend beschriebenen Verfahren nur begrenzt; weiß man doch nie, ob nicht eine bei einem Vergleichsversuch gerade nicht beachtete Verschiedenheit in den Versuchsbedingungen eine erhebliche Änderung eines der beiden zum Vergleich stehenden Baustoffe hervorgerufen hätte.

**α) Prüfung der Lebensdauer durch Messung der Widerstandsänderung.**

Einige Bemerkungen bezüglich des Meßverfahrens zur Feststellung der Widerstandsveränderung werden bei Forderung b) (Beständigkeit gegen die Auflagematerialien) gemacht werden. Bezüglich der Beständigkeit von Widerständen gegenüber der Ofenatmosphäre ist folgendes zu sagen: da die Oxydschicht von Metallen nur einen Bruchteil der elektrischen Leitfähigkeit von reinen Metallen hat, meinte man früher, daß das Verhältnis der spezifischen Widerstände der zu untersuchenden Probe in neuem und gebrauchtem Zustande unmittelbar das Verhältnis des oxydierten Querschnitts zu dem gesamten Querschnitt eines Leiters geben müßte. Diese Überlegung, so verlockend sie an sich wäre, ist leider falsch, weil, wie Rohn (ZV 22, 23) berichtet, der Widerstand auch vom Gefüge abhängig ist. Rohn schlägt zwar vor, als Ausweg das Material vor der Prüfung unter nicht oxydierenden Bedingungen auf eine über der Prüftemperatur liegende Temperatur zu erwärmen, um die Gefügeänderung „vorwegzunehmen“, doch weist er selbst auf die nur sehr begrenzte Wirksamkeit dieses Verfahrens hin (l. c.). Näheres über das Meßverfahren siehe unter b).

**β) Prüfung der Lebensdauer durch Messung der Gewichtsänderung.**

Die zweite Prüfmethode — Feststellung der Gewichtsänderung — wurde von Klein (ZV 24) angegeben und dann von Rohn (ZV 22) und Hengstenberg und Bornefeld (ZV 25) weiter vervollkommnet. Bei der von Rohn angegebenen Prüfungsart wird das Material anders beansprucht als im normalen Betrieb: Rohn legt nämlich das zu prüfende Material in Form eines Wendels auf zwei Rollen aus Marquardt-scher Masse, erwärmt das Wendel und läßt es dann wieder abkühlen. Ein Teil des Zunders springt dabei ab (abgesprühter Zunder), ein Teil wird durch Ausrecken und nachträgliches Wiederwickeln des Wen-

dels gewaltsam entfernt (abgereckter Zunder). Dies gewaltsame Ausrecken tritt in der Praxis in der Regel nicht auf, und es ist durchaus fraglich, ob es nur als Steigerung der üblichen Beanspruchung durch das Arbeiten des Widerstandes anzusehen ist, so daß die Qualitätsreihenfolge bei Prüfung mehrerer Stoffe unverändert bleibt, oder ob durch die schroffe Art der Beanspruchung sich eine Änderung in der Qualitätsreihenfolge ergibt.

Ergebnisse derartiger Messungen sind bei Rohn (l. c.) angeführt.

Statt der Wägung des Zunders entfernt Hengstenberg mit seinen Mitarbeitern Bornefeld und Fritz auf chemischem Wege sorgfältig die Zunderschicht und stellt die Gewichtsverminderung des Prüfstückes selbst fest. Das Verfahren ist von Fritz und Bornefeld (ZV 26) beschrieben; Ergebnisse sind von Hengstenberg und Bornefeld (ZV 25) berichtet. Die Feststellungen erfolgen an genormten Plättchen von 5 mm Stärke. Zur Kritik dieser Anordnung ist zu bemerken, daß jede Probe nur einmal zu verwenden ist, da ja die gebildete Oxydhaut erst entfernt werden muß, ehe die gewünschten Feststellungen getroffen werden können. Bei der noch großen Unklarheit des ganzen Gebietes ist die individuelle Streuung der einzelnen Proben nicht ausgeschaltet. Weiter scheint es unbedingt erforderlich, die Proben sehr sauber zu reinigen und andererseits einen Angriff des noch gesunden Materials durch die chemischen Reinigungsmittel zu vermeiden. Die entsprechenden chemischen Reagenzien sind in den Arbeiten angegeben. Die Prüfdauer ist bei den beschriebenen Versuchen auf 120 und 240 Stunden genormt.

**γ) Unmittelbare Prüfung der Lebensdauer.** Die dritte Prüfmethode von Smithells, Williams und Avary (ZV 27) geht unmittelbar auf die Lebensdauer des Materials aus. Es werden dünne, in den Abmessungen genormte Wendel in — ebenfalls genormte — Fassungen eingesetzt und wiederholter Erwärmung und Abkühlung unterworfen, wobei festgestellt wird, wieviel solcher Erwärmungsperioden ausgehalten werden, ehe Zerstörung eintritt. Smithells hat die Methode für sehr dünne Drähte entwickelt (0,375 mm); eine Übertragung auf stärkere Drähte ist bisher in der Literatur nicht bekanntgeworden. Es ist auch die Zulässigkeit einer Übertragung der an dünnen Drähten gesammelten Erfahrungen auf stärkere Drähte noch durchaus unsicher.

Es bleibt das Ergebnis, daß bis heute ein einwandfreier Laboratoriumsvergleich von metallischen Baustoffen in bezug auf ihre Oxydationsbeständigkeit nicht möglich ist.

b) Beständigkeit gegen die Auflagematerialien.

Was die Beständigkeit gegen die Auflagematerialien betrifft, so ist zunächst festzustellen, daß für Nickel-Kupferlegierungen Unter-

suchungen hierüber noch nicht bekannt geworden sind. Für Chrom-Nickellegierungen ist vor allem Schwefel<sup>1</sup> außerordentlich gefährlich. Im übrigen gelten noch der gleichzeitige Angriff von Eisenoxyden und Kieselsäure als verhängnisvoll. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich bei gemeinsamer Einwirkung von Eisenoxyd und Kieselsäure eine niedrig schmelzende Schlacke bildet, die die schützende Oxydschicht des Chromnickels zerstört<sup>2</sup>.

Die Frage des Angriffs des Auflagematerials auf Chromnickel ist noch sehr wenig geklärt. Denn zu dem chemischen Angriff kommen vielfach noch lokale thermische Überlastungen durch ungleichmäßige Wicklung oder örtlichen Wärmestau. In diesem Zusammenhang muß auf die Arbeiten von Albers-Schönberg und Bichowsky (ZV 28) hingewiesen werden, die einen chemischen Einfluß der Auflagematerialien in einem von ihnen untersuchten Fall, bei dem die äußeren Umstände einen solchen Angriff vermuten ließen, überhaupt ablehnen. Die Arbeit will zeigen, daß nicht jede Zerstörung metallischer Baustoffe, bei der der Laie einen Angriff durch das keramische Material vermuten muß (z. B. wegen Verfärbung der keramischen Masse), durch einen solchen hervorgerufen ist.

Wie vorsichtig man in diesen Fragen urteilen muß, geht aus einem Versuch hervor, den Angriff einer bestimmten Kieselgurart auf Chromnickel zu prüfen: es wurde ein Wendel von etwa 25 mm Ø (außen) in Kieselgur gebettet. In der Mitte lag ein Thermoelement, und die ganze Versuchsanordnung wurde durch Stromdurchgang durch das Wendel erhitzt (Temperatur 1000°). Nach 1500 Stunden brannte das Wendel durch. Die Untersuchung ergab, daß das ganze Wendel praktisch unversehrt war und nur an einer Stelle eine lokale Überhitzung aufgetreten sein muß. Da das Wendel peinlich gleichmäßig gewickelt war, ist die Überhitzung nur durch eine lockere Stopfung an der Fehlerstelle zu erklären. Das Wendel wurde geschweißt und zeigte nach weiteren 1500 Stunden noch keine Spur einer neuen Zerstörung.

Ein systematischer Vergleich bezüglich des Angriffs des Auflagematerials auf das Widerstandsmaterial ist noch schwieriger als ein solcher bezüglich der Beständigkeit des Widerstandsmaterials gegenüber der Ofenatmosphäre.

Endgültig entscheiden kann auch hier lediglich die Praxis. Denn selbst ein Laboratoriumsversuch, der die Betriebsbedingungen nachzuahmen versuchen würde, wie z. B. für Wendel das Einlegen eines Wendels in eine Schamotterille, und Vornahme eines Dauerversuchs, würde nur begrenzten Wert haben, weil zusätzliche Beanspruchungen durch ungleichmäßiges Wickeln, durch örtliche Bedeckung mit

<sup>1</sup> Man findet in Kieselgur oft Schwefel.

<sup>2</sup> Nach freundlicher Mitteilung von Herrn Dr. Rohn.

Schmutz im Lauf des Betriebes u. dgl. m., viel größere Gefahren enthalten können als das Auflagematerial selbst und unter Umständen auch bei verschiedenen Baustoffen verschiedene Folgen haben werden.

Abgesehen von diesen grundsätzlichen Bedenken bietet die laboratoriumsmäßige Nachahmung von Betriebsverhältnissen noch eine weitere große Schwierigkeit. Man denke wieder an ein Wendel. Man will den Angriff verschiedener Auflagematerialien auf ein bestimmtes Widerstandsmaterial oder das Verhalten verschiedener Widerstandsmaterialien gegen ein Auflagematerial prüfen. Wenn irgendeines der Wendel ungleichmäßig gewickelt ist, so daß es an einigen Stellen nicht aufliegt, oder sich nach kurzer Erwärmung infolge innerer Spannungen wirft, so ist nicht mehr die gleiche Berührungsfläche vorhanden und der Versuch wäre verfälscht. Deswegen sollte man derartige Einwirkungsversuche stets so vornehmen, daß das Auflagematerial pulverisiert wird und das zu prüfende Widerstandsmaterial in das Pulver eingebettet wird. Daß man auch dabei sehr vorsichtig zu Werke gehen muß, geht aus dem obenerwähnten Beispiel hervor. Nach sorgfältiger Reinigung des Metalls kann die Prüfung des Angriffs entweder durch chemische Analyse erfolgen, oder durch Wägung, oder durch Messung der Widerstandszunahme. Erfahrungen sind bisher für keine der drei Prüfungsarten veröffentlicht worden. Die Messung der Widerstandszunahme hat die bereits oben erwähnten Nachteile. Für ganz rohe Prüffeldmessungen könnte sie allenfalls gebraucht werden, weil die ganze Anordnung von vornherein nur angenäherte Ergebnisse gewärtigen läßt.

Da die Widerstandszunahme proportional dem Querschnitt, der chemische Angriff dagegen proportional der Oberfläche ist, muß, sollen Versuche mit Drähten verschiedenen Querschnitts verglichen werden, die relative Widerstandszunahme  $\left(\frac{\text{Endwiderstand}}{\text{Anfangswiderstand}}\right)$  mit dem Verhältnis  $\left(\frac{\text{Querschnitt}}{\text{Umfang}}\right)$  multipliziert werden. Auf dieser Grundlage hat z. B. der Verfasser einige Tastversuche mit Erzeugnissen der Johns-Manville-Gesellschaft und der Sterchamolwerke gemacht, die ergaben, daß diese Stoffe mit Chromnickel B der Heraeus-Vakuumschmelze nicht reagiert haben.

Außer den eigentlichen Auflagematerialien können auch sonstige im Ofen vorhandene Stoffe dem Widerstandsmaterial gefährlich werden. Z. B. zeigt die Erfahrung, daß bestimmte Kohlungsmittel Chromnickel angreifen. Einsatzmittel, die nur Kohlenstoff abgeben, schaden nicht, da im Einsatztopf immer genügende Mengen Sauerstoff vorhanden sind, um eine Reduktion des Chromoxyds zu verhindern. Es ist aber nötig, daß die Einsatzkästen vor Benutzung mit einer Oxyd-

schicht überzogen sind, weswegen sich eine Glühung der leeren Töpfe vor Inbetriebnahme empfiehlt<sup>1</sup>.

c) Mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit).

Früher stellte man die Zerreißfestigkeit von Metallen bei hohen Temperaturen in gleicher Weise wie bei Zimmertemperatur durch Zerreißversuche fest. (Literaturzusammenstellung des bis 1922 erschienenen Schrifttums siehe Örtel ZV 29). Es zeigte sich aber, daß die Belastungsdauer bei hohen Temperaturen nicht zu vernachlässigen ist; bei länger dauernder Belastung tritt nämlich ein „Kriechen“ auf, das später von selbst wieder zum Stillstand kommt, z. T. aber sich bis zur Zerstörung fortsetzen kann. Statt die Zerreißfestigkeit anzugeben, muß man also einen Ausdruck suchen, der diese Erscheinungen mit berücksichtigt.

Allen Versuchen, diesen Fragenkomplex zu klären, liegt die Erfahrung zugrunde, daß die Dehngeschwindigkeit (prozentuale Längendehnung/Zeiteinheit) in den ersten Versuchsstunden am größten ist. Die Bestimmung der Dauerstandfestigkeit, wie das Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung (Arbeiten von Pomp, Dahmen, Enders ZV 30 und 31) diejenige Belastung bezeichnet, bei der auch in unendlich langer Zeit eine Dehnung des Materials bei der Temperatur, auf die sich die Angabe bezieht, nicht eintritt, ist außerordentlich langwierig (Lobley und Betts ZV 32). Pomp, Dahmen und Enders (l. c.) schlagen deswegen vor, neben der „wahren“ Dauerstandfestigkeit eine „praktische“, wie folgt, zu definieren: sie gibt die höchste Belastung an, bei der eine bestimmte Dehngeschwindigkeit zu einer bestimmten Zeit nach Versuchsbeginn erreicht wird (wieder für eine bestimmte Temperatur).

Zur Prüfung dieser praktischen Dauerstandfestigkeit wurde eine Dauerbelastungsmaschine umgebaut und es wurden an Stählen Messungen bis 500° durchgeführt. Der Gebrauch dieser Prüfmaschine bei diesen Temperaturen und erst recht bei höheren dürfte im betriebsmäßigen Prüffeld schon wegen der erforderlichen Genauigkeit der Temperaturregelung auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen. Dagegen wird sich wahrscheinlich für den Betrieb eine von Rohn (BV 12) beschriebene Einrichtung zur Bestimmung der „Kriechfestigkeit“ bzw. Kriechgrenze auch für betriebsmäßige Messungen eignen. Die Apparatur ist in Abb. 73 schematisch dargestellt. Der Prüfstab *C* dient gleichzeitig als Temperaturregler, indem er mit Hilfe der am Prüfstab befestigten Schneide *G* die Blattfeder *D* und damit auch den Kontakt *E* betätigt, der damit die Ofenwicklung (über das Relais *H*) aus- und einschaltet.

---

<sup>1</sup> Laut freundlicher Mitteilung von Herrn Dr. Rohn.

Die Heizwicklung befindet sich im Inneren des Ofens *A*. Der Prüfstab wird durch die Last *L* belastet. Die Temperatur im Ofen wird gleichzeitig durch das Thermoelement *J* am Temperaturschreiber *K* registriert.

Bei irgendeiner bestimmten Last wird — solange der Prüfstab unter der Kriechgrenze belastet ist — die Temperatur durch den Prüfstab konstant gehalten. Übersteigt aber die Prüflast die Kriechgrenze, so wird der Stab sich dehnen und dabei den Ofen ausschalten. Die Temperatur wird sinken, bis das Kriechen zum Stillstand kommt, die Belastung also der Kriechgrenze (bei der Temperatur, die dann erreicht ist) entspricht.

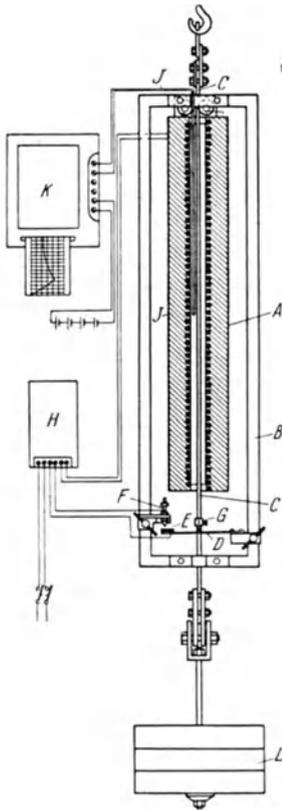


Abb. 73. Apparat zur Bestimmung der Kriechfestigkeit (Rohn BV 12).

Man kann, nach Angabe von Rohn, entweder zunächst mit einer Temperatur arbeiten, die zweifellos über der Kriechgrenze liegt, und sich so von oben langsam der Temperatur für die betreffende Belastung nähern (eine solche Aufnahme siehe Abb. 74) oder man beginnt mit einer Belastung, die unterhalb der möglichen ist und steigert die Temperatur um etwa  $20^{\circ}$  in Abständen von 24 Stunden, bis ein Kriechen beginnt. Der Apparat erfordert keine Wartung und bietet den Vorteil, in verhältnismäßig kurzer Zeit die wahre Kriechgrenze ermitteln zu können. Die beiden beschriebenen Belastungsarten führen zu verschiedenen Werten der Kriechgrenze, so daß man von einer unteren und einer oberen Kriechgrenze sprechen muß. Die unteren Werte ergeben sich bei Erreichen des Beharrungszustandes

von oben, d. h. die höhere Vorbeanspruchung setzt die Leistungsfähigkeit des Materials herab.

Leider sind Materialwerte, die nach diesem Verfahren aufgenommen sind, außer den bei Beschreibung des Apparats (Rohn BV 12) erwähnten, dem Verfasser nicht bekannt geworden.

Aus der Arbeit von Lobley (l. c.) ergibt sich: 1. daß scheinbar eine Abhängigkeit der Kriechgrenze vom Prüfquerschnitt besteht; unterhalb  $1,5 \text{ mm } \varnothing$  sinkt die Kriechgrenze bei konstanter Belastung erheblich.

2. Daß sie für das untersuchte Chromnickel oberhalb  $900^{\circ}$  unter  $35 \text{ g/mm}^2$  liegt.

Es ist üblich, bei der Bemessung von Bauteilen mit gewisser Sicherheit unter den gerade noch zulässigen Werten zu bleiben. Die Einhaltung einer solchen Sicherheit wird bei den hier besprochenen Eigenschaften doppelt erschwert, einmal, weil die Absolutbeträge der Kriechfestigkeit so klein sind, daß die Konstruktionen auch ohne Sicherheit teuer und schwer werden, dann, weil die „Sicherheit“ auch das Auftreten von Übertemperaturen berücksichtigen soll und die Kriechgrenze mit zunehmender Temperatur schnell heruntergeht.

#### d) Unempfindlichkeit gegen raue Behandlung.

Für die Unempfindlichkeit gegen raue Behandlung gibt es selbstverständlich keinen Ausdruck, der die zahlenmäßige Bestimmung erlaubt. Eine gewisse Beurteilung kann auf Grund der Zahlen über mechanische Festigkeit erfolgen. Genau so, wie für den ganzen Ofen, gilt auch für seine Baustoffe, daß sie nur schwer „foolproof“<sup>1</sup> ausgeführt werden können.

Bei den metallischen Konstruktionsteilen spielt die Unempfindlichkeit eine besondere Rolle — man denke z. B. an die Beschickungseinrichtungen. Aber trotzdem wird es kaum gelingen, die Unempfindlichkeit so weit zu treiben, daß man auf die Forderung verzichten könnte, den Elektroofen so sorgfältig wie eine Maschine zu behandeln.

#### e) Möglichst kleine Alterung.

Diese Eigenschaft spielt besonders bei nicht-metallischen Widerständen eine Rolle. Wenn sie dennoch auch hier erwähnt wird, so geschieht das deswegen, weil es nicht ausgeschlossen ist, daß auch bestimmte metallische Baustoffe ihre Eigenschaften unabhängig von chemischen Reaktionen, die von außen an den Stoff herangetragen werden, verändern. Veröffentlichungen hierüber sind dem Verfasser nicht bekannt geworden.

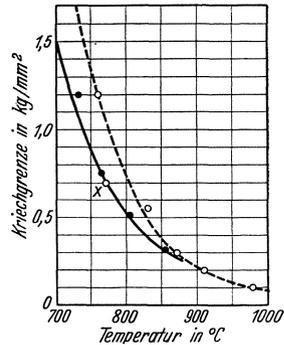


Abb. 74. Kriechgrenzwerte von Chromnickel (Rohr BV 12)

Punkte mit vollen Kreisen entstammen Versuchen, bei denen der Stab erst mit einer höheren Last belastet worden ist, und erst nach einigem Kriechen zur Ruhe kam. — Die Punkte mit leeren Kreisen entstammen Versuchen, bei denen die Last zuerst unter der Kriechgrenze lag; die Temperatur wurde dann gesteigert, bis bei der eingestellten Last das Kriechen aufhörte. Der Prüfstab war bei  $1050^{\circ}$  vorgeglüht.

<sup>1</sup> Ausdruck aus dem amerikanischen Schrifttum, der mit „trottelsicher“ übersetzt werden könnte.

## f) Leichte Bearbeitbarkeit.

Viele von den als hitzebeständig anzusprechenden Metallen sind verhältnismäßig hart und daher schwer bearbeitbar.

Die gebräuchlichen Chrom-Nickellegierungen sind kalt und warm verformbar und lassen sich elektrisch nach dem Widerstands- und nach dem Lichtbogenverfahren schweißen. Bei der Lichtbogenschweißung sind Elektroden aus dem gleichen Material erforderlich wie das zu verschweißende Gut. Ebenso gelingt Autogenschweißung, wobei entweder mit neutraler (Empfehlung von Krupp und Schöller-Bleckmann) oder schwach oxydierender Flamme (Heraeus-Vakuumschmelze) gearbeitet wird.

Die Zerreiβfestigkeit in kaltem Zustand, die für die Verarbeitung von Bedeutung ist, ist für verschiedene Werkstoffe nachstehend zusammengestellt:

Werkstoffbezeichnung	Zusammensetzung	Zerreiβfestigkeit kg/mm <sup>2</sup>	
Heraeus-Vakuumschmelze	{ Mat. B	15 Cr; 61 Ni; 20 Fe; 4 Mn	60
	{ „ B 7 M	15 Cr; 60 Ni; 16 Fe; 2 Mn; 7 Mo	80
	{ „ C <sub>0</sub>	20 Cr; 73,5 Ni; 1,5 Fe; 3 Mn; 2 Mo	75
Friedrich Krupp A.G.	{ Mat. NCT 3	25 Cr; 20 Ni; 55 Fe	68
	{ „ NCT 6	20 Cr; 60 Ni; 20 Fe	65
	{ „ NCT 8	20 Cr; 78 Ni; 2 Fe	63
Schöller-Bleckmann	{ Mat. R 40	23 Cr; 35 Ni; 0,25 C; Rest Fe	{ 60—80
	{ „ R 60	15 Cr; 60 Ni; 0,25 C; Rest Fe	

## g) Wärmeausdehnung.

Diese Eigenschaft spielt besonders bei den für Konstruktionszwecke bestimmten Metallen eine große Rolle. Die Prüfmethode eignen sich grundsätzlich nicht für Betriebsversuche und sind z. B. bei Geiger-Scheel beschrieben (BV 13). Eine Zusammenstellung der Werte für verschiedene Werkstoffe findet sich in der folgenden Zahlentafel:

Werkstoffbezeichnung	Längendehnung %/° C	
Heraeus-Vakuumschmelze	{ Mat. B . . . . .	14 · 10 <sup>-6</sup>
	{ „ B 7 M . . . . .	13 · 10 <sup>-6</sup>
	{ „ C <sub>0</sub> . . . . .	15 · 10 <sup>-6</sup>
Friedrich Krupp A.G.	{ Mat. NCT 3 . . . . .	18,5 · 10 <sup>-6</sup>
	{ „ NCT 6 . . . . .	16,5 · 10 <sup>-6</sup>
	{ „ NCT 8 . . . . .	17,1 · 10 <sup>-6</sup>

Über die Dehnung von Nickel-Eisenlegierungen, die, wie erwähnt, für den Ofenbau ebenfalls von Wichtigkeit sind, siehe Hiemenz (BV 14).

## h) Entsprechender spezifischer Widerstand.

Der elektrische Widerstand ist selbstverständlich nur für die Heizkörper von Bedeutung. Um den Einfluß der Übergangswiderstände zu verringern, empfiehlt es sich, bei der Messung des Widerstandes große Längen zu nehmen. Es ist besonders darauf zu achten, daß die Oxydhaut an der Verbindungsstelle zum Stromanschluß entfernt wird, da sie einen zu hohen Widerstand vortäuschen würde. Wie aus dem Abschnitt „Berechnung“ (S. 68) hervorgeht, ist das erforderliche Gewicht an Widerstandsmaterial um so kleiner, je niedriger der spezifische Widerstand ist. Es wäre daher an sich kleiner spezifischer Widerstand anzustreben. Bei kleinen und mittleren Öfen wird aber bei kleinem spezifischen Widerstand des Heizkörpers der Querschnitt klein und gleichzeitig die unterzubringende Länge an Widerstandsmaterial groß, so daß aus diesem Grund bei kleinen Öfen ein hoher spezifischer Widerstand erwünscht ist. Diese Überlegung (ob kleiner oder großer spezifischer Widerstand günstiger ist) tritt aber, wenn überhaupt, nur bei Öfen mit Temperaturen bis  $600^{\circ}$ , höchstens  $700^{\circ}$  in Erscheinung. Oberhalb dieser Temperatur ist dann die Lebensdauerfrage von so ausschlaggebender Bedeutung, daß dagegen die anderen Fragen in den Hintergrund treten müssen. Der spezifische elektrische Widerstand für eine Reihe gebräuchlicher Ofenbaustoffe ist in Abb. 75, abhängig von der Temperatur, dargestellt. Der sehr starke Anstieg des Widerstandes mit der Temperatur bei Nickel gibt die Möglichkeit, mit diesem Baustoff sogenannte selbstregulierende Geräte zu bauen, die auch bei recht starken Spannungsschwankungen fast konstante Leistungsaufnahme ergeben.

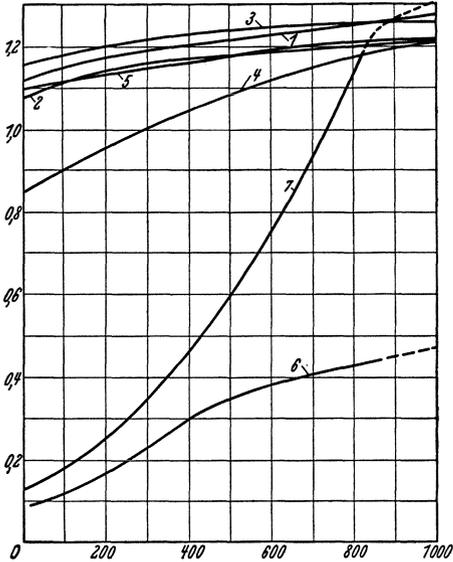


Abb. 75. Spezifischer elektrischer Widerstand [ $\Omega$ ,  $\text{mm}^2/\text{m}$ ] (Ordinate) in Abhängigkeit von der Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] (Abszisse.)

Material: 1 Heraeus B, 2 Krupp NCT 3, 3 Heraeus B 7 M, 4 Krupp NCT 6, 5 Heraeus Co, 6 Nickel-Mangan (Heraeus), 7 Elektrolyteisen.

## i) Temperaturkoeffizient des Widerstandes 0 oder positiv.

Auch diese Eigenschaft ist natürlich nur für die Heizkörper von Bedeutung. Die Werte des Temperaturkoeffizienten gehen — indirekt —

aus der Abb. 75 hervor. Ein negativer Temperaturkoeffizient bedeutet für den Ofen eine Gefährdung insofern, als bei Spannungsschwankungen und dadurch bedingten vorübergehenden Temperaturerhöhungen bei negativem Temperaturkoeffizienten der Ofen „durchgehen“ kann. Ist der Temperaturkoeffizient des Widerstandes positiv, so ist der Ofen mehr oder weniger „selbstregulierend“ (Nickel!). Er kann dann mit kleineren Schaltapparaten ausgeführt werden; denn mit zunehmender Durchwärmung sinkt seine Aufnahme selbsttätig. Wenn der Regler zu arbeiten beginnt, so ist die Aufnahme des Ofens wesentlich kleiner als zu Beginn; was sonst durch komplizierte Schaltungen erst erzwungen werden muß, stellt sich bei stark positivem Temperaturkoeffizienten von selbst ein.

#### k) Sichere Reproduzierbarkeit.

Die Mannigfaltigkeit von Ausführungsformen im Ofenbau und die dadurch bedingte Unsicherheit lassen es doppelt wünschenswert erscheinen, Baustoffe, die sich einmal bewährt haben, stets in gleicher Güte mit den gleichen Eigenschaften erhalten zu können. Bei dem außerordentlichen Einfluß kleiner Änderungen in der Legierung z. B. spielt die Sorgfalt des Herstellers eine große Rolle, und es ist daher besonders zu empfehlen, in der Wahl der Lieferer sehr vorsichtig zu sein. Die Art der Herstellung ist natürlich von größter Bedeutung; so wird z. B. das Vakuumschmelzen durch die Möglichkeit der Fernhaltung verunreinigender Bestandteile eine Gewähr für Innehaltung gewünschter Zusammensetzung einer Legierung geben können.

Als Beleg für die Bedeutung der genauen Innehaltung von bestimmten Zusammensetzungen sei eine Arbeit von Gruber (BV 15) genannt, der über das Verhalten hitzebeständiger Legierungen gegen Schwefel berichtet. Als Maß für den Angriff wurde die Gewichtszunahme der einzelnen Probestücke nach einstündiger Einwirkung von Schwefelwasserstoff bestimmt. Es zeigen sich z. B. folgende Verhältnisse bei 1000°: eine Legierung (20% Fe, 61% Ni, 15% Cr, 4% Mn) ergibt einen Angriff, der gleich 100% sei. Eine sehr ähnliche Legierung (19% Fe, 58% Ni, 14% Cr, 4% Mn, 5% Al) ergibt dann eine Abnutzung von nur 50% und eine Legierung (18% Fe, 56% Ni, 13% Cr, 4% Mn, 9% Al) gibt eine Abnutzung von nur 3%.

Nach verschiedenen Versuchen der Fa. Heraeus scheint auch die Wärmebehandlung, der hitzebeständige Metalle unterworfen werden, einen gewissen Einfluß auf die Werkstoffeigenschaften zu haben. Siehe Rohn (BV 12) bezüglich des Einflusses auf die Kriechgrenze; Hiemenz (BV 14) bezüglich des Einflusses auf die Längendehnung.

## B. Nichtmetallische Widerstände.

Als nichtmetallisches Widerstandsmaterial kommt ausschließlich Siliziumkarbid in Betracht, das meist in Stabform Verwendung findet. Die Anforderungen an dieses Material, die, wie gleich im voraus bemerkt werden muß, in weitestem Maße noch nicht erfüllt werden, sind die gleichen wie für metallische Widerstände (siehe S. 113).

a) und b) Beständigkeit gegen die Ofenatmosphäre und gegen die Auflagematerialien bei Betriebstemperatur.

Nach Angabe der Lieferfirmen greifen in erster Linie Alkalien, Erdalkalien, Eisen-, Kupfer- und Schwermetalloxyde an. Ebenso gehen Silikate und Sulfate mit Siliziumkarbid Verbindungen ein. Über den Angriff durch Gase gehen die Angaben auseinander. Es ist z. B. nicht einheitlich angegeben, ob Kohlenoxyd, Kohlendioxyd sowie Sauerstoff und Luft Siliziumkarbid angreifen.

c) Mechanische Festigkeit.

An Siliziumkarbidwiderständen treten durch die Ausgestaltung der Stromzuführung mechanische Beanspruchungen auf; da, wo die Enden gegenüber dem eigentlichen Heizeil erheblich verstärkt sind, treten bei der geringsten, schwer vermeidbaren Unsymmetrie Biegebungsbeanspruchungen auf; da, wo zwecks einwandfreien Kontakts Anschlußstücke angepreßt werden müssen, können leicht Knickbeanspruchungen in das Material kommen. Zahlenangaben über die Festigkeit von SiC liegen nicht vor; sie würden auch nur geringe Bedeutung haben, weil die auftretenden Beanspruchungen sich auch nicht zahlenmäßig erfassen lassen. Erfahrungsgemäß kann gesagt werden, daß SiC bei Verwendung als Widerstand nahe der Grenze seiner Festigkeit beansprucht wird: den normalen Beanspruchungen ist es wohl ohne weiteres gewachsen, aber geringe Unsymmetrien in der Lagerung können verhängnisvoll werden.

d) Unempfindlichkeit gegen rauhe Behandlung.

Die bisher bekannten Widerstände lassen in dieser Beziehung fast noch alles zu wünschen übrig; man muß also bei Behandlung dieser Widerstände sehr vorsichtig sein.

e) Möglichst kleine Alterung.

Siliziumkarbidwiderstände werden abgesehen von vorzeitigem Bruch meist durch Widerstandszunahme unbrauchbar. Diese Alterung tritt bisweilen über die Länge des einzelnen Stabes gleichmäßig auf, bisweilen sogar ungleichmäßig. Worauf diese Alterungserscheinung zurück-

zuführen ist, ob es sich um Oxydation, eine Kristallisation, einen Brenn-  
vorgang oder um einen Dissoziationsvorgang handelt, ist noch nicht  
geklärt. Welche Ursachen schließlich im Betrieb die Lebensdauer  
praktisch beeinflussen, ist ebenfalls noch nicht bekannt.

Man kann im allgemeinen mit einer Widerstandszunahme

von etwa 30 % bei 1300 bis 1400°	nach 1000 bis 2000 Stunden und
„ „ 15 % „ 900°	„ 1000 „ 2000 „

rechnen. Der Anstieg des Widerstandes auf den vorgenannten Wert  
erfolgt nicht nach einheitlichen Kurven; unter Umständen altert das  
Material in den ersten Betriebsstunden am stärksten, unter Umständen  
ist die Widerstandszunahme auch allmählich.

Um die Stäbe ausnützen zu können, muß daher die Möglichkeit  
bestehen, mit zunehmender Alterung die Anschlußspannung zu er-  
höhen. Wie weit diese Maßnahme getrieben werden kann, ist nicht be-  
kannt; die Meinungen sind geteilt, ob durch dauerndes Nachregu-  
lieren der Spannung die Lebensdauer praktisch über ein gewisses Maß  
hinaus gesteigert werden kann. Unter außerordentlich günstigen Ver-  
hältnissen sollen gegenüber den angegebenen Werten doppelte Werte  
erzielt worden sein, d. h. bei gleicher Temperatur halbe Widerstands-  
zunahme in der Zeiteinheit.

#### f) Leichte Bearbeitbarkeit

spielt bei Siliziumkarbidwiderständen für den Ofenbauer keine Rolle,  
weil die Widerstände einbaufertig vom Lieferer bezogen werden.

#### g) Geringe Wärmeausdehnung

ist gleichfalls wegen der Ausbildung der Verbindung mit der Strom-  
zuführung von Bedeutung. Je geringer die Längendehnung, um so  
sicherer kann der Kontakt gestaltet werden. Andererseits verlangen  
bestimmte Konstruktionen hohe Dehnung ähnlich der von Metallen,  
damit der Heizstab sich in gleicher Weise dehnt wie das metallische  
Anschlußstück.

#### h) Spezifischer Widerstand.

Siliziumkarbid kann bei gleichem Grundmaterial mit den verschieden-  
sten Widerständen ausgeführt werden (siehe S. 74).

#### i) Temperaturkoeffizient des Widerstandes.

Siliziumkarbid hat negativen Temperaturkoeffizienten, doch kann  
durch entsprechende chemische Behandlung dieser Nachteil beseitigt  
werden. Silit (Hersteller Siemens-Plania) ändert seinen Widerstand nach

folgender Gleichung

$$\frac{R}{R_0} = 1 - 7,95 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta + 3,15 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2 * \quad (38)$$

$R_0$  ist der Widerstand in kaltem Zustand.

Globalar (Hersteller Deutsche Carborundumwerke) hat einen leicht positiven Temperaturkoeffizienten.

#### k) Leichte Reproduzierbarkeit.

Diese Eigenschaft muß den Konstrukteur und den Benutzer von Öfen am meisten interessieren. Leider ist die Technik der Siliziumkarbidherstellung auch in dieser Beziehung noch nicht sehr weit vorgeschritten. Für den Kaltwiderstand von Silit wird eine Toleranz von 1000 % \*\* verlangt, der Warmwiderstand wird mit einer Genauigkeit von 10 % garantiert.

Wird ein Stab einmal vorzeitig zerstört, sei es durch Unachtsamkeit der Bedienung, sei es durch Materialfehler, so müssen meist alle Stäbe, mindestens aber die der gleichen Gruppe, ausgewechselt werden (gleichmäßige Temperaturverteilung), denn ein frisch eingesetzter Heizstab wird einen wesentlich kleineren Widerstand haben als die gebrauchten. Man könnte versuchen, durch künstliche Alterung nach dem Widerstand des zerbrochenen Stabes einen neuen herzustellen; dennoch bestünde keine Sicherheit, daß die weitere Alterung nach der gleichen Kurve erfolgt wie die der anderen Stäbe.

### C. Keramische Baustoffe.

Außer Metallen sind für den Ofenbau keramische Baustoffe von wesentlicher Bedeutung, und zwar der Anwendung nach vor allem für drei Gebiete:

1. als Baustoff im engeren Sinne, d. h. zur Begrenzung des Ofens (innen, manchmal auch außen) und an Stellen hoher mechanischer Beanspruchung;
2. als Wärmeschutzstoff;
3. als Mittel der elektrischen Isolierung.

Oft hat ein Material in einem Ofen mehrere der oben genannten Aufgaben zu erfüllen; in der Regel wird man aber für die einzelnen Aufgabengebiete verschiedene Baustoffe benötigen.

\* Lt. freundlicher Auskunft der Siemens-Planawerke.

\*\* Diese Zahl sieht ungünstiger aus als sie ist: Silit hat negativen Temperaturkoeffizienten und nimmt daher in warmen Zustand erheblich mehr Energie auf als in kaltem, so daß sich die Unterschiede mit steigender Temperatur ausgleichen. Da die Stromaufnahme der heißen Widerstände erheblich größer ist als die der kalten, spielen selbst beträchtliche Unterschiede im Kaltwiderstand für die Bemessung der Zuführungsleitungen keine Rolle.

Für die Aufgaben der Gruppe 1 wird in erster Reihe Schamotte und dann Steatit und steatitähnliche Massen verwendet;

für die Aufgaben der Gruppe 2 Kieselgurfabrikate, Glas- und Schlackenwolle, Magnesia, Asbest und Kunststoffe aus diesen Bestandteilen;

für die Aufgaben der Gruppe 3 schließlich in erster Reihe Steatit und steatitähnliche Massen und dann Schamotte. Außerdem wären hier die Isolierstoffe der Elektrotechnik (Bakelitmassen und dgl.) zu erwähnen, die u. a. außen am Ofen Verwendung finden. Diese werden aber in diesem Buch nicht näher besprochen, weil im Zusammenhang mit dem Ofenbau keine ungewöhnlichen Forderungen an diese Werkstoffe gestellt werden; für sie muß auf das einschlägige Schrifttum hingewiesen werden.

## 1. Die wesentlichsten Eigenschaften der keramischen Baustoffe vom Gesichtspunkt des Ofenbaues und die Möglichkeiten ihrer Prüfung und Messung<sup>1</sup>.

### a) Mechanische Eigenschaften.

**α) Festigkeit.** In Betracht kommt in erster Reihe Druckfestigkeit, dann aber auch Zugfestigkeit, letztere namentlich in Zusammenhang mit der Frage der Temperaturwechselbeständigkeit.

Die Werte der Festigkeit sind natürlich abhängig von der Temperatur, bei der die Prüfung vorgenommen wird. Aber außer der Temperatur spielt die Zeit eine sehr erhebliche Rolle (siehe ZV 33, H. Hirsch ZV 34). Es handelt sich hier um die Erscheinungen der sogenannten Druckerweichung, die den im vorhergehenden Abschnitt besprochenen Erscheinungen der Kriechfestigkeit bei Metallen sehr ähnlich sind. Belastet man einen keramischen Körper bei einer bestimmten Temperatur mit einem Gewicht, das erheblich kleiner ist als seine Bruchlast bei dieser Temperatur, so wird u. U. bei einer längeren Prüfdauer eine bleibende Längenänderung eintreten. Die Prüfung erfolgt in einer normalen Maschine zur Druckfestigkeitsbestimmung bei erhöhten Temperaturen. Es sind 3 verschiedene Prüfverfahren bekannt geworden (Hirsch ZV 34, 35):

1. Man steigert langsam bei konstantem Druck die Temperatur und stellt diejenige Temperatur fest, bei der die Zerstörung, also ein schnelles Absacken des Prüfkörpers, beginnt (Din 1064; Abb. 76).

---

<sup>1</sup> Viele der zu den Messungen erforderlichen Apparate liefert das Laboratorium f. Tonindustrie Seeger & Cramer, Berlin NW 21, Dreysestraße 4, das auch Prüfungen ausführt. — Die verschiedenen Anforderungen an keramische Werkstoffe, die Art ihrer Prüfung und reichliche Zahlenangaben finden sich bei Singer BV 16.

2. Man hält die Temperatur konstant und steigert den Druck langsam bis zum Beginn der Zerstörung des Prüfkörpers.

3. Man hält Temperatur und Druck konstant und beobachtet die Längenänderung über eine größere Zeitspanne. Zum Vergleich benötigt man hierbei noch die Feststellung der Längenänderung bei unbelastetem Zustand bei gleichen Temperaturen; die Differenz ergibt den Einfluß der Belastung (Abb. 77).

Die beiden ersten Verfahren ergeben kein einwandfreies Bild, da im Betrieb meist Belastungsbedingungen, wie sie dem Verfahren 3 zugrunde liegen, auftreten und bis heute eine einwandfreie Übertragung der nach Verfahren 1 und 2 gewonnenen Ergebnisse auf die Praxis nicht möglich ist. Das dritte Verfahren, das die Bedingungen des Betriebes nachahmt, hat den Nachteil, daß es einen langwierigen Dauer-

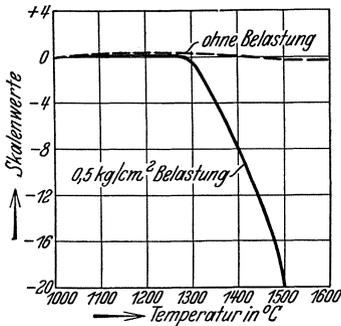


Abb. 76. Druckerweichungsversuch (Superdiamaterial). (Cammerer ZV 51.)

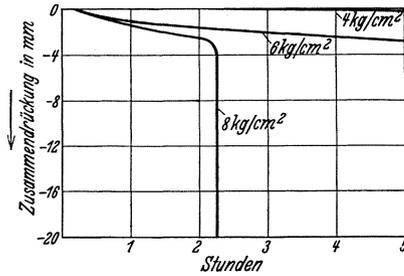


Abb. 77. Druckerweichungsversuch bei konstantem Druck und konstanter Temperatur; Höhe des Prüfkörpers 50 mm.

versuch erfordert. Denn im Gegensatz zu Metallen (siehe S. 119) darf man hier nicht aus der Formänderung der ersten Stunden auf diejenige bei Dauerbetrieb schließen. Dies zeigen die folgenden Zahlen, die vom Laboratorium für Tonindustrie aufgenommen worden sind.

Prüfmateriale: Kieselgurfabrikat, gebrannt (Johns Manville).

Druckfestigkeit kalt und bei 1185° C: 39 kg/cm<sup>2</sup>.

Druckerweichungsversuch siehe Abb. 77.

Eine Ausdehnung dieser Versuche auf die erforderliche Dauer ist z. Z. sehr schwierig, weil dabei ständige Überwachung nötig ist. Trotzdem zeigen die vorstehenden Kurven, daß bei geringen Belastungen bei einer an sich zulässigen Temperatur unter Umständen erst nach mehreren Stunden eine Deformation beginnt. Um dennoch dies Meßverfahren anwenden zu können, wäre es zu empfehlen, die Versuche bei einer Reihe von Temperaturen durchzuführen und auf möglichst lange Zeit auszudehnen. Praktisch wird man dann dem Material nur einen Bruchteil derjenigen Belastung zutrauen dürfen, bei der es auch am Ende der Prüfung noch keine Deformation zeigte.

In den Werbeschriften der keramischen Fabriken und Isolierstofffirmen wird stets die Kaltdruckfestigkeit angegeben; soweit aber überhaupt die Festigkeit eines Stoffes den Ofenkonstrukteur interessiert, kann nur der Wert derjenigen Belastung von Interesse sein, bei dem bei der Arbeitstemperatur auch im Dauerbetrieb ein Zusammensacken nicht eintritt. Man muß hierzu einen zulässigen Wert der Formänderung, die Arbeitstemperatur und die Beobachtungszeit angeben. Es sollte z. B. verlangt werden, daß die Belastung bei einer Temperatur von  $1000^{\circ}$  im Verlauf von  $x$  Stunden keine größere Zusammendrückung ergibt als 1% der Höhe des Prüfkörpers. Jede Festigkeitsberechnung, die sich nur auf die Werte der Kaltdruckfestigkeit stützt, ist notwendigerweise völlig unsicher und wertlos.

Soweit der Verfasser weiß, sind Untersuchungen über das „Zug-erweichen“ bisher noch nicht gemacht worden. Für auf Zug beanspruchte Teile von Beschickungseinrichtungen z. B. wäre eine diesbezügliche Feststellung interessant. Soweit man nach der Zugfestigkeit nur zwecks Beurteilung der Temperaturwechselbeständigkeit fragt, wird die Zug-erweichung keine große Bedeutung haben, weil bei schnellem Temperaturwechsel eine langdauernde Zugbeanspruchung nicht in Betracht kommt.

**β) Härte.** Wohl zu unterscheiden von der Festigkeit ist die Härte eines Baustoffes, die im Ofenbau z. B. dann eine Rolle spielen kann, wenn Abnützerserscheinungen wesentlich werden, wie z. B. bei Verwendung an Transporteinrichtungen. Außerdem bereitet es gewisse Schwierigkeiten, ein weiches Material einzubauen. Als Maßzahl der Härte kann die Mohr'sche Härteskala dienen. Diese ist bekanntlich roh und hat außerdem noch gewisse Schwierigkeiten bei der Anwendung auf keramische Baustoffe, bei denen unter Umständen durch ihre Porosität kein einwandfreies Bild erhalten wird. Eine weitere Prüfmöglichkeit auf Härte bietet die Kugeldruckprobe (ZV 36).

**γ) Die Kantenbrüchigkeit** eines Materials äußert sich durch Absplittern von Kanten bei verhältnismäßig kleinen, schlagartigen Beanspruchungen. Man kann sie etwa proportional der Schlagbiegefestigkeit setzen. Zur Prüfung wird ein runder Prüfstab dem Schlag eines Pendelhammers ausgesetzt. Die zur Zertrümmerung des keramischen Körpers verbrauchte Schlagarbeit wird gemessen und danach die Schlagbiegefestigkeit/cm<sup>2</sup> berechnet. Vergleichbar sind nur die Resultate von Stäben etwa gleichen Durchmessers und genau gleicher Länge. Um die Schlagbiegefestigkeit auch in Abhängigkeit von der Temperatur zu bestimmen, könnte man einen solchen Versuch auch ohne weiteres in einem Ofen aufbauen, doch sind derartige Anordnungen vermutlich wegen der experimentellen Schwierigkeiten bisher nicht bekannt geworden.

d) **Abrieb.** Viele keramische Teile in Öfen sind schleifender Abnutzung unterworfen, und zwar nicht nur die Teile von Beschickungseinrichtungen, sondern auch Teile der Ofenwand, die infolge Ausdehnung und Zusammenziehung aneinander reiben. Ofensohle und dgl. werden häufig durch das Darüberschieben des Gutes durch Abrieb abgenutzt. Der Abrieb wird im allgemeinen mit der Größe der Poren, also mit der Grobheit des Gefüges zunehmen. Zur Prüfung bedient man sich entweder der Böhmeschen Schleifmaschine, bei der der Prüfkörper bei Anwendung konstanten Druckes unter Beifügung von Schmirgel auf einer Stahlscheibe mit bestimmter Geschwindigkeit zerrieben wird. Die Gewichtsabnahme nach einer vorgeschriebenen Zeit wird bestimmt. Oder man kann einen unter vorgeschriebenem Druck stehenden Sandstrahl eine bestimmte Zeit auf einen Prüfkörper genormter Abmessungen einwirken lassen und ebenfalls den Gewichtsverlust in  $g/cm^2$  bestimmen. Schließlich kann man den Prüfkörper trommeln (ZV 36; Lunge-Berl BV 17).

ε) **Raumgewicht.** Es ist bekannt, daß die meisten keramischen Baustoffe (im weitesten Sinne verstanden) mehr oder weniger porös sind. Die Größe und Form der Poren hat auf das Verhalten der Körper den allergrößten Einfluß. Ein Teil der Poren steht durch den ganzen Körper hindurch in Verbindung miteinander, während ein Teil abgeschlossene Hohlräume bildet. Man versteht unter Porosität das Verhältnis des Inhalts der Poren zu dem des ganzen umschlossenen Raumes, und man unterscheidet zwischen wahrer und scheinbarer Porosität, je nachdem ob alle oder nur die offenen Poren in Rechnung gesetzt werden. Man bezeichnet als spezifisches Gewicht eines keramischen Stoffes das Gewicht seiner Raumeinheit. Zur Bestimmung des spezifischen Gewichts (und damit der Porosität) muß man daher peinlichst alle Luftreste entfernen, muß also die Probe sehr fein mahlen, die Luft durch Wasser verdrängen und die Probe dann trocknen, eine Arbeit, die exakt nur im Laboratorium vorgenommen werden kann.

Im Gegensatz zum spezifischen Gewicht bezeichnet man als Raumgewicht das Gewicht der Raumeinheit eines fertigen Prüfkörpers; dieses Gewicht schwankt natürlich sehr stark mit der Porosität und kann durch Wägung einfach ermittelt werden.

Der Absolutwert des spezifischen Gewichts verschiedener keramischer Stoffe schwankt nur in sehr geringen Grenzen: etwa von 2000 bis 4000  $kg/m^3$ , während das Raumgewicht etwa zwischen 250 und 3500  $kg/m^3$  liegt.

Im Zusammenhang mit der scheinbaren Porosität steht das sogenannte Wasseraufnahmevermögen, das uns aber hier nicht näher interessiert, und dann die Gasdurchlässigkeit, auf die wir weiter unten noch zu sprechen kommen werden. Auf alle diese Eigenschaften hat nicht nur die Porosität, sondern auch die Absolutgröße der einzelnen Poren

einen Einfluß (Cammerer BV 18). Sogenannte dicht gebrannte Massen verhalten sich bei gleicher Porosität (gleiches Raumgewicht) erheblich anders als porös gebrannte.

Bei geschütteten oder geschichteten Stoffen verliert der Begriff des Raumgewichts seinen Sinn, sofern man nicht den Stopfungsgrad angibt; denn je nachdem, wie man diese Stoffe preßt, verändert sich das Raumgewicht.

§) **Gasdurchlässigkeit.** Für alle Öfen, bei denen im Inneren eine bestimmte Atmosphäre künstlich aufrechterhalten wird, spielt die Gasdurchlässigkeit für die als Ofeninnenwand verwendeten Baustoffe eine gewisse Rolle. Man drückt sie aus in  $\text{cm}^3$  Luft/ $\text{cm}^2$  Prüfkörperoberfläche, die in einer Stunde bei einem Luftdruck entsprechend 10 cm Wassersäule durch einen Prüfkörper bestimmter Dicke gehen (z. B. 1 cm; H. Hirsch ZV 37).

η) **Die Hygroskopizität** keramischer Körper ist eng mit der Porosität verknüpft. Denn die offenen Poren, die zur Bestimmung der scheinbaren Porosität dienen, können sich mit Wasser vollsaugen. Man bezeichnet ihr Volumen daher auch mit Wasseraufnahmevermögen. Die Bestimmung erfolgt etwa durch Einlegen der Probe in Wasser und Bestimmung der endgültig aufgenommenen Wassermenge.

θ) **Die Maßhaltigkeit.** Die Maßhaltigkeit keramischer Baustoffe ist meist erheblich geringer als diejenige metallischer Baustoffe, und zwar infolge der sogenannten „Schwindung“ (Troeken- und Brennschwindung). Die Maßhaltigkeit ist von sehr großer Bedeutung, weil große Toleranzen beim Einbau eine Nacharbeit notwendig machen. Da enge Mauerfugen wichtig sind, muß dieses Nacharbeiten mit Maschinen erfolgen — meistens durch Schleifen.

Dieses Schleifen im Werkstatttraum vorzunehmen, empfiehlt sich nicht, da durch den unvermeidlichen Staub die dort befindlichen Maschinen leiden würden; man sollte also die Stoffe möglichst so herstellen, daß keine Nacharbeit erforderlich ist.

ι) **Erschütterungsfestigkeit.** Diese Eigenschaft spielt vor allem bei pulver- oder faserförmigen Stoffen eine Rolle, die für Isolierzwecke Verwendung finden. Die mehr oder weniger fest eingestampften Stoffe sacken infolge Erschütterung in sich zusammen und es entstehen Hohlräume, die die Isolierwirkung in weitestem Maße zunichte machen.

Zur Prüfung auf Erschütterungsfestigkeit hat der Verfasser einen metallischen Hohlquader verwendet, in dessen Wände das zu prüfende Material eingefüllt wurde. Durch einen motorgetriebenen Exzenter wurde der Kasten geschüttelt, indem er aus einer bestimmten, geringen (jedoch an sich einstellbaren) Höhe herabfiel (Fallhöhe etwa 5 mm). Je kleiner das auf den gegebenen Raum eingebrachte Gewicht war, nach um so kürzerer Zeit trat das Sacken ein, das durch Öffnen des Kasten-

deckels festgestellt wurde. Oberhalb einer bestimmten Stopfdichte wurde ein Sacken überhaupt nicht mehr beobachtet.

Die Vorschrift eines bestimmten Füllgewichts auf einen gegebenen Raum ist allein nicht ausreichend; es ist noch ganz besonderer Wert auf Gleichmäßigkeit des Stopfens zu legen, und es muß ausdrücklich gesagt werden, daß einwandfreies Stopfen, namentlich bei leichtem Kieselgurpulver, auf so große Schwierigkeiten stößt, daß man oft besser leitendes, schwereres Pulver verwendet, weil das leichte sich zu schwer stopfen läßt.

#### b) Wärmetechnische Eigenschaften.

**a) Wärmeleitfähigkeit.** Die Bedeutung der Wärmeleitfähigkeit geht aus dem Abschnitt „Berechnung“ klar hervor. Die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Baustoffe ist im allgemeinen gut bekannt. Es muß nur zur Beurteilung auf folgende Punkte hingewiesen werden:

1. Es ist stets zu unterscheiden, ob Angaben über Wärmeleitfähigkeit sich auf die Mitteltemperatur beziehen oder auf die Temperatur an den heißesten Flächen. Die letztgenannte Art der Angabe, die man namentlich im ausländischen Schrifttum häufig findet, ist irreführend, da die mittlere Temperatur bei gegebener Innentemperatur von der Schichtstärke abhängt.

2. Die Wärmeleitfähigkeit ist stark von der Temperatur abhängig.

3. Die noch häufig verbreitete Ansicht, daß ein Stoff um so besser isoliert, je leichter er ist, trifft nicht immer zu und kann zu schweren Enttäuschungen führen. Selbst bei gleichem Grundstoff hängt die Wärmeleitfähigkeit noch von der Art der Verarbeitung und namentlich von der Porengröße ab. Im allgemeinen kann man sagen, daß bei gleichem Grundstoff die Wärmeleitfähigkeit um so niedriger ist, je feiner verteilt die Poren sind (Cammerer BV 18).

Eine Prüfung der Wärmeleitfähigkeit gehört mit zu den schwierigsten Messungen der Wärmetechnik und kann in einem Betriebsprüffeld kaum genau ausgeführt werden. Geeignete Apparaturen finden sich bei Cammerer BV 7, Raisch ZV 38, Schmidt und Gehlhoff ZV 39 beschrieben. Die Messung selbst dauert meist mehrere Tage und erfordert während der Versuchsdauer gleichmäßige Raumtemperatur. Viel wichtiger als die Feststellung der genauen Wärmeleitfähigkeit ist aber meist der Vergleich der Wärmeleitfähigkeit mehrerer Materialien. Derartige Vergleiche kann man bequem in einer Art Normalofen ausführen. Pirani und Wangenheim schlagen hierzu zylindrische Öfen vor (ZV 40), während der Verfasser entsprechende Messungen an einem quaderförmigen Ofen ausführte und so zum Vergleich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe stets einwandfreie Unterlagen erhielt. Nimmt man ein Vergleichsmaterial, dessen Wärmeleitfähigkeit von einer

wissenschaftlichen Stelle bestimmt wurde, so kann man durch Zurückrechnen auch mit ausreichender Genauigkeit die Wärmeleitfähigkeit anderer Stoffe bestimmen, indem man die Leerverluste des Normalofens bei Isolierung mit Normalmaterial und bei Isolierung mit dem zu vergleichenden Material gegenüberstellt. Der Vergleich von Wärmeschutzstoffen auch in bezug auf Wärmeleitfähigkeit muß die Beschaffungskosten berücksichtigen. Dies führt dazu, daß man theoretisch für jeden Ofen das wirtschaftlichste Material durch langwierige Berechnung ermitteln müßte. Um die hierzu erforderlichen umfangreichen Rechnungen zu ersparen, kann man (Paschkis ZV 41) mit guter Annäherung dasjenige Material, dessen Produkt  $p\lambda^2 \dots p\lambda^3$  am niedrigsten ist, als das wirtschaftlichste ansprechen; hierbei ist  $p$  der Preis für das Material in  $\mathcal{M}/\text{m}^3$ ,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit.

**$\beta$ ) Spezifische Wärme.** Die Bestimmung der spezifischen Wärme wird sich ebenso wie die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nur selten betriebsmäßig durchführen lassen. Die genaue Ermittlung erfolgt z. B. mit Kalorimeter (Scheel in BV 16, S. 429).

**$\gamma$ ) Wärmeausdehnung.** Die meisten der in Betracht kommenden Stoffe dehnen sich bei unbelasteter Erwärmung aus, während ungenügend gebrannte Stoffe bei neuerlicher Erwärmung oft nachschwinden. Es ist erforderlich, die Ausdehnungskurve zu kennen. Man erhält sie etwa durch Erwärmung der Probe im Kohlegrießofen und Bestimmung der Länge durch Anvisieren.

**$\delta$ ) Die Feuerfestigkeit.** Die Feuerfestigkeit eines Materials wird durch die Nummer des Segerkegels bezeichnet, der gleichzeitig mit einem kegelförmigen Probekörper aus dem zu prüfenden Material umsinkt (siehe Din 1061 und 1063). Man glaubte früher, der Feuerfestigkeit große Bedeutung zumessen zu sollen, doch tritt diese gegenüber den anderen Eigenschaften ebenso stark zurück wie bei den metallischen Baustoffen etwa die Frage nach dem Schmelzpunkt. Denn meist wird ein Baustoff schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen, als durch die Feuerfestigkeit angegeben, für die Zwecke des Ofenbaues unverwendbar.

**$\epsilon$ ) Die Temperaturwechselbeständigkeit<sup>1</sup>** ist eine der wichtigsten Eigenschaften eines Materials, das im Ofenbau Verwendung finden soll. Tritt doch bei jedem Anheizen ein Temperaturwechsel auf, den man möglichst schnell verlaufen lassen will. Bei jeder Öffnung der Ofentüren dringt in den Ofen ein kalter Luftstrom, der einen Temperaturwechsel mit sich bringt. Je schroffer der Temperaturwechsel, um so größer ist die Gefahr einer Zerstörung des Baustoffes. Diese tritt dadurch ein, daß benachbarte Schichten des Materials wegen der dort herrschenden Temperaturunterschiede sich verschieden ausdehnen, und die Zug-

<sup>1</sup> Der Verfasser verdankt wertvollste Mitteilungen zu diesem Abschnitt den Herren Dr. Albers-Schönberg und Dipl.-Ing. Bichowsky.

festigkeit den so entstehenden Spannungen nicht gewachsen ist. Grobporöse Massen sind verhältnismäßig leicht temperaturwechselbeständig zu machen, denn auftretende Zugspannungen können sich z. T. durch kleine Risse, die an einer Pore enden, im Inneren des Körpers ausgleichen, während bei dichten Massen eine derartige innere Entspannung ausgeschlossen ist. Dennoch kann man auch dichte Massen in weitem Maße temperaturwechselbeständig machen; dies gelingt dann, wenn entweder die die Zerstörung fördernden Kräfte klein sind (wenn nämlich die Ausdehnung klein ist), oder sie gelingt, wenn die der Zerstörung entgegenwirkende Zugfestigkeit groß ist. Eine willkürliche Steigerung der letzteren ist z. Z. unmöglich, während eine Verminderung der Ausdehnung in vielen Fällen gelingt. Nach dem Vorstehenden wird eine Zerstörung vor allem auch bei jenen Temperaturen zu befürchten sein, bei denen der betreffende Körper eine von einer sprunghaften Änderung des Ausdehnungskoeffizienten begleitete Umwandlung erfährt.

Die auftretenden Spannungen, die von den Temperaturunterschieden abhängen, werden weiter von der Materialstärke und von der Temperaturleitfähigkeit bedingt. Hierbei spielt selbstverständlich nicht die mittlere Stärke, sondern die Stärke an den dicksten Stellen die ausschlaggebende Rolle, d. h. aber, daß die Form des Körpers auf die Temperaturwechselbeständigkeit einen sehr großen Einfluß ausübt. Durch geeignete Formgebung kann man die Temperaturwechselbeständigkeit stark beeinflussen, z. B. durch Vorsehen von Entspannungsschlitzten. Die Temperaturleitfähigkeit ist dafür maßgebend, wie groß der Temperaturunterschied bei gegebener Temperaturwechselgeschwindigkeit wird. Es ist deswegen auch vorgeschlagen worden (Norton ZV 42), als Maß der Temperaturwechselempfindlichkeit (Gegensatz von Temperaturwechselbeständigkeit!) folgenden Ausdruck festzulegen<sup>1</sup>:

$$\text{Temperaturwechselempfindlichkeit} = \frac{\text{Wärmeausdehnungskoeffizient}}{\text{Temperaturleitfähigkeit} \cdot \text{max. Torsionsvermögen}}$$

Nach Versuchen von Norton ergibt die Zahl der Abschreckungen, in Abhängigkeit des vorgenannten Ausdrucks aufgetragen, eine hyperbelähnliche Kurve. Allgemein anerkannt ist jedoch dieser Ausdruck als Maßzahl der Temperaturwechselbeständigkeit nicht.

Da eine Maßzahl für die Temperaturwechselbeständigkeit nicht festliegt, können Versuche nur Vergleichswerte ergeben, und es empfiehlt sich, die Versuche an Prüfkörpern ähnlicher Form, wie die zum Gebrauch bestimmte, vorzunehmen; man wird sonst bei der Übertragung auf die Praxis sehr vorsichtig zu Werk gehen müssen. Die Dinorm, Din 1068, sieht zwei Prüfmethode vor: das Normalsteinverfahren und das Zylinderverfahren.

<sup>1</sup> Referat bei Philips ZV 43, wo auch ausführliche Literaturangaben zu finden sind.

Beim Normalsteinverfahren werden drei Normalsteine an einem Ende in einen Ofen gestellt und auf Temperatur gebracht. Nach Erreichen der Prüftemperatur von  $950^{\circ}$  wird der Ofen eine Stunde lang auf gleicher Temperatur gehalten, die Proben dann 3 min lang in fließendem Wasser abgeschreckt; sie werden nach dem Abdampfen an der Luft neuerlich erhitzt usw. Die Prüfung gilt als beendet, wenn mindestens 50% der dem steten Temperaturwechsel ausgesetzten Enden abgeplatzt sind. Bei der Normung ist auf den Einfluß der Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs sowie die Schnelligkeit der Abkühlung (Wassertemperatur und Abkühlgeschwindigkeit sind nicht gegeben) keine Rücksicht genommen. Will man dieses Prüfverfahren zum Vergleich verschiedener Werkstoffe verwenden, wird man gut daran tun, von sich aus den Temperaturanstieg des Ofens sowie die anderen erwähnten Punkte festzulegen.

Das Zylinderverfahren verwendet als Prüfkörper Vollzylinder genormter Abmessungen, die voll erwärmt werden, im Gegensatz zu den Normalsteinen, die nur an einem Ende erhitzt werden. Die Erwärmungszeit ist auf 15 min, die Abschreckzeit auf 3 min beschränkt. (Während dieser Zeit wird aber bei vielen Körpern ein Temperatenausgleich nicht erzielt; es empfiehlt sich daher, längere Zeiten zu wählen.) Die Zahl der Abschreckungen bis zur Zerstörung des Körpers wird gezählt und ist bei gleichem Material höher als die nach dem Normalsteinverfahren ermittelte.

Der Verfasser hat wiederholt Versuche ähnlich denen nach dem Zylinderverfahren ausgeführt, wobei allerdings statt der Vollzylinder Hohlzylinder verwendet wurden. Diese wurden an dünnen Drähten aufgehängt und mit diesen Drähten aus dem Ofen entfernt, um an der Luft vollkommen zu erkalten. Verzichtet man auf diese Aufhängung, so kann schon durch das zur Entnahme dienende Werkzeug eine vorzeitige Abschreckung eintreten und eine mechanische Beschädigung hervorgerufen werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß Körperform und Prüfbedingungen möglichst dem praktischen Betrieb entsprechen sollen. Man soll z. B. auch das Abschreckmittel (z. B. Luft oder Wasser) dem Betrieb entsprechend wählen, weil die Qualitätsreihenfolge bei diesen beiden Abschreckmitteln erheblich voneinander abweichen kann.

### c) Chemische Eigenschaften.

**$\alpha$ ) Reaktion mit dem Widerstandsmaterial vgl. S. 116.**

**$\beta$ ) Der Angriff durch Schlacke** spielt bei den hier behandelten Öfen eine verhältnismäßig kleine Rolle, dagegen ist für Bäder (Salzbadöfen) der durch Salze von sehr großer Bedeutung.

Die Prüfung auf einen eventuellen Angriff durch Salze kann in ähnlicher Weise wie die auf Angriff durch Schlacke derart erfolgen, daß man einen Normalstein ausbohrt und in die Bohrung flüssiges Salz füllt bzw. in der Bohrung Salz schmilzt. Nach einer gewissen Einwirkungszeit wird der Stein in der Mitte der Bohrung durchgesägt und festgestellt, wie groß der Inhalt derjenigen Fläche in  $\text{cm}^2$  ist, die mit dem Salz eine Reaktion eingegangen ist.

#### d) Elektrische Eigenschaften.

**$\alpha$ ) Isolationsfähigkeit.** Die im vorliegenden Abschnitt besprochenen Stoffe sind durchwegs schlechte elektrische Leiter<sup>1</sup>. Die Isolationsfähigkeit wird meist ausgedrückt durch den Isolationswiderstand, bei dessen Messung natürlich darauf zu achten ist, daß die Widerstände der Prüfinstrumente dem zu prüfenden Widerstand entsprechen. Abgesehen von den durch die Instrumentenwahl bedingten Schwierigkeiten ist beim Aufbau der Prüfanordnung für eine Messung bei hohen Temperaturen besonderes Augenmerk auf die Stromzufuhr zu lenken. Die Verbindung der Elektrode mit dem Prüfstück muß so innig sein, daß keine nennenswerten Übergangswiderstände auftreten. Ein vorheriges Festziehen der Kontakte (etwa in Form federnder Klemmen) führt nicht zum Ziele, da Klemme und Prüfstück in der Regel verschiedene Längendehnung haben; diese bewirkt bei hohen Temperaturen eine Lockerung der bei tiefen Temperaturen gut anliegenden Verbindung. Man versucht die richtige Anpressung z. B. dadurch zu erzielen, daß man die eine Elektrode sehr schwer ausführt und mit ihrer Hilfe den Prüfkörper noch auf die darunter liegende zweite Elektrode aufpreßt.

**$\beta$ ) Elektrolyse.** Das keramische Material eines Ofens steht meist unter einem Potentialunterschied, herrührend von der elektrischen Ausrüstung des Ofens, so daß eine Zerstörung durch Elektrolyse nicht ausgeschlossen erscheint. Bestimmte Angaben darüber sind jedoch dem Verfasser nicht bekannt geworden.

## 2. Besprechung der einzelnen Baustoffe.

Im folgenden sollen die einzelnen keramischen Baustoffe besprochen werden, soweit sie für den Elektroofenbau von Bedeutung sind. Wir müssen hierbei nach Anwendungsgebieten unterscheiden und werden daher der Reihe nach besprechen:

- a) feuerfeste Steine;
- b) halbfestfeuerfeste Steine und Wärmeschutzstoffe;
- c) elektrische Isolier- und Konstruktionsmaterialien.

---

<sup>1</sup> Ihr Leitvermögen nimmt allerdings mit wachsender Temperatur beträchtlich zu.

## a) Feuerfeste Steine.

Es kommt hauptsächlich die Verwendung von Schamotte, in besonderen Fällen größerer Beanspruchung die Verwendung von aluminiumoxydreicherer Produkten wie Sillimanit oder Mullit in Betracht. Im folgenden werden die Eigenschaften zweier Schamottematerialien und des „DTS Edelmullit“ genannt.

Zahlentafel 5.

	Maxial (Schamotte- material von Scheidhauer & Gießing)	Protos (Schamotte- material der Schamotte- fabrik Freienwalde)	DTS- Edelmullit (Deutsche Ton- und Steinzeug- werke)
Kaltdruckfestigkeit [kg/cm <sup>2</sup> ] . . . . .	200—250	130	750—1500
Druckerweichung <sup>1</sup> [°C] $\left\{ \begin{array}{l} T_a \dots\dots \\ T_{40} \dots\dots \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1405 \\ 1650 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1470 \\ 1625 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1600 \\ 1800 \end{array} \right.$
Spez. Gewicht [kg/dm <sup>3</sup> ] . . . . .	2,6	2,6	—
Raumgewicht [kg/dm <sup>3</sup> ] . . . . .	1,95	1,87	2,08—2,4
Porosität (Volumprozent) . . . . .	25	28	—
Maßhaltigkeit [%] . . . . .	± 0,75	± 2	—
Wasseraufnahme Gewichtsprozent . . . . .	11	13	12,8—2,0
Wärmeleitfähigkeit <sup>2</sup> $\left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}} \right]$ . . . . .	s. Abb. 78	—	—
Spez. Wärme $\left[ \frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C kg}} \right]$ . . . . .	s. Abb. 78	Man rechnet im allgemeinen mit 0,2—0,22 kcal/°C kg.	
Feuerfestigkeit Segerkegel und °C . . . . .	33—34 (1730—1750°)	34 (1750°)	—
Temperaturwechselbeständigk. Zahl der überstandenen Abschreckungen	70	40	60—2 je nach Raumgewicht

b) Halbfeuerfeste Steine und Wärmeschutzstoffe<sup>3, 4</sup>.

a) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von etwa 400 bis 600°. In dem genannten Temperaturbereich finden Asbest- und Magne-

<sup>1</sup> Die Angaben über Druckerweichung sind so zu verstehen, daß einmal die Temperatur der beginnenden Erweichung bestimmt wird ( $T_a$ ), und dann die Temperatur, bei der die Zusammendrückung 40% erreicht hat ( $T_{40}$ ).

<sup>2</sup> Die Wärmeleitfähigkeit feuerfester Steine ist in weitestem Maß von der Struktur derselben abhängig. Diesbezügliche Untersuchungen sind von Esser, Salmang und Schmidt-Ernsthausen durchgeführt (BV 19), siehe auch E. Schmidt (BV 20).

<sup>3</sup> Steinhoff (ZV 44) gibt eine ausgezeichnete Übersicht über Vorkommen, Herstellung und Verarbeitung von Kieselgur, mit besonderer Berücksichtigung der feuerfesten Leichtsteine. Literatur ist reichlich angegeben.

<sup>4</sup> Die auf den folgenden Seiten erwähnten nichtmetallischen Werkstoffe werden von folgenden Lieferanten vertrieben:

Lüneburger Isoliermittelwerke, Lüneburg: 85% Magnesiaplaten, Diamagplatten.

sia-Materialien Verwendung. Daneben spielt als zu stopfendes Material Schlackenwolle eine große und Glaswolle eine gewisse Rolle. Schließlich seien hier die Metallluftschichtisolierungen<sup>1</sup> erwähnt, die allerdings für Zwecke des Ofenbaues sich noch nicht in nennenswertem Maße einzuführen vermochten, wohl in erster Linie wegen der im Verhältnis zu sonstigen Isolationsarbeiten schwierigen Montage. Der große Vorteil dieser Isolierungen — ihre geringe Speicher-

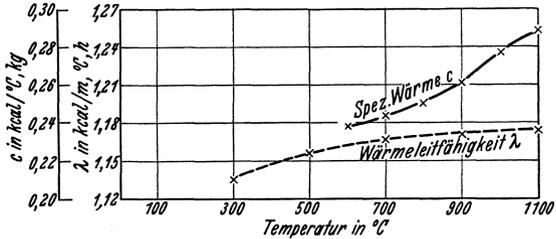


Abb. 78. Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmen von Schamotte (Maxial I) nach Angaben von Scheidhauer & Gießing.

wirkung — kommt mit Rücksicht auf die Masse der Ofenwand, der Beschickungseinrichtungen, des Gutes usw. nicht im gleichen Maß zur Geltung, wie etwa bei der Isolierung von Rohren. Über die Metall-

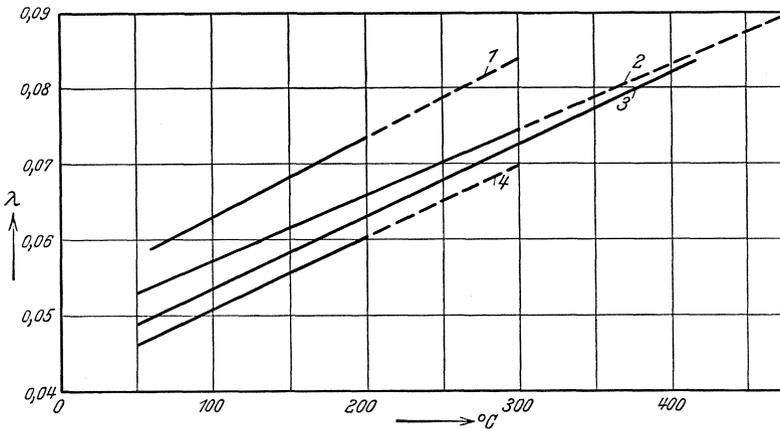


Abb. 79. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [kcal/m, °C, h] von Wärmeschutzstoffen mit einer Gebrauchsgrenze bis 600° (nach Angabe der Lieferer).

1 Lambdamaterial, 2 Diamagplatten, 3 Schlackenwolle, 4 Magnesiaplaten.

luftschichtisolierungen haben E. Schmidt (ZV 45) und Cammerer (ZV 46 und BV 7) berichtet.

Sterchamolwerke, G. m. b. H., Dortmund: Cristobalitsteine, Superiorsteine, Feuerleichtstein, Sterchamol 20, 21, 22, 23, Sterchamolhinterfüllmasse IIIa.

Vereinigte Korkindustrie A.G., Berlin-Wilmersdorf, Badensche Str. 29: Superdia, Kieselgurhartbrand, Dia 138, Standard, Kieselgur 8 R, Kieselgur 91, Perenit, Lambda.

Johns Manville: Superbrick, C 22, Sil-O-Cel. Brick, Sil-O-Cel Beton, Sil-O-Cel Pulver.

<sup>1</sup> Aluminiumfolie-Isolierungen: Alfol der Alfol-Dyckerhoff G.m.b.H., Hannover und Reflex-Isolierung der Vereinigten Korkindustrie A.G., Berlin.

Die Festigkeit der Niedertemperaturisolerstoffe ist gering. Dies ist aber von nicht allzu großer Bedeutung, da das Gerippe der Öfen vielfach aus Stahl hergestellt werden kann. Unter Umständen kann man die Ofeninnenwand für sich allein aufrichten. Die Isolierung — namentlich aus Isolierplatten — vermag sich praktisch stets selbst zu tragen, so daß sie nur auf ihrer Außenseite durch einen Bewurf entsprechend widerstandsfähig gemacht werden muß. Da die Außenwände stets nur geringe Temperaturen annehmen, bietet die Herstellung eines haltbaren Bewurfs keine Schwierigkeiten.

Die nachfolgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über einige gebräuchliche Isoliermittel dieser Gruppe.

Zahlentafel 6.

Werkstoff	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Höchste Gebrauchstemperatur [° C]	Spez. Wärme je Raumeinheit [kcal/m <sup>3</sup> , ° C]	Maßhaltigkeit [%]
85% Magnesiaplaten . . .	140	300	336	2
Diamagplatten. . . . .	250	500	600	2
Perenitmaterial . . . . .	260	500	572	—
Lambdamaterial . . . . .	300	300	660	—
Schlackenwolle. . . . .	260	*	572	—

Die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Stoffe ist aus der Abb. 79 zu entnehmen. Die spezifische Wärme wird im allgemeinen mit 0,22 bis 0,24 anzunehmen sein.

Zur weiteren Erläuterung sei erwähnt, daß Lambda ein Asbest-Gipsgemisch ist und Diamag ein Magnesiafabrikat. Alle plattenartigen Stoffe — also alle genannten Isoliermittel außer Schlackenwolle, die zu stopfen ist, sind so weich, daß sie mit dem Messer geschnitten werden können. Auf diese Weise ist die Verarbeitung sehr leicht. Man könnte noch daran denken, die naß anzusetzenden Isoliermischungen, wie sie namentlich zur Rohrisolierung verwendet werden, auch im Ofenbau anzuwenden, doch sieht der Verfasser hierin keine Vorteile gegenüber den hier beschriebenen Isolierstoffen mit der verhältnismäßig einfachen Aufbringung.

**β) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von etwa 800 bis 1000<sup>0</sup>.** In diesem Bereich finden sich die meisten Kieselgurfabrikate,

\* Die Gebrauchsgrenze von Schlackenwolle ist umstritten, hängt außerordentlich stark auch von der Sorgfalt der Herstellung ab. Bei der Bestimmung der Gebrauchsgrenze ist nicht nur die Haltbarkeit der Schlackenwolle selbst zu bedenken, sondern auch die Tatsache, daß viele Schlackenwollearten bei höheren Temperaturen Metalle anzugreifen imstande sind und auch u. U. durch Absonderung von Gasen Zerstörungen hervorrufen. Der Nachteil von Schlackenwolle ist weiter ihre besonders starke Hygroskopizität, ihr sehr großer Vorteil die leichte und — gegenüber Kieselgurpulver — saubere Montage. Über die Herstellung von Schlackenwolle berichtet Guttman (ZV 47), über die Verwendung Bohlander (ZV 48) und insbesondere unter Berücksichtigung der hohen Temperaturen Günther (ZV 49).

und zwar sowohl Steine als auch Pulver. Für die in diese Gruppe gehörigen Sterchamolfabrikate ist die Belastung für beginnende Druckerweichung in die Abb. 80 eingezeichnet<sup>1</sup>.

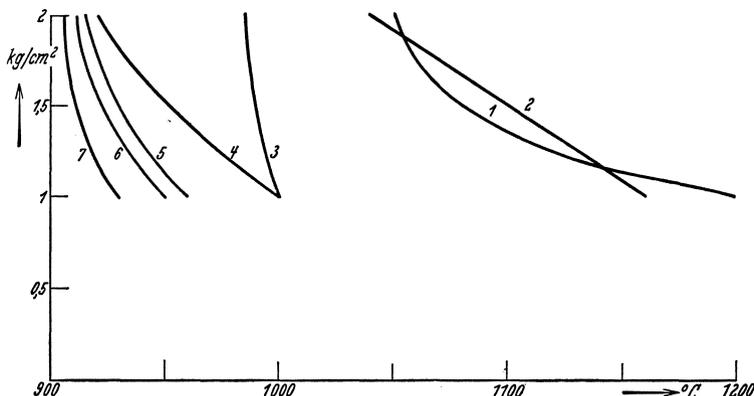


Abb. 80. Druckerweichungsverhalten von Sterchamolfabrikaten nach Angabe der Sterchamolwerke. 1 Feuerleichtstein, 2 Cristobalit, 3 Superior, 4 Marke 20, 5 Marke 21, 6 Marke 22, 7 Marke 23.

Die Raumgewichte einiger Steine, sowie die Füllgewichte pulverförmiger Stoffe, bei denen Zusammensacken nicht auftritt, sind in der folgenden Zusammenstellung angegeben, die zugleich auch die höchsten Gebrauchstemperaturen und die spezifischen Wärmen, bezogen auf die Raumeinheit, enthält.

Zahlentafel 7.

Werkstoff	Raum- bzw. Schüttgewicht <sup>2</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Höchste Gebr.-Temp. [° C]	Spez. Wärme je Raumeinheit [kcal/° C m <sup>3</sup> ]
Sterchamol 20 . . . . .	900	1000	198
„ 21 . . . . .	700	960	154
„ 22 . . . . .	450	950	99
Kieselgurhartbrand . . . . .	825	950	182
Sterchamol 23 . . . . .	380	930	84
Dia 138 . . . . .	700	900	154
Standard. . . . .	525	900	116
Sil-O-Cel-brick . . . . .	480	875	106
Sil-O-Cel-Beton <sup>3</sup> . . . . .	950	1000	209
Sterchamol IIIa . . . . .	525	1000	116
Kieselgur 8 R . . . . .	400	900	88
„ 91 . . . . .	240	900	53
Sil-O-Cel-Pulver . . . . .	250	875	55

<sup>1</sup> Weitere Angaben über das Druckerweichungsverhalten von Steinen für diesen Temperaturbereich waren nicht erhältlich.

<sup>2</sup> Unter Schüttgewicht ist derjenige Betrag angegeben, bei dem ein Zusammensacken des Materials im Dauerbetrieb nicht mehr eintritt.

<sup>3</sup> Der Sil-O-Cel-Beton wird durch Mischung eines Sil-O-Cel C3 genannten Stoffes (gemahlener natürlicher Sil-O-Celstein, ein amerikanischer Kieselgur)

Die Wärmeleitfähigkeit der Stoffe, dargestellt in Abhängigkeit von der Temperatur, ergibt sich aus der Abb. 81. Über den Angriff auf Metalle sei auf die entsprechenden Abschnitte bei der Erörterung der metallischen Baustoffe (S. 116) verwiesen. Bestimmte Angaben wird man in den meisten Fällen nicht erhalten können, da das ganze Gebiet noch zu ungeklärt ist, und man wird sich daher von der Verwendbarkeit der einzelnen Stoffe in Verbindung mit den betreffenden Metallen durch Versuche selbst überzeugen müssen.

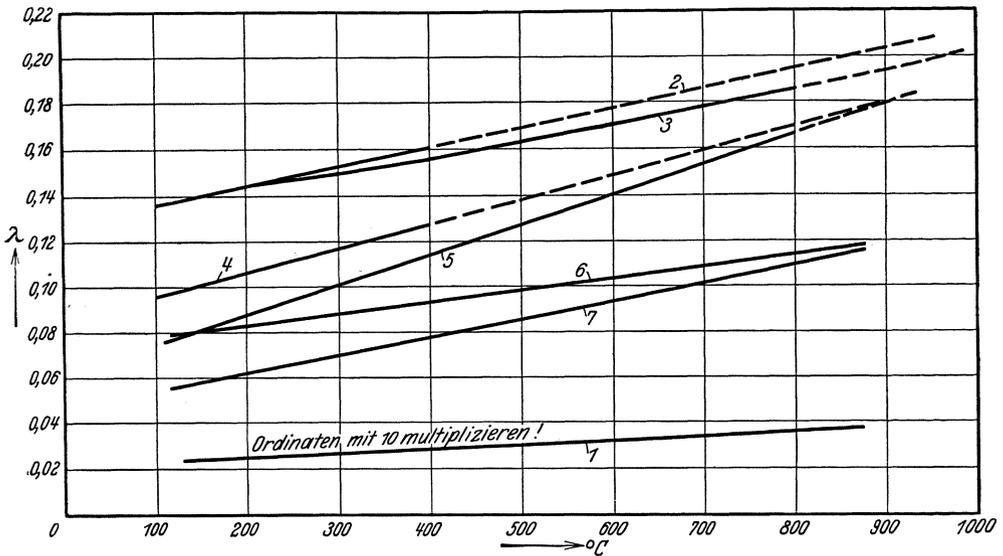


Abb. 81. Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [kcal/m, °C, h] der Wärmeschutzstoffe mit einer Gebrauchsgrenze von 800 ... 1000° (nach Angabe der Lieferer).

1 Silocel C3-Beton, 2 Kieselgur-Hartbrand, 3 Sterchamol 21, 4 Standard, 5 Sterchamol 23, 6 Silocel Brick, 7 Silocel Pulver.

Auch die elektrischen Eigenschaften sind bisher nicht bekannt. Die Leitfähigkeit aller Stoffe steigt natürlich — übrigens ebenso wie die Wärmeleitfähigkeit — mit dem Feuchtigkeitsgehalt. Man wird daher bei Stoffen, die feucht vermauert werden — sowohl aus Gründen der elektrischen Isolation als wegen der Wärmewirtschaft — für ausreichende Abzugsmöglichkeit für das Wasser sorgen, und bei großen Öfen sogar u. U. während des Baues trocknen müssen. Der Abzug des Wassers kann bei großen Schichtstärken nur durch das Material selbst erfolgen und dauert dann unter Umständen sehr lange. Die inneren Schichten,

vom Raumgewicht 445 kg/m<sup>3</sup> mit Portlandzement und Wasser an der Verwendungsstelle hergestellt. Die Temperaturgrenze wird durch den Portlandzement gesetzt, während das C3 allein, in Form eines grobkörnigen Schüttstoffes, bis 1095° verwendet werden kann.

die schnell heiß werden, trocknen zwar vorübergehend bald aus, doch zieht bei dem nächsten Erkalten das Wasser eventuell aus den äußeren kalten Schichten wieder in die inneren wärmeren zurück. Die wesentlich niederen Werte der Wärmeleitfähigkeit bei pulverförmigen Stoffen gegenüber Steinen machen es notwendig, bei Öfen die Verteilung der Wärmeschutzstoffe über die Ofenflächen sorgfältig zu überlegen. Darüber wird im Zusammenhang mit dem Bau der Öfen noch zu sprechen sein (siehe S. 190 und 193).

γ) Stoffe mit einer höchsten Gebrauchstemperatur von 1000 bis 1400°. Vor wenigen Jahren hat man Baustoffe gefunden, die den genannten Temperaturen standhalten und dennoch eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit besitzen als die eigentlichen feuerfesten Stoffe. Der amerikanische Sprachgebrauch hat für diese Baustoffe die Bezeichnung „semi-refractory“ geschaffen, den eine deutsche Firma mit „Feuerleichtstein“ übersetzt hat.

Die Druckfestigkeit der Stoffe ist erheblich, spielt aber nach den obengenannten Ausführungen keine nennenswerte Rolle; dagegen ist das Druckerweichungsverhalten von großer Wichtigkeit (Steinhoff ZV 50). Wenn auch Dauerversuche, wie sie oben angedeutet sind, noch nicht bekannt geworden sind, so können doch die Zahlen der obigen Abbildung Aufschluß geben: die Abb. 80 zeigt für verschiedene Sterchamolfabrikate, abhängig von der Temperatur, die Werte der Druckbelastung an, bei der die Steine zusammenzusinken beginnen.

Weiter berichtet Cammerer (ZV 51), daß Superdia im unbelasteten Zustand bis 1600° keine erhebliche Volumänderung erfährt, dagegen bei einer Belastung mit 0,5 kg/cm<sup>2</sup> schon bei Temperaturen von etwa 1280° abzusinken beginnt (siehe Abb. 76).

Daraus schließt Cammerer, daß bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zum Wärmestrom die Steine bis etwa 1350° beansprucht werden dürfen, da die kälteren Steinteile die Druckbeanspruchung restlos aufnehmen können. Cammerer rechnet dabei mit einem Temperaturgefälle im Stein von etwa 5°/mm. Bei Druckbelastung parallel zum Wärmestrom wird man die Temperatur keinesfalls über 1200 bis 1250° steigern dürfen.

Die Maßhaltigkeit wird mit 1,5 bis 2% garantiert.

Die Wärmeleitfähigkeit der vorgenannten Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur gibt die Abb. 82. Man sieht daraus, daß sehr große Unterschiede zwischen den einzelnen Werkstoffen nicht bestehen, daß aber gegenüber den Stoffen, die nur für niedrigere Temperaturen bestimmt sind, die Wärmeleitfähigkeit erheblich höher liegt. Die spezifische Wärme aller Materialien beträgt etwa 0,22 kcal/kg, °C. — Daraus ergeben sich als Werte der spez. Wärme bezogen auf die Raum-

einheit, die folgenden Zahlen, die, ebenso wie die Raumgewichte, aus Zahlentafel 8 zu entnehmen sind.

Zahlentafel 8.

Werkstoff	Raumgewicht (kg/m <sup>3</sup> )	Spez. Wärme je Raumeinheit (kcal/°C m <sup>3</sup> )
Superdia . . . . .	700....750	155....165
Superbrick . . . . .	610	134
Feuerleichtstein . . . . .	900	198
Cristobalit . . . . .	600	132
Superior . . . . .	550	121
C 22 . . . . .	610	134

Zahlenangaben über die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme sind nur schwer erhältlich. Siehe z. B. Cammerer (BV 7).

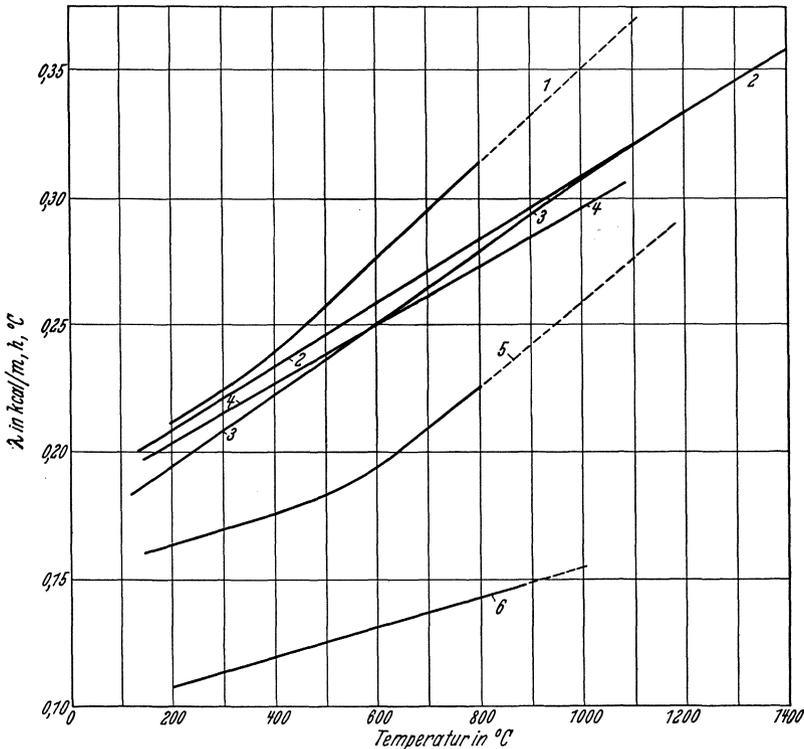


Abb. 82. Wärmeleitfähigkeit halbfester Werkstoffe (nach Angabe der Lieferer).  
 1 Sterchamol-Feuerleicht, 2 Sil-O-Cel Superbrick, 3 Superdia, 4 Sil-O-Cel C 22, 5 Cristobalit,  
 6 Superior.

c) Elektrische Isolier- und Konstruktionsmaterialien.

Hier kommen in erster Reihe Steatit und steatitähnliche Massen in Betracht. Über die Eigenschaften, soweit sie bekannt sind, gibt die

nachfolgende Zusammenstellung Aufschluß, die der Verfasser der Steatit-Magnesia AG. verdankt. Das Material Rheostit eignet sich besonders zur Ausstattung von elektrischen Öfen, daneben aber gewinnt eine „Sipa“ genannte dichte Masse mit bemerkenswert kleinem Ausdehnungskoeffizienten steigende Bedeutung als Heizwicklungsträger.

Zahlentafel 9.  
 Materialeigenschaften keramischer Baustoffe für Elektrowärme.

	Rheostit	Sipa
Raumgewicht [kg/dm <sup>3</sup> ] . .	2,28	2,2
Porosität (Volumprozent)	20	0,1...4*
Schlagbiegefestigkeit [kgcm/cm <sup>2</sup> ] . . . . .	1,6	1,9...2,3
Biegefestigkeit [kg/cm <sup>2</sup> ] . .	334	500...650
Zugfestigkeit [kg/cm <sup>2</sup> ] . .	110,5	180...350* (unglasiert)
Druckfestigkeit [kg/cm <sup>2</sup> ] .	655	3000...5000
Ausdehnungskoeffizient linear . . . . .	20°...500° = 3,8 · 10 <sup>-6</sup> 20°...950° = 4,65 · 10 <sup>-6</sup>	20° ... 650° = 1,25...1,7 · 10 <sup>-6</sup>
Wärmeleitfähig. $\left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h } ^\circ\text{C m}} \right]$	0,84	—
Erweichungspunkt [°C] . .	1650	1430
Spez. Widerst. [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] (~)	300° = 5,0 · 10 <sup>7</sup> 600° = 1,4 · 10 <sup>5</sup> 900° = 7,7 · 10 <sup>3</sup>	300° = 2,2 · 10 <sup>8</sup> 600° = 1,1 · 10 <sup>6</sup>
Durchschlagsfestigkeit [kV/cm] . . . . .	30,5	50...100*
Härte. . . . .	9	—

### IV. Einige Sondermeßverfahren der Ofentechnik.

Es kann nicht Aufgabe dieses Buches sein, alle bei der Ofentechnik zur Anwendung kommenden Meßgeräte und Meßverfahren zu beschreiben. Es sollen vielmehr nur vorwiegend Spezialverfahren für den Widerstandsofen berücksichtigt werden, die sich in erster Reihe auf Temperatur- und Leistungsmessungen stützen.

#### 1. Unmittelbare Bestimmung der Nutzwärme.

Die Nutzwärme wird meist so gefunden, daß mit Hilfe eines Elektrizitätszählers die vom Ofen aufgenommene Wärmemenge bestimmt wird und durch einen getrennten Versuch die Verluste ermittelt werden. Die Differenz der gesamten aufgenommenen Arbeit abzüglich der Verluste gibt die Nutzwärme.

\* Die Zahlen umfassen verschiedene Sipa-Arten.  
 Paschkis, Elektroöfen.

Dieses Verfahren hat zwei Nachteile:

1. Man erhält nur die mittlere Nutzwärme für das ganze Gut ohne Rücksicht auf mögliche Verschiedenheiten in der Durchwärmung einzelner Stücke.

2. Die Messung ist auf einfache Weise nur im Beharrungszustand des Ofens durchzuführen.

Diesen Nachteilen geht man aus dem Weg, wenn man die von Gut aufgenommene Wärmemenge unmittelbar feststellt, was für kleine Stücke mit Hilfe einer kalorimetrischen Messung möglich ist.

Über die physikalisch genaue Durchführung kalorimetrischer Messungen vgl. die einschlägigen Handbücher (z. B. Kohlrausch BV 21; Gramberg BV 22). In der Praxis wird man meist auf die genauen Messungen verzichten müssen und nach folgendem einfachen Verfahren arbeiten, mit dem der Verfasser eine Genauigkeit von etwa 3% erreicht hat (bei Messungen an kleinen Messingstücken, die auf Temperaturen zwischen 700 und 800° erwärmt wurden). Die Genauigkeit wurde so bestimmt, daß das Gut in einem Laboratoriumsofen auf eine bestimmte Temperatur gebracht wurde und die Temperatur dann in der zu eichenden Meßanordnung auf seinen Wärmeinhalt geprüft wurde. Die Abweichungen gegenüber der aus dem Laboratoriumsofen bekannten Temperatur betrug  $\pm 3\%$ .

Das Gut wird unmittelbar aus dem Ofen in ein mit Wasser gefülltes Gefäß geworfen; aus der Temperaturzunahme des Wassers kann der Wärmeinhalt der Probestücke und, bei bekannter spezifischer Wärme, daraus ihre mittlere Temperatur zurückgerechnet werden. Folgende Fehlerquellen sind u. a. bei diesem Verfahren zu berücksichtigen:

a) Das Gefäß steigert die Wärmekapazität der Anordnung. Mit Rücksicht auf das unvermeidliche Temperaturgefälle in der Gefäßwand ist das Gewicht des Gefäßes nur teilweise einzusetzen.

b) Durch die Trägheit des Thermometers, das zur Temperaturbestimmung des Wassers dient, ist eine bestimmte Einstellzeit erforderlich, während der von der Gefäßwand Wärme abgegeben wird.

c) Die Entnahme des Gutes aus dem Ofen erfolgt meist mit einem Werkzeug, das durch Wärmeableitung Fehler verursachen kann. (Das Werkzeug kann erforderlichenfalls vorgewärmt werden.)

d) Beim Transport zum Gefäß tritt eine weitere Abkühlung des Gutes ein.

Zu den beiden letzten Punkten ist zu bemerken, daß meist auch bei Betrieb nicht die Temperatur des Gutes im Ofen interessiert, sondern die Temperatur nach Entnahme. Stellt man das Kalorimeter in entsprechende Entfernung vom Ofen, so kann diese Messung sogar besonders der Praxis entsprechende Ergebnisse liefern.

## 2. Anheizversuch und Leerverluste<sup>1</sup>.

Man kann in einem Versuch die theoretische und die praktische Anheizzeit, die Speicherwärme und die Leerverluste bestimmen (Paschikis BV 6). Man heizt dazu den vollständig erkalteten Ofen unter Verwendung eines Temperaturreglers auf und verfolgt gleichzeitig seine Manteltemperatur.

Notwendig für diese Messung ist ein Zähler, ein Temperaturmeßgerät zur Verfolgung der Innentemperatur und mindestens eines zur Verfolgung der Manteltemperatur. Weiter empfiehlt es sich — namentlich wegen der Feststellung der Anheizzeiten — die Klemmenspannung zu verfolgen, und schließlich muß die Raumtemperatur beobachtet werden.

Bezüglich des Zählers sind keine besonderen Ansprüche zu stellen. Bei unsymmetrischer Wicklung ist ein Drehstromzähler erforderlich, bei symmetrischer Drehstromwicklung und bei V-Schaltung kommt man dagegen mit einem (billigeren) Einphasenzähler aus. Dies gilt natürlich nur für induktionsfreie Belastung, mit der im allgemeinen trotz eventueller Transformatoren bei Widerstandsöfen mit ausreichender Genauigkeit gerechnet werden darf. — Schaltet man bei Drehstrom (Dreieck oder Sternschaltung der Widerstände) die Spannungsspule des Zählers zwischen zwei beliebige Außenleiter und die Stromspule in eine der Leitungen, so kann man den Zähler als ein Meßorgan aus einer Zweiwattmeterschaltung auffassen. Bekanntlich zeigen bei der Zweiwattmeterschaltung beide Meßorgane bei induktionsfreier symmetrischer Belastung gleich an, so daß unsere Zählerablesung mit 2 multipliziert werden muß. Bei V-Schaltung muß, damit man die Zählerablesung auch mit 2 multiplizieren kann, die Stromspule in eine der Außenphasen und die Spannungsspule zwischen Außen- und Mittelphase gelegt werden.

Bezüglich des Temperaturmeßgeräts können hier keine besonderen Vorschriften gemacht werden, statt dessen sei auf den unten folgenden Abschnitt 6 über Temperaturmessung verwiesen. Man wird bei dem Anheizversuch natürlich stets die Temperatur mit dem zur betriebsmäßigen Messung bestimmten Gerät im betriebsmäßigen Einbau messen.

Die Bestimmung der Manteltemperatur erfolgt zweckmäßig an mehreren Stellen; man verwendet entweder Thermoelemente oder Quecksilberthermometer. Bezüglich Anbringung der Meßgeräte sei auf Spezialwerke, z. B. von Knoblauch-Hencky (BV 23) verwiesen.

Die meßtechnische Schwierigkeit liegt darin, eine Anordnung zu finden, bei der durch die Anbringung des Meßgeräts weder ein Wärmestau eintritt, der die

<sup>1</sup> Siehe auch Berechnung S. 39ff.

Manteltemperatur scheinbar steigern würde, noch Wärme abgeleitet wird, wodurch die Temperatur zu niedrig gemessen würde.

Bezüglich der Messung der Raumtemperatur sei lediglich davor gewarnt, diese zu nahe am Ofen zu bestimmen, da die Umgebung des Ofens natürlich wärmer ist als die übrige Raumtemperatur.

Zur Auswertung verfährt man wie folgt: Es werden (Abb. 21) über der Zeit (zweckmäßig als Abszisse) Leistung und Temperatur (als Ordinaten) eingezeichnet. Als Leistung wird bei viertelstündlicher Zählerablesung die vierfache Differenz zweier aufeinander folgender Ablesungen, bei 10 minutlicher Ablesung (6 mal je Stunde) die sechsfache Differenz usw. über der Mitte des beobachteten Zeitabschnittes aufgetragen. Die Leistung wird zunächst — bei konstanter Spannung — konstant bleiben. Ist man nicht sicher, daß die Spannung während des ganzen Versuchs konstant bleibt, so empfiehlt es sich, diese zu registrieren, wodurch sich Unstimmigkeiten in den Zählerablesungen leicht aufklären lassen.

Die Innentemperatur wird praktisch sofort, scheinbar jedoch erst nach einer kurzen Zeitspanne, die von der Trägheit des Temperaturmeßgerätes abhängt, zu steigen beginnen. Der Anstieg ist (abgesehen von dem durch die Trägheit bedingten Anfangsknick) zunächst linear und wird sich erst nach einiger Zeit (die vom Wärmeüberschuß des Ofens [siehe S. 102] abhängt) konkav zur Abszissenachse krümmen. Bei der Manteltemperatur merkt man vorerst keinen Anstieg.

Sobald die Innentemperatur den Sollwert erreicht hat, spricht der Regler an und setzt die mittlere Leistung herunter, während die Temperatur um den Sollwert zu schwanken beginnt. Das Sinken der Leistung durch Aus- und Einschalten wirkt sich in zuerst geringen, später steigenden Differenzen zwischen zwei aufeinander folgenden Zählerablesungen aus. Während die Innentemperatur nur noch Schwankungen um diesen mittleren Sollwert ausführt, nähert sich die Manteltemperatur erst langsam ihrem Beharrungszustand. Wenn dieser erreicht ist, ist auch die Leistung auf einen konstanten Wert, die Leerverluste, abgesunken. Diese können durch einige aufeinander folgende Zählerablesungen, deren Differenzen unter sich gleich sein müssen, festgestellt werden. Die Fläche  $B$  unter der Leistungskurve wird planimetriert (in der Abb. 21 nach rechts oben schraffiert) und in kWh umgerechnet, dann wird die Fläche unter der Ofenmanteltemperaturkurve planimetriert und ebenfalls in kWh umgerechnet. Man erhält durch Planimetrierung zunächst einen Betrag ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ), der durch Multiplikation mit dem Ordinatenverhältnis der Leistungskurve und der Ofenmanteltemperaturkurve auf kWh umgerechnet wird: Wert  $C$  (in der Abbildung nach rechts unten schraffiert). Die Differenz  $B - C$  gibt die Speicherwärme in kWh.

### 3. Die Leerverlustanalyse.

Hat man die Leerverluste auf Grund der im letzten Abschnitt besprochenen Versuche festgestellt, so wird in den meisten Fällen Interesse bestehen, zu untersuchen, wodurch diese Leerverluste bedingt sind. Man wird zunächst auf Grund der Formeln (11) die theoretischen Verluste ermitteln und diese dann den gemessenen gegenüberstellen. Die Differenz ist bekanntlich auf Wärmekurzschlüsse zurückzuführen. Oft wird es notwendig sein, sich am ausgeführten Ofen über die Aufteilung der Einflüsse der verschiedenen Wärmekurzschlüsse klar zu werden, um entsprechende Umbauten vornehmen zu können. Diese Aufteilung der Wärmekurzschlüsse kann man meist dadurch vornehmen, daß man die Oberflächentemperaturen des Ofens an den verschiedenen Stellen mißt. Man wird bald finden, daß die Stellen der Wärmekurzschlüsse wesentlich heißer sind als die gut isolierten Stellen und wird sich durch ein Schema der Wärmeabgabe, die mit guter Annäherung proportional den Temperaturen gesetzt werden kann, bald den Einfluß der einzelnen Wärmekurzschlüsse klarmachen können. Bei diesem Verfahren sind zwei Fehlerquellen zu vermeiden:

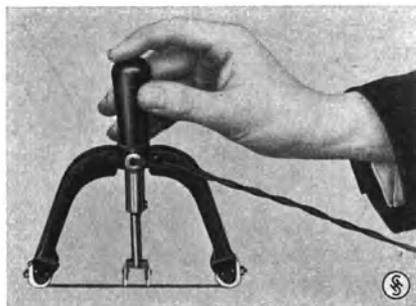


Abb. 83. Oberflächenpyrometer Siemens & Halske, Berlin.

Nicht die Manteltemperaturen, sondern die Mantelübertemperaturen sind proportional den Wärmeverlusten und dann spielen die Wärmeübergangsverhältnisse eine gewisse Rolle (Windanfall, benachbarte andere Öfen und dgl. mehr). Bei gleicher Mantelübertemperatur ist die abgegebene Wärmemenge je nach der Wärmeübergangszahl verschieden. Bei einem Vergleich der Wärmeabgabe von verschiedenen Teilen der Mantelfläche sind diese Unterschiede von großem Einfluß<sup>1</sup>. Zur Messung der Manteltemperaturen bedient man sich der sogenannten Oberflächenthermoelemente (Oberflächenpyrometer), die man seit einigen Jahren in zu betriebsmäßigen Messungen geeigneten Formen erhält (Abb. 83). Bei der Einführung der Wärmeübergangszahl in die Rechnung muß man Luftbewegung und andere Störungen des Temperaturfelds berücksichtigen.

<sup>1</sup> Im Gegensatz dazu hatten die Unterschiede in der Wärmeübergangszahl bei der Berechnung der Wärmeverluste keine Bedeutung, denn der Widerstand des äußeren Wärmeübergangs konnte gegenüber dem Wärmeleitwiderstand der Ofenwand vernachlässigt werden.

Der Fehler, der durch Ungenauigkeiten an dieser Stelle entstehen kann, wird verringert, wenn Wärmeabgabe außer von der Ofenmantelfläche ausgeschlossen oder genau bekannt ist. Man wird z. B. zwecks Aufteilung der Wärmeabgabe von den Wänden Spalten (an den Türen, an Heizkörperdurchführungen usw.) abdichten, da die durch diese entweichende Luft zu schwer meßbar ist; andererseits wird man die Verluste durch Kühlwasser (an Widerständen usw.) durch Messung der Wassermenge und der Temperaturen im Zulauf und Ablauf genau erfassen können und von den gesamten Leerverlusten vorab abziehen.

Bei der Auswertung der Restverluste verfährt man wie folgt: Man teilt den ganzen Leerverlust durch die Fläche des Ofens (Mantelfläche) und findet unter Annahme einer mittleren Wärmeübergangszahl die mittlere Temperatur des Ofenmantels. Durch Vergleich der gemessenen Temperaturen mit dieser „Solltemperatur“ können Wärmekurzschlüsse leicht nachgewiesen werden.

Da man natürlich nicht von vornherein die Punkte extremer Temperaturen kennt, wird man zweckmäßig die Ergebnisse durch graphische Darstellung der Temperaturen über den einzelnen Ofenwänden (z. B. in Form von Isothermen) zu ergänzen suchen. Bei der Auswertung kann man entweder den Unterschieden unmittelbar nachgehen oder man wird, namentlich wenn stark verschiedene Temperaturen auftreten, die einzelnen Temperaturen mit passend erscheinenden Werten der Wärmeübergangszahl multiplizieren und erst diese Produkte, die proportional der Wärmeabgabe/Flächeneinheit sind, vergleichen.

#### **4. Wärmebilanzen an Öfen mit vom Durchsatz abhängigem Wärmeleichgewicht.**

Bei den bisherigen Erörterungen war die für die meisten Öfen gültige Voraussetzung gemacht, die Wärmeverluste seien praktisch unabhängig von dem Durchsatz. Wir müssen nun noch kurz die Ermittlung der Verluste an Öfen erörtern, bei denen diese Voraussetzung nicht zutrifft. Es handelt sich hierbei vor allem um bestimmte Arten von Wanderöfen (z. B. Wandertrockenöfen nach dem Gegenstromprinzip, Durchziehöfen und dgl.). Bei diesen Öfen muß man, um die Leerverluste und die Speicherwärme zu erhalten, eine Wärmebilanz bei normal belastetem Ofen aufstellen und durch Rechnung die Verluste bestimmen. Dies sei an einem Beispiel erläutert, das den auf S. 236 beschriebenen Wandertrockenofen für Kerne betrifft (siehe hierzu Paschkis ZV 52). Dabei sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die für die Wärmebilanz zu ermittelnden Größen selbstverständlich von Ofen zu Ofen andere sind und daß die Meßverfahren sich nach dem gewünschten Maß der Genauigkeit und den zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln richten müssen.

Bei unserem Beispiel werden die Kerne (sogenannte Ölsandkerne),

um sie mechanisch zu schonen, in feinen Auflegesand gebettet, der feucht zur Verwendung gelangt. Die in ihm enthaltene Feuchtigkeit muß demnach verdampft werden. Das Öl, mit dem sie angemacht sind, verdickt unter Zersetzungserscheinungen.

Es wird Wärme verbraucht für die:

Erwärmung des Kernsandes,	Erwärmung der Kernplatten,
„ „ Öl,	„ „ Kette und Horden,
„ „ Auflegesandes und Ver-	Deckung der Leerverluste,
dampfung des Wassers aus dem Auf-	Speicherwärme.
legesand,	

Die Kerne werden auf eisernen Kernplatten in den Ofen gebracht, deren Gewicht im Vergleich zu dem der Kerne zum Teil recht erheblich ist. Da der Ofen im Gegenstromprinzip arbeitet, erscheint als Wärmeverbrauch für die durch den Ofen laufenden Teile nicht das jeweilige Produkt aus Trockentemperatur, Gewicht und spezifischer Wärme, sondern es gehen vielmehr nur die Temperaturen in die Rechnung ein, mit denen die Teile den Ofen verlassen. Da über den Querschnitt der einzelnen Stücke keine gleichmäßige Temperatur herrschen kann, wurde die Wärme des Kernsandes durch ein Kalorimeter, die Temperatur des Auflegesandes durch ein Quecksilberthermometer, die der Kernplatten durch Thermoelemente bestimmt. (Die Temperaturunterschiede in den Kernplatten wurden [wegen der hohen Temperaturleitfähigkeit des Eisens und wegen der geringen Materialstärke] bei der Messung vernachlässigt; ebenso mußten die Temperaturunterschiede im Auflegesand außer Ansatz bleiben.) Die Abluftwärme wurde durch Messung der Temperatur und der Menge (mit Prandtl'schem Staurohr) ermittelt. Die Leerverluste wurden durch Messung der Ofenmanteltemperaturen an vielen Stellen bestimmt. Die Wärmeübergangszahl wurde mit  $\alpha = 10 \text{ kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{C h}$  angenommen, und jede abgelesene Temperatur mit den zugehörigen Flächenelementen multipliziert. Die Wärmeverluste durch die Ausstrahlung der Kette und Horden während des Aufenthalts vor der offenen Ofentüre blieb zusammen mit der Speicherwärme als Restwärme. Es wurden 5 Versuche vorgenommen, aus denen sich folgende Aufteilung der verbrauchten Wärmemengen ergab:

	Versuchsnummer				
	1	2	3	4	5
	Wärmemengen [kWh]				
Kerne, Restwärme . . . . .	25	25	28	17	14
Erwärmung des Öles . . . . .	2	1	5	1	1
Verdampfungswärme, Wasser i. Auflegesand	6	5	6	5	6
Auflegesand, Restwärme . . . . .	2	2	2	2	2
Kernplatten, Restwärme . . . . .	26	13	22	21	16
Luft . . . . .	257	198	289	265	238
Abstrahlung . . . . .	34	28	35	40	31
Rest- und Speicherwärme . . . . .	52	90	43	6	61

Eine Trennung von Speicherwärme und Kettenverlusten wäre theoretisch möglich, wenn man die Versuche in praktisch unveränderter Weise über einen ganzen Tag fortgeführt hätte, und die Veränderungen der Restwärme in ihrer Abhängigkeit von der Tageszeit verfolgt hätte. Eine derartige Messung verbot sich aber — ganz unabhängig von den Versuchskosten — deswegen, weil für die Dauer eines Tages nicht genügend Kerne gleicher Größe zur Verfügung standen (was wohl in Gießereien kaum je der Fall sein wird). Man könnte sonst auch noch die Temperatur der Kette und der Horden während des Aufenthalts der Kette vor der Ofentüre beobachten und dann mit einer angenommenen Wärmeübergangszahl die Verluste errechnen. Nach Abzug dieser Verluste von den Restverlusten bliebe nur die Ofenspeicherwärme übrig.

Da die Zahlen den überragenden Anteil der Luftwärme am gesamten Wärmeverbrauch zeigten, versuchte man mit Erfolg, diesen durch Verringerung der Luftmenge herabzudrücken. Dabei stieg der Wärmeverbrauch durch Restwärme im Kernsand, den Kernplatten und dem Auflegesand; die Zunahme dieser Wärmemengen wurde aber mehr als aufgewogen durch die Abnahme der Luftwärme. Es ist anzunehmen, daß es einen Wert für die Luftmenge gibt, bei der der Wärmeverbrauch einen Kleinstwert erreicht (siehe S. 186). Dieser Wert konnte aus Betriebsgründen im Falle unseres Beispiels durch Versuch nicht festgestellt werden.

Außer diesen für die Betriebsführung unmittelbar wichtigen Ergebnissen erwies es sich auch als nötig, die Verbrauchswerte, statt wie in Gießereien üblich, auf die Menge ausgebrachter Kerne, auf ein „reduziertes Gewicht“ zu beziehen, das sich errechnet aus:

$$G_r = G_s + G_p \left( \frac{0,20}{0,13} \right)^* = G_s + G_p \cdot 1,54 . \quad (39)$$

Hierin bedeutet  $G_r$  das „reduzierte Gewicht“,  $G_s$  das Gewicht des Kernsandes,  $G_p$  das Gewicht der Kernplatten; alle Gewichte bezogen auf die gleiche Durchsatzzeit. Die Verwendung dieses Begriffs hilft dazu, die sehr großen Schwankungen im spezifischen Stromverbrauch (kWh/kg) aufzuklären. Dieser betrug, auf das Sandgewicht bezogen, zwischen 0,154 und 0,335; auf das reduzierte Gewicht bezogen betrug er zwischen 0,0945 und 0,0645. Das Verhältnis des größten zum kleinsten Wert vermindert sich bei Einführung des reduzierten Gewichts von 2,17 auf 1,47. Die noch immer bestehenden Unterschiede konnten auf den Einfluß der Ofenbeschickung (die zwischen 3875 und 6282 kg reduziertes Gewicht je Tag betrug) und den Einfluß der Luftmenge zurückgeführt werden.

---

\* 0,20 = spez. Wärme von Kernsand; 0,13 = spez. Wärme von Eisen.

## 5. Temperaturmessung.

Über genaue Temperaturmessungen in Laboratorien — Messungen dieses Genauigkeitsgrades sind im Ofenbetrieb nur selten durchführbar — finden sich Angaben in vielen Handbüchern, die hier als bekannt vorausgesetzt werden dürfen. Über betriebsmäßige Messung sind ebenfalls zahlreiche Veröffentlichungen erschienen. Es sollen hier lediglich einige Hinweise auf Fehlermöglichkeiten bei der praktischen Temperaturmessung an Öfen gegeben und einfache Wege zu ihrer Vermeidung mitgeteilt werden, ohne daß diese Zusammenstellung Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte. Vgl. hierzu auch Walger und Lorenz ZV 53.

a) Bei Thermoelementen weicht die Temperatur der Kaltlötstelle von dem bei der Eichung der Anlage angenommenen Betrag ab. Die Annahme, man müßte als Korrektur einfach den Betrag der Temperatur der Kaltlötstelle der Ablesung zuzählen, ist ebenso falsch wie die Annahme, es handle sich um einen konstanten Fehler (Keinath BV 24) oder er sei durch Verwendung einer Ausgleichsleitung behoben. Meist wird die Raumtemperatur je nach Tages- und Jahreszeit erheblich schwanken. Ist die Kaltlötstelle der Ausgleichsleitung noch in Strahlungsnähe des Ofens, so wird, je nach Durchwärmungszustand desselben, noch ein zusätzlicher Fehler entstehen. Man wird dafür sorgen müssen, die Temperaturschwankungen durch entsprechende Maßnahmen an der Kaltlötstelle — z. B. durch Einsenken derselben in den Boden — auszuschließen.

b) Abgesehen von den Schwankungen der Temperatur der Kaltlötstelle können Temperaturschwankungen am Millivoltmeter einen Fehler in der Anzeige zur Folge haben. Im Gegensatz zu dem unter a bezeichneten Fehler, der sich meist noch an der fertigen Anlage beseitigen läßt, kann die Temperaturabhängigkeit der Meßgeräte selbst nachträglich nicht verändert werden. Dieser Fehler ist darauf zurückzuführen, daß die Instrumentenspule aus Kupfer besteht und ihr Widerstand deswegen temperaturabhängig ist. Man vermindert bei guten Instrumenten den Einfluß dieser Abhängigkeit durch Vorschaltwiderstände aus einem temperaturunabhängigen Material (z. B. Konstantan). Je größer bei gegebenem Meßbereich der Vorschaltwiderstand ist, um so weniger Energie bleibt für das eigentliche Meßwerk, um so empfindlicher muß also das Instrument sein.

c) Eine Messung zu nahe der Ofenwand ergibt durch axiale Wärmeableitung in der Armatur des Fühlorgans Meßfehler. Es empfiehlt sich, das Fühlorgan auf eine gewisse Länge in der heißen Zone zu führen.

d) Dicke Fühlorganarmaturen machen das Fühlorgan ungeeignet zur Messung schnell veränderlicher Vorgänge.

## 6. Temperaturverteilungsmessungen.

Man rühmt dem elektrischen Ofen seit je seine besondere Temperaturgleichmäßigkeit nach, und so ist es verständlich, wenn immer wieder der Wunsch entsteht, durch Messung sich von dieser Gleichmäßigkeit zu überzeugen. Zu dieser Aufgabe muß vor allem gesagt werden, daß die „Gleichmäßigkeit“ sich natürlich nur auf die Oberfläche eines bestimmten Gutes beziehen kann, da ja im letzten nur die Guttemperaturen interessieren, und diese sich erst aus der Heizkörperverteilung und der Größe, Durchwärmung und Anordnung des Gutes ergeben. Bei Öfen mit Luftbewegung kann nur der praktische Versuch ein Ergebnis bringen, indem man das Gut in der betriebsmäßig beabsichtigten Weise durch den Ofen gehen läßt und durch Oberflächenmessungen sich von der Gleichmäßigkeit der Temperaturen überzeugt. Bei Öfen mit Wärmeübertragung durch Strahlung kann man, falls man nicht ebenfalls mit dem praktisch vorliegenden Gut einen Versuch machen kann, den Nutzraum mit einem möglichst homogenen Gut füllen und die Temperaturverteilung durch Messung des Anstiegs der Oberflächentemperatur festzustellen suchen. Da bei Vorhandensein von Bodenheizkörpern die Wärmeleitung eine Rolle spielt, wird das Verfahren zu großer Ungenauigkeit verurteilt sein.

## V. Wirtschaftlichkeitsfragen.

In diesem Abschnitte werden drei verwandte Aufgabengebiete besprochen:

- A. Die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Ofens,
- B. Vergleich mehrerer Öfen grundsätzlich gleicher Bauart.
- C. Maßnahmen zur wirtschaftlichen Betriebsführung.

Obwohl diese drei Teilgebiete sich vielfach berühren, sollen sie der Übersichtlichkeit wegen gesondert besprochen werden.

### A. Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Ofens.

Die Wirtschaftlichkeit eines elektrischen Ofens (genau wie die jeder Maschine) darf nicht bei der Ermittlung nur eines Teiles der Betriebskosten haltmachen. Allerdings ist die notwendige Erfassung der ganzen Betriebskosten meist sehr schwierig, weil die Kostenanteile außerordentlich mannigfaltig sind. Für eine gegebene Ofenkonstruktion und einen bestimmten Betrieb sind meist zwei Kostenanteile verhältnismäßig beweglich:

- die Beschaffungskosten (Amortisationskosten) und
- die Wärmekosten (Strompreis).

Trotzdem man praktisch meist so vorgeht, daß man diese beiden Faktoren gleichzeitig bearbeitet, ja sogar die übrigen Kostenanteile auch noch einer Veränderung unterzieht (indem man verschiedene Ofenformen untersucht), kann man die Einflüsse der beiden Anteile gesondert verfolgen. Man untersucht zuerst, welcher Strompreis für die betreffende Aufgabe noch tragbar ist und ermittelt dann den billigsten Ofen gleichwertiger Ausführung. Es sei ausdrücklich betont, daß in der Praxis diese Untersuchung parallel mit der über den Ofenpreis erfolgt, etwa so, daß man die Strompreisermittlung für mehrere Ofenpreise, Bauarten und Qualitäten durchführt, um so die wirtschaftlichste Ofenform zu finden. (Es werden z. B. die Zahlen für Wärmeverluste, für totes Gewicht usw. auch von den Beschaffungskosten abhängen.) Wir verstehen unter Grenzstrompreis denjenigen höchsten Strompreis, bei dem das betreffende Verfahren mit elektrischer Heizung im Vergleich zu einem anderen Brennstoff noch wirtschaftlich ist.

Bei der Ermittlung des Grenzstrompreises müssen nach dem Vorstehenden die gesamten übrigen Betriebskosten festgelegt werden (wobei die Beschaffungskosten und die Art des Kapitaldienstes als gegeben anzusehen sind). Ein Teil der Vorteile des elektrischen Ofens läßt sich zahlenmäßig jedoch nicht festlegen, und so kann man drei Genauigkeitsstufen der Grenzstrompreisermittlung unterscheiden:

1. Grenzstrompreis auf Grund des Wärmekostenvergleichs;
2. Grenzstrompreis auf Grund des Betriebskostenvergleichs;
3. Grenzstrompreis unter Berücksichtigung auch ideeller Nebenvorteile.

## 1. Grenzstrompreis auf Grund des Wärmekostenvergleichs.

### a) Strompreisermittlung.

Die Wärmekosten ergeben sich aus dem Wärmeverbrauch und dem Strompreis. Über den Wärmeverbrauch ist in den vorhergehenden Abschnitten erschöpfend gesprochen worden. Dagegen bedürfen die Strompreise noch einer näheren Betrachtung.

Meist ist der Strompreis nicht als gegebene Größe anzusehen. Er ist vielmehr im wesentlichen abhängig von:

- α) der Benutzungsstundenzahl, bezogen auf Anschlußwert oder auf eine zeitliche Höchstbelastung;
- β) der Höhe der Stromentnahme überhaupt;
- γ) dem Leistungsfaktor;
- δ) der Tageszeit (evtl. Jahreszeit) der Entnahme.

Kommt in einem Betrieb zur bisherigen Stromentnahme solche durch Elektrowärme neu hinzu, so ändern sich in den meisten Fällen

alle vier Bedingungen; die Folge ist, daß der Strompreis vor und nach Einführung der Elektrowärme nicht der gleiche sein wird.

Es wäre nun irreführend und falsch, den neuen „mittleren“ Strompreis der Betriebskostenberechnung zugrunde zu legen. Denn die bisherigen Stromverbraucher des Betriebes (Motoren, Beleuchtung usw.) erhalten ja nun auch billigeren Strom; diese Verbilligung muß dem Elektrowärmeverbraucher gutgeschrieben werden (Paschkis ZV 54). Dadurch ergeben sich z. T. recht weitgehende Verbilligungen der Wärmekosten, die zu berücksichtigen sehr häufig unterlassen wird.

Für diejenigen Leser, die mit Fragen der Strompreisermittlung nicht vertraut sind, seien im nachfolgenden die oben erwähnten Punkte, die auf die Stromkosten Einfluß haben, kurz erläutert.

**a) Die Benutzungsstundenzahl.** Die Kosten einer kWh dienen teilweise zur Deckung der beweglichen Kosten (z. B. Brennstoffkosten usw.), die proportional dem Arbeitsverbrauch sind und teilweise zur Deckung der festen Kosten (namentlich zur Verzinsung und Amortisation der Kraftwerks- und Leitungsanlagen), die unabhängig von der Höhe des Stromabsatzes sind und sich nur nach dem Ausbau der Anlage richten. Ist für einen bestimmten Abnehmer eine gewisse Maschinenleistung bereitgestellt, so kann er — im Grenzfall — diese Leistung durch 8760 h im Jahr ausnützen. Tatsächlich werden stets nur weniger „Benutzungsstunden“ erreicht. Nach dem Vorstehenden ist es klar, daß die Belastung des Kilowattstundenpreises mit festen Kosten um so niedriger sein wird, je höher die Benutzungsstundenzahl ist. Meist kommen diese Verhältnisse auch im Aufbau der Tarife zur Geltung: es wird ein „Arbeitspreis“ für die verkaufte kWh und daneben ein vom Stromverbrauch unabhängiger „Leistungspreis“ verlangt. Dieser richtet sich entweder nach der Größe der installierten Leistung [kW] oder nach dem Höchstverbrauch eines bestimmten Zeitabschnittes (z. B. einer Viertelstunde: „Viertelstündliches Maximum“) während einer Beobachtungsperiode, z. B. einem Monat.

Der Beginn der Zählung für diesen Verbrauch erfolgt nicht ununterbrochen, sondern alle Viertelstunden (also z. B. um 0, 15, 30, 45 Minuten nach der vollen Stunde).

Beispiel: Würde in einem Betrieb festgestellt (dies geschieht in der Praxis durch selbsttätige Zähler), daß im Laufe eines Monats in keiner Viertelstunde ein höherer Verbrauch als 50 kWh auftrat, so würde der Leistungspreisberechnung eine Leistung von  $4 \cdot 50 = 200$  kW zugrunde gelegt werden. Wie dieser Wert erreicht wird, ist dabei gleichgültig. — Es wäre z. B. der Fall denkbar, daß während 5 Minuten eine Leistung von 600 kW entnommen wird und dann 10 Minuten lang alle Verbraucher abgeschaltet sind, oder daß während der ganzen 15 Minuten eine gleichmäßige Entnahme von 200 kW stattfindet usw.

Den Einfluß der Benutzungsstundenzahl auf den Strompreis zeigen die folgenden Zahlen:

Es kostet eine Jahresentnahme von 50000 kWh bei einem Arbeitspreis von 6 Pf./kWh und einem Leistungspreis von 60.  $\mathcal{M}$ /kW und bei

einer Leistung von 25 kW, entspr.	2000 Benutzungsstd.	4500,— $\mathcal{M}$
„ „ „ 12 kW „	4167 „	3720,— $\mathcal{M}$
„ „ „ 8 kW „	6250 „	3480,— $\mathcal{M}$
„ „ „ 5,9 kW „	8500 „	3354,— $\mathcal{M}$

Der Strompreis geht demnach von 9 Pf./kWh (bei 2000 Benutzungsstunden) auf 6,7 Pf./kWh (bei 8500 Benutzungsstunden) herunter.

**$\beta$ ) Höhe der Stromentnahme.** Bei größerer Stromentnahme entspricht es der allgemeinen kaufmännischen Gepflogenheit, Mengenrabatte zu geben; dies hat seine Berechtigung wegen des geringeren Anteiles an Verwaltungs- und Verteilungskosten je kWh.

**$\gamma$ ) Die Berücksichtigung des Leistungsfaktors.** Kraftwerke und Leitungen sind für eine bestimmte Stromstärke ausgeführt. Ist ein Teil dieses Stroms „Blindstrom“ (liegt also Phasenverschiebung vor), der keine Einnahmen bringt, so muß der dem Blindstrom entsprechende Anteil am Kapitaldienst vom Wirkstrom übernommen werden: der Wirkstrompreis — die kWh — wird teurer. Es sei hier daran erinnert, daß Widerstandsöfen praktisch stets mit Leistungsfaktor 1 arbeiten, also ohne Phasenverschiebung fahren. Sie wirken daher günstig auf die Gesamtphasenverschiebung ein.

**$\delta$ ) Zeit der Entnahme.** Die Stromentnahme aus Kraftwerken schwankt sehr stark nach den Tages- und Jahreszeiten: fast durchweg haben die Werke eine „Lichtspitze“, die natürlich im Winter höher ist als im Sommer. Betreibt man nun den Ofen so, daß er während der Zeit der Höchstbelastung nicht eingeschaltet wird, so kann der Strompreis dafür niedriger gehalten werden.

Als Beispiel möge an Hand eines praktisch vorkommenden Tarifs der Einfluß eines Elektrowärmestromverbrauchers auf die Stromkosten besprochen werden.

Der Tarif sehe folgende Sätze und Vorschriften vor:

1. Die Leistungsgebühr wird nach dem viertelstündlichen Maximum berechnet und beträgt jährlich bei einer Leistung von:

75—100 kW	80,— $\mathcal{M}$ /kW	150—200 kW	65,— $\mathcal{M}$ /kW
100—150 kW	70,— „	über 200 kW	60,— „

2. Die Arbeitsgebühr beträgt bei einem Jahresverbrauch von:

100000—150000 kWh	6,05 Pf./kWh	250000—350000 kWh	4,95 Pf./kWh
150000—200000 „	5,50 „	350000—500000 „	4,80 „
200000—250000 „	5,20 „	500000—650000 „	4,70 „

3. Die Arbeitspreise sind berechnet für einen Leistungsfaktor von 0,8 (entsprechend einer Ablesung an den Blindleistungszählern von 75% der Ablesung der Wirkleistungszähler). Jede überschreitende Leer-kWh wird mit 0,12 des Arbeitspreises verrechnet, jede fehlende Leer-kWh mit 0,06 des Arbeitspreises gutgeschrieben.

4. Auf den Arbeitspreis für die in den Nachtstunden entnommene Arbeit wird ein Rabatt von 33 ⅓% gewährt.

Der bisherige Verbrauch betrage 145 000 kWh, 162 000 Blind-kWh, das Maximum 92 kW. Es werde der Anschluß eines Elektroofens erwogen, der bei einem Anschlußwert von 118 kW eine jährliche Stromentnahme von 400 000 kWh bedingt. Der Leistungsfaktor des Ofens ist 1. Der Ofen kann entweder so betrieben werden, daß 160 000 kWh von der genannten Summe nachts entnommen wird, oder so, daß der gesamte Betrieb in den Tagstunden erfolgt. (Dabei ist für Tag- bzw. Nachtstunden der Mittelwert zwischen den Sommer- und Winterzeiten zu nehmen, falls diese, wie praktisch in den meisten Fällen, nicht gleich sind. Wird z. B. in den Sommermonaten von 18 bis 6 Uhr Nachtstromrabatt gewährt, in den Wintermonaten dagegen nur von 21 bis 6 Uhr, so ist bei gleichmäßiger Stromentnahme in die Jahresberechnung der Stromverbrauch von 19 ½ bis 6 Uhr als Nachtstrom einzuführen.)

Die Wärmekosten des Ofens ergeben sich dann aus folgenden Rechnungen:

a) Stromrechnung bei altem Betrieb:

Arbeitsgebühr 145 000 kWh · 6,05 Pf./kWh . . . . .	8772,50 <i>ℳ</i>
Leistungsgebühr 92 kW · 80 <i>ℳ</i> /kW . . . . .	7360,00 <i>ℳ</i>
Blindleistung. Bezogen wurden . . . . .	162 000 Blind-kWh
Frei wären 0,75 · 145 000 . . . . .	108 750 „
Daher sind zu bezahlen für . . . . .	53 250 Blind-kWh
6,05 · 0,12 · 53 250 . . . . .	386,60 <i>ℳ</i>
	Summe: 16 519,10 <i>ℳ</i>

b) Nach der Umstellung wären zu bezahlen:

Arbeitsgebühr 545 000 kWh · 4,70 Pf./kWh . . . . .	25 615,00 <i>ℳ</i>
Leistungsgebühr 210 kW · 55 <i>ℳ</i> /kW . . . . .	11 550,00 <i>ℳ</i>
	Summe: 37 165,00 <i>ℳ</i>

Blindleistung. Erlaubt wären 0,75 · 545 000 = 408 750 Blind-kWh  
verbraucht würden nur 162 000 „

Vergütung daher für 246 750 Blind-kWh

Abzug 246 750 · 0,06 · 4,70 . . . . .	695,80 <i>ℳ</i>
	Daher wären zu bezahlen 36 469,20 <i>ℳ</i>

Die Differenz zwischen früher und später beträgt daher 19 950,10 *ℳ*. Es kostet daher der Ofenstrom  $\frac{19950,10 \text{ } \mathcal{M}}{400000 \text{ kWh}} = 5 \text{ Pf./kWh}$ . Bei Entnahme von 160 000 kWh nachts würde von den Stromkosten ein Betrag von  $4,70 \cdot 160000 \cdot \frac{1}{3} = 2506,70 \text{ } \mathcal{M}$  abgehen.

Die gesamten Stromkosten betragen dann nur mehr: 19 950,10 *ℳ*  
– 2506,70 *ℳ*  
Rest 17 443,40 *ℳ*.

Der Ofenstrom kostet in diesem Fall  $\frac{17443,40 \text{ } \mathcal{M}}{400000 \text{ kWh}} = 4,38 \text{ Pf./kWh}$ .

b) Vergleich der Wärmekosten elektrischer und brennstoffgefeuerter Öfen.

Es muß hier noch der Vergleich der Wärmekosten elektrischer Öfen mit denen brennstoffgefeuerter erörtert werden. Auf den ersten Blick sieht die Aufgabe eindeutig aus: Das Produkt aus Stromverbrauch und

Strompreis (der nach den vorherigen Ausführungen zu ermitteln ist) wird dem Produkt aus Brennstoffmenge und Brennstoffpreis gegenübergestellt. Die Berechnung wird aber verwickelt, wenn man die Unterschiede zwischen verschiedenen Ofenarten bei schwankender Belastung berücksichtigt (Paschkis ZV 55). Es ist selbstverständlich, daß der Ofen, so wie jede Maschine, einen vom Durchsatz abhängigen spezifischen Verbrauch hat: je niedriger der Durchsatz, um so höher ist der spezifische Verbrauch (kcal/kg Ausbringen). Der Anstieg des spezifischen Verbrauchs mit sinkendem Durchsatz ist jedoch bei verschiedenen Ofenarten durchaus verschieden. Gefühlsmäßig gibt jedermann zu, daß der Elektroofen „einen höheren Wirkungsgrad“ habe als jeder brennstoffgefeuerte Ofen. Der „höhere Wirkungsgrad“ des Elektroofens ist bedingt durch seine niedrigeren Leerverluste und diese wiederum sind eine Folge des Fortfalls der Verluste durch unvollständige Verbrennung.

Die folgende Untersuchung geht der Einfachheit wegen vom Beharrungszustand aus.

Der Wärmeverbrauch des Elektroofens im Dauerbetrieb läßt sich darstellen als:

$$Q_e = Q_N + Q_{Ve} \cdot t, \tag{40}$$

wobei  $Q_e$  der Verbrauch des elektrischen Ofens,  $Q_N$  die Nutzwärme für einen bestimmten Durchsatz,  $Q_{Ve}$  in diesem Zusammenhang die Verluste (Leerverluste), und  $t$  die Zeit, in der der Durchsatz bewältigt wird, ist.

Im gleichen Sinn kann man den Verbrauch des brennstoffgefeuerten Ofens darstellen als

$$Q_b = \frac{1}{\eta_V} (Q_N + Q'_{Vb} \cdot t) \tag{41}$$

$$= \frac{Q_N}{\eta_V} + Q_{Vb} \cdot t. \tag{41a}$$

Hierin ist  $Q_b$  der Verbrauch des brennstoffgefeuerten Ofens,  $Q_N$  die Nutzwärme (die beim Vergleich natürlich den gleichen Durchsatz betreffen muß wie beim Elektroofen, also bei beiden Öfen gleich ist),  $Q'_{Vb}$  der Abstrahlungsverlust des brennstoffgefeuerten Ofens,  $Q_{Vb}$  der Leerverlust und  $\eta_V$  der Wirkungsgrad der Verbrennung für den betreffenden Ofen.

Wir betrachten zunächst die Abb. 84. Auf der Abszisse ist der Durchsatz aufgetragen, auf der Ordinate der stündliche Wärmeverbrauch. Die Gerade  $e$  stellt die Gleichung (40) (für Elektroöfen), die Gerade  $b_1$  die Gleichung (41 a) (für Brennstofföfen) mit  $\eta_V = 1$ , die

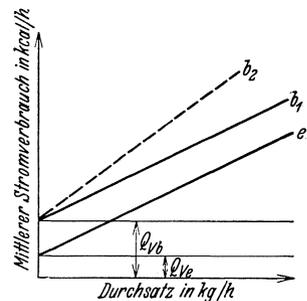


Abb. 84. Stündlicher Wärmeverbrauch, abhängig vom Durchsatz (Elektro- und Brennstofföfen).

Gerade  $b_2$  diese Gleichung mit  $\eta_V \neq 1$  dar. Die Geraden  $b_1$  sind parallel und sind nur um die Differenz der Leerverluste gegeneinander verschoben. Die Leerverluste sind selbst bei gleicher Isolierung bei dem brennstoffgefeuerten Ofen (wegen der unvollkommenen Verbrennung) immer höher als beim Elektroofen. Beim Abszissenwert 0 ist das Verhältnis der Ordinaten gleich dem Verhältnis der Leerverluste, und sinkt mit wachsendem Abszissenwert immer mehr. (Das Verhältnis nähert sich mit wachsendem Durchsatz asymptotisch dem Betrag 1.)

Teilt man die einzelnen Ordinatenwerte der Abb. 84 durch die zugehörigen Abszissenwerte, so kommt man auf die Abb. 85, bei der der spezifische Wärmeverbrauch in kcal/kg abhängig vom Durchsatz gezeigt ist. Der spezifische Verbrauch (kcal/kg) ist selbstverständlich bei kleinen Durchsätzen stets größer als bei großen. Er ist in der Abbildung

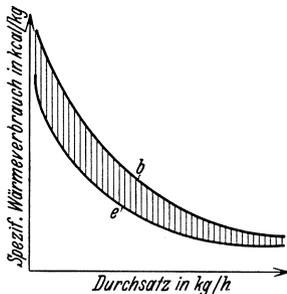


Abb. 85. Spezifischer Wärmeverbrauch, abhängig vom Durchsatz. (Elektro- und Brennstofföfen.)

für den Elektroofen mit  $e$ , für den Brennstoffofen mit  $b$  bezeichnet. Aber die Abnahme des spezifischen Verbrauchs ist in charakteristischer Weise beim Brennstoffofen langsamer als beim Elektroofen. Die schraffierte Fläche zwischen den beiden Kurven, die mit zunehmendem Durchsatz schmaler wird, zeigt deutlich die zunehmende Überlegenheit des Elektroofens mit abnehmenden Durchsätzen an. Vorausgesetzt bei dieser Darstellung und diesen Überlegungen ist, daß beide Öfen gleichmäßig auf Temperatur gehalten werden müssen. Der Elektroofen wird daher z. B. häufig in Werkzeughärtereien auch dem reinen Wärmekostenvergleich nach dem Brennstoffofen überlegen sein; denn hier werden die Öfen tagaus tagein in Bereitschaft auf Temperatur gehalten, wobei die Durchsätze oft sehr klein sind. Ähnliche Verhältnisse treten bei der Einsatzhärtung auf; bei großen Einsatzstiefen, die längere Zeit erfordern als geringe Einsatzstiefen, ist der Elektroofen dem Brennstoffofen eher überlegen als bei kleinen Einsatzstiefen mit ihren kurzen Einsatzzeiten. Nach Durchwärmung des Gutes muß der Ofen je nach Einsatzstiefe kürzere oder längere Zeit auf Temperatur gehalten werden, wobei nur die Leerverluste aufzubringen sind. Der Wärmeverbrauch je kg Einsatzgut ist bei langen Einsatzzeiten bei Elektroöfen verhältnismäßig niedriger als bei Brennstofföfen.

Die Vernachlässigung von  $\eta_V$  bringt oft, namentlich bei Öfen ohne Rekuperation, bedeutende Fehler mit sich. Berücksichtigt man  $\eta_V$ , so erhält man für den Brennstoffofen die Gerade  $b_2$  (Abb. 84); das Verhältnis der Ordinaten  $\frac{b_2}{e}$  nähert sich asymptotisch dem Wert  $\frac{1}{\eta_V}$ .

Die Abb. 84 und 85 zeigen diese Verhältnisse qualitativ. Man kann jedoch auch eine allgemeingültige Darstellung wählen, allerdings unter Annahme des Wertes  $\eta_V = 1$ . Man bildet dazu zunächst das Verhältnis der Gleichungen (41 a) und (40).

$$\frac{Q_b}{Q_e} = \frac{\frac{Q_N}{Q_{V_e}} + \frac{Q_{V_b}}{Q_{V_e}} \cdot t}{\frac{Q_N}{Q_{V_e}} + t} \quad (42)$$

Diese Gleichung ist in Abb. 86 dargestellt, und zwar in Form einer Kurvenschar, die mit einem Nomogramm vereinigt ist.

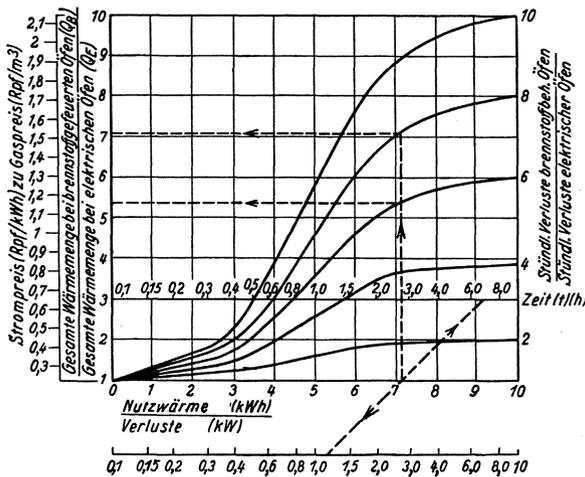


Abb. 86. Vergleich des Wärmeverbrauchs bei elektrischen und brennstoffgefeuerten Öfen. (Paschkis ZV 55.)

Als Kurvenparameter ist das Verhältnis der Leerverluste bei brennstoffgefeuerten zu denen bei elektrischen Öfen aufgetragen ( $\frac{Q_{V_b}}{Q_{V_e}}$ ). Die Abszisse der Kurvenschar ist nur eine Hilfsgerade. (Sie hat den Wert einer Zeit.) Man geht von dem um diese Hilfsgerade gezeichneten Nomogramm aus, dessen eine Skala die Zeit  $t$ , die andere das Verhältnis  $\frac{Q_N}{Q_{V_e}}$  ist. Die eine Ordinatenkala gibt das Verhältnis der Wärmemengen, die zweite (da häufig Elektro- mit Gasöfen zu vergleichen sind) das Verhältnis Strompreis: Gaspreis, bezogen auf einen Heizwert von 4000 kcal/m<sup>3</sup>.

Zum Gebrauch geht man von dem Abszissenomogramm (z. B.  $\frac{Q_N}{Q_{V_e}} = 12$ , Zeit 7 Stunden) aus und verbindet die beiden Geraden des Nomogramms. Vom Schnittpunkt mit der Abszissenachse lotet

man herauf bis zu dem Schnittpunkt mit der entsprechenden Kurve (z. B.  $\frac{Q_{vb}}{Q_{ve}} = 6$ ) und liest dann auf der Ordinatenachse das Verhältnis der Wärmemengen ab (z. B. 5,2).

## 2. Grenzstrompreis auf Grund des Betriebskostenvergleichs.

Eine allgemein gültige Gliederung der Betriebskosten dürfte sich kaum finden lassen. Dies scheint auch die Hauptschwierigkeit zu sein, die die Berechnung des Grenzstrompreises auf Grund des Betriebskostenvergleichs bisher verhinderte. In vielen Betrieben sind die einzelnen Betriebskostenanteile noch nie festgestellt worden. Die Abb. 87 soll daher keine allgemeingültige Darstellung sein, sondern will nur ein Beispiel geben, und darauf hinweisen, wie mannigfaltig die Betriebskosten-

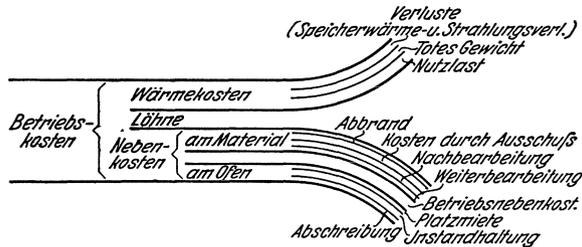


Abb. 87. Schema der Kostengliederung eines Ofenbetriebes. (Paschkis ZV 54.)

anteile bei der Wärmebehandlung sind. Das Schaubild unterscheidet Wärmekosten, Lohnkosten und Nebenkosten. Die Wärmekosten sind unter 1 bereits ausführlich besprochen worden.

### a) Lohnkosten.

Hier sind zunächst — falls nicht bereits unter Wärmekosten berücksichtigt — die Anfuhrkosten für die Brennstoffe zum Ofen und die Abfuhr der Schlacke einzusetzen. Dann kommen die eigentlichen Heizerlöhne hinzu. Vielfach kann man brennstoffgefeuerte Öfen nicht in den Produktionsgang einordnen, so daß das Gut zu besonderen Wärmebehandlungsräumen transportiert werden muß. Demgegenüber können die Elektroöfen fast ausnahmslos in den Gang der Fabrikation eingeschaltet werden, so daß der erwähnte Transport entfällt. Die Transportlöhne sind in die Berechnung miteinzusetzen. Eigentliche Bedienungs-löhne kommen beim Elektroofen kaum vor. Anheizen und Regelung erfolgt meist automatisch; lediglich bei der Beschickung wird z. T. menschliche Arbeitskraft gebraucht.

### b) Nebenkosten.

Außer Wärmekosten und Löhnen spielen noch eine große Zahl anderer Kostenbestandteile eine Rolle in der Betriebskostenaufstellung.

Diese übrigen Bestandteile werden meist unter dem Sammelbegriff „Nebenkosten“ zusammengefaßt. Als Beispiel einer Gliederung der Nebenkosten sei auf die Abb. 87 verwiesen; es muß jedoch nochmals betont werden, daß die hier gezeigte Gliederung nur ein Beispiel ist und keinen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit erhebt. Allgemein brauchbar dürfte dabei lediglich die Unterteilung in:

- Nebenkosten am Material,
- Nebenkosten am Ofen,
- Betriebsnebenkosten

sein. Unter den Nebenkosten am Material verdienen die Ausschlußkosten hervorgehoben zu werden; denn in vielen Fällen wird sich durch Einführung des elektrischen Betriebs die Ausschlußmenge verringern. Und einer bestimmten Ausschlußmenge von z. B.  $p\%$  entspricht eine

stärkere Verteuerung als  $1 + \frac{p}{100}$  gegenüber den ohne Ausschluß auftretenden „angenommenen“ Wärmekosten. Denn es muß ja nicht nur die Wärmebehandlung wiederholt werden, sondern in den meisten Fällen muß noch mehr Arbeit aufgewendet werden, um das verdorbene Stück wieder brauchbar zu machen. Bezeichnet man als „Wertzahl“ den Quotienten  $\frac{\text{Wertverlust}}{\text{angenommene Wärmekosten}}$ , so

sind im Zähler entweder die Differenz Neuwert — Altwert oder die Aufarbeitungskosten einzusetzen. Aus der Wertzahl und dem mengenmäßigen Ausschlußbetrag  $p$  ergibt sich aus der Abb. 88 der „Verteuerungsbeiwert“, der angibt, mit welcher Zahl die angenommenen Wärmekosten multipliziert werden müssen, um die wahren Wärmekosten, unter Berücksichtigung des Ausschusses, zu erhalten.

Es ist weiter unterschieden zwischen Weiterbehandlungskosten und Nachbehandlungskosten. Die ersteren umfassen alle jene Vorgänge, denen das Material im Anschluß an die Wärmebehandlung auf alle Fälle unterworfen werden muß, deren Höhe sich aber durch die Wärmebehandlung ändern kann (z. B. ist Zahl und Stärke der Züge im Anschluß an das Weichglühen abhängig von der Güte der Wärmebehandlung). Durch die Nachbehandlung werden alle unerwünschten Folgen der eigentlichen Erwärmung bekämpft. Zur Nachbehandlung gehört in diesem Sinn z. B. die Reinigung des Gutes von Schmutz und Zunder.

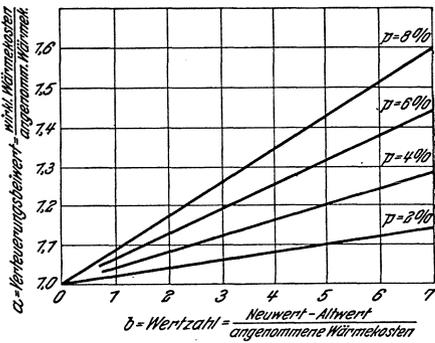


Abb. 88. Verteuerung der Wärmebehandlung durch Ausschluß. (Paschkis ZV 54.)

In der Regel werden beim brennstoffgefeuerten Ofen die Löhne und Nebenkosten höher sein als bei dem elektrischen Ofen. Ihr Verhältnis

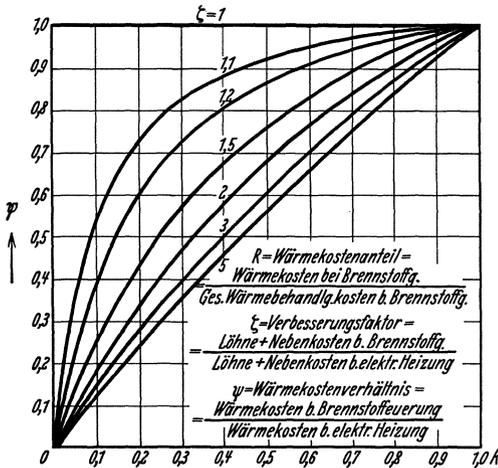


Abb. 89. Einfluß des Wärmekostenanteils auf den Verbesserungsfaktor bei verschiedenen Wärmekostenverhältnissen. (Paschkis BV 6).

sei als „Verbesserungsfaktor“ bezeichnet. Weiter soll das Verhältnis der Wärmekosten zu den gesamten Wärmebehandlungskosten (Wärmekosten + Löhne + Nebenkosten) als Wärmekostenanteil bezeichnet werden. Die Abb. 89 gestattet das Verhältnis  $\psi$  der Wärmekosten zu jedem Verbesserungsfaktor  $\zeta$  und Wärmekostenanteil  $R$  abzulesen (siehe Paschkis BV 6). Man kann dann aus der Abb. 80

das erforderliche Wärmepreisverhältnis ermitteln. Es sei übrigens darauf hingewiesen, daß keineswegs immer die Nebenkosten beim elektrischen Ofen niedriger sein müssen als beim Brennstoffofen (Schutzgas beim Blankglühen).

### 3. Grenzstrompreisermittlung unter Berücksichtigung ideeller Vorteile.

Manche von den Betriebskosten lassen sich im voraus nicht genau übersehen. Aber auch wenn genaue Ermittlungen vorliegen, bleiben Einflüsse, die man zahlenmäßig überhaupt nicht erfassen kann. Es sei auf folgende Punkte hingewiesen:

Große Sauberkeit, dadurch u. a. Hebung der Arbeitsfreudigkeit; Möglichkeit der Reproduzierbarkeit einmal als richtig erkannter Vorgänge; Einfachheit und Übersichtlichkeit ermöglichen leichte Kontrolle der richtigen Bedienung; Möglichkeit, die Öfen in den Fließbetrieb einzuordnen.

Ist der Anteil der Wärmebehandlungskosten an den Gesamtkosten des betreffenden Werkstücks nicht groß, so wird man diesen ideellen Vorteilen zu Liebe eine gewisse Verteuerung der Wärmebehandlungskosten in Kauf nehmen können.

Betragen z. B. die Wärmebehandlungskosten 10% der gesamten Fertigungskosten und würden die Wärmebehandlungskosten durch Elektrowärme um 10% erhöht, so bedeutet dies, daß das Gut um 1% verteuert wird, was man unter Umständen um der zahlenmäßig nicht nachweisbaren, aber zweifellos vorhandenen Vorteile der Elektrowärme willen gern in Kauf nehmen wird.

## B. Vergleich verschiedener Öfen.

Während die im vorigen Abschnitt besprochenen Vergleichspunkte (Lohn, Nebenkosten usw.) vorwiegend dazu dienen, die Wirtschaftlichkeit der Elektrowärme überhaupt und einer in Aussicht genommenen Ofenform für irgendeine besondere Aufgabe zu prüfen, soll hier noch besprochen werden, wie zwei Elektroöfen grundsätzlich gleicher Bauart miteinander verglichen werden können.

Diese Aufgabe tritt bei jeder Beschaffung eines Ofens auf: sobald die Form des Ofens festgelegt ist, muß entschieden werden, welches Fabrikat beschafft werden soll. Die Angaben in den Angeboten sind meistens so unklar, daß eine sachgemäße Entscheidung sehr schwer zu treffen ist. Welche Punkte bei einem derartigen Vergleich eine Rolle spielen können, und wie verschleiert oft die Angaben gemacht werden, hat der Verfasser (Paschkis ZV 56) an einem Beispiel dargelegt.

Über die Art, wie ein solcher Vergleich durchgeführt werden kann, herrscht noch vielfach Unklarheit. Er sollte sich, dies sei vorweg bemerkt, sowohl auf wärmetechnische Verhältnisse als auch auf die Ausführungsform des Ofens erstrecken.

Die Beurteilung der letzteren ist meist dem Laien außerordentlich schwer, und auch die Angabe von Referenzen wird oft nicht vollen Ersatz schaffen können, weil bei der großen Mannigfaltigkeit der Bauformen ein guter Erfolg mit einer Ofenform nicht notwendig auch eine Gewähr für den Erfolg bei anderen Aufgaben bietet.

Für diesen Teil des Vergleichs lassen sich allgemeine Richtlinien nicht geben; anders für den Vergleich der wärmetechnischen Güte. Hier arbeitete man früher fast ausschließlich mit „abgeleiteten Kennzahlen“, wie Wirkungsgrad, Leistungsfähigkeit und dgl. Auch heute findet man noch oft derartige Angaben, die jedoch irreführend sind und unbedingt vermieden werden sollten. Im Gegensatz dazu sind „unmittelbare Kennzahlen“, wenn sie zweckmäßig ausgewählt werden, trotz der etwas größeren Mühe, die ihre Auswertung verursacht, sehr fruchtbar, vor allem wegen ihrer Eindeutigkeit. Da in der Praxis noch häufig mit abgeleiteten Kennzahlen gearbeitet wird, seien die beiden wichtigsten derselben zunächst erörtert.

### 1. Abgeleitete Kennzahlen.

#### a) Wirkungsgrad.

Man begegnet auch heute noch häufig dem Versuch, den Wärmeverbrauch zweier Öfen durch Gegenüberstellung von Wirkungsgradzahlen zu vergleichen. Abgesehen davon, daß, wie oben erwähnt, der Wärmeverbrauch nicht allein maßgebend für die Wärmekosten ist, und der Wärmepreis bei verschiedenen Öfen (Tag- und Nachtentnahme,

Höhe des Anschlußwerts u. dgl.) verschieden sein kann, führt dieser Versuch nicht zum Ziel, weil der Wirkungsgrad eines Ofens sich nicht eindeutig definieren läßt. Man kann — ohne auf die Abhängigkeit des „Wirkungsgrades“ von der Beschickung (Ausnützung des Ofens) Rücksicht zu nehmen — wenigstens vier verschiedene Größen als Wirkungsgrad definieren (Paschkis ZV 54). Dabei ist stets ein einheitliches Verfahren, das im Ofen vorgenommen werden soll, zugrunde gelegt. Es gibt aber viele Verfahren (Tempern, Einsetzen usw.), die unabhängig von dem Ofen eine bestimmte Zeit erfordern. Der „Wirkungsgrad“ wäre demnach noch weiter von dem im Ofen vorzunehmenden Verfahren abhängig, und bei gleichem Ofen würde man z. B. je nach der verlangten Einsatztiefe stark verschiedene Wirkungsgradzahlen erhalten.

Beträgt etwa der Leerverlust eines Zementierofens (Einsatzofens) 15 kW, die Wärmemenge zur Erwärmung einer bestimmten Gutmenge 100 kWh, die Zeit bis zur Erreichung der Einsatztemperatur 4 Std., die Einsatzdauer zur Erreichung einer Einsatztiefe von 0,5 mm 6 Std., zur Erreichung einer Tiefe von 1 mm 12 Std., so wäre der „Wirkungsgrad“ bei 0,5 mm Einsatztiefe: 0,4; zur Erreichung einer Einsatztiefe von 1 mm: 0,29. Wird das Gut nur bis auf Einsatztemperatur erwärmt und dann abgekühlt, so beträgt der „Wirkungsgrad“ sogar 0,53.

Wir sehen also: der Wirkungsgrad ist kein geeignetes Mittel für den Vergleich von Öfen.

#### b) Leistungsfähigkeit.

Oft wird der Vergleich von Öfen nach ihrer „Leistungsfähigkeit“ durchgeführt. Diese Zahl gibt das höchstmögliche Ausbringen aus dem Ofen ohne Rücksicht auf Durchwärmungszeit an. Sie ist gegeben durch Teilung des Wärmeüberschusses (Anschlußwert — Leerverluste) durch den Wärmeverbrauch für 1 kg des zu erwärmenden Gutes. Dieser Maßstab bevorzugt zu Unrecht Öfen mit hohem Anschlußwert. Ein Ofen „doppelter Leistungsfähigkeit“ könnte mit Rücksicht auf die oben besprochenen Durchwärmungsgesetze (siehe S. 11ff.) keineswegs die doppelte Menge Gut in der Zeiteinheit erwärmen.

Also ist auch die Leistungsfähigkeit kein geeigneter Vergleichsmaßstab für Öfen.

## 2. Unmittelbare Kennzahlen<sup>1</sup>.

Diese sollen sich erstrecken auf:

Wärmeverbrauch,	Regelung,
Abmessungen,	Haltbarkeit der Widerstände.
Durchsatz,	

<sup>1</sup> Paschkis ZV 54 und BV 6.

Für den Wärmeverbrauch soll angegeben werden: Leerverluste bei der Arbeitstemperatur, theoretische und praktische Anheizzeit; Speicherwärme. Bei Angabe der Speicherwärme ist auf die oben angegebene Art der Bestimmung Rücksicht zu nehmen (vgl. S. 147) und darauf zu achten, daß auch nach Beendigung der praktischen Anheizzeit gegenüber dem Beharrungszustand ein vermehrter Wärmeverbrauch auftritt.

Bei ununterbrochenem Betrieb ergibt sich aus diesen Kennzahlen der tatsächliche Wärmeverbrauch durch Multiplikation der Leerverluste mit der Zeit der zu berechnenden Betriebsperiode und Hinzufügen der Nutzwärme einschließlich der Wärme für totes Gewicht.

Bei unterbrochenem Betrieb hängt die Berechnungsart von der Dauer der Unterbrechungen ab. Wird der Betrieb nur kurzzeitig — z. B. nach dauernder Benutzung während einer Woche nur über den Sonntag — unterbrochen, so kann man meist so vorgehen, als würde der Betrieb auch über den Sonntag durchgehen und nur einen geringen Abschlag für die kleineren Verluste während der Stillstandszeit machen. Dauert umgekehrt die Unterbrechung so lange, daß der Ofen vollkommen erkaltet, so ergibt sich auf Grund der Kennzahlen der Wärmeverbrauch angenähert wie folgt:

Wärmeverbrauch = Speicherwärme + Leerverlust · (Betriebszeit — theoretische Anheizzeit) + Leerverlust · 0,66 · theoretische Anheizzeit.

Eine genaue Lösung für Zwischenfälle ist nicht bekannt.

Bezüglich der Abmessungen ist zu verlangen, daß die Nutzraumabmessungen und der Schutzabstand angegeben werden. Mindestens muß gesagt sein, worauf sich die angegebenen Maße beziehen. Häufig werden die Abmessungen der Verlustfläche, der Türquerschnitt usw. angegeben (Paschkis ZV 56). — Bei gleicher Konstruktion und gleicher Isolierung wird der Ofen mit kleineren Schutzabständen die geringeren Wärmeverluste ergeben. Man wird dann prüfen müssen, ob durch besondere Maßnahmen bei dem einen Ofen ein geringerer Schutzabstand gerechtfertigt ist, ob bei dem anderen der Schutzabstand übertrieben groß ist usw. Dabei spielt natürlich die Gebrauchstemperatur und der Verwendungszweck des Ofens eine Rolle. Denn wenn die Temperatur hoch ist und das Gut stark zundert und lange im Ofen bleibt, werden die Schutzabstände bei gleicher Konstruktion größer sein müssen als für entgegengesetzte Bedingungen. Z. B. werden Schutzabstände, die bei einem Ofen zur Wärmebehandlung von nichtrostendem hitzebeständigem Metall ausreichen, bei den gleichen Temperaturen zur Wärmebehandlung von Eisen zu knapp sein. — Bei Wanderöfen wird man sich in der Regel bei Vergleichen der Abmessungen auf die Angabe des Querschnitts beschränken müssen (wenigstens in Form von „Kenn-

zahlen“ wird man die Längenabmessungen nur schwer vergleichen können).

Bei Angabe des Durchsatzes ist auf zweierlei zu achten:

Es genügt nicht, den Durchsatz in kg/h für ein bestimmtes Material anzugeben. Denn der wirklich erzielbare Durchsatz hängt von Stückgröße und Schichtung ab.

Weiter ist die relative Mindertemperatur, auf die sich der Durchsatz bezieht, anzugeben.

Die Bestimmung der Regeldifferenz würde am besten durch Angabe der beiden im Abschnitt Regelung näher erläuterten Kennzahlen  $K_1$  und  $K_2$  erfolgen (siehe S. 102). — Solange sich dieses Verfahren nicht durchgesetzt hat, sollte sich die Angabe der Regeldifferenz wenigstens auf einen bestimmten Wärmeüberschuß beziehen (also z. B. auf voll durchwärmten leeren Ofen bei einem bestimmten Anschlußwert) und die Trägheit des zur Bestimmung verwendeten Meßgeräts nennen. Die Regeldifferenzen unmittelbar nach Beschickung werden dann — weil der Wärmeüberschuß geringer ist — stets kleiner als die oben angegebenen sein.

Die Haltbarkeit der Widerstände ist in Kennzahlen eindeutig noch nicht festlegbar. Man versucht, von der spezifischen Belastung auszugehen. Wie im Abschnitt über Berechnung der Widerstände angegeben ist (siehe S. 70), kann man aber bei unveränderter Belastung die Widerstände mit verschiedenen Gewichten ausführen. Je höher das Gewicht, um so länger wird bei gleicher Konstruktion und gleicher Belastung der Widerstände die Lebensdauer sein. Es fehlt bis heute noch ein Umrechnungsmaßstab, um den Einfluß einer veränderten Belastung auf die Lebensdauer der Widerstände bestimmen zu können. Weiter ist der Einfluß der Widerstandskonstruktion zahlenmäßig noch völlig ungeklärt. Die gleiche Belastung wird z. B. zweifellos bei Band-, Wendel-, Kern- und Rahmenwiderständen und bei nichtmetallischen Siliziumkarbidwiderständen völlig andere Lebensdauer ergeben. So kann man zunächst nur für Widerstände gleichen Werkstoffs und gleicher Konstruktion durch Angabe der Belastung und des Gewichts eine qualitative Reihenfolge der Güte aufstellen.

### C. Wirtschaftliche Betriebsführung.

Zwei Wege vor allem dienen bei gegebenem Ofen dazu, die Wärmekosten herunterzusetzen:

- Herabsetzung des Wärmeverbrauchs,
- Herabsetzung des Wärmepreises.

Um beides zu erreichen, muß zunächst die grundsätzliche Forderung aufgestellt werden, daß nach einem Betriebsfahrplan gearbeitet wird. Immer wieder sollte betont werden, daß die Wärmebehandlung genau so der „Arbeitsvorbereitung“ unterliegen muß wie jeder andere Teil eines gut geführten Betriebes.

### 1. Die Herabsetzung des Wärmeverbrauchs

setzt voraus:

gute zeitliche und räumliche Ausnützung des Ofens, und Vermeidung unnötiger Temperaturwechsel.

Jeder Temperaturwechsel hat Wärmeverluste zur Folge. Werden in einem Ofen Vorgänge mit verschiedenen Temperaturen durchgeführt, so bedeutet es eine Ersparnis, über einen möglichst langen Zeitraum alle Vorgänge bei einer Temperatur (wenn möglich der höheren) auszuführen, und dann erst die bei der zweiten Temperatur. Ist diese die niederere, so wird hierbei ein Teil der Speicherwärme wieder ausgenützt, die bei der höheren Temperatur im Mauerwerk gebunden war.

### 2. Die Herabsetzung des Wärmepreises

muß durch Anpassung der Betriebsführung an den Tarif erfolgen und wird meist Berücksichtigung auch der oben (siehe S. 155) erwähnten vier Punkte voraussetzen. Die Betriebsführung hat namentlich auf die „hohe Benutzungsstundenzahl“ und „Vermeidung der Benutzung während der Spitzenzeiten“ Einfluß. Man wird während der Spitzenzeiten die Leistung des Elektroofens, soweit sich dies irgend machen läßt, entweder verringern oder, was noch besser ist, ganz abschalten. Man hat dazu sogar selbsttätige Einrichtungen entwickelt, die bei Erreichen einer bestimmten Last den Ofen selbsttätig unterbrechen. An anderer Stelle hat man diese Arbeit einem Schalttafelwärter übertragen, der den Zähler beobachtet und bei starkem Anstieg der elektrischen Arbeit den Ofenstromkreis unterbricht. Dies sei an Hand der Abb. 90 erläutert, die den Fall eines Tarifs mit viertelstündlicher Maximumzählung behandelt.

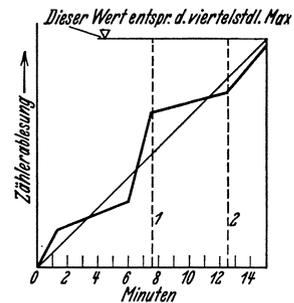


Abb. 90. Beispiel des Arbeitsverlaufs in einem Werk während eines Spiels des Maximumzählers (15 Minuten).

Sie zeigt den Zählerstand über eine Viertelstunde. Der Anstieg ist zunächst steil, wird dann etwas flacher, um später durch Einschaltung irgendwelcher Geräte sehr schnell zu wachsen. Daraufhin schaltet zur Zeit 1 der Schalttafelwärter den Ofen ab, der Anstieg verlangsamt sich. Wird nun festgestellt, daß der Verbrauch von z. B. 50 kWh voraussichtlich nicht erreicht wird, so würde der Ofen etwa zur Zeit 2 wieder eingeschaltet werden.

Im Gegensatz zu dieser Arbeitsweise steht eine, bei der man auf grundsätzlich gleiche Arbeitsverläufe bei aufeinander folgenden Arbeitsprozessen ausgeht, die eventuelle Erhöhung der Spitzen in Kauf nimmt und dafür jede Charge sozusagen an Hand des Zählers fährt. Man wird z. B. vorschreiben, daß Chargen von einem bestimmten Gewicht nach einem bestimmten Stromverbrauch dem Ofen entnommen werden. Man kann bei regelmäßiger Kontrolle des Zählerstandes auf jede Unstetigkeit der Produktion aufmerksam werden.

Welches Verfahren man wählt, das der geringsten Wärmekosten oder das der gleichen Chargenvorschrift, hängt, abgesehen von der persönlichen Einstellung des Betriebs, auch von der Art des zu behandelnden Gutes ab. Man wird sich vielfach bemühen, eine Verbindung der beiden Verfahren zu erreichen und wird um so eher damit Erfolg haben, je gleichmäßiger die Stromentnahme des übrigen Betriebes ist.

Die Art, wie Beschaffung und Betriebsführung hierbei ineinandergreifen, sei am folgenden Beispiel dargelegt.

Verlangt wird ein Ofen zum Härten von Blattfedern. Die einzelnen Blätter haben gleichen Querschnitt ( $120 \cdot 15 \text{ mm}^2$ ), aber sehr verschiedene Längen: das kürzeste Blatt des Bundes hat eine Länge von 220 mm, das größte eine solche von 1300 mm. Die Federn werden nach Entnahme aus dem Ofen gehärtet, und zwar muß, damit der Härter voll ausgenützt sei, jede zweite (bei großen Federn höchstens dritte) Minute eine Feder anfallen. Die Härtetemperatur beträgt etwa  $850^\circ$ . Außen dem Härten ist noch ein Anlassen nötig, das aber nicht in den gleichen Öfen vorgenommen werden muß. Das Anlassen erfolgt bei etwa  $300 \dots 400^\circ$ .

Der Durchsatz an Federn ist gering. Im Monat werden nur etwa 60 Bunde hergestellt, die aus je 15 bis 16 Federn bestehen. Die gesamte Gutmenge eines Monats könnte also in etwa 30 bis 40 Stunden aufgearbeitet werden. Der Ofen müßte nur viermal im Monat angeheizt werden.

Der Strompreis setzt sich in der üblichen Weise aus einem Leistungspreis, der sich nach dem viertelstündlichen Maximum richtet, und für jedes kW 3,50  $\mathcal{M}$ /Monat betrage, und einem Arbeitspreis, der 4,0 Pf./kWh betrage, zusammen. Bei Nachtentnahme wird ein Nachlaß von 20% auf den Arbeitspreis gewährt. Eine Verbilligung durch guten Leistungsfaktor kann nicht eintreten.

Lösung 1. (Berücksichtigt nicht die Forderungen der Elektrowärmewirtschaft.) Da alle 3 min eine große Feder gehärtet werden muß, muß der Anschlußwert für einen Durchsatz von  $18,2 \text{ kg}/3 \text{ min}$  ( $18,2 \text{ kg}$ : Gewicht des größten Federblatts;  $60 \text{ kWh}$  Nutzleistung) ausreichen. Um schnelles Anheizen zu gewährleisten, würde ein Anschlußwert von etwa  $110 \text{ kW}$  vorteilhaft sein (bei 2 min Erwärmungszeit sogar  $150 \text{ kW}$ ).

Der Wärmeverbrauch eines Monats würde sich, unter Zugrundelegung eines Verlustes von  $5 \text{ kW}$ , einer Speicherwärme von  $75 \text{ kWh}$ , 4 maligem Aufheizen/Monat und einem Bundgewicht von  $135 \text{ kg}$  ergeben zu:

$$\begin{array}{r}
 60 \cdot 135 \cdot 0,17 \cdot 830 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 1320 \text{ kWh} \\
 \text{Speicherwärme. . . . . } 300 \text{ ,,} \\
 \text{Verluste. . . . . } 140 \text{ ,,} \\
 \hline
 \text{Summe: } 1960 \text{ kWh}
 \end{array}$$

Die Wärmekosten hierfür würden betragen (unter Zugrundelegung eines viertelstündlichen Maximums von 100 kW):

Leistungspreis $3,5 \cdot 100 = 350,00$ $\mathcal{M}$
Arbeitspreis $0,04 \cdot 1960 = 78,40$ „
Wärmekosten <u>428,40 <math>\mathcal{M}</math>/Monat.</u>

Die folgenden Lösungen 2 und 3 berücksichtigen die Forderungen der Elektrowärmewirtschaft.

Lösung 2. Es wird ein Ofen mit einem Fassungsvermögen von 3 vollständigen Sätzen Federn vorgesehen. Der Ofen wird zu Schichtschluß beschickt, selbsttätig mit Beginn des Nachtstromtarifs eingeschaltet, und über Nacht langsam aufgeheizt. Unter Tags ist dann nur eine geringe Leistung zuzuführen, die zur Deckung der Verluste ausreicht. Für die gleiche Produktion wie oben ergibt sich dann:

Wärmeverbrauch:	
Nutzwärme . . . . .	1320 kWh
Speicherwärme (20 mal Anheizen) . . . . .	1500 „
Verluste (davon 50% in der Nacht) . . . . .	280 „
	<u>Summe: 3100 kWh</u>
Wärmekosten:	
3,5 $\mathcal{M}$ /kW $\cdot$ 6 kW . . . . .	21,00 $\mathcal{M}$
2960 kWh zum Nachtstrompreis (0,04 $\cdot$ 0,8)* . . . . .	94,72 „
140 kWh zum Tagstrompreis (0,04) . . . . .	5,60 „
	<u>Summe: 121,32 <math>\mathcal{M}</math>/Monat.</u>

Hierbei ist angenommen, daß die Verluste wegen des größeren Fassungsvermögens des Ofens größer sind als bei Lösung 1. Bei Tag tritt als Leistung (für den Leistungspreis) nur der Leerverlust auf. Man sieht, daß der Wärmebedarf um fast 60% höher ist. Durch Verlegung des Verbrauchs in die Nacht entfällt aber ein großer Teil der Leistungsgebühr und außerdem wird für den größten Teil der Arbeitsgebühr der billige Nachtpreis berechnet.

Dadurch kommt trotz des erheblich höheren Verbrauchs ein Betrag in der Größenordnung von 25% des früheren für die Wärmekosten zustande.

Lösung 3. Setzt man nun noch voraus, daß in dem Ofen auch angelassen werden soll, so würde man so verfahren, daß nach dem Härten der Federn nach Lösung 2 der Ofen mit verringertem Anschlußwert zum Anlassen verwendet würde. Es müßten je Tag 3 Bunde angelassen werden, und wenn man eine 6stündige Arbeitszeit hierfür rechnet, so wäre ein Anschlußwert von etwa 8 kW ausreichend. Ein beträchtlicher Teil der Speicherwärme würde wieder ausgenutzt, so daß für das Anlassen nur sehr geringe Kosten aufzuwenden wären. Man kann den zusätzlichen Wärmeverbrauch auf etwa 700 kWh/Monat schätzen. Die Wärmekosten für das Anlassen würden betragen:

Zusätzliche Leistungsgebühr: $2 \cdot 3,5$ . . . . .	7,00 $\mathcal{M}$
Arbeitsgebühr $700 \cdot 0,04$ . . . . .	28,00 „
Zusätzliche Wärmekosten	<u>Summe: 35,00 <math>\mathcal{M}</math>/Monat</u>

Es ist zweifellos, daß man zu etwas niedrigeren Stromverbrauchszahlen kommen würde, wenn man etwa alle Härten einer Woche aneinanderreihen würde (Vermeidung unnötiger Temperaturwechsel!). Aber man würde dann zum Teil mit dem teureren Tagstrom härten müssen, und außerdem eine höhere Leistungsgebühr entrichten.

\* 20% Nachtstromrabatt.

## Zweiter Teil.

**Ausführungsformen.**

Die außerordentliche Mannigfaltigkeit von Bauarten sowohl ganzer Öfen als auch von Einzelteilen macht es unmöglich, im Rahmen dieses Buches eine erschöpfende Beschreibung aller Formen zu geben. Es sollen vielmehr an einer Auswahl von typischen Ausführungen die Gesichtspunkte der Konstruktion dargelegt und eine Übersicht über die Möglichkeit ihrer Abwandlung gegeben werden.

Zwei Temperaturen, und zwar die von etwa 500 und 1000°, stellen Grenzen dar, die die Auswahl der Ofenbaustoffe und die Konstruktion der Öfen ausschlaggebend beeinflussen.

Bis 500° kann man die Innenwand aus gewöhnlichem Eisen machen, ohne befürchten zu müssen, daß sie durch Oxydation zerstört wird: Niedertemperaturöfen.

Oberhalb 500° muß man bereits keramische Baustoffe für die Innenwand des Ofens verwenden, kann aber bis 1000° noch nickelhaltige Legierungen für die Widerstandselemente benützen: 500 bis 1000° Mitteltemperaturöfen.

Oberhalb 1000°... 1100° kann man z. Z. metallische Widerstände nicht mehr verwenden, man ist auf nichtmetallische Widerstände (meist Siliziumkarbid) angewiesen<sup>1</sup>. Oberhalb 1000°: Hochtemperaturöfen.

**I. Einzelteile.****A. Widerstände.**

Man kann die Widerstände in zwei große Gruppen teilen:

1. Freistrahrende Widerstände, bei denen das stromführende Widerstandsmaterial frei im Ofen liegt und
2. eingebettete Widerstände, bei denen die Wärmeabgabe vom Widerstandsmaterial nicht unmittelbar erfolgen kann. Die Wärme muß erst eine elektrische Isolierschicht durchdringen, die natürlich auch ein Temperaturgefälle bedingt. Die Heizleiter müssen eine erheblich höhere Temperatur erreichen, als die an der Oberfläche nutzbar gemachte. Diesem Nachteil steht als Vorteil gegenüber, daß die Widerstände gegen Oxydation und gegen Berührung geschützt sind.

---

<sup>1</sup> Es scheint, daß die Entwicklung hochhitzebeständiger Legierungen zur Verwendung nicht nickelhaltiger Stoffe führen wird.

## 1. Metallische Widerstände.

### a) Freistrahkende Widerstände.

**a) Rahmenwiderstände.** Diese Widerstände werden auf keramische Reiter aufgewickelt, die entweder Kreuzform oder dgl. besitzen und so ohne metallische Stütze den Draht auf-

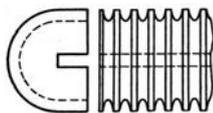


Abb. 91. Reiter für Rahmenelement. (Steatit-Magnesia A.G., Berlin-Pankow.)

Derartige Reiter können auch auf die zu beheizenden Flächen — z. B. Wände von Kesseln — unmittelbar aufgesetzt und dann bewickelt werden.

zunehmen gestatten, oder es werden einzelne Reiter ähnlich Abb. 91 auf einen eisernen Rahmen gesetzt, der je nach der gewünschten Form des Heizkörpers verschieden ausgebildet werden kann (Abb. 92). Für bandförmige Wider-



Abb. 92. Rahmenwiderstand. (Widerstand A.G., Hannover.)  
Beachte die Verschweißung des Heizdrahts mit dem Anschlußdraht.

stände schließlich kann man die Widerstände durch Auffädeln von einzelnen Isolatoren auf eiserne Tragstangen in beliebiger Länge und für die verschiedensten Bandquerschnitte herstellen (Abb. 93)<sup>1</sup>.

Die Anfertigung erfolgt meistens so, daß zunächst der Eisenrahmen hergestellt wird; dieser wird notfalls zwischen Spitzen einer Drehbank, sonst auf einer Wickelmaschine in Rotation versetzt, nachdem die Isolatoren aufgesetzt sind. Das Band wird an einer Stelle am Rahmen befestigt und durch die Umdrehungen des Rahmens aufgewickelt. Schließlich wird das Band abgeschnitten und das andere Ende ebenfalls am Rahmen befestigt.

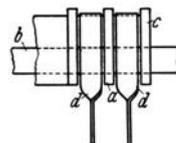


Abb. 93. Teile eines Rahmenwiderstands. (Industrie-Elektrofen G. m. b. H., Köln.)

Auf das Trageisen *b*, das zweckmäßig rechteckigen Querschnitt erhält, werden Isolatoren (nicht bezeichnet) und Zwischenstücke *a, c* aufgeschoben. Der bandförmige Heizwiderstand *d* liegt auf den Isolatoren auf. Durch Aneinanderfügen von Zwischenstücken *a, c* verschiedener Stärke kann die Teilung beliebig verändert werden.

Bei der Herstellung ist zu beachten, daß

1. das verwendete Rahmenmaterial zu der Temperatur paßt;

2. bei zu großem Abstand der Querstützen sich das Element verzieht und die Gefahr eines Kurzschlusses zwischen Heizkörper und Rahmen entsteht;

3. bei dem Entwurf der Isolatoren auf Kriechwege zu achten ist. Die Trennwände zweier Windungen müssen ausreichend hoch geführt werden;

4. sich ausreichende Kriechwege nur durch starke Rippen erzielen

<sup>1</sup> Ruß: D.R.P. 502413.

lassen, da die Höhe der Rippen für jede Stärke aus Gründen der Herstellung und mit Rücksicht auf mechanische Festigkeit begrenzt ist;

5. bei großen Breiten der Rahmen die Steigung des Bandes beim Wickeln eine sehr wesentliche Rolle spielt. Man muß entweder ab-

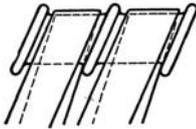


Abb. 94. Abgeschrägte Isolatoren.

Bei großen Breiten des Rahmens erforderlich, um ein Abplatzen der Ecken zu vermeiden.

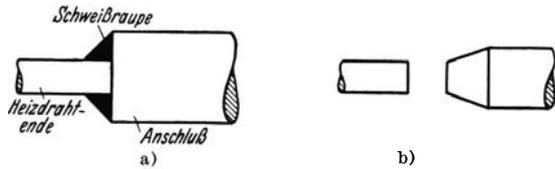


Abb. 95. Schweißverbindung von Runddraht mit Anschlußstück. (Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau.)

a) Die Enden von Anschlußstück und Heizdraht werden stumpf aneinander gestoßen. Es wird dann autogen oder mittels Lichtbogen in der im Bild angegebenen Weise eine Schweißbraupe aufgelegt.  
b) Die Stücke werden in der hier gezeigten Weise vorbereitet und dann elektrisch stumpf geschweißt.

geschrägte Isolatoren verwenden, was aber teuer ist (Abb. 94), oder die Abstände der Isolatoren erheblich größer als die Breite wählen, so daß sich das Band oder der Draht auf den Isolatoren bewegen kann. Andernfalls platzen beim Wickeln die Wulste der Isolatoren weg.

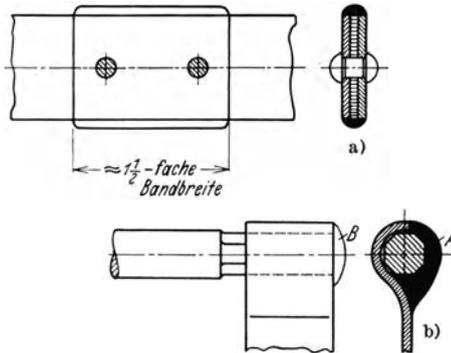


Abb. 96. Schweißverbindungen von Band mit Anschlußstück. (Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau.)  
a) Verstärkung des Heizkörperbandes durch beidseitiges Aufschießen je eines gleich starken Bandes. — Die drei Bänder werden auf etwa 1,5-fache Bandbreite übereinandergelegt, mit 2 Nieten geheftet und dann an den Schmalkanten verschweißt. b) Anschluß von Heizband an einen Rundstab. — Das Band wird etwa um den halben Umfang des Führungsstabes herumgebogen und in der durch A angegebenen Weise verschweißt. Das zusätzliche Verschweißen der Stirnenden B ist von Vorteil.

5. Die Draht- oder Bandenden müssen so ausgestaltet werden, daß ein Anschluß der Stromzufuhrdrähte möglich ist. Wird, wie es meist geschieht, die Verbindung der einzelnen Drähte durch Verschraubung ausgeführt, d. h., wird an jedes Element ein Verbindungsdraht angeschraubt, so muß der Heizdraht mit den Klemmschrauben verbunden werden. Abb. 92 zeigt eine Schraubverbindung einer Klemme mit dem Heizdraht. Bei höheren Temperaturen erfolgt Verschweißen des Drahtes mit der Schraube. Das Ende des Heizdrahtes wird hierzu verstärkt, um eine Er-

wärmung der Klemme selbst zu vermeiden, und zwar empfiehlt es sich, die Verstärkung auf 3 bis 4fachen Querschnitt vorzunehmen; ein Draht von 1,2 mm  $\varnothing$  z. B. wird auf etwa 2 mm verstärkt werden. Die gleiche Verstärkung wird auch ausgeführt, wenn die

die Verbindung der einzelnen Elemente außerhalb des Ofens vorgenommen wird, so daß jeder einzelne Heizkörper durch die Ofenwand geführt werden muß. Die Verbindung des Heizdrahtes mit der Verstärkung geschieht entweder durch Verschweißen (Abb. 95 und 96) oder durch Umwickeln des eigentlichen Heizleiters mit Draht aus gleich oder besser leitendem Material. Statt der Verschweißungen sind auch Quetschverbindungen angewendet worden, wobei das verstärkte Stück unter Umständen als Rohr ausgebildet ist<sup>1</sup>.

Die Abb. 97 zeigt eine Platte mit aufgebauten Heizwiderständen, wie sie z. B. für Trockenöfen verwendet wird. Durch die Montage auf die Platte ist ein Auswechseln der Widerstände sehr leicht gemacht.

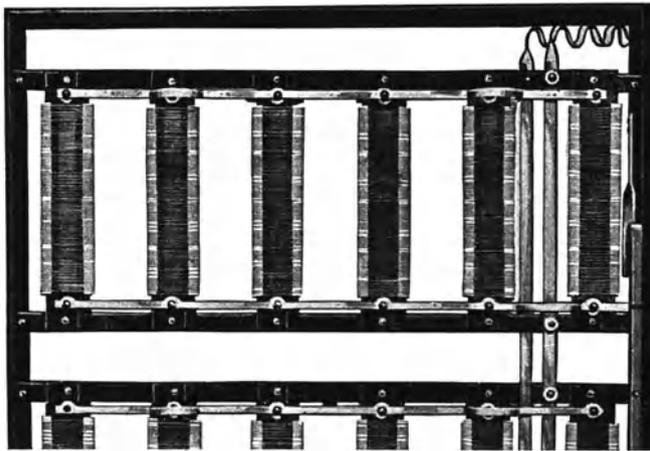


Abb. 97. Heizregister (Heizplatte). (Widerstand-A.G., Hannover).  
Die Schaltverbindungen sind aus Kupferstreifen hergestellt.

Rahmenwiderstände finden hauptsächlich für Öfen bis 450 ... 500° Verwendung.

β) **Wendelwiderstände** (Abb. 98). Die Herstellung erfolgt entweder auf Schraubenfedernwickelmaschinen, die mit Rücksicht auf die hohen Festigkeitswerte des Widerstandsmaterials sehr fest gebaut sein müssen, oder auf Drehbänken über einem Dorn (Abb. 99).

Die Verstärkung der Enden muß in gleicher Weise ausgeführt werden wie bei den Rahmenelementen (Abb. 100).

Besondere Sorgfalt ist auf die Lagerung der Wendel zu verwenden. Einmal soll die mechanische Unterstützung möglichst vollkommen sein und dann ist peinlichst darauf zu achten, daß die Heizwiderstände überall die Wärme gleich gut abgeben können, daß also keine sogenannten

<sup>1</sup> Wiggin u. Glynn Lobley: D.R.G.M. 1014075 und SSW: D.R.G.M. 1094404.

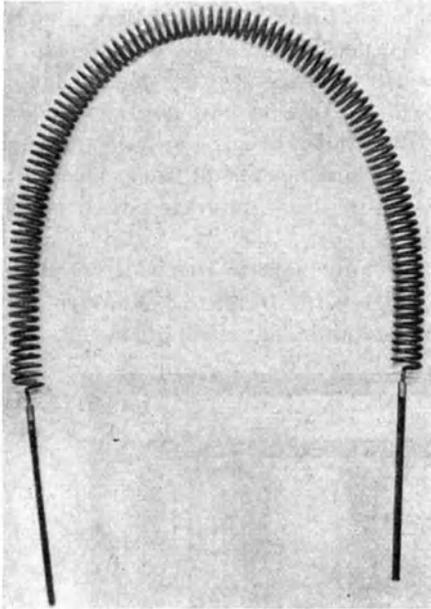


Abb. 98. Wendel aus Chromnickel. (Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau.)  
Beachte die sehr gleichmäßige Wicklung: Die einzelnen Windungen haben gleichen Abstand, um die an enger gewickelten Stellen auftretenden Überhitzungen zu vermeiden. Die verstärkten Anschlußenden sind angeschweißt.

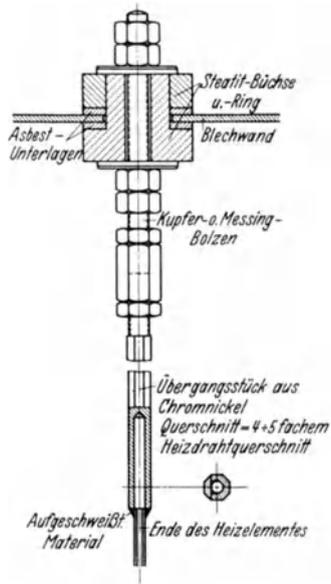


Abb. 100. Durchführung des Heizelements durch die Ofenwand; Verbindung des Heizdrahts mit der Durchführung. (Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau.)

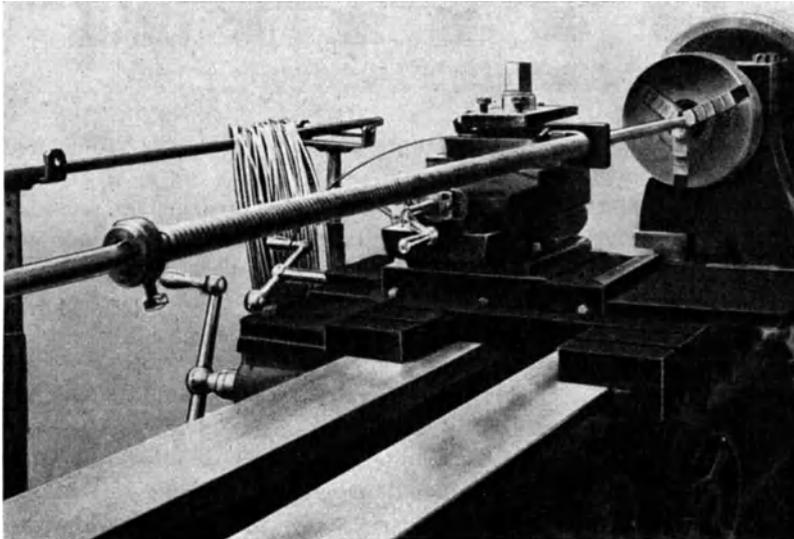
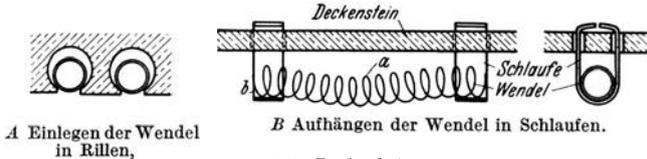


Abb. 99. Herstellung eines Wendels auf der Drehbank. (Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau.)  
Die einzelnen Windungen liegen dicht bei dicht und werden nachträglich auf die gewünschte Länge ausgezogen. Statt dessen kann man auch von vornherein mit entsprechender Steigung wickeln.

Muffelungen eintreten. Die beiden Forderungen kommen — namentlich bei der Anordnung der Deckenheizkörper — leicht in Widerspruch, wie aus der Abb. 101 *A* hervorgeht. Die Lagerung des Wendels in den Nischen ist einwandfrei, die Wärmeabfuhr aber sehr beschränkt. Umgekehrt wird bei der Anordnung nach Abb. 101 *B* die Wärmeabfuhr ein-



wandfrei sein, aber die mechanische Beanspruchung an den Stellen *a* in der Mitte zwischen 2 Aufhängungen ist groß und führt zu einem Durchhängen des Wendels; dadurch nähern sich die Windungen bei *b*, und es tritt dort leicht eine Überhitzung ein.

Bei Verwendung von Wendeln zur Seitenheizung ist darauf zu achten, daß sie, wenn sie infolge von Wärmeausdehnung „arbeiten“, nicht aus den Rillen der Tragsteine heraustreten können (Abb. 102). Man verhütet dies zweckmäßig durch eine Art Vorsteckstifte (*c*), wie sie ebenfalls eingezeichnet sind, oder durch Anbinden der Wendel an die Ofenwand (bei *d*). Dabei ist allerdings Montage und Demontage der Widerstände schwierig. Man kann auch die Tragsteine weit vorstehen lassen, so daß das Wendel eine große Steigung überwinden muß, ehe es von seiner Unterlage abgleitet.

Bei den Seiten- und namentlich bei den Bodenwiderständen ist schließlich darauf zu achten, daß Schmutz, der in die Rinnen fällt, nicht das Wendel bedeckt. Geschieht dies, so können Beschädigungen zweierlei Art eintreten: erstens kann der Schmutz chemisch mit dem Widerstandsmaterial oder mit dem Material der Ausmauerung (oft mit beiden) reagieren (siehe Abb. 103). Zweitens wird, wenn das Wendel von Schmutz und Zunder bedeckt ist, an der betreffenden Stelle die Wärmeabgabe behindert sein, und das Wendel wird durch örtliche Überhitzung zerstört werden. Die einzige erfolgreiche Maßnahme hiergegen ist eine gründliche Reinigung des Ofens. Die Zeitabstände zwischen zwei solchen Reinigungen können erhöht werden, wenn das Wendel in der Rinne hochgelagert wird (Abb. 104)<sup>1</sup>. Statt dessen sieht SSW in besonders geformten Boden-



Abb. 102. Wendel für Seitenheizung. Vorquellen der Wendel verhindert durch Vorsteckstifte *c* oder Anbinden der Wendel bei *d*.

<sup>1</sup> Heraeus-Vakuumschmelze, D.R.P. 533 448.

steinen Öffnungen vor, durch die Zunder durch die Bodenwiderstände hindurch in eine unter dem Ofen befindliche Sammelrinne fallen kann<sup>1</sup>.

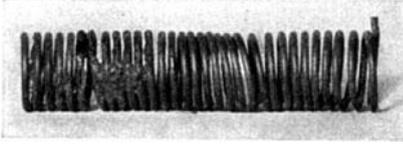


Abb. 103. Zerstörtes Wendel  
(Paschkis ZV 13).

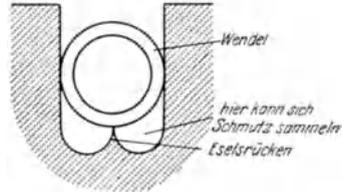


Abb. 104. Mittels „Eislerücken“ hochgelagertes Wendel  
(Heraeus-Vakuumschmelze, Hanau, M.).

Wendelwiderstände werden vorzugsweise für Öfen mit Temperaturen zwischen 500 und 1100° verwendet.

**γ) Kernwiderstände.** Manche Ofenbauer verwenden statt Wendelwider-

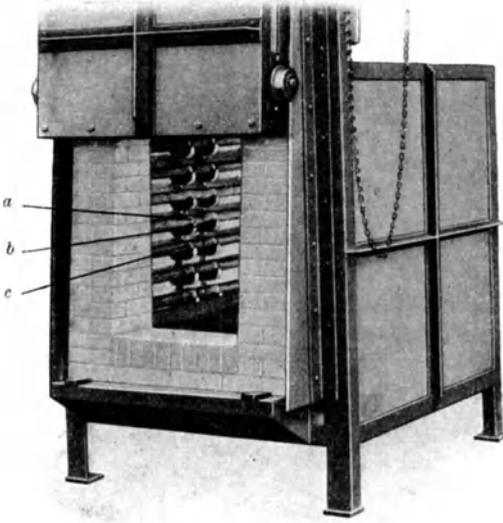


Abb. 105. Ofen mit Kernwiderständen (BBC, Baden). Die Widerstände *c* sind an den Auflagestellen *a* mit größerer Steigung gewickelt (siehe *b*), so daß der Draht die Auflagestelle nicht berührt.

ständen auf keramische Kerne gewickelte Widerstände. Eine derartige Anordnung zeigt die Abb. 105. Etwas abweichend ist die Bauform nach Abb. 106. Hier sind Distanzstücke *a* vorgesehen. Vielfach wird Draht in Wendelform auf Kerne aufgewickelt, so daß man von einem gewickelten Wendel sprechen könnte. Die beiden Drahtenden können (Rückführung im hohlen Kern) auf der gleichen Seite des Kerns liegen.

**δ) Mäanderförmige Widerstände.** Heizband — selten statt dessen sehr starke Stäbe (Rundmaterial) — wird mäanderförmig gebogen und an der

Ofenwand befestigt. Entweder wird das Band unmittelbar auf Tragsteine aufgehängt (Abb. 107), wobei aber an der Aufhängestelle Zerstörungen zu befürchten sind (Abb. 108): an der Berührungsstelle tritt ein Wärmestau auf, so daß diese Stelle etwas überhitzt wird und außerdem wird das Band an der Stelle der Aufhängung mechanisch am stärk-

<sup>1</sup> SSW: D.R.P. Anm. S. 94357, vgl. auch S. 243.

sten beansprucht; das Band wird auseinandergezogen und dadurch der Widerstand an dieser Stelle erhöht. Dadurch wird auch die mechanische Festigkeit herabgesetzt, und so steigern sich die zerstörenden Einflüsse bis zum Zerreißen des Bandes. In der Abb. 108 sind deutlich Schmelz-



Abb. 106. Kernwiderstand (Gautschi u. Brandt, Singen). Die Distanzstücke *a* ermöglichen eine Lagerung ohne nennenswerte Behinderung der Abstrahlung.

perlen zu sehen. Da bei dieser Art von Widerständen die mechanische Beanspruchung in jedem Falle größer ist als bei Wendeln, wo jede Windung unterstützt ist, sollte man sie zweckmäßigerweise niedriger belasten als Wendel.

Die Gefahr der Überhitzung an den Aufhängestellen kann durch Zwischenfügen eines metallischen Tragstückes praktisch beseitigt werden. SSW legt nach einem Verfahren der Westinghouse Electric Comp. auf den Tragstein ein Blech aus hitzebeständigem Metall<sup>1</sup>, das als Kühlfahne wirken soll, während die AEG nach einem Verfahren der General Electric Co. das Band an eine nicht stromführende Drahtschleife hängt und diese erst an den Tragstein befestigt.

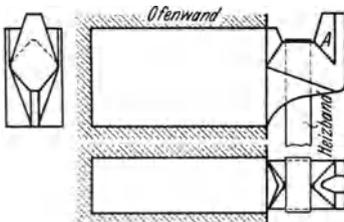


Abb. 107. Tragstein für bandförmige Heizkörper (Steatit-Magnesia A.G.).

Die schneidenförmige Ausbildung des eigentlichen Auflagers *A* soll die Gefahr einer Überhitzung des Heizbandes vermindern.

Die Gefahr der Überhitzung an den Aufhängestellen kann durch Zwischenfügen eines metallischen Tragstückes praktisch beseitigt werden. SSW legt nach einem Verfahren der Westinghouse Electric Comp. auf den Tragstein ein Blech aus hitzebeständigem Metall<sup>1</sup>, das als Kühlfahne wirken soll, während die AEG nach einem Verfahren der General Electric Co. das Band an eine nicht stromführende Drahtschleife hängt und diese erst an den Tragstein befestigt.

Schlaufenwiderstände sind in erster Reihe in den Vereinigten Staaten vorwiegend für Öfen mit Betriebstemperaturen von 500 bis 1100<sup>0</sup> im Gebrauch.



Abb. 108. Zerstörter Bandheizkörper (Paschkis ZV 13).

Da die Aufhängesteine

aus anderen Werkstoffen hergestellt werden wie die eigentliche Ofenwand, besteht die Gefahr, daß sie nicht gut abbinden. Bei der Befestigung der Widerstände selbst treten auch zusätzliche Beanspruchungen auf. Man hat deshalb besondere Konstruktionen gesucht, die ein Herausziehen der einzelnen Steine aus dem Mauerwerksverband verhindern sollen<sup>2</sup>. Auch hat man Aufhängehaken aus

<sup>1</sup> SSW: D.R.P. 447 928.

<sup>2</sup> Keene: USA-Pat. 1624344; 1622650; SSW: D.R.P. 485084.

Metall vorgeschlagen<sup>1</sup>. Das Metallband neigt oft zu Verwerfungen; man hat deswegen verschiedene Formen von Distanzstücken entworfen, um die einzelnen Schleifen des Mäanders näher legen zu können<sup>2</sup>.

### b) Eingebettete Widerstände.

**a) Glimmerumpreßte Elemente** (Abb. 109). Diese bestehen aus einem Wickelstreifen aus bestem Heizmikanit mit Chromnickelbandbewicklung.

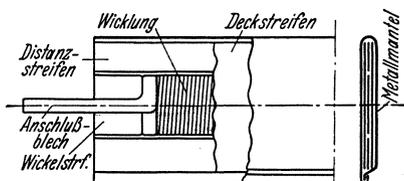


Abb. 109. Glimmerumpreßtes Heizelement (Widerstand-A.G., Hannover).

Der Wickelstreifen wird durch zwei schmale Mikanitstreifen distanziert und mit zwei Deckstreifen aus gleichem Material abgedeckt. Die Stromzuführung erfolgt durch beiderseitig angeordnete Nickelblechfahnen, die um den Wickelstreifen gelegt und mit der Heizwicklung fest verbunden sind; diese Heizeinrichtung

wird in einen ein- oder zweiteiligen Metallmantel gebettet und gepreßt. Das so gefertigte Element (Heizscheide) ist vollkommen spritzwasserdicht und äußerst stabil.

Höchstzulässige Oberflächentemperatur: 300°  
 Höchstzulässige Oberflächenbelastung: bei 300° etwa 1,2 ... 1,5 W/cm<sup>2</sup> } auf den Ele-  
 bei 125° etwa 2,2 ... 2,5 W/cm<sup>2</sup> } mentman-  
 tel bezogen.

**β) Plattenheizkörper.** Der Heizdraht wird in einem keramischen Material eingebettet, das den Draht völlig von Luft abschließt. Das Element kann entweder mittels zentraler Bohrung aufgeschraubt oder mit Eisen umgossen werden. Belastung 4 ... 5 W/cm<sup>2</sup> Plattenoberfläche, einseitig gemessen.

**γ) Stabförmige Heizkörper** für niedere und mittlere Temperaturen wurden wiederholt ausgeführt. Während man früher für diese Zwecke oft schmale Rahmenelemente in Eisenrohre steckte, wurde vor einigen Jahren von der General Electric Co. eine besonders interessante Konstruktion angegeben (Abb. 110). Ein ganz eng gewickelter Wendel wird mit Hilfe von Lavastücken in der Mitte eines Eisenrohres zentrisch festgehalten. In den Hohlraum zwischen Rohr und Wendel wird Magnesit gefüllt und dann wird das Rohr in der Hammermaschine geschlagen, wobei sich überraschenderweise Wendel, Magnesit und Rohr in gleicher Weise dehnen, so daß

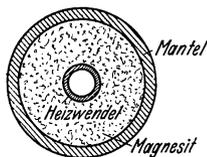


Abb. 110. Querschnitt eines Heizstabes (General Electric Co.-AEG).

<sup>1</sup> Biebel: USA-Pat. 1638822 und AEG D.R.P. 458446.

<sup>2</sup> Woodson: USA-Pat. 161736f; Mc. Farland: USA-Pat. 1661842; AEG: D.R.P. 489581.

man völlig homogene Heizkörper erhält. Die fertiggestellten Rohre kann man biegen, ja sogar mit Eisen umgießen, wodurch der Heizkörper für die verschiedensten Zwecke brauchbar wird. Als einfacher Heizstab eignet er sich z. B. für die Beheizung von Trockenöfen, da im Gegensatz zu Rahmenelementen auch bei Durchbrennen des Heizkörpers keine glühenden Stellen freiliegen; dadurch ist bei Gegenwart explosibler Gase usw. jede Gefahr vermieden. Die so hergestellten Heizstäbe eignen sich weiter in umgossenem Zustand hervorragend für die Beheizung von Bädern bei niedrigen Temperaturen. Die Abb. 111 zeigt ein umgossenes Heizelement.

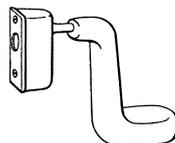


Abb. 111. Umgossener Heizstab (General Electric Co.). Links der Kasten für die Anschlüsse.

d) **Schniewindgitter.** Zur Gruppe der eingebetteten Widerstände kann man auch Schniewindgitter rechnen, ein Gewebe von Asbest und Konstantandraht. Sie mögen wegen ihrer breiten Anwendbarkeit für industrielle Heizzwecke hier erwähnt werden, wenn man sie auch nur selten in geschlossenen Öfen findet.

ε) Die bereits im Abschnitt „Berechnung“ erwähnten Öfen mit in die innere Ofenwand eingebetteten Widerständen werden bei Besprechung der Ofenwand erörtert werden (siehe S. 194).

c) Zur Frage der Auswechselbarkeit der Widerstände.

Einer der schwerwiegendsten Vorwürfe, die man dem elektrischen Ofen macht, ist das Bestehen der Gefahr, daß bei Ausfall eines Widerstandes eine lange Betriebspause nötig wird, um einen neuen Widerstand einzusetzen; meist muß der ganze Ofen erkalten, ehe der zerstörte Heizkörper ausgebaut werden kann.

Im Kreise der Ofenbauer gibt es bezüglich dieser Frage zwei grundsätzlich verschiedene Standpunkte.

Einerseits findet man die Auffassung, der Widerstand müßte so betriebssicher sein, daß ein Auswechseln überhaupt nicht nötig wird — andererseits heißt es, daß ein (dem Heizkörperdefekt entsprechendes) Versagen einer Düse beim Gasofen durch Auswechseln sofort behoben werden kann, so daß im Gegensatz zum Gasofen der Elektroofen nie als betriebssicher anzusprechen sei, wenn der erwähnte Nachteil nicht behoben würde.

Die beiden Bauarten haben verschiedene Anwendungsgebiete: Öfen mit langer Abkühlzeit, die im Fließbetrieb arbeiten, sollten, wenn irgend möglich, auswechselbare Widerstände haben oder wenigstens zwei vollständige Sätze Heizkörper eingebaut erhalten, so daß bei Ausfall eines Widerstandes sofort der zweite stattdessen eingeschaltet werden kann. Dagegen werden Öfen mit kurzen Betriebsperioden, die außerdem schnell abkühlen, keine im Betrieb auswechselbaren Widerstände er-

halten müssen. Denn jede derartige Konstruktion bedeutet eine wesentliche Verteuerung des Ofens und eine Erhöhung der Leerverluste.

Mit Rücksicht auf die vielen Öfen, die auswechselbare Widerstände erhalten sollten, und die große Bedeutung der Aufgabe mögen im folgenden die wichtigsten Versuche, auswechselbare Widerstände zu schaffen, angegeben werden — in die Praxis haben sich nur die wenigsten dieser Bauformen einzuführen vermocht.

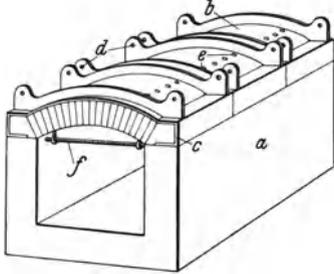


Abb. 112. Im Betrieb auswechselbarer Heizkörper (BBC, Baden).

*a* Ofenseitenwand, *b* Ofendecke, der Länge des Ofens nach in mehrere Teile geteilt, *c* U-Eisen, in die sich das Gewölbe der Decke stützt, *d* Querverspannungen mit Tragösen, die ein Anheben der Decke gestatten, *e* Öffnungen zur Befestigung der Heizwiderstände *f*.

Die Heizwiderstände sind an den Ofenwänden angeordnet. Um sie auszuwechseln, kann man daher entweder die betreffende Wand des Ofens von außen abnehmbar machen oder in einer zu der beheizten senkrechten Wand einen Streifen beweglich gestalten, um die Widerstände zu entfernen.

*a*) Ein Stück der beheizten Wand wird entfernt. Eine besonders typische Ausführungsform zeigt die Abb. 112: die Decke ist abnehmbar und an ihr hängt wenigstens ein Teil der Widerstände<sup>1</sup> oder man kann die Widerstände nach Abheben der Decke leicht erreichen<sup>2</sup>.

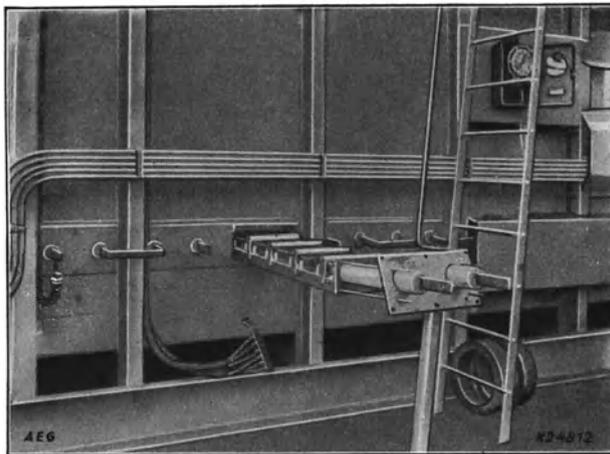


Abb. 113. Auswechseln eines Rahmenwiderstandes (AEG, Berlin).

*β*) Ein Teil der zur beheizten Wand senkrechten Fläche wird entfernt. Diese zweite Art der Anordnung ist verbreiteter als die erste. Vor

<sup>1</sup> BBC: D.R.P. 442258.

<sup>2</sup> SSW: Engl. Pat. 302223.

allein bei den Rahmenwiderständen, die ja nur bei niedrigeren Temperaturen Verwendung finden, ist diese Anordnung zweckmäßig, denn hier können die Gleitbahnen usw. zur Bewegung des Wandteils aus Eisen bestehen (Abb. 113). Den Widerstand selbst bringt die Abb. 114. Eine oft ausgeführte Form auswechselbarer Kernwiderstände ist in

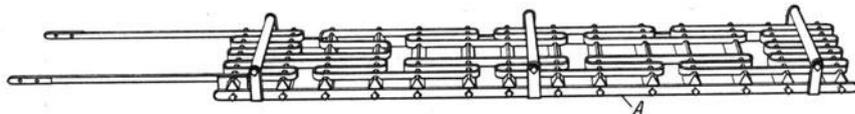


Abb. 114. Auswechselbares Heizelement (General Electric Co., Schenectady).  
Der Rahmen A ist durch Quereisen versteift und gleitet auf Schienen im Ofen. Die Quereisen tragen Isolatoren, auf denen der mäanderförmige Widerstand ruht.

der Abb. 115 gezeigt. Interessant ist auch die Ausführungsform<sup>1</sup> nach Abb. 116, die sich für nicht zu tiefe Öfen eignet. Widerstände dieser Form sind zweifellos sehr leicht auswechselbar. Man erkaufte aber diese leichte Auswechselbarkeit mit erhöhten Wärmeverlusten, bedingt durch die nur kleine Überdeckung der Türe und den jedesmaligen Verlusten bei Anhebung der Verschlußstücke gleichzeitig mit

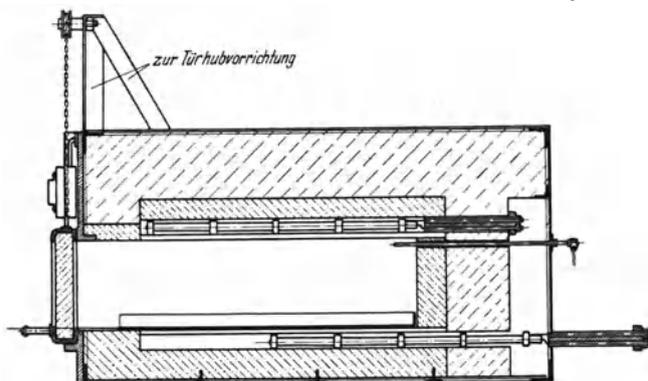


Abb. 115. Auswechslung eines Kernwiderstandes während des Betriebes (Gautschi & Brandt, Singen). Die Abbildung zeigt den Bodenwiderstand im Augenblick der Auswechslung; die Deckenwiderstände ruhen in Rillen, ähnlich Abb. 101 A und können in ihnen in gleicher Weise bewegt werden, wie in den Bodensteinen.

der Türe. Wendelheizkörper sind meist nur auswechselbar, wenn sie in Schamotterillen liegen, wobei sie vorübergehend versteift werden können<sup>2</sup>. Meist werden sie mit ihren Trägern zusammen auszuwechseln sein; derartige Bauarten sind in großer Zahl bekannt geworden, ohne daß sie sich in nennenswertem Umfange in die Praxis einzuführen vermochten<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Kamps; D.R.P. 496256.

<sup>2</sup> AEG; D.R.P. 508191.

<sup>3</sup> AEG; D.R.P. 485287; Hirsch-Kupfer; D.R.P. 505384; BBC; Engl. Pat. 271003; AEG; Engl. Pat. 345874.

Die Anforderungen an auswechselbare Widerstände, zwischen denen der Konstrukteur ein Kompromiß finden müßte, sind:

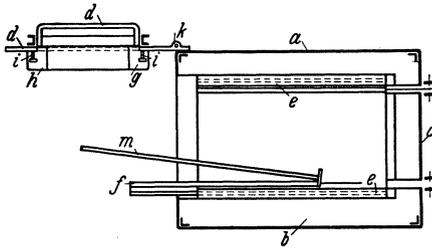


Abb. 116. Im Betrieb auswechselbarer Heizkörper nach Kamps.

Die Türe schwingt um ein Gelenk  $k$ , das auf der Ofendecke  $a$  befestigt ist. Mit Hilfe metallischer Stützen  $i$  sind an die Türe oben und unten Ansätze  $g$  und  $h$  angefügt, die bei geschlossener Türe die Decken-, Seiten- und Bodenheizkörper nach vorne zu abdecken. Die Türe  $d$  ist so ausgebildet, daß die Spaltverluste möglichst klein werden. Nach Öffnen der Türe können die Widerstände  $f$  mit Hilfe eines Werkzeuges  $m$  aus den Rillen (in der Abbildung unten!) weggezogen werden, nachdem die Verbindungen an der Rückwand des Ofens gelöst sind.  $b$  ist der Boden des Ofenmantels.

1. geringste Vermehrung der Leerverluste;
2. bequeme Entfernung der zerstörten Heizkörper;
3. möglichst kleiner Raumverlust;
4. möglichst kleine Beschaffungskosten;
5. möglichst kleine Arbeitszeit für die Auswechslung.

Eine vollkommene Lösung für diese Forderungen ist bisher noch nicht gefunden. Am nächsten kommt ihr die in Abb. 115 gezeigte, die nur für Kernwiderstände anwendbar ist.

## 2. Nichtmetallische Widerstände.

Diese werden praktisch nie eingebettet geliefert, sondern arbeiten stets als freistrahkende Widerstände. Bei der Konstruktion ist besonderes Augenmerk auf die Stromanschlüsse zu richten. Bei der Berechnung wurde bereits erwähnt, daß dabei drei Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind: gutleitende Durchführungen transportieren Wärme aus der Ofenwand zu den Klemmen, verursachen also Verluste und erhöhen die Klemmentemperatur; schlechtleitende Durchführungen vermindern zwar die Verluste durch Wärmeableitung, steigern aber die Stromwärmeverluste in der Durchföhrung und erhöhen so gleichfalls die Klemmentemperatur; niedrige Klemmentemperatur, die mit Rücksicht auf die Sicherheit des Kontakts nötig ist, bedeutet hohes Temperaturgefälle an den Enden der Durchföhrung und steigert so die Wärmeverluste.

Der keineswegs als ideal anzusehende Ausweg, den man beschrritten hat, ist der, daß man den elektrischen (und damit gleichzeitig den Wärmeleit-) Widerstand der Durchföhrungsenden herabsetzt und die Klemmentemperatur durch intensive Kühlung betriebssicher gestaltet.

Die Herabsetzung des Meterwiderstandes der Durchföhrungsstücke erfolgt entweder durch Verdickung der Enden oder durch Verringerung des spezifischen Widerstandes an diesen Stellen. Die Abb. 117 zeigt einen Heizstab mit verdickten Enden. Das verstärkte Ende kann aus dem gleichen Material hergestellt werden wie der Heiz-

stab. Die Verstärkung selbst wird auf den verschiedensten Wegen gefertigt: meist wird eine Muffe, geschlitzt oder ungeschlitzt, über das zu verstärkende Ende des Stabes geschoben und der Zwischenraum zwischen Stab und Muffe mit Kitt oder Metall ausgefüllt<sup>1</sup>. Sollen die Durchführungsstücke geringeren Widerstand haben als die Heizkörper, so kann entsprechende Nachbehandlung angewendet werden: sie können siliziert werden<sup>2</sup>, mit Aluminium überzogen sein<sup>3</sup>, mit Aluminiumdraht



Abb. 117. Silitzstab mit verdickten Enden (Siemens-Plania, Berlin).

umwickelt werden<sup>4</sup> oder mit schwer schmelzenden Metallen behandelt sein<sup>5</sup>.

Die Länge der verdickten Enden wird heute bis 300, höchstens 350 mm gesteigert; von dieser Länge muß noch ein Teil für die Aufbringung des Drahtes, der die Anschlußklemme trägt (Abb. 118), abgezogen werden, da der Draht nicht in der Ofenwand liegen soll. Man ist dadurch auf ziemlich dünne Ofenwände angewiesen, wodurch bei

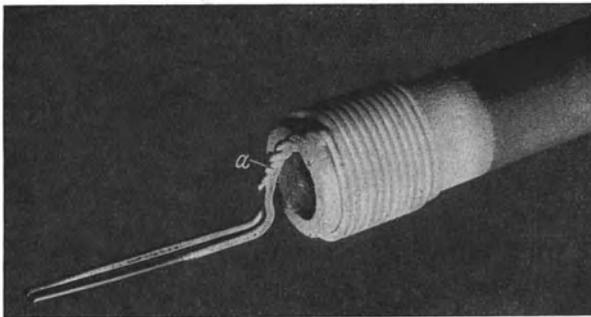


Abb. 118. Anschlußstück eines metallisierten, mit Nickeldrahtanschluß versehenen und verdickten Endes eines Silitheizstabes (Siemens-Plania, Berlin).

hohen Temperaturen die Verwendung solcher Anschlußenden weniger wirtschaftlich wird.

Für Temperaturen bis 1000° werden auch Stäbe ohne verdicktes Ende, lediglich mit metallisierten Anschlüssen, empfohlen.

<sup>1</sup> Gebr. Siemens & Co.: D.R.P. 480750 und 393502; Siemens-Planiawerke: D.R.P. 481735.

<sup>2</sup> Siemens-Planiawerke: D.R.P. 488685.

<sup>3</sup> Gebr. Siemens & Co.: D.R.P. 353072.

<sup>4</sup> Gebr. Siemens & Co.: D.R.P. 388170.

<sup>5</sup> Elektrochrom G. m. b. H.: D.R.P. 443936.

Beim Einbau der Stäbe muß dafür Sorge getragen werden, daß sich die Stäbe frei dehnen können; die Durchführungsrohre dürfen also nur leicht mit Asbestwolle ausgelegt sein. Auch sollen die Kontakte nicht den Stab starr machen. Die besondere Form des Drahtendes ( $\alpha$  in Abb. 118) ist gewählt, um eine freie Ausdehnung des Stabes zu ermöglichen. — Die Notwendigkeit der freien Dehnung macht auch die senkrechte Anordnung der Stäbe schwierig: sie dürfen nur einseitig gehalten sein. Früher wurde das obere Ende festgehalten, während das untere sich frei dehnen konnte. Fiel dann Zunder in die untere Öffnung, so wurde der Stab eingeklemmt und brach infolge mangelnder Möglichkeit, sich auszudehnen, ab. Um dies zu verhindern, stellte man den Stab am unteren Ende auf eine Isolierplatte, so daß er sich nach oben frei dehnen konnte<sup>1</sup>. Bei senkrechter Anordnung

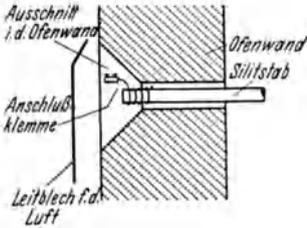


Abb. 119. Aussparungen in der Ofenwand zur Kühlung der Anschlußklemme. (Nach Vorschlag der Siemens-Plania-Werke.)

stellte man den Stab am unteren Ende auf eine Isolierplatte, so daß er sich nach oben frei dehnen konnte<sup>1</sup>. Bei senkrechter Anordnung

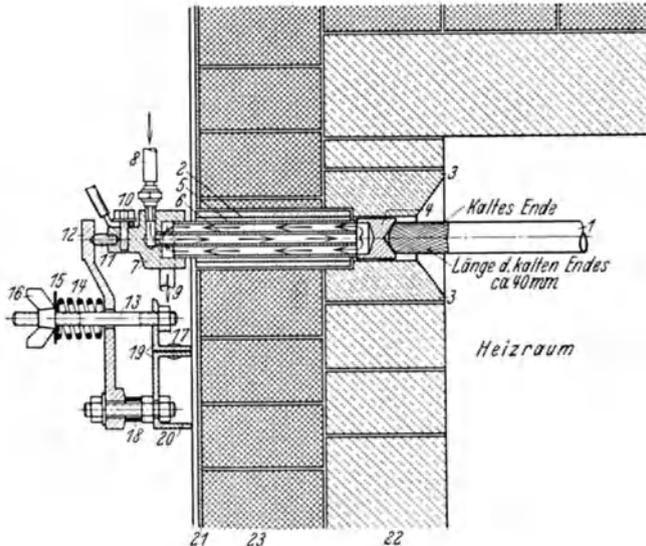


Abb. 120. Anordnung eines Globarheizelements mit wassergekühlten Stromzuführungsklemmen (Globar Corp. Deutsche Carborundum-Werke, Düsseldorf).

1 Globarstab, 2 Durchführungsrohr, 3 Klemmenstein, 4 Wassergekühlter Kontaktkopf, 5 Äußeres Abflußrohr (Kühlwasser), 6 Inneres Zuführrohr (Kühlwasser), 7 Klemmenkopf, 8 Schlauchnippel, 9 Wasserschlauch, 10 Stromanschluß, 11 Elektr. Isolation, 12 Druckhebel, 13 Bolzen, 14 Druckfeder, 15 Beilagscheibe, 16 Flügelmutter, 17 Gegenmutter, 18 und 19 Distanzhalter, 20 Klemmenstütze, 21 Äußerer Ofenmantel, 22 Feuerfeste Ausmauerung, 23 Wärmeschutz.

sind noch besondere Vorsichtsmaßregeln erforderlich, um einen Luftzug durch den Ofen zu vermeiden.

<sup>1</sup> SSW: Engl. Pat. 305470.

Schließlich ist peinlich darauf zu achten, daß keine Biegebeanspruchungen in das Material kommen, daß die Stäbe also nichtirgendwie an den Anschlußenden an der freien Einstellung behindert werden.

Selbstverständlich müssen die Enden selbst kalt gehalten werden. Man verwendet dazu Kühlfahnen, um die Temperatur der Anschlüsse zu drücken<sup>1</sup>, soweit die natürliche Luftkühlung nicht ausreicht. In

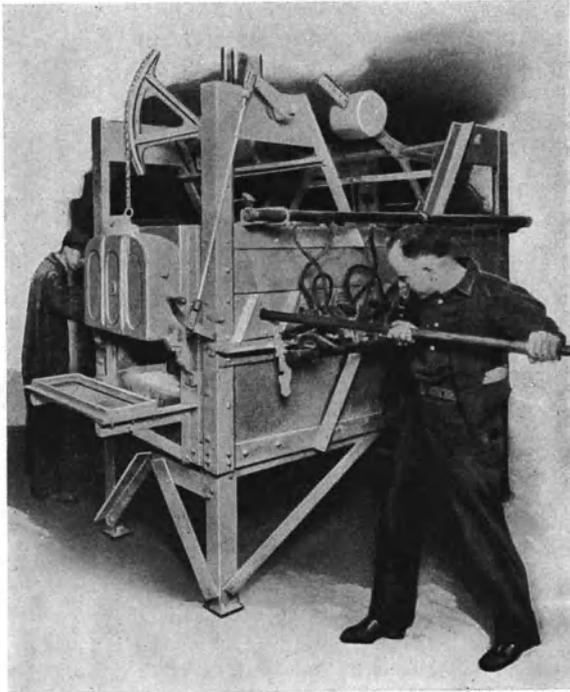


Abb. 121. Auswechseln eines Globarstabes während des Betriebes (Globar Corp. Deutsche Carborundum-Werke, Düsseldorf).

Vor Einsetzen des neuen Elements ist dieses auf möglichst hohe Temperatur zu bringen. Metallrohre werden beiderseits in den Ofen eingeführt und an die Enden des zu entfernenden Elements angelegt. Unter Gegendruck der beiden Metallrohre durch die Arbeiter wird das Element auf eine Seite durchgestoßen. Hierauf wird das neue Element auf das durchgestoßene Rohrende aufgelegt und durch Aufpressen des Rohres auf das andere Stabende unter Gegendruck der beiden Rohre in den Ofen eingeführt. Die Auswechslung eines Elements dauert 10 . . . 15 Minuten.

Fällen, wo die Ofenwandstärke sehr gesteigert wird, würden die Stromanschlüsse dann nicht mehr frei liegen, da die Länge der Durchführungen, wie oben erwähnt, aus mechanischen Gründen nicht über ein gewisses Maß gesteigert werden darf. Man schneidet dann die Durchführungsstelle an der Ofenwand aus (Abb. 119), muß aber noch durch Leitbleche (siehe die Abbildung) dafür sorgen, daß die nun verdeckt

<sup>1</sup> Gebr. Siemens & Co.: Schweiz. Pat. 121282.

liegende Kontaktstelle ausreichend gekühlt wird. Dadurch entstehen natürlich neuerliche Wärmeverluste.

Einen grundsätzlich anderen Weg hat die amerikanische Globar-gesellschaft beschritten, die, auf Patenten der Kummler & Matter-A.-G.<sup>1</sup> fußend, die Globarstäbe entwickelt hat. Die Durchführungen durch die Ofenwand bestehen für diese Stäbe aus Metall, das durch axialen Federdruck gegen den Siliziumkarbidstab gepreßt wird. Um die Kontaktstelle nicht infolge des Übergangswiderstandes thermisch zusätzlich zu belasten, werden die Enden des Stabes durch eine Spezialbehandlung besser leitend gemacht, so daß die Wärmeerzeugung dort geringer ist als auf der wirksamen Länge des Stabes. Um dabei keinen Nutzraum zu verlieren, werden Spezialsteine verwendet (3 in Abb. 120), die einen entsprechenden Ausschnitt haben. Die Anschlußstücke aus hitzebeständigem Metall sind für Temperaturen bis etwa 1000° Ofentemperatur nur luftgekühlt; für höhere Temperaturen werden sie hohl ausgeführt und sind von Wasser durchströmt. Der Anschluß der Wasserkühlung ist in Abb. 120 deutlich zu sehen. Die Auswechslung der Stäbe ist bei heißem Ofen möglich und in Abb. 121 dargestellt.

## B. Ofenwand.

Die Konstruktion der Ofeninnenwand ist in außerordentlich starkem Maße von der Betriebstemperatur des Ofens abhängig (siehe S. 172). Beachte:

Wir werden daher die Ofenwandkonstruktionen für die 3 Ofengruppen gesondert besprechen.

### 1. Niedertemperaturöfen.

#### a) Wand und Decke.

Die Innenwand aus Blech muß, um sich selbst und das Gut tragen zu können, mit der Außenwand durch Stege usw. verbunden sein. Beachte:

1. Innen- und Außenwand haben sehr verschiedene Temperaturen;



Abb. 122. Schema der Verbindung von Innen- und Außenwand bei Niedertemperaturöfen.

die beiden Wände müssen also gegeneinander arbeiten können. Die Verbindungsstege dürfen nicht ganz steif sein.

2. Auf die erheblichen Ausdehnungen, denen die Innenwand ausgesetzt ist, muß schon beim Bau Rücksicht genommen werden.

3. Jede metallische Verbindung zwischen Innen- und Außenwand bedeutet einen Wärmeverlust. Dieser ist um so größer, je kürzer das Verbindungsstück und je größer sein Querschnitt ist.

<sup>1</sup> Schweiz. Pat. 126 669.

4. Soweit als irgend möglich fügt man Asbest oder sonstige schlecht leitende Stoffe zwischen Wand und Verbindungsstück. Auch sehr kleine Isolierschichten ergeben bemerkenswerte Erfolge (Abb. 122).

Als Wärmeschutzstoff wird vielfach Schlackenwolle verwendet. (Eigenschaften S. 140.) Sonst kommen für Niedertemperaturöfen Metallluftschichtisolierungen und, namentlich in Amerika, Asbest-Kieselgurmischungen und auch Asbest-Magnesiummischungen in Betracht. Bei lockerem Material, z. B. Schlackenwolle, ist, wie oben erwähnt, auf entsprechende Stopfdichte zu achten (Zusammensacken!).

Die beträchtlichen Verluste durch Wärmekurzschlüsse gaben in Amerika Anlaß, die Ofenwand aus einzelnen Bauteilen zusammenzusetzen. Zwei typische Beispiele derartiger Konstruktionen sind in den Abb. 123 und 124 dargestellt. Bei der Ausführung der Abb. 123 werden isolierte Verbindungsstücke verwendet, die die einzelnen gesondert gefertigten Paneele vereinigen. Die Paneele haben dank der Durchbrechung der Stirnbleche nur sehr geringe Wärmekurzschlüsse (siehe Abb. 123b). Bei der Abb. 124 wird eine Bauart gezeigt, die durchgehende Metallverbindungen zwischen Innen- und Außenwand vermeidet.

#### b) Türen.

Auch die Türkonstruktion hängt von der Ofentemperatur ab. Die Tür besteht bei Niedertemperaturöfen meist aus einem Hohlkasten, in den der Wärmeschutz eingefüllt wird. Hierbei liegt bei großen Türen die Gefahr vor, daß durch die hohen Temperaturunterschiede innerhalb der Tür Verwerfungen auftreten. Denn der Ofenrand

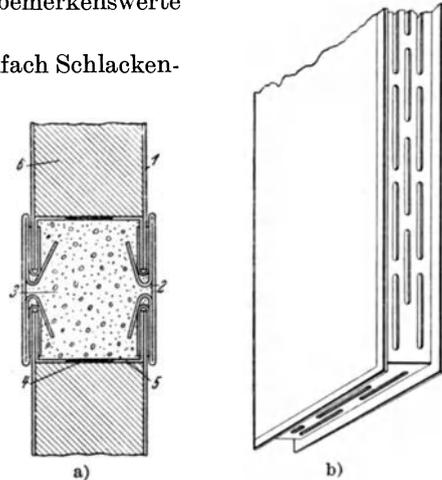


Abb. 123. Wandkonstruktion (Swartwout Oven division der Foundry Equipment Co., Cleveland, Ohio).

a) Querschnitt durch eine Verbindung. 1 Stahlmantel, 2 Abschlußstreifen, zugleich Ausdehnungsglied, 3 Isolierung des Verbindungsstückes, 4 Ausnehmung in dem Stirnblech, 5 Stahlmantel des Verbindungsstückes, 6 Paneelisolierung. — b) Ansicht eines Ofenpaneels. Beachte die Ausnehmungen im Stirnblech, die den Wärmedurchgang von innen nach außen verringern.

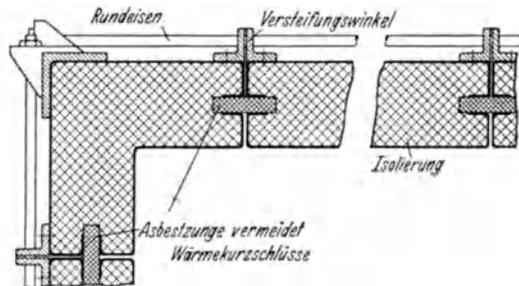


Abb. 124. Wandkonstruktion (Paul Mähler Co., Chicago). An den Wänden sind durchgehende Metallwindungen zwischen Innen- und Außenwand verschieden.

wird durch metallische Verbindungen mit dem Ofeninnern heiß, während die Mitte der Türebene, die durch gute Isolation geschützt wird, verhältnismäßig kalt bleibt.

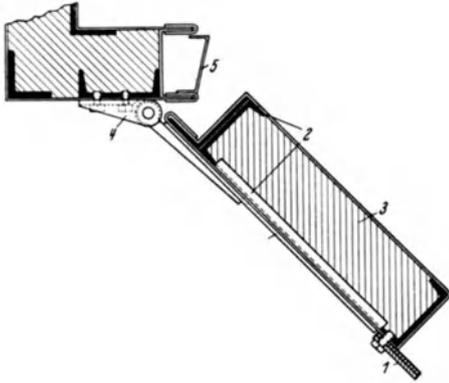


Abb. 125. Türkonstruktion (Swartwout Oven division der Foundry Equipment Co., Cleveland, Ohio). 1 Türdichtung, 2 Blechmantel, 3 Türisolierung, 4 verstellbare Türangel (Kugellager), 5 federnde Türdichtung.

Es wird versucht, die Wärmekurzschlüsse der Türe selbst und die an den Türangeln durch Sonderkonstruktionen zu vermindern (Abb. 125). Um einen luftdichten Abschluß des Ofens zu erzielen, wird die Dichtungsfläche zweckmäßig mit einem elastischen Stoff — z. B. Asbest — belegt, der dann auch bei leichter Verwerfung der Tür noch verhältnismäßig gut dichtet. Eine andere amerikanische Konstruktion zeigt Abb. 126.

Die Bewegung erfolgt meist aus der Türebene heraus (Flügeltüren).

## 2. Mitteltemperaturöfen.

### a) Wand.

Die Ofeninnenwand besteht meist aus Schamotte und wird entweder aus plattenartigen Formsteinen zusammengesetzt (Abb. 127) oder aus Normalsteinen und Splits aufgebaut (Abb. 128). Man hat auch genormte Formsteine verwendet (Abb. 129).

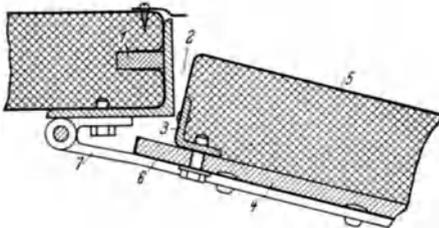


Abb. 126. Türkonstruktion (Paul Maehler Co., Chicago).

1 Asbestzunge, vermeidet Wärmekurzschlüsse, 2 Tür schließt dicht, trotz leichter Bedienung, 3 Winkelisenrahmen zur Versteifung, 4 12-mm-Asbestschiefer dichtet die Fugen und vermeidet Wärmetransport vom Winkel zum Deckmantel, 5 Wärmeschutz, 6 äußerer Blechmantel, 7 Türangel zurückgesetzt; sie gestatten dadurch eine volle Türöffnung.

Soll der Ofen durch Wendel beheizt werden, so müssen die zu beheizenden Flächen entsprechende Aussparungen erhalten, über deren Formgebung bei Besprechung der Wendel (S. 176) das Nötigste gesagt wurde. Ofenseitenwände aus plattenförmigen Formsteinen und aus Einzelsteinen müssen gegen Kippen gesichert werden. Auch die Seiten-

wände aus Einzelsteinen sind gegen Kippen nach außen zu sichern. Man wird daher die Isolierschicht in der Regel trotz der dadurch bedingten höheren Leerverluste mindestens teilweise aus Steinen aufbauen

müssen, um so eine Abstützung der Innenwand zu erzielen. Die Räume zwischen den Stützpfeilern aus Isoliersteinen können mit Pulver ausgefüllt werden. Ebenso wird der Boden Stützen aus Wärmeschutzsteinen erhalten müssen. Bei größeren Herdbelastungen und namentlich, wenn hohe Temperaturen und häufiger Temperaturwechsel hinzukommen, wird man nicht nur einzelne Stützen aus Isoliersteinen machen, sondern die ganze Ofensohle mit Wärmeschutzsteinen untermauern.

#### b) Die Ofendecke

kann

- a) aus einem Stein,
- b) als Gewölbe,
- c) als Hängendecke

hergestellt werden.

Die Decke aus einem Stein ist im allgemeinen nur bei Ofenbreiten bis höchstens etwa 1 m möglich, da die Herstellung größerer Schamotteplatten bisher nicht mit Sicherheit gelingt. Man kann Schamottestücke mit größerer Länge nur bei sehr großen Stärken ausführen, die aus wärmetechnischen Gründen unerwünscht sind und die die Gefahr des Springens erhöhen.

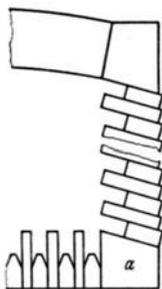


Abb. 128. Ausmauerungsschema (Heraeus-Vakuumsmelze, Hanau.)

Mit Hilfe des einzigen Formsteines *a* kann die Seitenwand aus Normalsteinen aufgebaut werden und dennoch den Schutz gegen Zunderablagerung enthalten (s. Abb. 104).

Bei größeren Breiten sowie bei Rundöfen über etwa 0,5 m  $\varnothing$  muß man Gewölbe verwenden. Der Gewölbeschub wird endgültig erst von der Ofenaußenwand und ihren Versteifungen aufgenommen. Dabei müssen selbstverständlich alle Zwischenteile ausreichende Festigkeit besitzen. Erreichen die hinter der feuerfesten Ausmauerung liegenden Schichten Temperaturen von über 900°, so besteht die Gefahr, daß die Isoliermaterialien durch

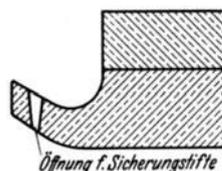


Abb. 129. Formstein für Ofenwand (Freienwalder Schamottefabrik).

Die Rillen nehmen die Wendel auf. Stifte aus Metall sichern die Wendel gegen Herausquellen.

den Gewölbeschub zusammengedrückt werden (siehe Abb. 130). Geben die Wärmeschutzsteine *m* an der Stelle der Berührung mit *a* nach, so sackt das Gewölbe nach unten durch. Um dieser Gefahr zu begegnen, werden zweckmäßigerweise die Steine *m—m* (je nach Temperatur eventuell auch nur die innenliegenden Steine *m*) nicht aus Isolier-

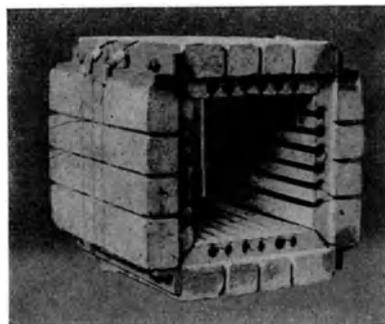


Abb. 127. Ofenwand aus plattenartigen Formsteinen (Elektroschaltwerk Göttingen).

material, sondern aus Schamotte ausgeführt. Da, wie oben (S. 139ff.) erwähnt, die Wärmeleitfähigkeit von Schamotte erheblich höher ist als die von Wärmeschutzstoffen, entstehen auf diese Weise zusätzliche Wärmeverluste.

Eine Berechnung der Gewölbeabstützung stößt aus zwei Gründen auf Schwierigkeiten:

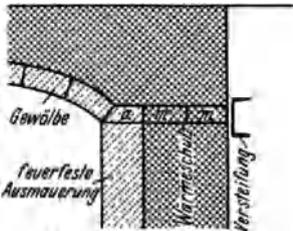


Abb. 130. Gewölbeabstützung.

a) Außer dem eigentlichen Gewölbedruck — dem statischen Druck —, der zu berechnen wäre, treten durch ungleichmäßige Wärmedehnung (Arbeiten der Ausmauerung) zusätzliche Beanspruchungen auf, die erheblich größer sein können als der statische Druck, die sich aber jeder Berechnung entziehen.

b) Die Materialwerte sind, wie im Abschnitt „Ofenbaustoffe“ ausgeführt, meist nicht bekannt. Man kann deshalb nur vorsichtig tastend an die Verwendung von Isoliersteinen zur Gewölbeabstützung herangehen, sollte aber diesbezügliche Versuche mit Rücksicht auf die großen erzielbaren Wärmeersparnisse nicht scheuen.

Bei Ofenbreiten über 2,0 m bringen Gewölbe erhebliche Betriebsunsicherheit in den Ofen und werden nur selten verwendet. M. F. King

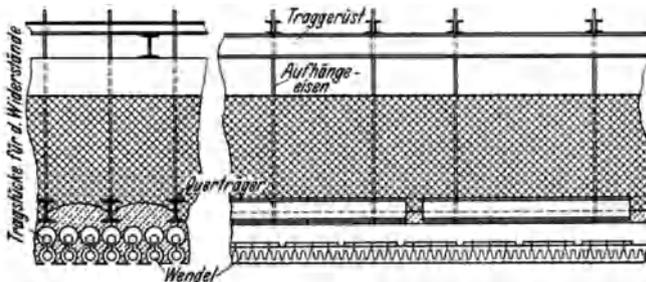


Abb. 131. Hängedecke (Hirsch-Kupfer, Finow, M.).  
Die Wendel sind an kurze Isolatorstücke angehängt.

(ZV 57) berichtet über ein in Amerika erprobtes Verfahren, auch bei Öfen großer Breiten mit Sicherheit Gewölbe anzuwenden. Sonst bedient man sich bei diesen Öfen der sogenannten Hängedecken (Abb. 131). Diese Decken bestehen aus einzelnen Steinen, die an einem Traggerüst oberhalb des Ofens aufgehängt werden. Bei dieser Konstruktion treten folgende Sonderaufgaben auf:

a) Die Steine müssen seitlich arbeiten können, ohne sich abzureiben; zwischen den Steinen sind daher gewisse Spalten erforderlich.

b) Die erwähnten Spalten dürfen nicht bis nach außen durchgehen.

c) Durch die Spalten dürfen keine Isolierteilchen u. dgl. in das Ofeninnere fallen können.

d) Die Aufhänger für die einzelnen Steine müssen auch bei den hohen Temperaturen an der Außenseite der Schamotte mechanisch fest sein.

e) Die Aufhänger sollen dabei möglichst wenig Wärme ableiten.

Die Spalten zwischen den Steinen können dadurch unschädlich gemacht werden, daß über sie Asbestpappe oder (bei höheren Tempera-

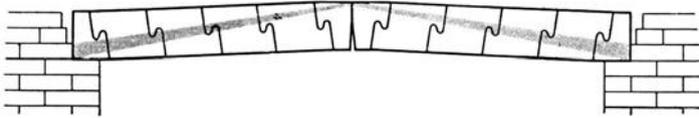


Abb. 132. Sonderkonstruktion der Decke aus einzelnen Formsteinen. (G. P. Reintjes, Kansas City.) Die schraffierte Fläche gibt die Richtung der Hauptbelastung an. Die Spalte am Rand und in der Mitte erlauben ein Atmen der ganzen Konstruktion. Beachte zugleich die geringe Pfeilhöhe.

turen) Steine gelegt werden. Die Verwendung von Isolierpulver zur Isolation von Hängedecken ist praktisch demnach ausgeschlossen, so daß man bei ihnen mit verhältnismäßig hohen Wärmeverlusten rechnen muß.

Um die Wärmeverluste durch die Aufhänger zu verringern, sollten diese — soweit man mit Rücksicht auf die Anforderungen an mechanische Festigkeit das Material frei wählen kann — aus Werkstoffen niedriger Wärmeleitzahl hergestellt werden. Es sind sogar Konstruktionen

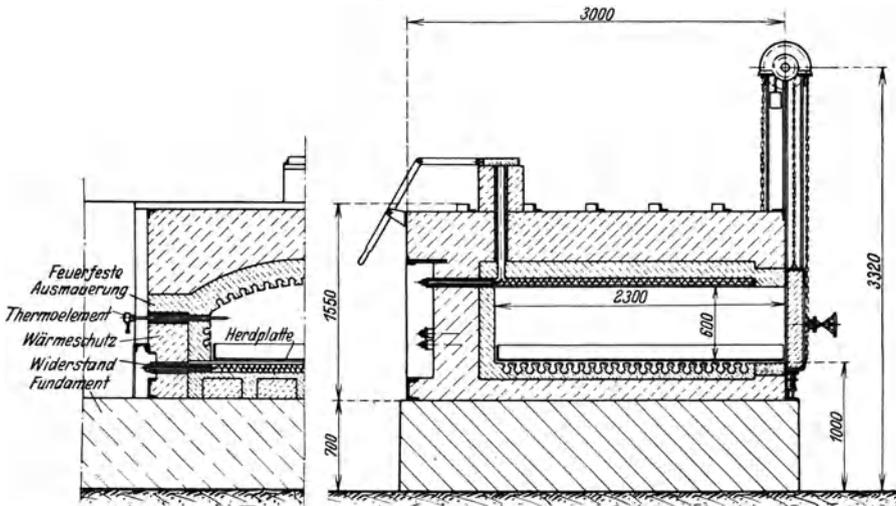


Abb. 133. Ausmauerungsschema eines Kammerofens. (Gautschi & Brandt, Singen.) Beachte die Richtung der Heizwiderstände, die an der Decke in der Längsrichtung, am Boden in der Querrichtung des Ofens laufen. Die Einhaltung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung wird dadurch erleichtert. Der Ofen dient Einsatzzwecken; um den Verbrennungsprodukten des Einsatzpulvers freien Abzug zu verschaffen, ist das Abzugrohr mit Klappe vorgesehen.

angegeben worden, bei denen die Aufhängestäbe abwechselnd aus metallischen und keramischen Stücken zusammengesetzt sind, um die Wärmeableitung zu vermindern.

Mit Sonderkonstruktion ohne Hängedecke bewältigt die amerikanische Praxis z. T. auch Ofenbreiten über 2 m (Abb. 132).

In der Abb. 133 ist ein komplettes Schema einer Ofenausmauerung gezeigt.

Bereits im Abschnitt „Berechnung“ wurden Öfen mit außenbeheizter Muffel erwähnt. Wir werden im Wild-Barfield-Ofen eine Ausführungsform mit einer Schamotte-

muffel kennenlernen, die auf ihrer Außenseite eine Heizwicklung trägt. Die Muffel mit der Wicklung ist eingebettet in Magnesiapulver (siehe S. 246).

Die Abb. 134 zeigt einen Schnitt durch einen Ofen, bei dem die Heizwicklung in Isolierzement eingegossen ist. Der Aufbau eines Ofens mit derartiger Innenwand gestaltet sich sehr einfach. Bei senkrechtem Ofenraum muß lediglich ein Unterbau aus festem Material (Isoliersteinen) gemacht werden. Die Muffel trägt sich selbst und wird in

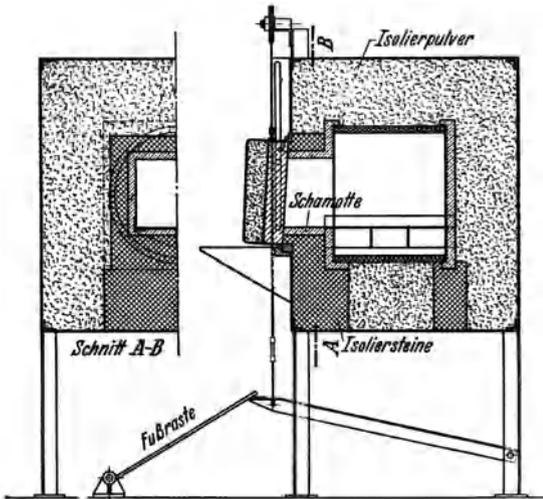


Abb. 134. Muffelöfen mit eingebetteten Heizwiderständen. (Junker G. m. b. H., Lammersdorf.)

Mit Ausnahme der Stützsteine für die Heizmuffel besteht die ganze Isolierung aus Pulver; daher niedrige Leerverluste.

Isolierpulver eingebettet. Bei liegenden Öfen muß die Muffel an den Enden auf Steine aufgesetzt werden. Der ganze übrige Zwischenraum kann mit Pulver ausgefüllt werden. Ganz entsprechend ist der Aufbau eines Ofens, dessen Länge so groß ist, daß mehrere Muffeln aneinander gereiht werden müssen. An den Verbindungsstellen werden Steine aufgestellt, die die beiden Muffeln tragen; der übrige Ofen wird in bekannter Weise mit Wärmeschutzstoffen gefüllt (Masukowitz ZV 58).

### c) Türen.

Bei kleineren Öfen werden manchmal Klapptüren verwendet (Abb. 135), bei größeren Öfen geht die Bewegung meist in einer zur Türebene parallelen Ebene vor sich (Hub- oder Zugtüren). Bei diesen sind bei der Konstruktion folgende Aufgaben zu lösen:

1. gute Dichtung gegen das Ofeninnere;
2. leichte Betätigung;
3. geringes Gewicht;
4. niedrige Wärmeverluste;
5. Haltbarkeit, d. h. Beibehaltung der Anfangseigenschaften auch bei längerem Betrieb.

Zu 1. An horizontalen Türkanten bedient man sich hierzu vorzugsweise der Sandtassen, deren Wirkung wegen des Einflusses der Ecken beschränkt ist (Abb. 136). An den senkrechten Kanten wird die Dichtung durch Anpressung bewerkstelligt. Da die äußere Stirnwand des Ofens meist aus Eisen besteht, reibt in der Regel Eisen auf Stein; ein gewisser Abrieb ist daher unvermeidlich. Um ihn

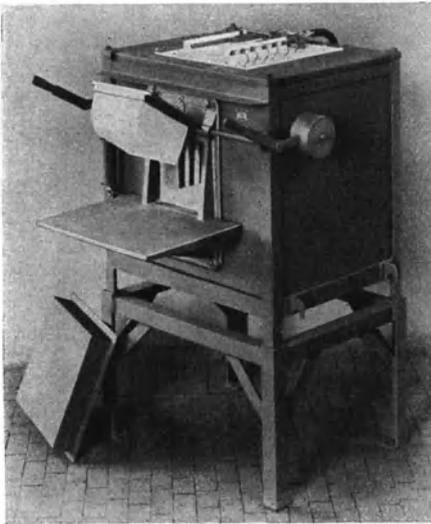


Abb. 135. Klapptüre. (SSW, Berlin.)  
Beachte gleichzeitig die Ofendecke; die Schutzhaube ist abgenommen; die Anschlüsse der Silnitwiderstände sind sichtbar.

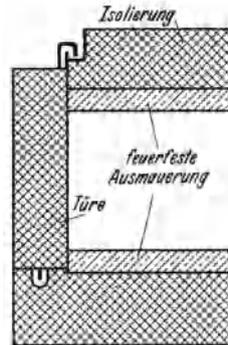


Abb. 136. Sandtassen-  
dichtung  
(oben und unten).

unschädlich zu machen, wird unter Umständen die Türe statt nach oben nach unten beweglich gemacht. Dadurch wird vermieden, daß von der Türe Steinteilchen auf das darunter befindliche Gut fallen. Um den Abrieb an sich möglichst zu verringern, wird durch geeignete Führung vielfach erreicht, daß die Tür nur im Augenblick des Aufsetzens, also am Ende der Schließbewegung, reibt (Abb. 137)<sup>1</sup>. Um die Anpressung zu verbessern, wird häufig eine eigene Andrückung vorgesehen (Druckschrauben oder dgl.; siehe Abb. 152).

Zu 2. Gut isolierte Türen haben häufig ein erhebliches Gewicht, das meist durch Gegengewichte ausgeglichen wird. Die Anwendung von

<sup>1</sup> BBC: Schweiz. Pat. 145500.

Gegengewichten empfiehlt sich in vielen Fällen, auch wenn die Bewegung mit Hilfe von Elektromotoren erfolgt, die bei Vorhandensein von Gegengewichten kleiner gewählt werden können als ohne solche.

Zu 3 und 4. Die Forderung 3 ist begründet in der Forderung nach leichter Betätigung und billigen Beschaffungskosten. Denn mit steigendem Gewicht steigt naturgemäß auch das Gegengewicht, die Größe der Hebel und Transmissions-

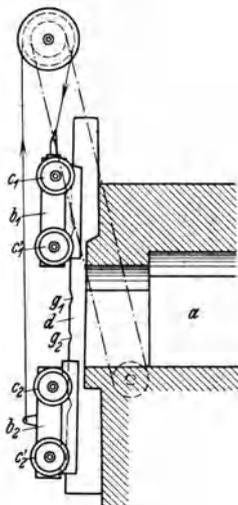


Abb. 137. Türkonstruktion. (BBC, Baden.)

*a* Ofenraum, *b*<sub>1</sub>, *b*<sub>2</sub> Türhälften, *c*<sub>1</sub>, *c*'<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>, *c*'<sub>2</sub>, Führungsrollen. Die Führungsschiene *d* hat Aussparungen *g*<sub>1</sub> und *g*<sub>2</sub>, in die sich die mit der Türe verbundenen Führungsrollen in den Endlagen der Türbewegung einlegen. Die Abbildung zeigt außer den Führungsrollen, die gute Dichtungsgewährleisten, noch die besondere Anordnung einer geteilten Türe, deren Vorteil schnelleres Öffnen und Schließen ist. Die Ausschnitte in den Führungsleisten heben die Türe gleich bei Beginn der Öffnungsbewegung von der Unterlage ab und vermeiden so Abrieb. Gegengewicht unnötig, da Türhälften sich gegenseitig tragen.

teile und damit die Kosten. Kleines Gewicht bedeutet aber dünne Isolationsstärken; die Forderung nach kleinem Gewicht steht daher vielfach in Widerspruch zu der Forderung 4 nach niedrigen Wärmeverlusten. Ein gewisser Ausgleich zwischen diesen Forderungen wird geschaffen, wenn man von der üblichen Ausmauerung (z. B. Abb. 138a; Gewicht ca. 340 kg/m<sup>2</sup>) abgeht und die Türe etwa nach Abb. 138b ausmauert. Diese Art der Ausmauerung ergäbe annähernd den gleichen Wärme-

widerstand und würde nur ca. 135 kg/m<sup>2</sup> wiegen. Dazukommt, daß bei der üblichen Ausführungsform, bei der die Türe vor der Stirnwand des Ofens gleitet, die für die Verluste maßgebende Fläche kleiner wird, wenn die Tür dünner ist. Eine Ausmauerung nach dieser Art setzt allerdings hochwertiges Isoliermaterial voraus. Derartige Türen wurden, soweit der Verfasser weiß, zuerst in

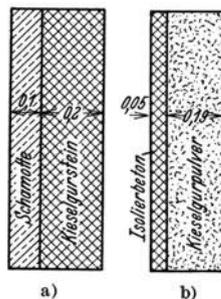


Abb. 138. Verfahren der Türmauerung.

Trotz gleicher Wärmedurchgangszahl gibt die Konstruktion nach b) erheblich kleinere Verluste als die nach a), weil die Oberfläche kleiner ist.



Abb. 139. Die Bedeutung der Türüberdeckung.

der amerikanischen Ofenpraxis angewendet (Johns Manville). Ein anderer Weg zur Verringerung des Türgewichts ist der, die Überdeckung zu verringern; allerdings werden die Verluste an den Seitenwänden der Tür dadurch größer (siehe Abb. 139). Allzu große Überdeckungen machen die Türe allerdings wieder schwer. Um diesem Zwiespalt aus dem Wege zu gehen, hat man die Türe als Teil der Stirnwand ausgebildet (Abb. 140). Dadurch wird die Überdeckung = 0 und dennoch sind die Verluste durch

die Türseitenwände vermieden. Die Anwendbarkeit dieser Konstruktion ist allerdings auf kleinere Öfen beschränkt, da bei großen Öfen die Angriffsfläche für den Hubmechanismus zu klein würde. (Siehe hierzu auch Zepernick ZV 59).

Wesentlich für niedrige Wärmeverluste ist die unter 1 besprochene gute Dichtung. Ganz besonders können die Verluste durch zwei hintereinander liegende Türen herabgesetzt werden. Dabei erhält die außen-

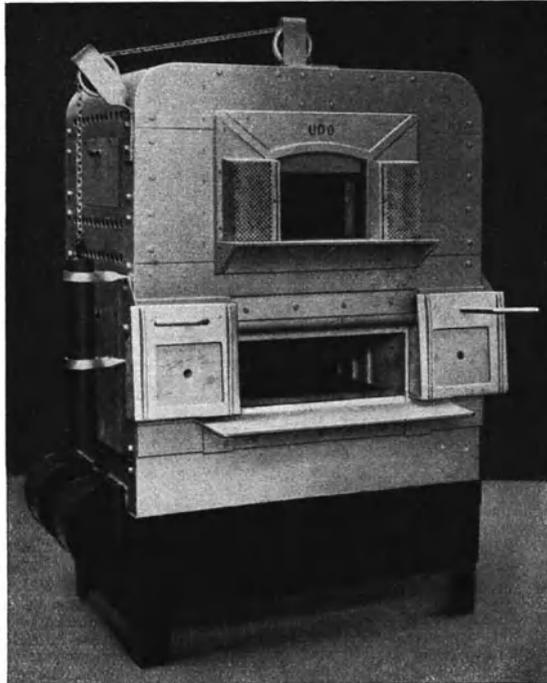


Abb. 140. Türkonstruktion. (Uhlendorff, Berlin-Lichtenberg.)

Die Türe der oberen Kammer des Doppelmuffelofens gleitet nicht vor, sondern in der Stirnwand.  
Die untere Türe ist als Schubtür durchgebildet.

liegende Tür an der Innenwand nur eine verhältnismäßig niedrige Temperatur und der Luftzug wird stark vermindert. Man hat derartige Türen so gebaut, daß man die innere Tür nur in den Ofen hereingestellt hat, es sind aber auch Konstruktionen bekannt geworden, bei denen die beiden Türen gemeinsam bewegt werden können (Abb. 141)<sup>1</sup>. Bisweilen nimmt man an Stelle einer inneren Türe einen Kettenvorhang. Bei unempfindlichem Gut kann man dann Beschickung und Entnahme bei heruntergelassenen Ketten vornehmen, wodurch die Wärme-

<sup>1</sup> BBC: D.R.P. 461427 und Basson: D.R.P. 474940.

verluste vermindert werden. Diese Ketten sind dauernd der Ofentemperatur ausgesetzt und müssen daher aus hitzebeständigem Material gefertigt werden, was eine Verteuerung der Tür mit sich bringt. Man kann, um diese Kosten zu vermeiden, die Ketten nur bei offener Türe vor die Ofenöffnung bringen und dadurch die Wärmeverluste durch Strahlung vermindern; dabei geht aber die Wirkung der Doppeltüre verloren (Abb. 142)<sup>1</sup>.

Zum Schluß sei noch eine Türbewegungskonstruktion gezeigt, bei der die Frage des Türgewichts sehr an Bedeutung verliert (Abb. 143). Bei dieser Türe kommt allerdings die glühende

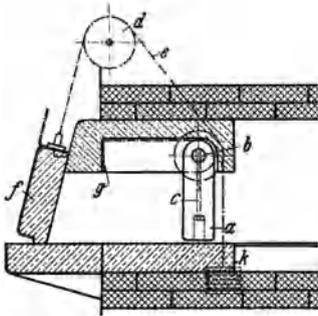


Abb. 141. Ofen mit 2 gekuppelten Türen. (BBC, Baden.)

Die äußere Türe *f* ist mit der inneren *a* durch Seil oder Kette *e* verbunden. Die innere Türe ist durch metallene Einlagen *c* versteift, die an der Welle *b* befestigt sind. — Wird *f* durch Drehen von *d* gehoben, so wird ein auf *b* befestigtes Kettenrad mitgenommen. *a* legt sich in die Öffnung *g*. Die Türen sind durch Gegengewichte *k* ausgeglichen.

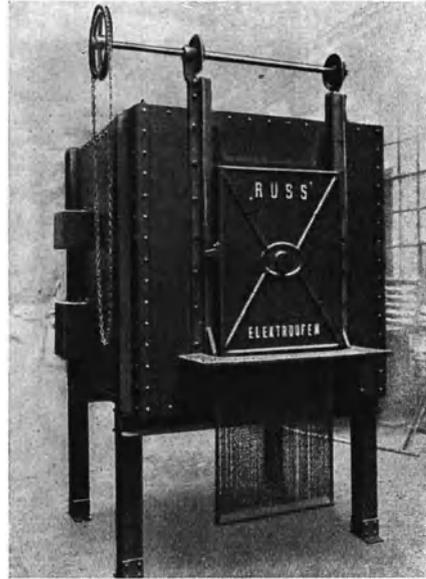


Abb. 142. Kettenvorhang (Industrie-Elektroofen G.m.b.H. Köln).

Der Kettenvorhang ist unten an der Hubtüre befestigt. Sobald die Türe hochgehoben wird, kommt der Kettenvorhang vor die Muffelöffnung; er gibt beim Beschicken oder Entnehmen des Gutes nur eine der Gutgröße entsprechende Öffnung frei. Wenn die Türe geschlossen ist, hängt der Kettenvorhang im Freien und kann sich wieder abkühlen.

Innenfläche vor die sonst kalte Ofenwand zu liegen. Dadurch wird die Türe stark abgekühlt, was Wärmeverluste mit sich bringt und außerdem die Haltbarkeit der Türe herabsetzt; weiter kann der Anstrich der Ofenaußenwand leiden. Ähnliche Schwierigkeiten treten übrigens z. B. auf, wenn ein Ofen unter einer Galerie steht und bei offener, d. h. gehobener Türe, deren Innenfläche der Galeriewand gegenübersteht.

Für stehende Öfen tritt ein Deckel an die Stelle der Türe. Während große Deckel nur mit maschinenartigen Einrichtungen bewegt werden können, kann der Deckel bei kleinen Öfen, bei denen er im ganzen ge-

<sup>1</sup> Ruß: D.R.G.M. 896790.

hoben werden kann, leicht ausgeschwenkt werden. Meist wird folgende Form verwendet: der Deckel wird durch einen Hebel angehoben, in der gehobenen Lage festgestellt und dann mit einem zweiten Hebel ausgeschwenkt. Durch die vorbereitende Vertikalbewegung ist die Verwendung einer Sanddichtung möglich<sup>1</sup>.

### 3. Hochtemperaturöfen.

Wand, Decke und Türen sind in ganz ähnlicher Weise aufgebaut wie die von Mitteltemperaturöfen. Es muß lediglich anschließend an die feuerfeste Innenwand eine Schicht aus halbfeuerfesten Steinen („semi refractory“) vorgesehen werden, weil die Wärmeschutzstoffe den hohen Temperaturen an der Außenwand der feuerfesten Schicht nicht gewachsen sind. Die hochwertigen Isolierstoffe rücken dadurch weiter nach außen, was bei gleichem Innenraum einen erheblich höheren Wärmeverlust bedeutet (siehe hierzu Abb. 29).

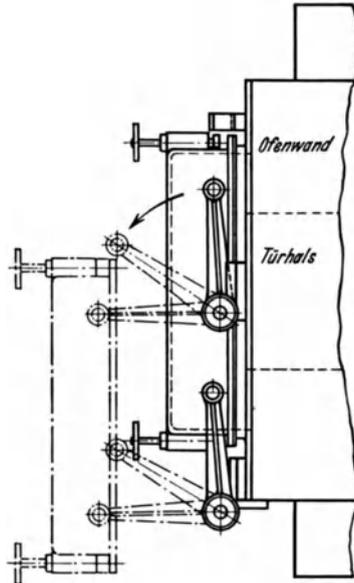


Abb. 143. Türkonstruktion (Junker G. m. b. H. Lammersdorf).

Die Abbildung stellt eine Draufsicht auf die Türe dar. Diese kann nach Lösung der Befestigung (Handräder!) in der Richtung des Pfeils um die beiden senkrechten Achsen geschwenkt werden. Die Türe ist in halboffenem Zustand gestrichelt eingezeichnet.

## C. Beschickungseinrichtungen.

Die Möglichkeit, am elektrischen Ofen niedrige Manteltemperaturen zu erzielen, sowie die Einfachheit, mit der er angeschlossen werden kann, gaben den Anstoß dazu, ihn so auszubilden, daß er in einen modernen Fließbetrieb eingeordnet werden kann. Er bringt im Gegensatz zu den früher üblichen kohle- und ölgefeuerten Öfen keinerlei Belästigung der Arbeiter durch Abgase und Hitze mit sich. Dadurch gab der Elektroofen die Anregung zur Ausbildung und Entwicklung einer Reihe mehr oder weniger selbsttätiger Beschickungs- und Transporteinrichtungen, deren Anwendungsmöglichkeiten, wie die spätere Entwicklung lehrte, keineswegs auf den Elektroofen beschränkt ist (Bulle und Flössel ZV 60). Ihr Gebrauch ist aber beim Elektroofen durch die Sauberkeit des Betriebs sehr erleichtert.

Die außerordentliche Mannigfaltigkeit der Bauformen von Elektroöfen ist dadurch bedingt, daß diese Einrichtungen meist mit den

<sup>1</sup> Siehe Thomson Houston: Engl. Pat. 255 479 und Otis, General Electric Co.: USA.-Pat. 1 646 213.

übrigen Betriebseinrichtungen zusammenarbeiten müssen, so daß für die gleiche Erwärmungsaufgabe sehr verschiedene Transporteinrichtungen Verwendung finden. Um dennoch eine gewisse Übersicht zu haben, wollen wir uns einer Einteilung nach wärmetechnischen Gesichtspunkten bedienen. Die Beschickungseinrichtungen üben nämlich nicht nur auf die Lohnkosten des Ofens, sondern auch im weitesten Maße auf seine Wärmewirtschaft einen Einfluß aus. Dieser wirkt sich aus.

1. in einer Vermehrung der Speicherwärme (bzw. des toten Gewichts) und
2. in einer Vergrößerung der Leerverluste.

Die Beschickungseinrichtungen können auch eine Verringerung des Wärmeverbrauchs mit sich bringen, indem sie die Chargenwechselzeiten vermindern (wodurch das Ausbringen vergrößert und die Leerverluste verkleinert werden) oder indem sie die Zeit herabsetzen, während der die Ofentüren offen stehen. Der einschneidendste Unterschied zwischen den verschiedenen Konstruktionen ist zweifellos durch ihren Einfluß auf das tote Gewicht gegeben; er soll uns darum als Grundlage zur Gliederung der Beschickungs- und Transporteinrichtungen dienen. Wir erhalten dadurch folgende Gruppen verschiedener Transport- und Beschickungseinrichtungen in der Reihenfolge höheren Wärmebedarfs durch totes Gewicht:

1. Beschickungseinrichtung kommt gar nicht in den Ofen (totes Gewicht = 0);
2. Beschickungseinrichtung ist dauernd im Ofen (totes Gewicht = 0, dafür aber meist vermehrte Speicherwärme und Leerverluste des Ofens);
3. Beschickungseinrichtung nur kurzzeitig im Ofen;
4. Beschickungseinrichtung ebenso lange im Ofen wie das Gut.

Der Übergang zwischen den einzelnen Gruppen ist fließend und daher mag die Eingruppierung der einen oder anderen Beschickungseinrichtung bisweilen willkürlich erscheinen.

### **1. Beschickungseinrichtungen, die gar nicht in den Ofen kommen.**

Typisch für diese Gruppe ist die Beschickung mittels Stößel. Ein in regelmäßigen Zwischenräumen sich bewegendes Stößel schiebt stets das am weitesten außen liegende Gut in den Ofen; dieses drückt auf das nächste, weiter innen liegende, das seinerseits weiter drückt und so am anderen Ende des Ofens ein Stück Gut hinausschiebt (Abb. 144). Um die Reibung auf dem Ofenboden zu vermindern, werden Schienen vorgesehen, die — namentlich bei hohen Tempe-

raturen und langen Öfen — gegen Herausreißen gesichert werden müssen.

Selbstverständlich kann diese Anordnung nur Verwendung finden, wo das Gut steif genug ist, um einen solchen Transport zu erleiden.

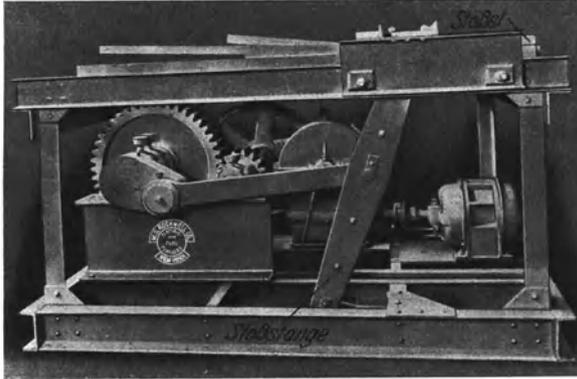


Abb. 144. Stößel (Rockwell Co. New York).

Man sieht auf dem Gerüst den Antriebsmotor, der über eine Schnecke und 2 Stirnräderpaare einen Exzenter treibt, der einer im Gestell gelagerten Stoßstange schwingende Bewegungen aufzwingt.

Oft wird, wenn das Gut nicht entsprechend steif ist, eine feste Zwischenlage verwendet, die je nach der Ofentemperatur aus hitzebeständigem Material bestehen muß, wodurch der Vorteil des geringen Totgewichts verloren geht.

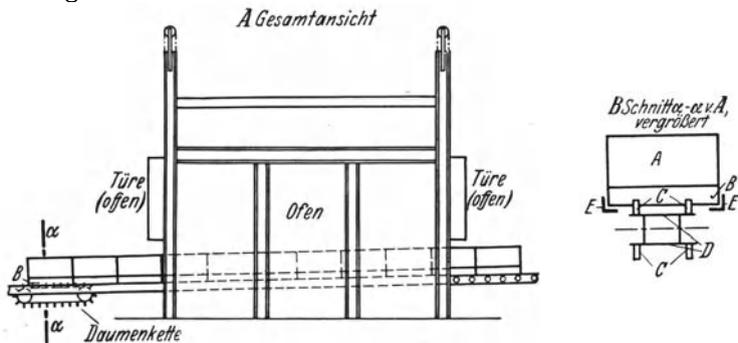


Abb. 145. Ofen mit Daumenkette.

Die Kästen *A* haben einen Rand *B*, in den die Daumen *C* der Kette *D* greifen. Die Kästen gleiten in den Führungen *E*.

Die Abb. 145 zeigt eine Beschickungseinrichtung derselben Gruppe, bei der das Stößel durch eine Daumenkette ersetzt wird.

An dieser Stelle müssen auch die Durchziehöfen erwähnt werden, das sind Öfen für die Wärmebehandlung von Draht, Band oder Blech, durch die das Gut durch außen liegende Haspelvorrichtungen hindurch-

gezogen werden muß. (Derartige Öfen sind auf S. 272 besprochen.) Weiter müssen hier Öfen mit abhebbarer Haube (siehe S. 245) und Tieföfen (siehe S. 243) mit abfahrbarer Decke genannt werden.

## 2. Beschickungseinrichtungen, die dauernd im Ofen bleiben.

### a) Hubbrücken.

Öfen mit dieser Art von Fördereinrichtung werden auch Schrittmacher-, Balkenherd- oder Schwingbrückenöfen genannt. Die Wirkungsweise erhellt aus der Abb. 146, die konstruktive Ausbildung hängt wesentlich von der Ofentemperatur ab. Die Biegungsbeanspruchung bei Anordnung nach der Prinzipskizze wird oft unzulässig groß sein, namentlich bei Verwendung für höhere Temperaturen. In solchen Fällen bildet man vorteilhaft Teile der Ofensohle als Hubbrücken aus, wie es Abb. 147

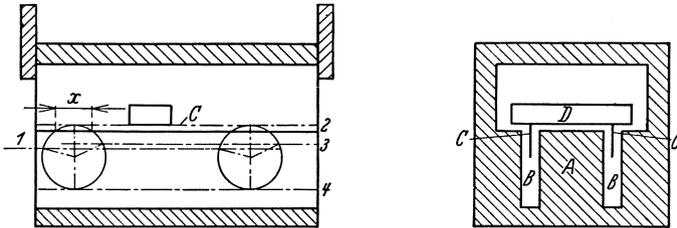


Abb. 146. Prinzip des Hubbrückenofens.

Die Ofensohle 4 hat 2 oder mehr Schlitze B, in denen die Hubbrücken C schwingen. Sie sind durch Exzenter oder eine entsprechende Einrichtung angetrieben, die jeden Punkt der Hubbrücken eine kreisförmige oder elliptische oder auch rechteckige Bewegung ausführen läßt. Dabei wird das Gut D von der feststehenden Ofensohle abgehoben, um einen Betrag  $x$  weiterbefördert und dann wieder abgesetzt. Die Antriebsvorrichtung kann in oder unter den Schlitzen liegen oder, wenn die Hubbrücken durch die Türe ragen, außerhalb des Ofens angeordnet werden. 1 bis 4 geben aufeinanderfolgende Höhenlagen des Exzenters an.

zeigt. Man mauert dann die Ofensohle auf und schützt durch diese Anordnung die Exzenter der Hubbrücke, die sich unter dem Ofen befinden und erforderlichenfalls (z. B. bei langen, niedrigen Öfen) ausfahrbar gemacht werden müssen, um sie erneuern zu können.

Entsprechend den verschiedenen Anforderungen an Gleichmäßigkeit des Ganges wird u. U. die Bewegung in eine Hub- und Längsbewegung aufgelöst, so daß je ein Hub- und ein Fahrmotor vorgesehen werden müssen. Statt der festen Ablagen für das Gut kann man auch zwei Systeme von beweglichen Hubbrücken anordnen, die gegeneinander verstellbar sind und deren Antriebe zeitliche Phasenverschiebung haben<sup>1</sup>. Selbstverständlich kann die Grundform der Anordnung auch weiter ausgebildet werden, wobei sie eine Reihe weiterer Aufgaben zu übernehmen geeignet wird<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Hirschmann: USA.-Pat. 1686696.

<sup>2</sup> Siehe z. B. die von S. A. Anciens Etablissements Loy & Aubé im französischen Patent 515837 vorgeschlagene Hubbrücke, die den Transport und gleichzeitig eine Wendung des plattenförmigen Gutes im Ofen übernimmt.

## b) Rollenherde.

Der Boden des Ofens besteht aus einer Reihe von Rollen, die sich um die eigene Achse drehen; meist werden sie durch einen außerhalb des Ofens liegenden Antrieb bedient und bewegen das auf ihnen liegende Gut. Abb. 148 zeigt das Innere eines derartigen Ofens (Außenansicht siehe z. B. Paschkis ZV 13). Die Ausbildung der Rollen selbst kann auf verschiedene Weise erfolgen. Für nicht zu hohe Temperaturen können volle Rollen aus hitzebeständigem Material verwendet werden (Nathusius ZV 61), bei höheren Temperaturen und rauhem Betrieb ist eine stärkere Anordnung nötig. In der Regel ist es erforderlich, alle Rollen anzutreiben, weil sich bei der großen Reibung infolge der hohen Temperaturen einzelne Rollen sonst nicht mitbewegen würden.

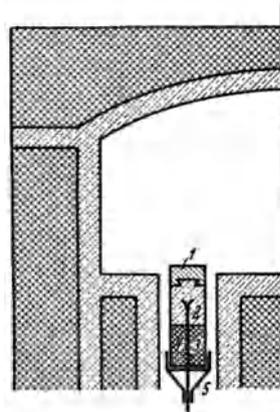


Abb. 147. Konstruktion einer Hubbrücke für einen Mitteltemperaturofen.

1 Feuerfester Belag; soll hart und nicht spröde sein und geringen Abrieb haben. 2 Feuerfester Zement; durch Schwalbenschwanz mit (1) und durch 3 (Metallstäbe; Rundeisen oder dgl.) mit dem Gerüst (5) verbunden. 4 Isoliersteine. 5 Gerüst, mit dem (nicht gezeichneten) Exzenter verbunden.

## c) Ringherdöfen.

Ein kreisringförmiger Herd wird um eine durch den Mittelpunkt des Kreisrings gehende Achse gedreht. Die Heizung befindet sich meist an den feststehenden Seitenwänden und an der Decke. Bisweilen ist auch versucht worden, den Herd



Abb. 148. Blick in das Innere eines Rollenherdofens. (BBC-Hagan, Baden.)

selbst unter Zuführung des Stromes über Schleifringe zu beheizen. Ein Schema eines Ringherdofens zeigt die Abb. 149. Die Entnahme des

Gutes erfolgt meist an einer neben der Aufgabetüre gelegenen Tür oder auch durch diese selbst. Man hat auch den Boden zur Entleerung verwendet, indem eine Reihe beweglicher Tassen vorgesehen sind, die gekippt werden und so durch eine Öffnung im Boden die Entleerung bewerkstelligen<sup>1</sup>.

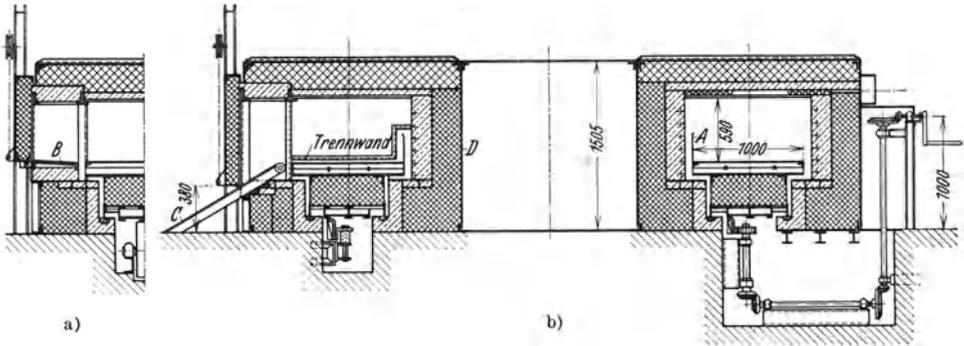


Abb. 149. Ringherdofen (SSW, Berlin).

Antrieb für die Drehung des Herdes von Hand; er wurde jedoch auch schon oft motorisch ausgeführt. Beachte die Sanddichtung des Herdes gegen den feststehenden Ofenteil. Ein Schutzblech *A* an der Innenseite des Ringherdes verhindert ein Abfallen des Gutes aus dem Nutzraum in den Transportkanal. Es sind zwei Türen vorhanden, je eine für das Einbringen (a) und das Ausbringen (b) des Gutes. Bei der Beschickungstüre schwache Neigung der Ofensohle *B* gegen das Ofeninnere, bei der Entnahmetüre Rutsche *C* zur Entleerung des Ofens. Zwischen Beschickungs- und Entleerungstüre ist eine Trennwand eingebaut, die eine gegenseitige Beeinflussung von ein- und ausfahrendem Gut verhindern soll. Der Kern (*D*) des Ofens kann u. U. auch noch mit Wärmeschutz ausgefüllt werden, wodurch dieser Teil des Mantels als Verlustfläche vermieden wird.

#### d) Trommelöfen.

Statt der beim Ringherdofen erforderlichen Drehung um eine senkrechte Achse kann die Drehung des beweglichen Ofenteils auch um eine wagrechte oder eine geneigte Achse erfolgen. Abb. 150 zeigt einen Trommelofen im Schnitt. Bei stärkerer Neigung der Achse und höheren Temperaturen besteht die Gefahr, daß das Gut nicht gleichmäßig durch den Ofen läuft, sondern durch Reibung eine Weile an derselben Stelle hängen bleibt, um dann ein ganzes Stück auf einmal im Ofen weiter zu „fallen“. Um eine gleichmäßige Förderung zu erzwingen, wird unter Umständen in das Innere der Muffel (die Trommelwand) ein Schraubengang eingebaut, der das Gut in ununterbrochenem Strom durch den Ofen zwingt. Die Beschickung erfolgt vielfach durch Einfüllen in einen feststehenden Trichter, wie in der Abbildung gezeigt, u. U. aber auch mit einem Aufgabelöffel.

#### e) Endloses Band (das im Ofen bleibt).

In der Regel bleiben Ketten- oder endlose Bänder ebenso lange im Ofen wie das Gut: die Ketten werden mit dem Gut erwärmt und

<sup>1</sup> Siehe hierzu die amerikanischen Patentschriften Baker 1638908 und 1638909; Keene 1638937; Talley 1783155.

kühlen am Rückweg zu dem Ofeneintritt wieder völlig ab. Um dem dadurch bedingten Mehrverbrauch an Wärme entgegenzuwirken, sind auch Ketten- oder Bandöfen entwickelt worden, bei denen auch der Rücklauf der Kette völlig im Inneren des Ofens erfolgt. Zu diesem Zweck wird die Ofenkammer etwas höher gemacht, als für Gut samt Kette erforderlich ist, und kann so unterhalb des Gutes das rücklaufende Trum der Kette aufnehmen (Abb. 151). Siehe auch Brooke ZV 62. Es sind dann besondere Maßnahmen zum Überleiten des Gutes von der Zubringerkette zur Ofenkette erforderlich; dies geschieht z. B. dadurch, daß die Zubringer- und Ofenkette an den Überleitstellen Ket-

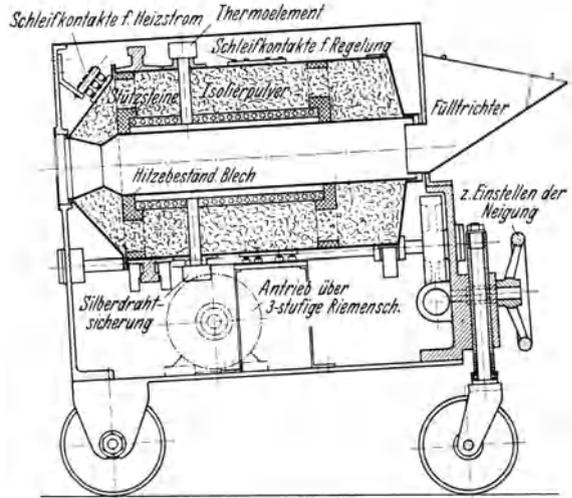


Abb. 150. Trommelofen (Junker G. m. b. H., Lammersdorf). In dem Inneren einer Muffel mit eingebetteten Heizwiderständen ruht eine Trommel aus hitzebeständigem Metall, die an beiden Seiten bis zu den Stirnwänden des Ofens durchgeführt ist. Die Heizmuffel ist mit Hilfe von Steinen im äußeren Ofenmantel gelagert. Die Steine sind, um die Wärmekurzschlüsse so klein als möglich zu halten, mit Aussparungen versehen. Die Isolation besteht aus Pulver. — Äußerer Ofenmantel, Isolierung, Heizmuffel und Trommel aus hitzebeständigem Blech rotieren gemeinsam. Stromzufuhr durch Schleifringe.

tenräder auf gemeinsamen Wellen haben, die den Transport bewerkstelligen. Man hat auch manchmal zwischen den beiden Ketten eine oder mehrere angetriebene Überleitwalzen vorgesehen (Abb. 151), die mit der gleichen Umfangsgeschwindigkeit angetrieben werden wie die Ketten. Schließlich kann man das Gut auch auf endlose Ketten herabfallen lassen, also den Antransport durch „Schwere“ bewerkstelligen.

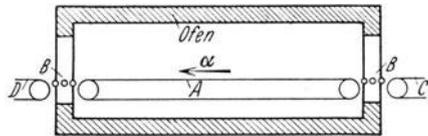


Abb. 151. Schema eines Fließofens mit Kette. Die Kette A befördert das Gut in der Richtung des Pfeiles  $\alpha$  durch den Ofen. Der Antransport erfolgt mit der Kette C, der Abtransport mit der Kette D. Die Überleitung von C auf A und von A auf D erfolgt mit Hilfe der Überleitvorrichtung B. (B besteht z. B. aus einer Reihe gesondert angetriebener Rollen). Die Kette A bleibt stets im Ofen. Die in ihr gespeicherte Wärme geht demnach nicht verloren.

f) Vergleich der Beschickungseinrichtungen dieser Gruppe.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Beschickungseinrichtungen dieser Gruppe finden wir: Hubbrücken sind in Niedertemperaturöfen von nicht allzu großer Länge ein ideales Trans-

portmittel. Die Durchbrechung des Ofenbodens mit den dadurch bedingten Komplikationen fällt weg. Die Hubbrücken können als einfache, leicht versteifte Profileisen hergestellt werden; die Wärmeableitung durch die Enden der Stäbe fällt nicht allzu schwer ins Gewicht. Bei sehr hohen Temperaturen und sehr großen Öfen bietet diese Anordnung den Vorteil der unbedingten Sicherheit der Triebwerksteile gegen die Gefahren der Hochtemperatur. Immer bietet die Anordnung den einen großen Vorteil der Möglichkeit absatzweisen Arbeitens: ohne Gefahr für die Transporteinrichtung kann der Ofen durch schnellen Lauf der Brücken gefüllt und dann für die ganze Zeit der Durchwärmung stillgesetzt werden, wobei die Türen geschlossen werden können. Es ist also halbkontinuierlicher Betrieb denkbar, der manche Vorteile zu bieten vermag. Die Hubbrücken haben den Nachteil, daß nur einigermaßen gleichmäßiges Gut gefördert werden kann, da Sicherheit bestehen muß, daß beim Anheben der Brücken nicht Gut von ihnen herabgleitet. Weiter haben sie den Nachteil, daß das Gut nicht in Ruhe bleibt, sondern regelmäßig angehoben werden muß, wobei Relativbewegungen zwischen Brücke und Gut nicht ausgeschlossen sind. Soweit Ketten Verwendung finden können ohne zu schwer zu werden, und soweit diese betriebssicher ausbildbar sind, vermeiden sie die vorerwähnten Nachteile. Ketten müssen aber namentlich bei mittleren und höheren Temperaturen an vielen Stellen unterstützt werden, ja u. U. dauernd auf dem Boden des Ofens schleifen und unterliegen so einer hohen Abnutzung. Weiter ist es in der Regel nicht zulässig, die Kette längere Zeit stillstehen zu lassen, da die Gefahr besteht, daß sie sich in der Mitte des Ofens an der heißesten Stelle verwirft. Ringherdöfen haben den Vorteil relativ kleinen Wärmebedarfs, da, falls erforderlich und gewünscht, der Hohlzylinder am inneren Ringmantel mit Wärmeschutzmitteln ausgefüllt werden kann; dann kann eine Wärmeabgabe nur an den Außen- und Stirnflächen erfolgen. Ringherdöfen haben den Nachteil, daß Entnahme und Beschickung praktisch an der gleichen Stelle erfolgt; dadurch bedeutet der Transport des Gutes durch den Ofen nicht gleichzeitig eine Fortbewegung desselben im Arbeitsprozeß, wie dies häufig bei großen Wanderöfen der Fall ist. Trommelöfen schließlich sind in ihrer Anwendung auf solches Gut beschränkt, das unbedenklich einer rauen Behandlung ausgesetzt werden kann; denn das Gut fällt fortwährend von einer gewissen Höhe des Trommelmantels herunter und darf seinerseits diesen nicht verletzen.

### **3. Beschickungseinrichtungen, die nur kurzzeitig in den Ofen kommen.**

#### a) Tragholme in Ofenschlitzen.

Die Ofensohle erhält eine Reihe von Schlitzen, in denen Tragholme fahren können, deren Höhe verstellbar ist und die nach Einfahren des

Gutes um einen geringen Betrag abgesenkt werden können, so daß das Gut auf den zwischen den Holmen befindlichen festen Tragstücken zu liegen kommt (Abb. 152, Tama ZV 63). Sehr gebräuchlich sind zwei Schlitzte, wobei die Traghölme entweder an einer Gabel hängend an einer Hängebahn laufen oder auf einem Beschickwagen vor dem Ofen angeordnet sind oder schließlich an einem Kran hängen (Tamele ZV 64).

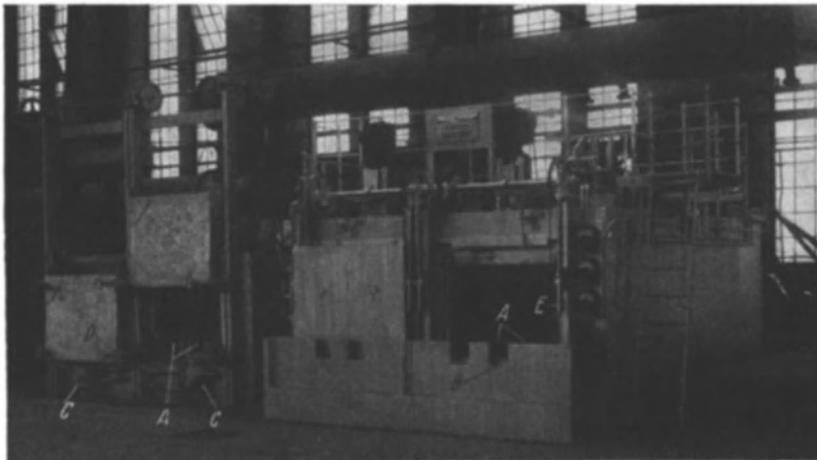


Abb. 152. Kammerglühöfen (Hirsch-Kupfer, Finow).

Im Boden der Öfen sind je zwei Schlitzte *A* vorgesehen, in die die Beschickmaschine einfährt, um das Gut auf den zwischen den Schlitzten stehenden Brücken abzusetzen. Zur Führung der Beschickmaschine ist an den rechten Ofen eine Platte vorgebaut, die nur zwei Ausschnitte *B*, den Bodenschlitzten entsprechend besetzt. — Beachte weiter die Türkonstruktion: Die Türen der zwei linken Öfen öffnen nach oben, die der beiden rechten Öfen nach unten. Je ein Türkontakt *C* (oben bei den nach unten öffnenden Türen, unten bei den nach oben öffnenden Türen) macht die Heizwiderstände stromlos, wenn die Türe geöffnet wird. Türhub motorisch. Gegengewicht bei den linken Öfen oberhalb derselben, bei den rechten hinter den Öfen. Türanpressung bei den linken Öfen durch Druckschrauben *D*, bei den rechten durch Hebel *E*, die durch Elektromagnete angezogen werden.

#### b) Wagen mit Hubplattform.

Bei sehr tiefen Öfen (langen Öfen) bereitet der Bau von freitragenden Traghölmen große Schwierigkeiten, da die Gefahr der Durchbiegung schon in kaltem Zustand besteht. Man hat deswegen in Schlitzten, ähnlich denen, wie sie für Traghölme Verwendung finden, Schienen gelegt, auf denen Wagen laufen, die eine in der Höhe verstellbare Plattform haben. Nach beendeter Einfahrt kann die Plattform (bzw. Teile derselben) gesenkt werden, wodurch das Gut abgesetzt wird. Hierzu besteht der Wagen entweder aus Ober- und Unterwagen, wobei der leichter gehaltene Oberwagen im Ofen bleibt; oder es ragen aus der Plattform nach dem Anheben einzelne Nasen heraus, die das Gut von der Unterlage abnehmen. Die Abb. 153 zeigt einen derartigen Wagen mit Hubplattform.

## c) Beschickmaschine mit Greiferarmen.

Bei dieser Beschickungsvorrichtung bewegt sich ein Greifer in den Ofen, der das Gut, das naturgemäß den dabei auftretenden Beanspruchungen gewachsen sein muß, umfaßt und nach Anheben aus dem Ofen befördert (Abb. 154, Trinks BV 25).

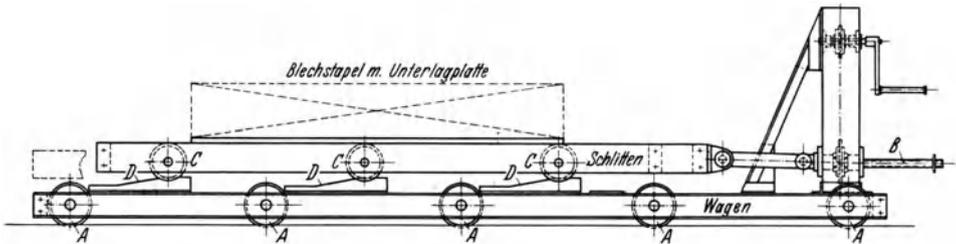


Abb. 153. Wagen mit Hubplattform (SSW, Berlin).  
Die Räder *A* fahren in Schlitzten der Ofensohle oder unter den Ofen ein. Durch Kurbeln an *B* wird der Schlitten durch Abrollen von *C* auf *D* gesenkt. Das Gut wird auf Brücken im Ofen abgesetzt.

## d) Ein Vergleich der Beschickungseinrichtungen dieser Gruppe

ergibt folgende Grenzen der Anwendbarkeit: Die Einrichtungen mit den Tragholmen sind besonders billig und sehr betriebssicher und finden daher breiteste Anwendung. Diese findet ihre Grenze lediglich

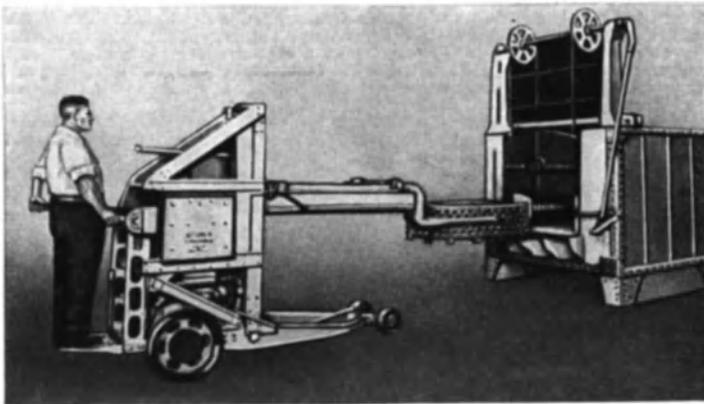


Abb. 154. Beschickmaschine mit Greiferarmen für unempfindliches Gut. (Nach Trinks BV 25.)

bei in der Beschickrichtung sehr tiefen Öfen, bei denen sie durch Wagen mit Hubplattform ersetzt werden. Die dritte Gruppe (Greiferarme) tritt bei den in diesem Buch besprochenen Öfen wegen der hohen Beanspruchung des Gutes stark zurück.

#### 4. Beschickungseinrichtungen, die ebenso lange im Ofen bleiben wie das Gut.

##### a) Ketten.

Ketten, die durch den Ofen laufen, tragen das Gut entweder unmittelbar oder mittelbar. Die Ketten werden durch einen außerhalb des Ofens liegenden Antrieb durch den Ofen gezogen. Bei der Ausbildung des Antriebs und aller Kettenteile ist auf das Arbeiten des Materials und seine Längendehnung entsprechend Rücksicht zu nehmen. Der Antrieb oder das Gegenlager müssen auf einen Schlitten gesetzt und durch Gewicht oder Federzug dauernd in Spannung gehalten werden. Auch bei den einzelnen Teilen der Kette ist viel Spiel zu geben. Die Anordnung der Ketten selbst hängt völlig von der Temperatur und dem zu fördernden Gut ab. Oft werden eine Reihe einzelner Kettenstränge verwendet, über denen das Gut liegt (Abb. 155). Hierbei besteht die Gefahr ungleichmäßiger Dehnung der einzelnen Stränge, wodurch die Kette zum Verwerfen neigt. Sieht man aber die Möglichkeit der verschiedenen Dehnung für jeden Strang vor, so besteht die Gefahr der Relativverschiebung eines der Kettenstränge gegen das Gut, wodurch dieses verletzt werden kann.

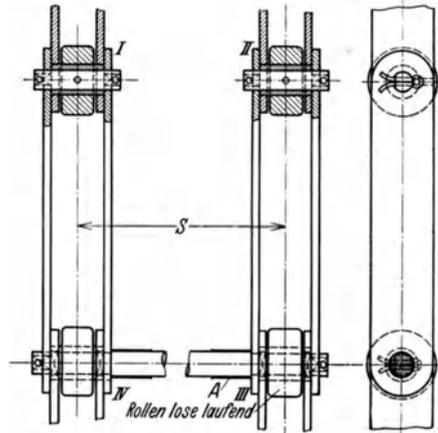


Abb. 155. Kette für einen senkrechten Niedertemperaturofen (Göhring & Hebenstreit, Dresden).

An den Stellen *A* werden Horden oder Traggestänge von der Breite *S* aufgehängt. Bei Verwendung in horizontalen Öfen wird u. U. durch Einsetzen von Drahtnetzen oder (vollen oder perforierten) Blechen zwischen den Punkten *I*, *II*, *III*, *IV* eine volle Tischkette gebildet. Es ist darauf zu achten, daß beim Wenden der Ketten über den Kettenrädern die einzelnen Bleche sich nicht stören.

Einfache Ketten — nach Art der Gallschen Ketten — sind in den meisten Fällen auf Niedertemperaturöfen beschränkt und finden auch trotz der in den letzten Jahren eingetretenen Verbesserungen der hitzebeständigen Materialien bei höheren Temperaturen nicht viel Anwendung. Bei etwas größeren Ofenlängen werden die durch die hohe Reibung bedingten Zugkräfte in der Kette so gewaltig, daß man bei der geringen Kriechfestigkeit der Metalle bei hohen Temperaturen außerordentlich schwere Ketten verwenden müßte, die teuer und wegen ihres Wärmeinhalts unwirtschaftlich wären. Aus ähnlichen Gründen finden Ketten, die mit feuerfesten Steinen belegt sind, im elektrischen Ofen kaum Verwendung. Dagegen hat man auch bei hohen Temperaturen statt Ketten endlose Bänder aus hitze-

beständigem Material gefertigt, das durch Verbindung der Enden zu einer geschlossenen Schleife ausgestaltet wurde; das Blech ist so dünn, daß es über Rollen laufen kann<sup>1</sup>.

Besondere Erwähnung verdient die Anordnung des rücklaufenden Trums. Wird das Gut unmittelbar am Ofen aufgegeben und abgenommen, so daß die Kette nur ganz kurz durch die kalte Werkstattluft laufen müßte, so ist Rückführung der Kette im Ofenschacht lohnend.

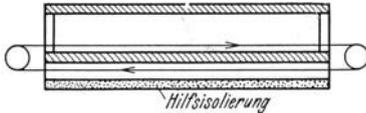


Abb. 156. Hilfsisolierung des rücklaufenden Kettenstrums.

Der Temperaturverlust an den Wendestellen ist so klein, daß dem rücklaufenden Trum nur wenig Wärme zugeführt werden muß. Ist man dagegen aus betriebstechnischen Gründen gezwungen, die Kette auf große Entfernungen durch den Werkstattraum laufen zu lassen, so ist in der Regel ohnedies der Wärmeinhalt verloren und eine Rückführung durch den Ofen würde nur unnötigerweise eine zweite Erwärmung zur Folge haben. Dagegen empfiehlt es sich meist wegen des wenn auch geringen Wärmeinhalts, unter dem Ofen das rücklaufende Trum wenigstens leicht zu isolieren (Abb. 156).

Oft genügt schon der Schutz gegen Luftzug. Eine solche Isolierung wird um so eher am Platze sein, je schwerer die Kette absolut und im Verhältnis zum Nutzgewicht ist.

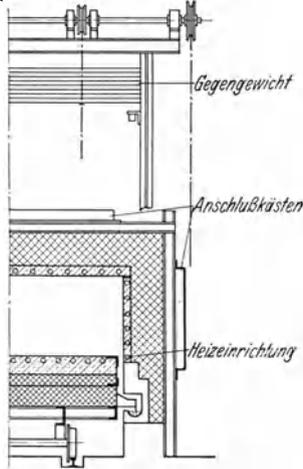


Abb. 157. Herdwagenofen (SSW, Berlin). Beachte die Labyrinthdichtung des Herdwagens gegen den Ofen mittels Sandtasse.

#### b) Wagen.

Das Gut wird auf Wagen gelegt, die mit ihm zusammen in den Ofen gelangen. Für niedrige Temperaturen kann man einfache Eisenkonstruktionen verwenden, bei höheren Temperaturen muß die Wagensohle je nach Ofentemperatur und Durchwärmungszeit des Gutes verschieden stark ausgemauert werden. Da Gut, das auf Wagen in den Ofen gefahren wird, meist schwer ist, müssen die Ausmauerungsmaterialien entsprechende Festigkeit haben; feste hitzebeständige keramische Materialien sind aber,

wie bei Besprechung der Baustoffe erwähnt, meist auch schwer und gute Wärmeleiter, so daß mit hohen Leerverlusten und mit großem totem Gewicht zu rechnen ist.

Während Wagen für Niedertemperaturöfen oft auf Schienen im

<sup>1</sup> Siehe Surface-Combustion Co: Schweizer Patent 133855.

Inneren des Ofens fahren, so daß besondere Dichtungsmaßnahmen nicht nötig sind (siehe Abb. 175), bilden ausgemauerte Herdwagen für höhere Temperatur meist auch die Ofensohle und es muß eine Abdichtung gegen die Seitenwände erzielt werden. Dazu werden die Seitenwände der Herdwagen ähnlich wie Labyrinthdichtungen ausgebildet (Abb. 157). Auch Sanddichtungen werden verwendet ähnlich wie bei Türen, wobei allerdings Maßnahmen nötig sind, um ein Ausschleiben des Sandes zu verhindern. Besonders schwierig ist die Dichtung des am weitesten im Ofen befindlichen Teils des Herdwagens. Hier hat man auskippbare Schneiden für die Dichtung verwendet<sup>1</sup>.

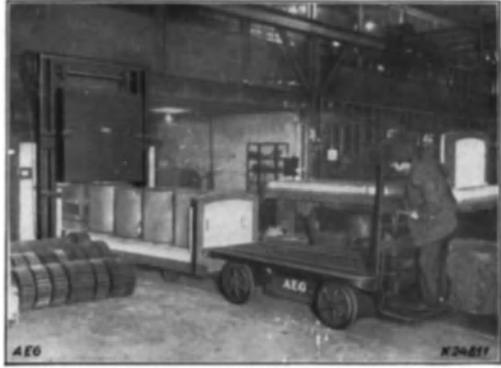


Abb. 158. Einfahren des Herdwagens mit Hilfe von Elektrokarren (AEG-Berlin).

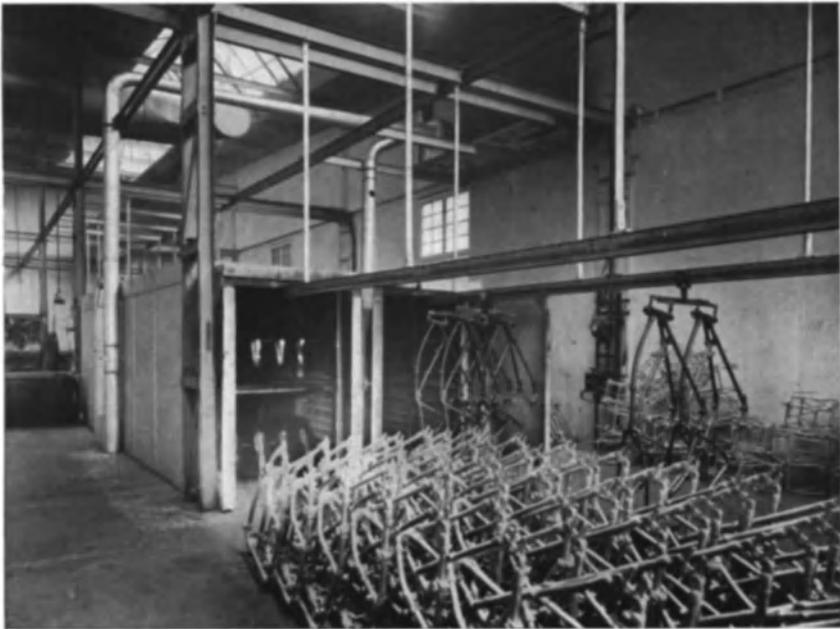


Abb. 159. Trockenofen für Fahrradrahmen. Beschickung mittels Laufkatzen an Hängebahnen. (SSW, Berlin).

<sup>1</sup> Baker: USA.-Pat. 1691368.

Die schweren ausgemauerten Herdwagen sind nicht leicht zu bewegen, wenngleich sie natürlich stets auf Schienen laufen. Die Bewegung und Handhabung wird erschwert bei Öfen, die heiß entleert werden, wobei die glühende Masse des Herdwagens aus dem Ofen gezogen wird. In diesen Fällen sind besondere mechanische Transportmittel für den Wagen zu empfehlen. Antrieb durch Fahrmotor oder über Leitseile durch den Werkstattkran oder mit Hilfe von Elektrokarren (Abb. 158).

### c) Hängebahnen.

An der Decke von Niedertemperaturöfen wird häufig eine Schiene angebracht, die als Hängebahnschiene dient und an der das Gut auf Katzen aufgehängt durch den Ofen läuft (Abb. 159).

Die Verwendung von Hängebahnen ist namentlich dann beliebt, wenn im Anschluß an den Ofen das Gut zu anderen Arbeitsplätzen befördert werden soll. Ist die Verteilung des Gutes so vorzunehmen, daß es an verschiedene Stellen des Betriebes gelangen soll, so müssen Sonder-

konstruktionen gefunden werden, um die Anordnung von Weichen entbehrlich zu machen. Man kann z. B. die Schienen, statt sie unmittelbar weiter laufen zu lassen, nur im Ofen selbst anordnen und Wagen zum Transport außerhalb des Ofens verwenden. Diese bildet man zweckmäßig als Gerüst aus und ordnet an der Decke ebenfalls Schienen an, auf die die Katze außerhalb des Ofens übergeht<sup>1</sup>.

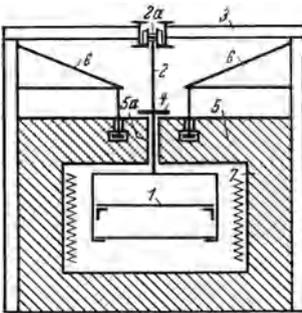


Abb. 160. Ofen mit Hängebahn außerhalb des Ofens.

1 Horden (zur Aufnahme des Gutes). 2 Aufhänger für die Horden, hängen an Katzen (2a), die auf Schienen laufen; diese sind durch Traggerüst (3) gehalten. — Die Aufhänger 2 sind mit Dichtungen (4) versehen und dichten so den Schlitz (5a), in der Ofendecke (5), die durch Streben (6) getragen wird. 7 Ofenwände. Die Horden (1) sind ebensolange im Ofen wie das Gut und bedeuten Speicherwärmeverlust; dagegen sind Aufhänger (2) nebst Katzen (2a) ohne Einfluß auf den Wärmeverbrauch. Die Aufhänger werden zweckmäßig, wenigstens teilweise, aus schlecht wärmeleitendem Material gefertigt.

## 5. Beschickungseinrichtungen, die mehreren der unter 1 bis 4 genannten Gruppen angehören.

Bei vielen Transporteinrichtungen wird ein Teil derselben mit dem Gut den Ofen durchwandern und nur ein Teil wird, wie oben beschrieben, den Ofen nur kurz berühren. Z. B. wird bei Hubbrückenöfen der Transport von kleinstückigem Gut nur unter Zwischenschaltung von Platten folgen können, die so lange im Ofen bleiben wie das Gut, während die Hubbrücken ständig

im Ofen sind. Bei Hängebahnen, die außerhalb des Ofens liegen, wird das Gut selbst auf Gehängen oder Horden durch den Ofen gehen.

<sup>1</sup> AEG: D.R.P. 484425.

Eine eingehendere Besprechung dieser Transporteinrichtungen dürfte sich erübrigen und es sollen hier nur Beschickungseinrichtungen erwähnt werden, die entweder unterhalb oder oberhalb des Ofens laufen und von denen nur ein Teil in das Ofeninnere ragt. Die Abb. 160 zeigt das Schema eines derartigen Ofens. Besondere Aufmerksamkeit ist der Verbindung der außen liegenden Teile mit den durch den Ofen gehenden zu widmen. Es ist notwendig, in diese Verbindungen schlecht wärmeleitende Teile einzubauen, außerdem für eine Abdichtung der Schlitzte, in denen die Verbindungsstücke gleiten, zu sorgen.

## 6. Vergleich der verschiedenen Beschickungseinrichtungen.

Zum Schluß dieses Abschnittes seien die fünf Gruppen von Beschickungs- und Transporteinrichtungen gegeneinander abgewogen. Bei der Auswahl spielt natürlich die betriebliche Eignung der einzelnen Anordnungen eine ausschlaggebende Rolle; die betriebliche Eignung hängt von den örtlichen Verhältnissen in starkem Maße ab, so daß die richtige Auswahl nur nach Kenntnis aller Arbeitsbedingungen möglich ist. Es gehört guter technischer Blick dazu, für die verschiedenen Betriebe stets die günstigste Anordnung herauszufinden. Andererseits wird der Ofenbauer nicht darauf verzichten können, selbst bei der Auswahl mitzuwirken: einmal, weil die Beschickungseinrichtung eines Ofens aufs engste mit seiner Wärmewirtschaft zusammenhängt, dann aber auch darum, weil er in vielen Fällen von sich aus durch Vorschlag verschiedener Möglichkeiten dem Verbraucher zeigen kann, was man mit Hilfe des elektrischen Ofens an Betriebserleichterungen erzielen kann. Wir werden uns bei einem Vergleich auf die wärmetechnischen Eigenschaften stützen müssen, dabei aber nie außer acht lassen dürfen, daß die betriebliche Eignung ein außerordentlich wichtiges Moment darstellt.

Die Gruppe der Beschickungseinrichtungen, die gar nicht in den Ofen kommen, sind — wenn sie ohne Verbindung mit solchen Einrichtungen verwendet werden, die mit dem Gut durch den Ofen wandern — auf rohes unempfindliches Gut beschränkt. Sie stellen aber bei diesem eine wärmetechnisch sehr glückliche Lösung dar. Einrichtungen, die ständig im Ofen bleiben, haben in allen Fällen als Gegengewicht zu der Ersparnis an toter Wärme den Nachteil einer Vermehrung der Leerverluste, die, soweit der Verfasser weiß, bisher in keinem Falle beseitigt werden konnte. Bei höheren Temperaturen kann nur außergewöhnlich sorgfältige Konstruktion und große Erfahrung vor Schwierigkeiten im Betrieb schützen. Beschickungseinrichtungen, die nur kurzzeitig in den Ofen kommen, können, da sie ja nicht voll durchwärmt werden, schwer und massig ausgeführt werden. Sie werden meist aus Stahl konstruiert; teure, hitzebeständige Metalle sind nicht erforderlich. Trotz des hohen

Gewichts leidet die Wärmewirtschaft des Ofens kaum; auch die Leerverluste werden nur unwesentlich erhöht, weil die Beschickungseinrichtung nur wenig Raum beansprucht. Eine gewisse geringe Erhöhung der Leerverluste ist allerdings nicht zu vermeiden. Mit zunehmender Tiefe des Ofens wachsen die Beschaffungskosten sehr; desgleichen der Platzbedarf für die Beschickungseinrichtung, die außerhalb des Ofens in Bereitschaft stehen muß, während die Charge durchwärmt wird.

Die Beschickungseinrichtungen, die ebensolange im Ofen bleiben wie das Gut selbst, sind zwar baulich verhältnismäßig einfach, aber nicht nur in bezug auf totes Gewicht, sondern auch durch starke Vermehrung der Leerverluste außerordentlich ungünstig. Ihre Verwendung kann nur in besonders gelagerten Fällen als gerechtfertigt angesehen werden: wenn z. B. durch Wärmerückgewinnung ein großer Teil der verlorenen Speicherwärme zurückerhalten werden kann, oder wenn sich auf andere Weise ein Handhaben des Gutes vor oder nach der Erwärmung (Umladen auf andere Transportmittel) nicht vermeiden läßt; oder schließlich, wenn durch besondere Umstände das Gewicht der Beschickungseinrichtung im Verhältnis zu dem des Gutes sehr klein gehalten werden kann.

## **D. Schalt- und Regeleinrichtung.**

### **1. Temperaturmessung und Regelung.**

Es kann nicht Aufgabe dieses Abschnittes sein, eine Übersicht über alle Temperaturmeßgeräte zu geben, über die es ausgezeichnete Spezialwerke gibt (Keinath BV 24, Raisch und Schropp BV 26). Es soll hier nur eine kurze Übersicht über diejenigen Geräte gebracht werden, die hauptsächlich im Elektroofen angewendet werden, und ihre Eigenschaften besprochen werden, soweit sie die Genauigkeit der Temperaturregelung zu beeinflussen in der Lage sind. Sowohl zur Temperaturmessung als auch zur Regelung muß zunächst ein Fühlorgan vorhanden sein. Im Anschluß findet ein Übertragungsorgan Verwendung, das bei den Meßgeräten gleichzeitig zur Ablesung der Temperatur verwendet werden kann, bei den Reglern jedoch die Temperaturimpulse zum Schaltorgan weiterleitet. Die Meßgeräte sowohl als auch die Regler sind je nach der Verwendungstemperatur erheblich verschieden (namentlich die Fühlorgane). Von der Bauart der Fühlorgane sind die Übertragungsorgane abhängig, so daß auch diese je nach der Temperaturlage verschieden ausgebildet werden. Dagegen sind die Schaltorgane praktisch nur von den Leistungen und Spannungen der Heizwiderstände, nicht aber von der Temperatur des Ofens abhängig.

## a) Fühlorgane und Übertragungsorgane.

Die Wirkung der Fühlorgane beruht auf einer temperaturabhängigen Eigenschaft. Als solche Eigenschaften kommen in Betracht:

Längenänderung	}	des Fühlorgans
Elektrischer Widerstand		
Thermokraft		
Magnetische Leitfähigkeit	}	des Fühlorgans oder des Gutes.
Strahlung		

Als Übertragungsmittel kommen in Betracht:

der elektrische Strom;

Gase, insbesondere Druckluft;

Dämpfe;

Flüssigkeiten, insbesondere Wasser und Öl.

Das wichtigste Übertragungsmittel ist heute zweifellos der elektrische Strom, während die ersten brauchbaren Regler sich des Druckwassers und der Druckluft bedienten. Die Anordnung ist bei diesen viel komplizierter als beim elektrischen Strom, so daß man diesen heute fast ausschließlich als Übertragungsmittel verwendet.

$\alpha$ ) Temperaturen bis etwa  $600^{\circ}$ . Die Temperaturgrenze deckt sich annähernd mit der der Niedertemperaturöfen.

Die Fühlorgane, die auf Längenänderung beruhen, bestehen aus zwei Werkstoffen mit verschiedener Wärmeausdehnung, und zwar entweder aus zwei festen Stoffen (Abb. 161) oder aus einem festen und einem flüssigen oder gasförmigen Stoff. Als Stoffpaare kommen meist zur Verwendung:

Bei niedrigen Temperaturen (bis etwa  $220^{\circ}$ ):  
Nickelstahl (Invarstahl) gegen Messing;

bei mittleren Temperaturen (über etwa  $220^{\circ}$   
bis etwa  $600^{\circ}$ ) Nickelstahl gegen Quarz.

Das Temperaturführelais (Abb. 161) besteht aus Fühler und Schaltvorrichtung. Der Fühler wird durch das sich unter Wärmewirkung stark ausdehnende Fühlrohr 2 und den sich wenig dehnenen Stab 1 gebildet, die im Boden 3 gegeneinander stoßen. Das Fühlrohr 2 sitzt im Fühlrohrschacht 5. Der Stab 1 ist am oberen Ende als Stellschraube ausgebildet und trägt die mit Mutter 6 versehene Skalen-scheibe 7.

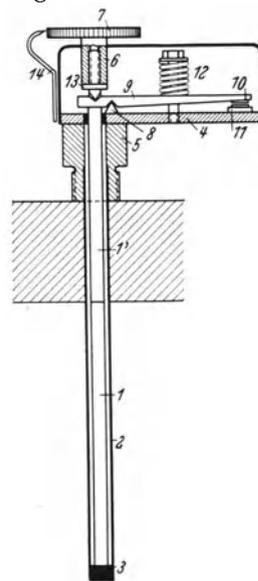


Abb. 161. Temperaturregler  
(Kieback u. Peter, Berlin).

Die Schaltvorrichtung umfaßt den im Schneidenlager ruhenden Hebel 9, der die Kontakte 10 trägt, sowie den auf der Grundplatte 4 befestigten Gegenkontakt 11. Die Feder 12 hält 10 und 11 in der Ruhelage geschlossen. Wärmedehnungen des Fühlers 1, 2 ergeben entsprechende Bewegungen von 6, die sich über den Druckring 13 auf den Hebel 9 übertragen, und gegen die Federkraft von 12 die Kontakte 10, 11 trennen.

In der Wand des Ofens herrscht im Mittel eine niedrigere Temperatur als im Ofen. Die Längenänderung des in der Wand liegenden Teils des Rohres (2) mit starker Längendehnung muß daher ausgeglichen werden: dies geschieht z. B. dadurch, daß im Rohr an Stelle des Stabes 1 auf die in der Ofenwand liegende Länge ein Hilfsstab 1' aus dem gleichen Material wie das Rohr 2 vorgesehen wird, so daß sich über die in Betracht kommende Länge Innen- und Außenmaterial um den gleichen Betrag ausdehnen.

Bei derartigen Fühl- und Übertragungsorganen ist meist eine Ablesung der im Ofen gerade herrschenden Temperatur nicht möglich. Dies ist ein Nachteil, weil die vom Reglerfühlorgan getrennte Temperaturmessung Unsicherheiten in den Ofenbetrieb bringt. Als Vorteil dieser Regler ist ihr geringer Preis zu nennen.

Quecksilberthermometer finden als Stabthermometer oder Winkelthermometer oder namentlich bei höheren Temperaturen als Federthermometer Anwendung. Bei den letzteren befindet sich das Quecksilber nur im Fühlorgan, während die Übertragung auf die Thermometerskala nach dem Manometerprinzip erfolgt: in der zur Zeigerbetätigung dienenden hohlen Spiralfeder und in den Verbindungsrohren zwischen Fühlorgan und Instrumentgehäuse befindet sich ein Gas, das unter dem Einfluß der Dehnung des Quecksilbers zusammengedrückt wird. Die Drucksteigerung setzt den Siedepunkt des Quecksilbers herauf; an dem Instrument wird eigentlich der Druck gemessen, und es ist lediglich auf Temperatur umgeiecht. Besondere Mittel sind nötig, um bei Führung des Verbindungsrohres (Übertragungsorgan) durch eine Zone erhöhter Temperatur (z. B. Ofenwand) eine Fehlanzeige durch zusätzliche Drucksteigerung des Gases infolge Eigenerwärmung desselben zu vermeiden (Abb. 162). Es wird hierzu eine Kompensationsfeder verwendet. Diese ist an ein neben dem Hauptfühlorgan befindliches Hilfsfühlorgan angeschlossen, das sich in dem Raum erhöhter Temperatur, die nicht gemessen werden soll, befindet (z. B. in dem Raum über einem Bad, in der Ofenwand usw.). Die Hilfsfeder im Meßgerät wirkt der Hauptfeder entgegen.

Bei Verwendung von Ausdehnungsreglern bieten die Kontakte einige Schwierigkeiten. Bei festen Werkstoffpaaren für Dehnungsregler ist zu bedenken, daß die Dehnung nur außerordentlich kleine Beträge

erreicht. Um ausreichend große Kontaktwege zu erzielen, sind sehr große mechanische Übersetzungen nötig (z. B. in der Größenordnung von 1:30). Dadurch werden die zur Verfügung stehenden Kontaktdrücke sehr klein. Dazu bedingt die hohe Übersetzung starke Reibung, und aus diesem Grunde muß man sich ganz besonders bemühen, an den Reglerkontakten nur ganz kleine Schaltleistungen zu erhalten, also Relais mit kleinem Eigenverbrauch zu verwenden. Die schleichende Öffnung und Schließung der Kontakte hat zur Folge, daß das Relais nicht ruckartig anzieht, sondern zuerst zittert. Abb. 163<sup>1</sup> zeigt ein Oszillogramm, das an einem Ausdehnungsregler aufgenommen ist und das darstellt, wie oft der Stromkreis geschlossen wird, ehe die endgültige Schließung, die das Anziehen des Relais bewirkt, eintritt.

Bei Quecksilberthermometern vermeidet man für Regelzwecke wegen der hohen Schalthäufigkeit grundsätzlich das Schalten am Quecksilberfaden selbst und verwendet statt dessen die bereits erwähnten Federthermometer, die einen ausreichenden Kontaktdruck ergeben, so daß die Kontakte unmittelbar in der Zeitgerbahn liegen können.

Bei den Ausdehnungsreglern müssen noch die Bimetallregler erwähnt werden. Als Fühlorgan

dient eine Bimetallfeder. So bezeichnet man Blattfedern, die aus zwei Blättern verschiedener Werkstoffe mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten bestehen, die fest miteinander verbunden sind. Wird die Bimetallfeder erwärmt, so müssen die beiden Blätter verschiedene Längen annehmen, was sie nur können, wenn sie sich krümmen (sie sind ja miteinander fest verbunden). Beim Krümmen berühren sie dann einen Kontakt und leiten so den Schaltvorgang ein. Die Formänderung geht stetig vor sich und so ist die Kontaktgabe eine schleichende, wenn nicht besondere Mittel angewendet werden, um eine Momentauslösung für die Kontakte zu bewerkstelligen.



Abb. 162. Quecksilberfederthermometer mit Temperaturkompensation (Schäfer & Budenberg, Magdeburg).

*A* Hauptführohr, *B* Betätigungsfeder hierzu, *C* Hilfsführohr, *D* Hilfsfeder, wirkt über die Hebel *G*, *H* der Feder *B* entgegen, *E* Zeiger, *F* Nullpunktkorrektion.

<sup>1</sup> Für die Überlassung der Abbildung ist der Verfasser der AEG zu Dank verpflichtet.

Widerstandsthermometer finden ebenfalls in dem genannten Temperaturbereich Anwendung als Fühlorgane. Bis etwa  $150^{\circ}$  wird Nickel, darüber bis etwa  $600^{\circ}$  Platin als Thermometerwerkstoff gebraucht. Die eigentlichen Thermometer — ebenso wie die noch zu besprechenden Thermolemente — werden in Schutzrohre gebettet, die außer als mechanischer Schutz noch dazu dienen, eine vorzeitige Oxydation des Fühlorgans zu verhindern, denn eine solche würde zu schweren Meßfehlern führen. Die Widerstandsmessung kann nach

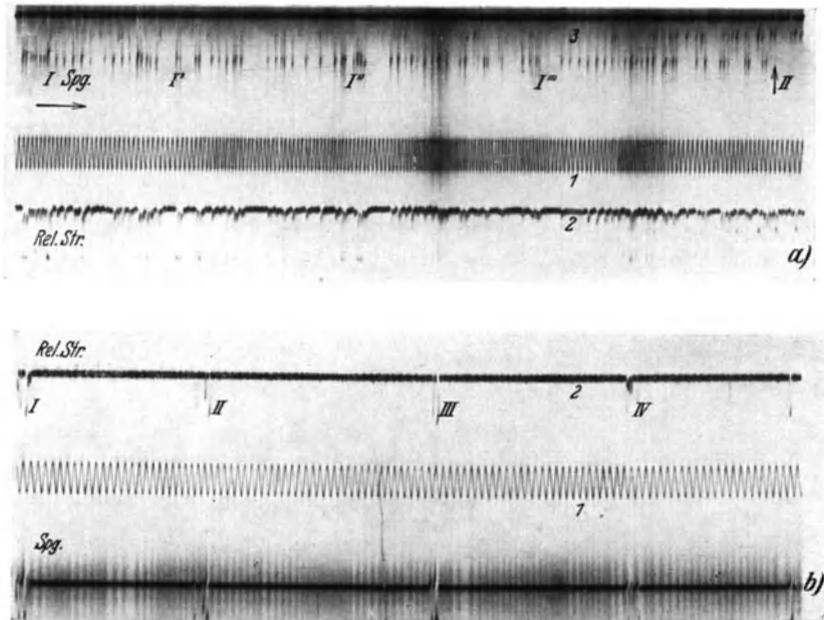


Abb. 163. Oszillogramm der Schaltvorgänge an einem Ausdehnungsregler.

a) zeigt den Einschaltvorgang, b) den Ausschaltvorgang. Die Linie 1 gibt den Zeittakt an (50 Per./sek.), die Linie 2 zeigt den Relaisstrom, die Linie 3 die Spannung an den Klemmen des Relais. Infolge ungenügenden Kontaktdrucks tritt nach a) endgültiges Einschalten erst nach vielen Stromspitzen ( $I, I'$  usw.), bei  $II$  ein. — Auch beim Ausschalten (nach b) tritt nicht sofort eine Stromunterbrechung ein, sondern der Strom steigt nach dem Ausschalten bei  $I, II, III$  usw. noch einmal an.

einem der bekannten Meßverfahren erfolgen. Meist wird allerdings der Strom gemessen und die Spannung durch Verwendung einer gesonderten Stromquelle konstant gehalten. Seit einiger Zeit ist aber auch die Messung bei unmittelbarer Speisung des Thermometers vom Netz aus möglich, und zwar mit Hilfe der Kreuzspulinstrumente. Spannungsschwankungen bis etwa 20% sollen die Meßgenauigkeit nicht beeinflussen. Die Armaturen sind meist gleicher Bauart wie für Thermolemente; sie werden im nächsten Abschnitt besprochen.

Soweit Thermoelemente bei diesen niedrigen Temperaturen Anwendung finden, werden hauptsächlich solche aus Eisen-Konstantan verwendet.

**β) Temperaturen bis etwa 1000°.** Der Bereich deckt sich annähernd mit dem für Mitteltemperaturöfen.

Ausdehnungsregler finden in diesem Temperaturbereich reichlich Anwendung; als Werkstoffpaar kommt bei Temperaturen über 600° z. Z. nur Chromnickel gegen keramische Massen in Betracht. Über die Vor- und Nachteile der Ausdehnungsregler ist oben das Nötigste gesagt worden.

Widerstandsthermometer aus Platin werden gelegentlich — aber mit Recht selten — auch noch für Temperaturen über 600° verwendet.

In dem mittleren Temperaturbereich werden hauptsächlich Thermoelemente gebraucht, und unter diesen spielen die aus Nickel und Chromnickel die größte Rolle. Daneben werden auch — namentlich für niedrigere Temperaturen bis etwa 750° Eisen-Konstantan oder Silber-Konstantan-Elemente verwendet.

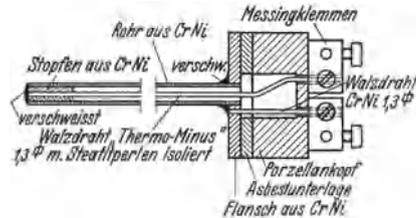


Abb. 164. Rohrelement (Heraeus - Vakuum-schmelze, Hanau).

Das Chromnickel ist oxydationsbeständiger als das Thermominus.

Weitaus die meisten Metalle, die zu Thermoelementen verwendet werden, würden nach verhältnismäßig kurzer Arbeitszeit bei hoher Temperatur korrodieren; man umgibt sie daher mit Schutzrohren, die einen Angriff der Thermoelemente durch die Ofenatmosphäre verhindern sollen. Diese Schutzrohre sind entweder aus keramischen Massen oder aus hitzebeständigen Metallen hergestellt. Ein Nachteil der Schutzrohre besteht in der unvermeidlichen Verschlechterung der Regeltgenauigkeit durch Vergrößerung der Charakteristikwerte (siehe S. 102).

Um den Schutz der Thermoelementrohre zu erzielen, ohne eine zu weit gehende Verschlechterung der Charakteristik in Kauf nehmen zu müssen, werden sogenannte Rohrelemente hergestellt (Abb. 164), bei denen der eine Schenkel — und zwar der mit größerer Korrosionsbeständigkeit — als Rohr hergestellt wird und den anderen allseitig umschließt. Bei Nickel-Nickelchromelementen wird demgemäß der Nickelchromschenkel als Rohr ausgebildet.

Die zu den Thermoelementen gehörigen Meßinstrumente interessieren hier vor allem in bezug auf die Kontakteinrichtungen. Die Kontakte liegen entweder unmittelbar in der Zeigerbahn, so daß der Zeiger bei Erreichen einer bestimmten Temperatur an den Kontakt stößt und durch ihn festgehalten wird. Dabei ist zu beachten, daß, wenn aus

irgendeinem Grund die Temperatur dann noch weiter steigt, dies nicht angezeigt wird. Es wird vielmehr vorgetäuscht, daß der Temperaturanstieg zum Stillstand kommt. Da der Kontakt zwischen Zeiger und festem Kontaktstück im Augenblick der Berührung nicht sicher wäre, müssen Maßnahmen getroffen werden, um den Kontaktdruck vorübergehend zu verstärken. Ebenso ist für plötzliche Unterbrechung (Momentschaltung) zu sorgen. Diese Aufgabe löst z. B. W. C. Heraeus durch eine Hilfs-EMK, die in regelmäßigen Abständen im Sinne des Kontaktschlusses oder der Kontaktöffnung sich der eigentlichen Thermokraft überlagert. Die Steuerung des Taktes erfolgt durch eine geheizte Bi-

metallfeder.  
 Besonders häufig findet man die sogenannte Fallbügelanordnung (Schema Abb. 165). Die Kontakte befinden sich hier nicht mehr in der Zeigerbahn, sondern unterhalb derselben. Der Zeiger wird in regelmäßigen Zeitabständen in der Größenordnung von 5...50 s durch einen Fallbügel nach unten gedrückt und betätigt je nach seiner Stellung einen von mehreren Kontakten, oder, wenn die Temperatur gerade einen Betrag erreicht hat, bei dem kein Kontakt vorhanden ist, wird der Zeiger in den Zwischenraum zwischen zwei Kontakten gedrückt. Die Häufigkeit des Niederdrückens des Fall-

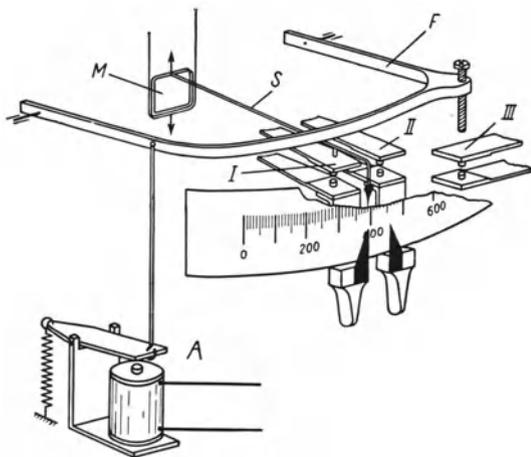


Abb. 165. Schema eines Temperaturreglers mit Fallbügel (S. u. H., Berlin).

Das Thermoclement (nicht gezeichnet) arbeitet auf eine Drehspule *M*, die zwischen permanenten Magneten schwingt. Dadurch wird der Zeiger *S* eingestellt. Der Magnet wird von einem Zeitschalter periodisch erregt, zieht dann den Anker *A* an (der dann durch die Feder losgerissen wird). *A* drückt den Fallbügel *F* nach unten. Steht *S* über einem der beiden Kontakte *I* oder *II*, so wird dieser auf den darunter befindlichen Kontakt gedrückt und schließt damit einen Relaisstromkreis. — Die Kontakte *I* und *II* sind jeder für sich (Einstellung der Unempfindlichkeit) und beide gemeinsam (Einstellung des Regelbereichs) verstellbar. *III* ist der Normkontakt, der geschlossen wird, wenn *S* zwischen *I* und *II* steht.

bügels — der Fallbügelrhythmus — wird durch eine Bimetallfeder oder durch ein mechanisches Uhrwerk oder durch einen kleinen Elektromotor bedingt. Die Betätigung durch das Uhrwerk kann unmittelbar oder unter Zwischenschaltung von Magneten erfolgen (Ansicht siehe Abb. 166).

Die Schaltung muß unter Selbstverriegelung der Relais oder Schütze vor sich gehen, so daß erst ein gegenteiliger Schaltbefehl eine einmal erreichte Schaltstellung zu verändern vermag. Zur Wahl des Fallbügelrhythmus ist oben unter „Berechnung“ bereits einiges gesagt worden. Kurzer Rhythmus (häufiges Abtasten) hat hohe Regelgenauigkeit, aber

große Schalthäufigkeit — daher starke Beanspruchung der Regelgeräte — zur Folge. Eine untere Grenze des Rhythmus ist gegeben durch die Zeit, die erforderlich ist, den beim Drücken in Schwingungen versetzten Zeiger zur Ruhe kommen zu lassen. Da die Forderungen nach Regelgenauigkeit verschieden sind, empfiehlt es sich, den Fallbügel-

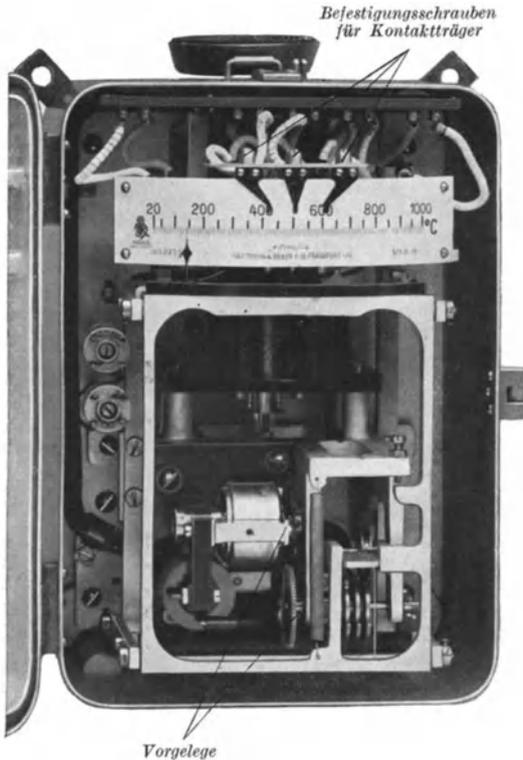


Abb. 166. Ansicht eines Temperaturreglers (Fallbügelregler) (Hartmann & Braun, Frankfurt/M.).

Der Antrieb des Bügels — Steigrahmen, da er zur Arbeitslage steigt, und nicht, wie der Fallbügel sinkt — erfolgt durch mechanische Glieder (Motor, Vorgelege, Steigräder). Wenn der Zeiger unter einem der Kontaktträger steht, so wird der betreffende Träger hochgehoben und kippt die auf ihm sitzende Quecksilberöhre. — Die Kontakte können in ihrer gegenseitigen Lage nach Lösen der Befestigungsschrauben verändert werden, wodurch die Unempfindlichkeit des Reglers verstellt werden kann.

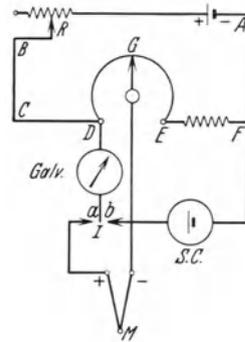


Abb. 167. Prinzip des Potentiometerreglers. (Leeds & Northrup, Philadelphia.)

Bei Arbeitsstellung liegt der Umschalter  $I$  an  $a$ . Das Galvanometer zeigt auf 0, wenn die Spannung am Thermoelement  $M$  gerade gleich groß ist, wie der Spannungsabfall, den der von  $\pm$  (Element) erzeugte Strom in dem Stück  $DG$  des Schleifwiderstandes  $ED$  hervorruft. (Stromkreis  $-AFEDCBB+$ ) Ist der Spannungsabfall in  $DG$  größer oder kleiner als die thermoelektrische Kraft, so erfolgt Ausschlag der Galvanometernadel, wodurch ein Kontakt geschlossen wird, der den Ofen entweder höher heizt oder abkühlt. — Bei Lage  $b$  des Umschalters  $I$  wird das Arbeitselement  $\pm$  durch Vergleich mit dem unveränderlichen Normalelement  $S.C.$  geprüft. Der veränderliche Widerstand  $R$  dient zur Justierung.

rhythmus einstellbar zu gestalten, falls die Bedienung des Ofens so sorgfältig ist, daß der Rhythmus der jeweils verlangten Genauigkeit entsprechend eingestellt werden kann. Die Fallbügelkonstruktion macht Regler verhältnismäßig teuer.

In der amerikanischen Praxis haben sich auch die Potentiometerregler eingebürgert, bei denen die Thermospannung nicht durch ein Millivoltmeter, sondern durch ein Potentiometer (nach der Nullmethode)

bestimmt wird. Die Abb. 167 zeigt die Meßanordnung, die Abb. 168 eine Ausführungsform.

Fühlorgane, die auf die Änderung magnetischer Leitfähigkeit ansprechen, sind für Regelzwecke bisher nicht angewendet worden. In Verbindung mit Öfen mit selbsttätiger Anzeige des Umwandlungspunktes spielen sie aber eine gewisse Rolle und werden an dieser Stelle später besprochen werden (S. 248).

Fühlorgane, die auf Strahlung ansprechen, spielen bei Mitteltemperaturöfen keine Rolle.

Die verschiedenen Relais, die bei den Schaltungen verwendet werden

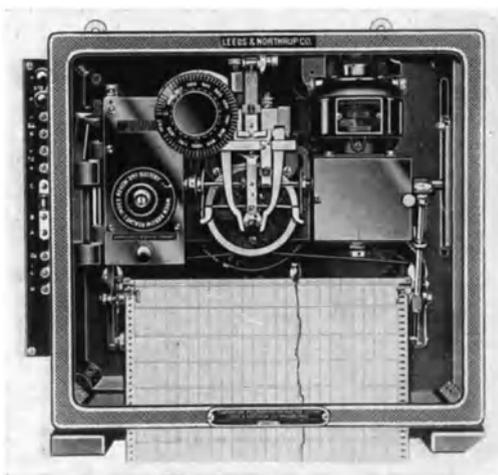


Abb. 168. Ansicht eines Potentiometerreglers.  
(Leeds-Northrup Co, Philadelphia.)

müssen, kann man sowohl zu den Übertragungsorganen als zu den Schaltorganen zählen. Wir werden sie bei den letzteren besprechen, da sie unabhängig von der Temperatur sind.

$\gamma$ ) Temperaturen über 1000°. Die Temperaturgrenze fällt annähernd mit der für die Hochtemperaturöfen zusammen. Für den unteren Teil des in Betracht kommenden Temperaturbereichs können noch Ausdehnungsregler, so wie unter  $\beta$

besprochen, Verwendung finden. Die Grenze ihrer Anwendungsmöglichkeit wird durch die Festigkeit des metallischen Fühlorganrohres gegeben.

Für den ganzen Temperaturbereich kommen Thermoelemente als Fühlorgane in Betracht, bis zu 1100° u.U. noch Nickel-Nickelchromelemente. Darüber hinaus müssen Edelmetallelemente Verwendung finden. Hierfür standen bisher ausschließlich Platin-Platinrhodiumelemente zur Verfügung. Vor einigen Jahren hat Heraeus ein Edelmetall-Thermoelement für Temperaturen bis 1200° entwickelt, das eine außerordentlich hohe Thermokraft aufweist und daher nicht mehr so wie die Platin-Platinrhodiumelemente auf hochempfindliche teure Meßinstrumente angewiesen ist.

Über 1200° stehen heute — wenn man von den Platin-Platinrhodiumelementen absieht — nur optische Pyrometer zur Verfügung. Teilstrahlungs-pyrometer gestatten nur subjektive Ablesung der Tem-

peraturen und sind daher für Zwecke der selbsttätigen Temperaturregelung nicht zu gebrauchen. Für Meßzwecke können sie natürlich angewendet werden. Sie beruhen auf dem Vergleich der Glühfarbe eines im Instrument befindlichen Glühfadens mit der des Gutes. Der Glühfaden kann verschieden stark erwärmt werden, so daß sich seine Glühfarbe entsprechend ändert. Der Strom, bei dem er gleich hell glüht, wie das Gut, dient zur Bestimmung der Guttemperatur. Die Skala des Temperaturmeßgerätes ist meist unmittelbar in Temperatureinheiten geeicht.

Beim Gesamtstrahlungs-pyrometer wird die Meßstelle anvisiert; die Strahlen über den gesamten Frequenzbereich werden durch die Optik

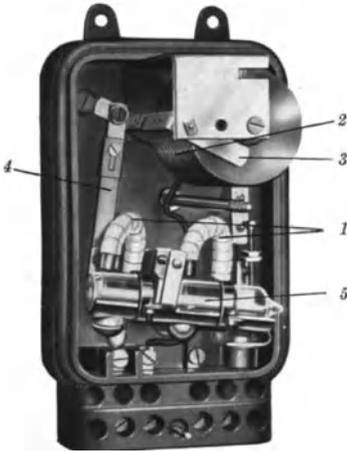


Abb. 169. Quicksilberrelais (P. Schröder, Feuerbach).

1 Stromzuführung, 2 Magnetspule, 3 Drehanker, 4 Hebel, 5 Quecksilberöhre. — Wenn 2 erregt wird, so wird 3 vor den Kern der Spule gezogen und klappt über 4 die Röhre 5.

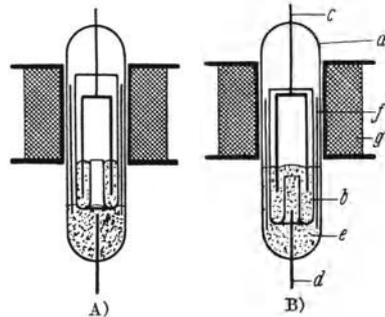


Abb. 170 Cutaxrelais (AEG, Berlin).

Quecksilberschwimmerrelais; Ausführung für Ruhestrom. *a* Glasröhre, *b* Schwimmer, *c*, *d* obere bzw. untere Stromzuführung, *e* Quecksilber, *f* Lamellen, *g* Spule. — In stromdurchflossenem Zustand (A) ist der Schwimmer hochgehoben; das Quecksilber ist nicht in der zentralen Bohrung des Schwimmers, *c* und *d* haben keine Verbindung miteinander. Wird die Spule stromlos (B), so sinkt der Schwimmer durch das Gewicht der Lamellen in das Quecksilber; dieses strömt in die zentrale Bohrung des Schwimmers und stellt eine stromleitende Verbindung zwischen *c* und *d* her.

des Instruments auf ein in ihm befindliches Thermoelement gerichtet. Die Erwärmung des Thermoelements wird gemessen und durch entsprechende Eichung der Meßinstrumente erhält man dadurch Aufschluß über die Temperatur der Meßstelle. Diese Ablesung ist objektiv und kann daher zur selbsttätigen Temperaturregelung verwendet werden. Die benötigten Meßgeräte sind dieselben, wie bei den Thermoelementen für Mitteltemperaturöfen beschrieben.

**d) Temperatur-Zeitregelung.** Es ist naheliegend, bei Bedarf die Temperatur nicht auf einen konstanten Wert zu regeln, sondern den Sollwert der Temperatur nach einem vorbestimmten Programm zu verändern; man bezeichnet diese Regelung als Programmregelung. Sie findet zweckmäßig bei all den Verfahren Anwendung, die einen bestimm-

ten Zeit-Temperaturverlauf erfordern, z. B. Tempervorgänge, Wärmebehandlung von Glas usw. Das Prinzip der Wirkungsweise ist entweder so, daß die Kontakte des Temperaturreglers mechanisch nach

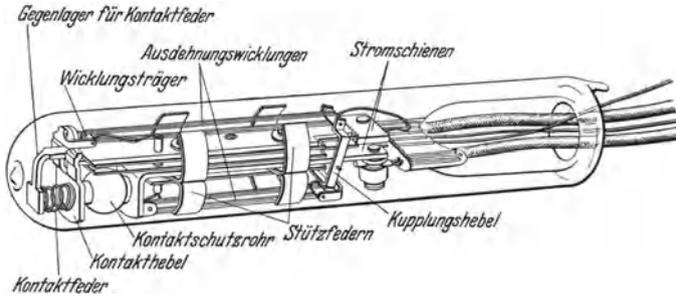


Abb. 171. Hitzdraht Vakuumschütz (Birka Regulator G. m. b. H., Berlin).  
Höchstleistung 1200 V, 17 Amp., 20 kW. — Die Kontakte werden durch Längendehnung der als „Ausdehnungswicklung“ bezeichneten stromdurchflossenen Leiter geschlossen.

einer bestimmten Zeit-Temperaturlinie bewegt werden (System Hartmann & Braun) oder es kann eine dem gewünschten Temperaturverlauf angepaßte elektromotorische Kraft in Serie mit der thermoelektrischen Kraft zur Programmregelung verwendet werden (System Siemens & Halske).

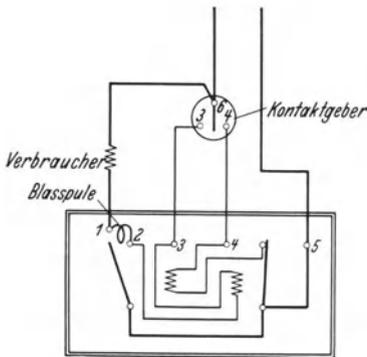


Abb. 172. Relais (Voigt & Haefner, Frankfurt a. M.).

Schließt sich der eine Kontakt des Kontaktgebers, so spricht die zugehörige Spule an und schaltet den „Verbraucher“ (z. B. das Ofenschütz) ein. Gleichzeitig fällt durch eine zwischen den beiden Spulen vorgesehene Verriegelung der Anker der zweiten Spule ab, so daß der vorher über den Anker dieser Spule geschlossene Stromkreis unterbrochen wird. Durch eine Verklüftung hält sich der Anker der jeweils eingeschalteten Spule so lange in der Einschaltstellung, bis der Kontaktgeber das Kommando für die entgegengesetzte Bewegung gibt.

seiner von den sonstigen Konstruktionen abweichenden Bauart besonders bemerkenswerter Quecksilberschalter ist in Abb. 170 gezeigt. Es ist, wie aus der Abbildung hervorgeht, nicht ein Kipp-schalter, sondern ein Verdrängungsschalter. Die Abb. 171 zeigt

#### b) Schaltorgane.

Die Schaltorgane besorgen die Ausführung der von den Fühlorganen gegebenen, über die Übertragungsorgane weitergeleiteten Schaltbefehle. Je nach Leistung des Ofens und der Schaltleistung der Reglerkontakte wird eine verschiedene Zahl von Zwischenorganen zwischen dem ersten Übertragungsorgan und dem letzten Schaltorgan Verwendung finden. Wir sagten schon früher, daß aus Zweckmäßigkeitsgründen die Besprechung aller dieser Zwischenrelais hier zusammengefaßt werden soll. Es werden fast alle Arten von Relais angewendet, sehr häufig die sogenannten Quecksilberrelais (Abb. 169). Ein wegen seiner großen Zuverlässigkeit und

einen für verhältnismäßig hohe Schaltleistungen geeigneten Schalter ohne Quecksilberkontakte: einen Hitzdraht-Vakuumschalter. Für die Fallbügelregler, aber auch sonst im Rahmen von Ofenschaltungen, haben Relais wie etwa das in der Abb. 172 gezeigte Bedeutung. Es hat „definierte Schaltstellungen“. Eine einmal erreichte Schaltstellung kann nur unter dem Einfluß eines entgegengesetzten Schaltbefehls verlassen werden.

## 2. Schaltanlagen.

Unter den nicht zur Temperaturregelung gehörigen Schaltelementen finden sich außer den Relais, die schon bei den Temperaturreglern besprochen worden sind, keine, die von den sonst in der Elektrotechnik verwendeten abweichen. Auf eine Besprechung derselben kann daher hier verzichtet werden. Die Schaltanlage mit allen Zubehörteilen wird manchmal an den Ofen selbst angebaut, wie es z. B. die Abb. 173 zeigt.

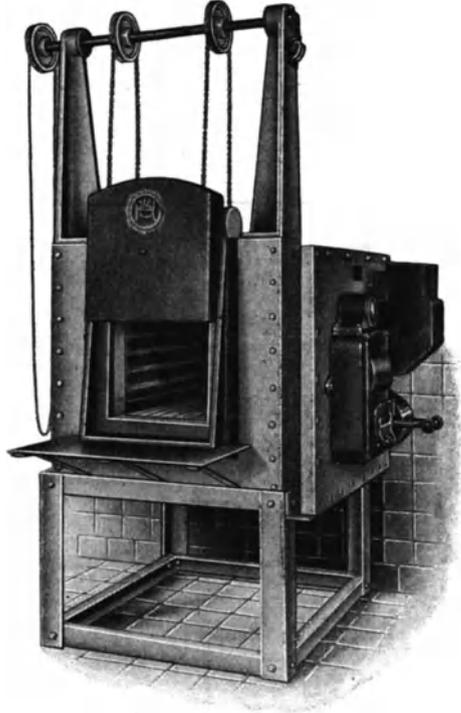


Abb. 173. Muffelofen (W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau a. M.).

Oder man hat ein gesondertes Schaltgerüst, das an die Wand angehängt wird. Für größere Anlagen werden statt dessen Schaltschränke und für ganz große Anlagen Schalttafeln vorgesehen. Tamele (ZV 65) zeigt eine große Zahl von Ausführungsformen von Öfen, die mit den verschiedensten Arten von Schalteinrichtungen versehen sind.

## II. Ganze Öfen.

Im nachfolgenden werden verschiedene Ofenformen besprochen, wobei mit Rücksicht auf die große Mannigfaltigkeit der Ofenarten eine Vollständigkeit nicht erstrebt werden konnte. Auch werden Öfen derselben Bauart vielfach für verschiedene Zwecke verwendet. Um Wiederholungen zu vermeiden, sind daher die Öfen nach baulichen Gesichtspunkten gegliedert.

## A. Niedertemperaturöfen.

Niedertemperaturöfen finden einmal für Trockenzwecke, dann auch für die Wärmebehandlung von Metallen Verwendung. Weiter haben sie Bedeutung als Anwärmöfen für die verschiedensten Zwecke, z. B. bei der Herstellung von Preßstoffen aus Kunstharzen u. dgl. Vom baulichen Gesichtspunkt aus sind zwei große Gruppen zu unterscheiden: die einfacheren Öfen ohne Lufterneuerung, die für alle Zwecke der Anwärmung — auch bei der Wärmebehandlung von Eisen- und Nicht-eisenmetallen — gebraucht werden, und die Öfen mit Lufterneuerung, die für Trockenzwecke dienen.

### 1. Anlaß- und Anwärmöfen.

a) Öfen mit absatzweiser Beschickung.

a) **Öfen ohne Luftbewegung.** In der einfachsten Form dienen diese Öfen z. B. zum Anwärmen der Bestandteile von Hartpapiermassen.



Abb. 174. Anwärmofen mit Wärmeübertragung durch Leitung.

In dem (außen in üblicher Weise isolierten) Nutzraum sind eine Reihe horizontaler Lagen von Heizkörpern angeordnet. Über jede Heizkörperlage kann eine Schale, die das körnige Gut aufnimmt, eingeschoben werden; die Wärmeübertragung auf das auf Platten befindliche Gut erfolgt durch Wärmeleitung (Abb. 174). Die Wärmeübertragung von den Heizkörpern auf die Platten erfolgt durch Strahlung und kann unter Umständen verbessert werden, indem die Heizkörper direkt an den Platten angepreßt werden. Der gleichmäßigen Verteilung der

Temperatur wegen wird man nur mit sehr geringen Schichthöhen arbeiten, und zwecks Vermeidung intensiver Bestrahlung einer Lage durch den darüber liegenden Heizkörper wird man unter diesen einen Strahlungsschirm einbauen. Möglicherweise wird man die Heizkörperunterlagen nach unten zu isolieren (*a* in Abb. 174).

Man hat diese Bauart auch auf die Wärmebehandlung von größerem Gut angewendet, und zwar in Anlehnung an die traditionellen Gepflogenheiten des Brennstoffofenbaues. Eine typische Bauart zeigt der Formenanwärmofen Abb. 175. Auch hier erfolgt die Wärmeübertragung durch Strahlung und daher nicht gleichmäßig, soweit es sich um mittelgroße Stücke handelt, zwischen denen Zwischenräume bestehen; nur die Randstücke werden angestrahlt. Mit Vorteil wird diese Bauart daher

für großes Gut nur dann angewendet, wenn es auf große Gleichmäßigkeit in der Temperaturverteilung nicht ankommt, wie es z. B. beim Anwärmen von Formen in der Preßglasherstellung der Fall ist. Nur die Innenfläche der Formen und der dieser benachbarte Teil des Materials braucht die geforderte Mindesttemperatur zu erreichen, und es ist nebensächlich, ob und wie weit die Wärme auch in das Gutinnere vordringt.

**β) Öfen mit Luftbewegung.** Bei einigermaßen empfindlichem Gut verbessert man bei Anwärnöfen die Wärmeübertragung stets durch Luftbewegung, wenn nicht Sonderbedingungen vorliegen, wie etwa bei dem Wanderanlaßofen für Sägeblätter, den Abb. 182 darstellt.

Bei Anwärnöfen mit Luftbewegung ist zu unterscheiden zwischen solchen, bei denen die Luft nur im Innern des Ofens in Bewegung gesetzt wird (Abbildung 176), und solchen, bei denen die Luftherwärmung außerhalb des Ofens erfolgt (Abb. 177).

Die Vorteile der Luftumwälzung im elektrischen Ofen hat, soweit der Verfasser weiß, erstmals die Leeds-Northrup Co erkannt und in ihrem Homo-Anlaßofen verwirklicht. Die Abb. 176 zeigt einen Schnitt

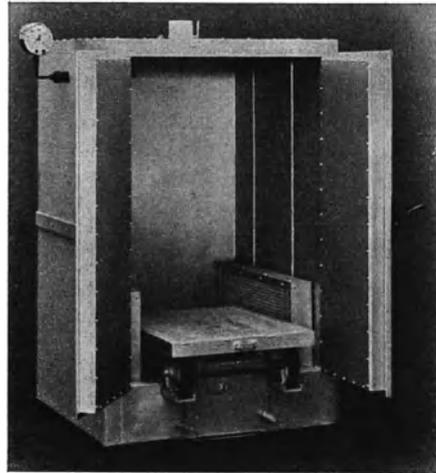


Abb. 175. Formenanwärnöfen (SSW, Berlin).  
Anlaßofen — keine Luftbewegung — nur für unempfindliches Gut.

durch einen solchen Ofen. Das am unteren Ende des Ofens befindliche Gebläse treibt die Luft an den Heizkörpern vorbei; sie wird durch die Unterseite des Deckels umgelenkt und strömt durch das in einem Korb befindliche Gut dem Lüfter wieder zu. Zwischen Heizelement und Korb befindet sich ein Strahlungsschutz, um die unmittelbare Wärmeabgabe der Heizkörper durch Strahlung an die außen liegenden Teile des Gutes zu verhindern. Ein gleichmäßiger Temperaturanstieg im Gut wird auch dadurch erzielt, daß die Strömungsrichtung der Luft in kurzen Zeitabständen gewechselt wird.

Ganz ähnliche Öfen stellt W. C. Heraeus her; es wird hier lediglich auf die Änderung der Luftrichtung verzichtet. Kurven, die an diesen Öfen aufgenommen sind, zeigt die Abb. 16, S. 26 im Abschnitt „Berechnung“.

Für große Öfen sind die Konstruktionen der Abb. 176 ungeeignet,

weil dann die Beherrschung der Luftbewegung schwierig und unsicher wird. Wendet man einen einzigen Ventilator an, so ist die Luftverteilung im Gut ungleichmäßig, wendet man mehrere Ventilatoren, die unmittelbar im Ofenraum liegen, an, so stören sich einmal die verschiedenen Luftbahnen und zweitens fördert der in der Mitte liegende Ventilator kältere Luft als die an den Seiten liegenden. Für große Öfen empfiehlt es sich daher, nach Abbildung 177 und 178 eine Umluftheizung vorzusehen, wodurch ein eindeutiger und starker Luftstrom erzeugt wird. Die Anwendbarkeit dieser Öfen findet ihre Grenze bei Öfen sehr großen Querschnitts und gleichzeitig hohen Ansprüchen an die gleichmäßige Durchwärmung des Gutes. Denn die Gleichmäßigkeit der Durchwärmung hängt von der Wärmeübergangszahl ab, die ausschlaggebend von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst wird. Diese wieder ist bei gegebenem Ventilator durch den Durchflußquerschnitt bedingt, und dieser endlich ist eine Funktion der Menge und Verteilung des Gutes. Um bei sehr großen Öfen und ungleichmäßigem Anfall des Gutes trotzdem eine gute Durchwärmung zu erzielen, hilft man sich manchmal durch unterteilte Luftbewegung, indem man Luftzu- und -abfluß an mehreren Stellen zugleich erfolgen läßt. Dies ist, wenn der Querschnitt klein ist, auch bei großen Öfen noch nicht erforderlich, wie aus der Betrachtung des sehr langen, aber schmalen Rohranlaßofens mit Luftumwälzung hervorgeht (Abb. 179). Der Nutzraum besteht aus einer rohrförmigen Retorte (*A*) von 7 m Länge und 400 mm Durchmesser. Die Retorte wird an der einen Stirnseite (*M*) beschickt und schließt an der anderen Stirnseite mit einer großen Schleife (*E*)

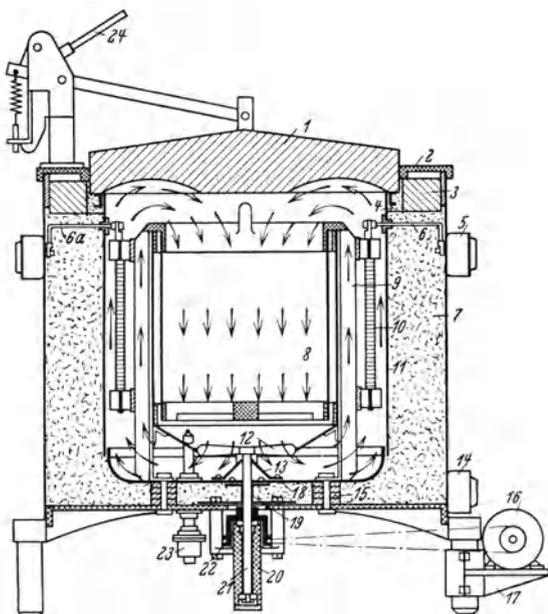


Abb. 176. Schnitt durch einen Homoanlaßofen (Leeds Northrup Co., Philadelphia).

1 Deckel, 2 gußeiserner Deckring, 3 Ringstein, 4 Sanddichtung, 5 Anschlußdose, 6, 6a Stromzuführung, 7 Wärmeschutz, 8 Korb zur Aufnahme des Gutes, 9 Korbversteifung, 10 Heizelemente, 11 innerer Ofenmantel (Blech), 12 Ventilator, 13 Luftleitblech, 14 Anschlüsse für den Ventilatormotor, 15 Tragstücke für Ofenboden, 16 Ventilatormotor, 17 Motorkonsole, 18 innerer Ofenboden, 19 Durchführung der Welle, 20 Lagerung der Welle, 21 Ventilatorwelle, 22 Stopfbüchse, 23 Thermoelement, 24 Hebelanordnung für Deckel (Deckellüfter).

Die Anwendbarkeit dieser Öfen findet ihre Grenze bei Öfen sehr großen Querschnitts und gleichzeitig hohen Ansprüchen an die gleichmäßige Durchwärmung des Gutes. Denn die Gleichmäßigkeit der Durchwärmung hängt von der Wärmeübergangszahl ab, die ausschlaggebend von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst wird. Diese wieder ist bei gegebenem Ventilator durch den Durchflußquerschnitt bedingt, und dieser endlich ist eine Funktion der Menge und Verteilung des Gutes. Um bei sehr großen Öfen und ungleichmäßigem Anfall des Gutes

trotdem eine gute Durchwärmung zu erzielen, hilft man sich manchmal durch unterteilte Luftbewegung, indem man Luftzu- und -abfluß an mehreren Stellen zugleich erfolgen läßt. Dies ist, wenn der Querschnitt klein ist, auch bei großen Öfen noch nicht erforderlich, wie aus der Betrachtung des sehr langen, aber schmalen Rohranlaßofens mit Luftumwälzung hervorgeht (Abb. 179). Der Nutzraum besteht aus einer rohrförmigen Retorte (*A*) von 7 m Länge und 400 mm Durchmesser. Die Retorte wird an der einen Stirnseite (*M*) beschickt und schließt an der anderen Stirnseite mit einer großen Schleife (*E*)

an einen Ventilatorraum an. Oberhalb des Rohres befindet sich ein Luftkanal ( $D$ ), in den Heizkörper ( $L$ ) eingebaut sind. Der Ventilator ( $G$ ), über  $I$  angetrieben durch den Motor ( $H$ ), wird in Zeitabständen von etwa 5 min umgesteuert, so daß die heiße Luft abwechselnd die beiden Enden  $E$  und  $F$  des Rohres erreicht. Die Beschickung erfolgt mit Hilfe einer Spezialmaschine. Durch die Bewegung der Luft wird ein guter Wärmeübergang erzielt, der sich in hohem Durchsatz und einem geringen Verbrauch auswirkt.

Auch die Verwendung von Herdwagen ist naheliegend, da mit Rücksicht auf die niedrige Temperatur eine Ausmauerung oder Isolierung nicht nötig ist, der Herdwagen vielmehr in den Ofen fahren kann (siehe Trockenöfen Abb. 175).

### b) Fließöfen.

Öfen mit Ketten, die ebenso lange im Ofen bleiben wie das Gut, sind ebenfalls schon für diesen Temperaturbereich gebaut worden (Abb. 180). An diesem Ofen wird der Vorteil einer Hängekettenanordnung sehr deutlich: die Kette besorgt nicht nur die Förderung des Gutes durch den Ofen, sondern auch den Transport zu anderen Arbeitsstellen des Betriebes. Der gezeigte Ofen hat einen Anschlußwert von 90 kW (Kettenlauf siehe Abb. 181) und einen nutzbaren Ofenquerschnitt von 305 mm  $\times$  710 mm. Die höchste Temperatur ist 235° (Schmidt ZV 66). Bei dem Ofen, Abb. 182, verläßt die als Tischkette ausgebildete Kette den Ofenraum nicht. Man sieht einen Abzug, der dazu dient, die durch Verbrennung der Ölreste bei der Anlaßtemperatur von 300° entstehenden Dämpfe aus dem Ofenraum zu entfernen. Der Ofen dient zum Anlassen von Mähmaschinenmessern, die nur einzeln auf die Kette gelangen und sich daher gleichmäßig erwärmen, ohne daß Luftbewegung notwendig ist. Der Ofen verbraucht bei einem Durchsatz von 130 kg/h, die von 90° auf 300° zu erwärmen sind, 140 kWh/t (ZV 67).

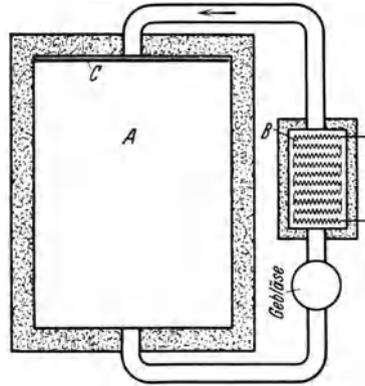


Abb. 177. Prinzipbild. Anlaßofen mit Umluftheizung.

In der Ofenkammer  $A$  ist das Gut eingebracht (auf Hordenwinkeln, auf einem Wagen oder dgl.). Die Luft wird durch das Gebläse dem Luftheizer  $B$  zugeführt und von dort nach  $A$  weitergedrückt, von wo sie dem Gebläse wieder zuströmt. Die Verteilscheibe  $C$  (Lochblech) sorgt für gleichmäßige Luftverteilung. Unter Umständen ist am unteren Ende des Ofens noch eine Lochplatte vorgesehen.

## 2. Trockenöfen.

Bei jedem Trockenvorgang ist eine Erneuerung der Trockenluft notwendig: beim echten Trocknen (das als Verdunstungs- oder

Verdampfungsvorgang aufzufassen ist) zum Abführen der Feuchtigkeits- (meist Wasser-) Dämpfe, wenigstens am Ende der Trockenperiode; bei

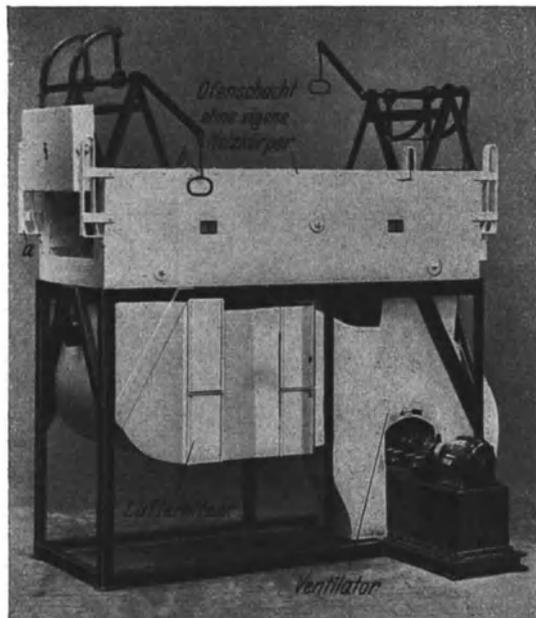


Abb. 178. Anlaßofen mit Umluftheizung (SSW, Berlin).  
Beachte die Abschrägung *a* in der Türführung, die eine gute Dichtung gewährleistet. — Türen ohne Gegengewicht können durch Einhängen der Griffe in die Rasten *b* offen gehalten werden.

unechten Trockenvorgängen (z. B. Lacktrocknen) ist Luft zur Oxydation des Lackes nötig.

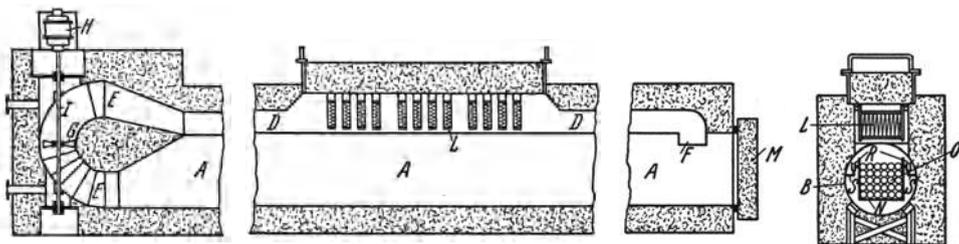


Abb. 179. Rohranlaßofen für Messing- und Kupferrohre (Junker G. m. b. H., Lammersdorf).  
Das Gut (*O*) liegt in einem Korb (*N*), der durch Rollen (*R*) auf die an der Innenwand der Retorte befestigten Schienen (*S*) aufläuft.

Dieser Luftwechsel kennzeichnet die Trockenöfen im Gegensatz zu anderen Niedertemperaturöfen.

Die absoluten Beträge an Frischluft, die für eine Trocknung nötig sind, sind meist nicht groß; praktisch muß aber mit großem Luftüber-

schuß gearbeitet werden, weil große Luftgeschwindigkeiten notwendig sind. Andernfalls besteht die Gefahr, daß sich um die einzelnen Stücke des Gutes ein „Film“ von stehender Luft bildet, der nicht erneuert

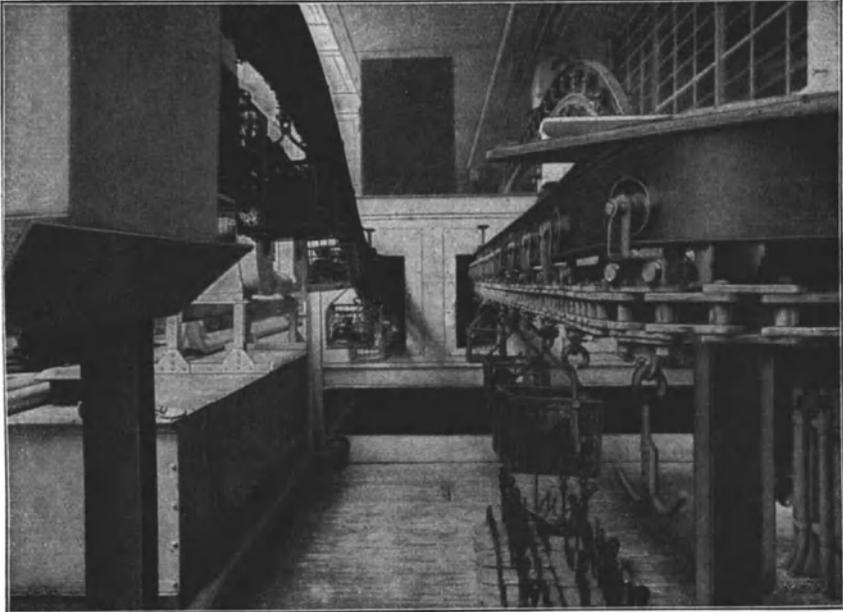


Abb. 180. Wanderanlaßofen (AEG, Berlin).

wird, so daß an den Verbrauchsstellen ein Unterschub von Frischluft entsteht. Starker Luftwechsel hat aber wieder einen empfindlichen Wärmeverlust zur Folge. Um zwischen diesen beiden Schwierigkeiten durchzukommen, hat man grundsätzlich zwei Wege beschritten: das Trocknen mit Umluftheizung, das Trocknen im Gegenstrom.

Bei einfachen Trockenschränken, namentlich kleineren Ausmaßes, muß man allerdings, um die Anschaffungskosten niedrig zu halten, auf diese beiden Mittel der Wärmeersparnis verzichten.

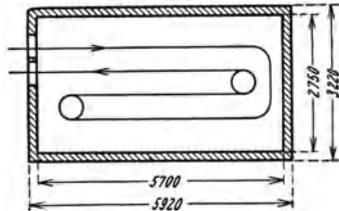


Abb. 181. Kettenlaufschema zum Ofen Abb. 180 (AEG, Berlin).

#### a) Öfen mit absatzweiser Beschickung.

Die Abb. 183 zeigt einen Kammertrockenofen der üblichen Bauart. Im Bodenblech sind Öffnungen vorgesehen, durch die Frischluft zugeführt werden kann; durch Klappen im Bodenblech (Handgriff I und II)

und an der Decke (Handgriff *III*) kann diese je nach der Größe des Frischluftbedarfs geregelt werden. Die Heizkörper (meist Rahmenelemente) sind hier auf dem Boden, in vielen

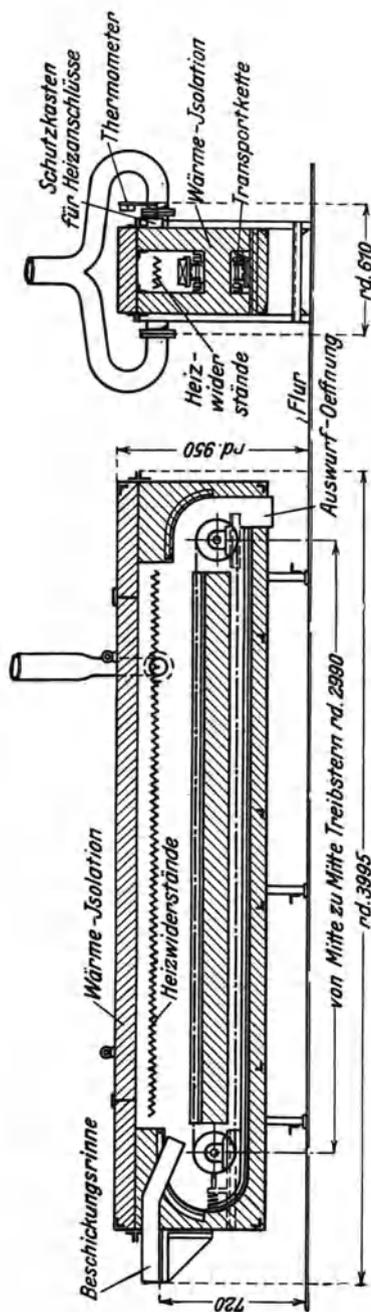


Abb. 182. Wanderanlaßofen für Sägeblätter (AEG, Berlin).



Abb. 183. Trockenschrank (Göhring & Hebenstreit, Dresden).

Fällen auch an den Seiten untergebracht. Im Bodenblech sind Luftlöcher vorhanden, die unter Umständen, z. B. bei feuergefährlichen

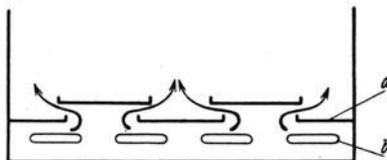


Abb. 184. Schutz der Heizkörper gegen herabtropfenden Lack.

Deckbleche *a* bieten Schutz gegen abtropfenden Lack und lassen dennoch Luft durch. Heizkörper *b*.

Lacken, noch gesichert sein müssen, um ein Herabtropfen brennbarer Flüssigkeiten in den Heizkörperraum zu verhindern (Abb. 184). Bei der Belastung der Heizkörper muß man bei

Öfen für brennbare Stoffe besonders vorsichtig sein und wird u. U. sogar gekapselte Elemente verwenden. (S. S. 180.)

Ein wichtiges Sondergebiet der Trocknung ist das der Vakuumtrocknung (Abb. 185), das z. B. in Verbindung mit Imprägnierung angewendet wird, häufig vor allem in der elektrotechnischen Industrie. Die Abbildung zeigt eine vollständige Anlage, bestehend aus zwei Aggregaten mit je zwei Kesseln. Einer von ihnen dient der Vakuumtrocknung und würde in ähnlicher Ausführung auch für Trocken Zwecke ohne nachträgliche Imprägnierung verwendet werden können. Im zweiten Kessel

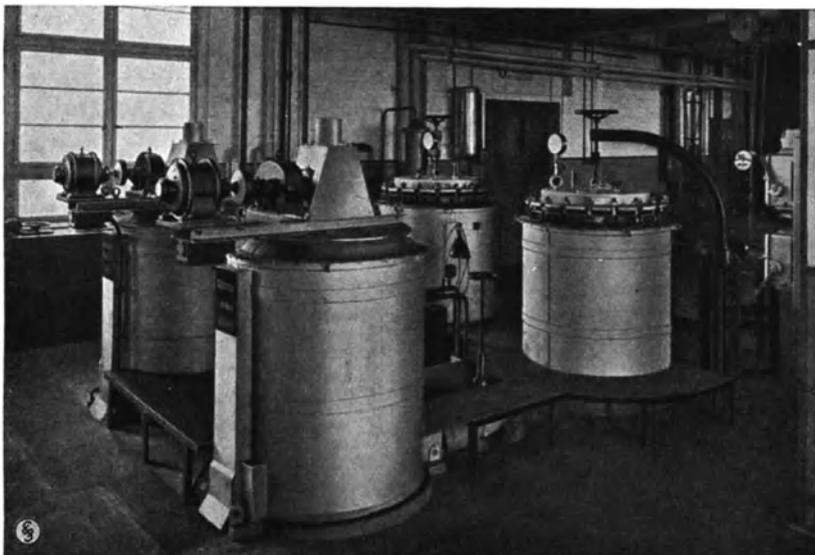


Abb. 185. Vakuumtrocken- und Imprägnieranlage (SSW, Berlin).

wird die Imprägniermasse erwärmt. Bezüglich der Arbeitsweise der ganzen Anlage sei auf die Arbeit von Berwig und Tamele (ZV 68) hingewiesen.

Ein Beispiel eines Trockenofens mit Umluftheizung ist in Abb. 186 gezeigt. Bei echten Trockenvorgängen kann der Frischluftanteil durch Messung der Luftfeuchtigkeit selbsttätig geregelt werden; bei unechten Trockenvorgängen ist bei sehr empfindlichem Gut und bei bestimmten Lackarten eine Verschmutzung des Gutes und eine Anreicherung der Trockenluft mit brennbaren Dämpfen zu befürchten. Wenn man in diesen Fällen statt des reinen Umluftverfahrens die Abluft des Ofens durch eine Verbrennungskammer führt, in der die Lackdämpfe durch glühende elektrische Widerstände entzündet werden, kann man die Feuersgefahr wesentlich vermindern<sup>1</sup>. Dadurch wird der Heizwert der

<sup>1</sup> AEG: D.R.P. 501174.

Lackdämpfe sogar noch ausgenützt. Je nach Ansprüchen an Sauberkeit kann man entweder die Luft aus dieser Verbrennungskammer dem Ofen wieder zuführen oder die Wärme, die der Luft sowohl aus dem Trockenraum als aus der Verbrennungskammer mitgeteilt ist, wird in einem Wärmeaustauscher an frische Luft übertragen.

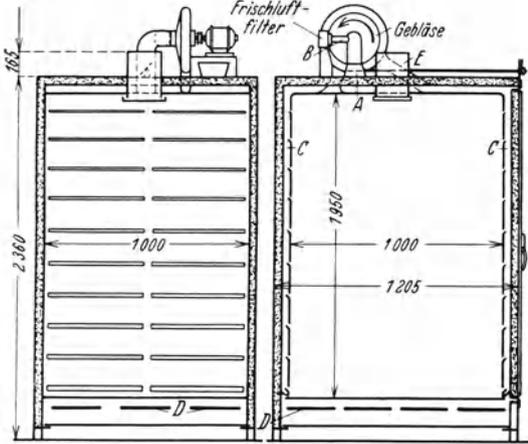


Abb. 186. Kammertrockenofen mit Umluftheizung (Göhring & Hebenstreit, Dresden).

Durch das Gebläse wird Luft aus dem Trockenraum (Stützen *A*) und Frischluft (Stützen *B*) angesaugt und durch die Kanäle *C* in die Heizwiderstände *D* gedrückt, von wo sie in den Trockenraum gelangt. Ein Teil der Luft beschreift nun immer wieder den gleichen Weg, während ein Teil durch den Stützen *E* ins Freie ausgeblasen wird.

Bei echten Trockenvorgängen kann der Frischluftanteil durch Messung der Luftfeuchtigkeit selbsttätig geregelt werden. Bei sehr großem Feuchtigkeitsgehalt ist der Anteil der Verdampfungswärme an dem gesamten Wärmebedarf so groß, daß auch noch der Dampfgehalt des geringen Anteils an Abluft die Wärmewirtschaft

erheblich verschlechtert. Man wird dann unter Umständen einen Wärmeaustauscher vorsehen (Kondensationsapparat), in dem die Abluft durch die im Gegenstrom fließende Frischluft unter den Tau-

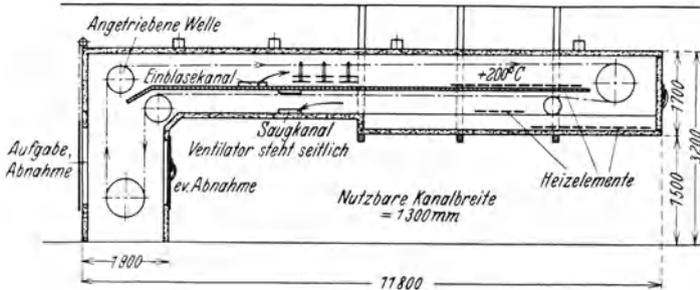


Abb. 187. Wandertrockenofen (Göhring & Hebenstreit, Dresden).

Der Ventilator saugt etwa 20% Frischluft und 80% Umluft an. Die ausgehende Ware und Luft geben durch die Zwischenwand Wärme an die darüberfließende kalte Ware und Luft ab.

punkt gekühlt wird und so einen erheblichen Teil der Verdampfungswärme abgibt.

### b) Fließöfen.

Die Abb. 187 zeigt einen Wandertrockenofen mit Umluftheizung, der zur Trocknung von Zählergehäusen dient. Bei einem Anschlußwert



von 78 kW liegt der Verbrauch für 1000 Stück zwischen 44 und 55 kWh. Das Gewicht der Stücke schwankt zwischen 240 und 2800 g; die Tagesleistung beträgt 8000 bis 10000 Stück, die Trockentemperatur etwa 200°. Der eigentliche Trockenkanal ist hochgelegt, so daß an Werkstattraum gespart wird. An den langen horizontalen Schenkel schließt sich nur ein kurzer vertikaler Schenkel an, der lediglich dazu dient, Aufgabe und Abnahme des Gutes vom Werkstattflur aus auszuführen.

Die Abb. 188 bringt eine andere Ausführung eines Wanderofens für ähnliche Zwecke. Sie zeigt einen Ofen mit Wärmerückgewinnung nach dem Gegenstromprinzip; die Kette ist als Tischkette ausgebildet und nimmt entweder unmittelbar oder unter Zwischenschaltung von Gestellen das Gut — lackierte Telephonegehäuse usw. — auf. Die Heiz-

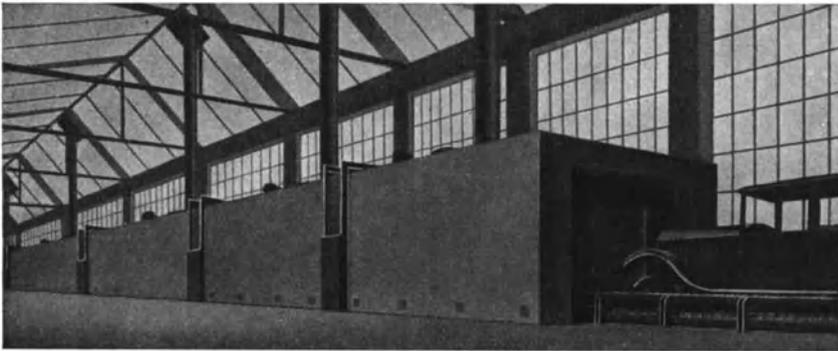


Abb. 190. Lacktrockenofen für Karosserien (SSW, Berlin).

körper befinden sich nur in der Mitte des Ofens, die Luft wird im Gegenstrom zur Ware durch den Ofen gesaugt. Der Verbrauch des Ofens beträgt bei einer Trockendauer von 1 Stunde bei einem Durchsatz von 400 kg/h 28 kW. Die normale Arbeitstemperatur liegt bei etwa 200°.

Die Abb. 189 zeigt die Anwendung des gleichen Prinzips auf stehende Öfen (Paschkis ZV 52)<sup>1</sup>. Der Ofen dient zur Trocknung von Kernen in Gießereien. Die Kerne werden auf Horden geladen, die mit Hilfe der Ofenkette im Gegenstrom zur Ware durch den Ofen gezogen werden. Der Anschlußwert des Ofens beträgt 90 kW; der Ofen verbraucht je nach Besetzung und Luftmenge zwischen etwa 0,06 und 0,10 kWh/kg reduziertes Gewicht (siehe S. 150).

Die Abb. 159 auf S. 211 zeigt einen halbkontinuierlichen Wanderofen für lackierte Fahrradrahmen, die an Katzen hängen und an Deckenlaufschienen in den Doppelofen geschoben werden. Nach Öff-

<sup>1</sup> Obgleich der hier gezeigte Ofen nicht der Weiterverarbeitung dient, wird er beschrieben, weil seine Bauart auch für viele andere Zwecke geeignet ist.

nung der während der Arbeit geschlossenen Türen können die Rahmen nach beendetem Trockenvorgang an der zur Einfahrt entgegengesetzten Seite wieder aus dem Ofen gefahren werden. Der Verbrauch beträgt etwa 200 kWh/t bei einem Durchsatz von 140 kg/h; der Anschlußwert beider Kammern zusammen 120 kW. Mit Rücksicht auf die Explosionsgefahr beim Lack muß mit hohem Luftüberschuß gearbeitet werden, woraus sich der große Wärmeverbrauch erklärt.

Die Abb. 190 zeigt die, soweit der Verfasser weiß, größte elektrische Trockenanlage der Welt: Es handelt sich um einen Ofen von 2650 mm Breite, 2000 mm Höhe, 91 500 mm Länge (Lichtmaße); Türquerschnitt 1830 × 1830 mm; die gespritzten Karosserien für Automobile können ungeteilt hindurchgehen. Der Anschlußwert beträgt 1000 kW. Der Durchsatz erreicht 25 Karosserien/Stunde mit einem Stückgewicht von im Mittel 500 kg/h, wobei der Anschlußwert zu etwa 70% ausgenützt ist.

## B. Bäder

(für niedrige, mittlere und hohe Temperaturen).

Nach der Bauart der Niedertemperaturöfen sind auch manche Bäder gebaut, die den verschiedensten Zwecken dienen können (Anlaß-

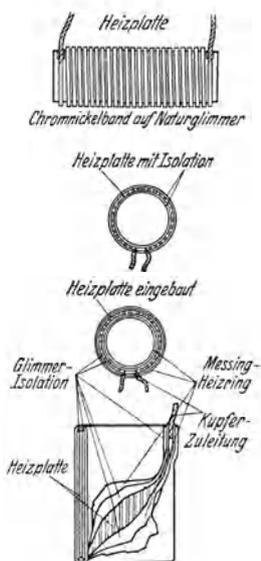


Abb. 191. Tauchsieder (Eltron, Berlin).

Der Widerstand ist ein Glimmerelement, wodurch der Anwendungsbereich dieser Tauchsieder auf etwa 350° beschränkt ist. Das Element wird gebogen und in einen Metallmantel eingesetzt.

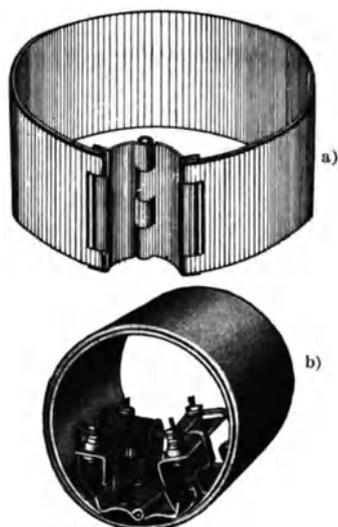


Abb. 192. Innenband-Heizkörper (Prometheus, Frankfurt a. M.).

Der ringförmige Mikanitheizkörper wird in das zu beheizende Rohr eingeführt; dann wird das Scharnier mit Hilfe eines Hebels durchgedrückt, wodurch man erreicht, daß der Heizkörper an die Innenwand des Rohres fest angepreßt wird. Die Abb. 192 b) zeigt einen Ausschnitt aus dem zu beheizenden Rohr mit eingebautem Innenbandheizkörper. Über dem Scharnier sind die Heizkörperanschlüsse zu sehen.

bäder, Härtebäder, Bäder zur Feuerverbleiung und — Verzinnung oder — Verzinkung usw., Bäder zum Schmelzen von Metallen für Gießzwecke

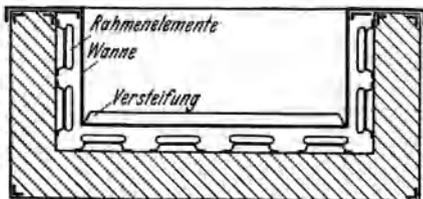


Abb. 193. Bad nach der Niedertemperaturbauart.

usw.). Im nachstehenden Abschnitt soll der Bau von Bädern im allgemeinen erörtert werden.

Die ideale Badbeheizung ist die durch Tauchsieder (Abb. 191), die entweder fertig bezogen werden oder man fügt einen Heizkörper in ein der Badflüssigkeit gegenüber chemisch beständiges

Rohr. Hierbei ist auf guten Wärmeübergang zwischen Heizkörper und Rohr zu achten, da bei schlechtem Wärmeübergang der Heizkörper



Abb. 194. Zinnschmelzkessel, in den Arbeitstisch eingebaut (SSW, Berlin).

zwecks Abgabe der ihm aufgedrückten Leistung höhere Temperaturen annehmen muß, was eine Gefährdung der Heizkörper und des Rohrs

durch Oxydation mit sich bringt. Die Abb. 192 zeigt eine Lösung der Firma Prometheus für diese Aufgabe.

Vielfach wird eine derartige Innenbeheizung ausgeschlossen sein, sei es, daß die Badflüssigkeit die Heizkörper oder ihr Schutzrohr gefährdet, sei es, daß wegen Einbauten, die aus betrieblichen Gründen notwendig sind, kein Platz für Tauchelemente vorhanden ist.

In diesen Fällen ist es günstig, die Behälterwand durch aufgeschraubte Heizelemente direkt zu erhitzen. Hierzu können Plattenelemente oder biegsame Elemente, die sich der Tiegelform anzupassen vermögen, Verwendung finden. Auch die Mikanitelemente können diesem Zweck dienen. (Siehe Widerstände S. 180.) Ein einfacher Aufbau ergibt sich auch vielfach dadurch, daß man an die Wand eines Niedertemperaturofens Rahmenwiderstände oder dgl. befestigt, die durch Strahlung und (meist natürliche) Konvektion ihre Wärme an die Tiegelfwand abgeben.

Die Abb. 193 zeigt ein derartiges Bad im Schnitt, die Abb. 194 den Aufbau des Bades mit dem oft erforderlichen Abzug für Dämpfe.

Bei höheren Temperaturen wird statt der Blechinnenwand die gewöhnliche Ausmauerung eines Mitteltemperaturofens verwendet, in den ein Tiegel oder eine Wand hereingehängt wird, wie aus der Abb. 195 zu sehen ist. Dient der Ofen zum Schmelzen, d. h. soll das flüssige Metall gewonnen werden, so kann man den Ofen kippbar gestalten (Abb. 196). Das Bild zeigt einen Ofen, bei dem die Kippachse durch die Tiegelschnauze geht, so daß der Ausgußpunkt während der ganzen Kippzeit an derselben Stelle bleibt. Man kann dadurch mit den Gießformen ganz nahe an den Ofen herantreten, wodurch die Oxydation des Gießstrahls stark beschränkt wird.

Viele Badflüssigkeiten sind gegenüber der Tiegelfwand und den Heiz-

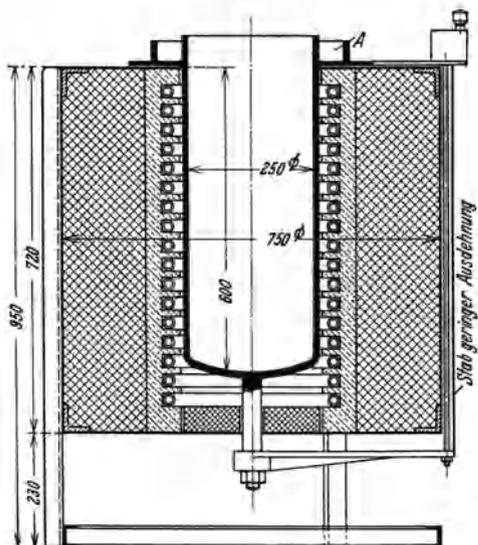


Abb. 195. Salzbadtiegelofen (W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau a. M.).

Der angeschweißte Ring *A* soll Salz, das mit dem Gut aus dem Bad entnommen wird, auffangen; Salz, das erst weiter außen abtropft, wird voraussichtlich erstarren und nicht in den Heizraum gelangen. Beachtenswert ist weiter die Temperaturregelung, die sonst in außen beheizten Tiegeln Schwierigkeiten macht, weil Tiegel und Badmasse durch ihre große Trägheit die Regeldifferenz erhöhen. Hier dient die Ausdehnung des Tiegels, die mit einem außerhalb des Ofens befindlichen Stab sehr geringer Ausdehnung verglichen wird, zur Regelung der Temperatur.

körpern mehr oder weniger aggressiv. Der Angriff ist in weitestem Maße von der Temperatur abhängig, und diese ist infolge des Temperaturgefälles an der Außenseite des Tiegels höher als an der Innenseite, also höher als die Gebrauchstemperatur. Da man bei vielen Tiegelmateriale und den verschiedensten Badflüssigkeiten bei den erforderlichen Temperaturen an der Gebrauchsgrenze ist, ist unbedingt ein Überfließen der Badflüssigkeit in den Heizraum zu vermeiden. Diese

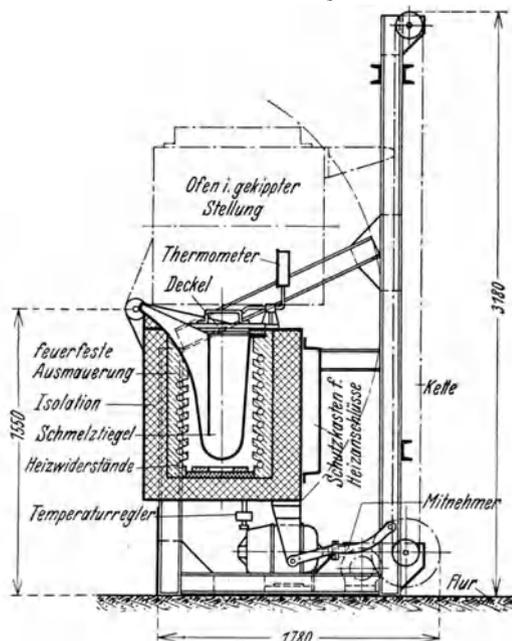


Abb. 196. Kippbarer Schmelzofen für Metalle (AEG, Berlin).

Beim Kippen treibt der Motor über das Vorgelege die Kette, die mit dem Mitnehmer den Tiegel wendet. Temperaturregelung im Heizraum und im Bad. — Um bei langem Stehen des Bades vor dem Vergießen ein Einfließen von Schlacké in die Formen zu verhüten, ist in den Tiegel eine Trennwand eingebaut, so daß das Metall der Schnauze stets vom Boden des Tiegels zuströmt. Tiegelinhalt 27 l; Anschlußwert 28 kW.

Aufgabe wird dadurch erschwert, daß viele Salze infolge Kapillarwirkung sich auch durch feinste Spalte durchzuziehen vermögen. Mit der Dichtung von Tiegel gegen Heizraum haben sich vor allem die amerikanischen Ofenbauer befaßt und eine Reihe von Konstruktionen gefunden, die z. T. nun auch in Deutschland bekannt geworden sind. Vielfach genügt ein einfaches Überkragen des Tiegelrandes zwecks Dichtung (Abbildung 197)<sup>1</sup>. Gegen manche Salze, vor allem Zyansalze, ist Flußeisen besonders beständig. Es kommt aber als Tiegelmateriale nicht in Frage, weil es an der Außenseite zundern würde. Man hat deswegen Tiegel gebaut, die aus Flußeisen bestehen und an der Außenseite mit

hitzebeständigem Material überzogen werden. In der letzten Zeit hat man, ebenfalls in Amerika, Salzbadtiegelöfen entwickelt, bei denen

<sup>1</sup> Deutsche Gold- und Silberscheideanstalt: D.R.G.M. 1023782; das Grundprinzip war in Amerika schon seit langem bekannt und wurde u. a. durch das USA.-Pat. 1657508 ausgebaut; wegen der verschiedenen Längendehnung von Tiegel und Stützrand ist dieser in mehrere Teile geteilt, die sich gegenseitig stützen. Ähnliche Konstruktionen geben die nachfolgenden Patente: D.R.P. 504000; USA.-Pat. 1707313; D.R.P. 491600; D.R.P. 480203 der Westinghouse Electric Co. und SSW; D.R.P. 497912; USA.-Pat. 1734629 der Hevi Duty El. Co.

Salz (es handelt sich meist um Zyansalze), das über den Tiegelrand oder durch Leckstellen des Tiegels in den Heizraum gelangt, durch einen oxydierenden Luftstrom unschädlich gemacht wird (James & Coley ZV 69).

Wenn ein Tiegel oder eine Wanne an einer Stelle leckt oder infolge von Kapillarwirkung Badflüssigkeit in den Heizraum gelangt, sind auch die Heizkörper gefährdet. Viele Tiegel, besonders Gußtiegel, sind an manchen Stellen porös (Lunker), ebenso geschweißte Tiegel an den Schweißnähten. Man hat außer durch die erwähnten Mittel auch versucht, durch Schutzgitter, die eine Art Oberflächenwirkung ausüben sollen, Heizkörper und

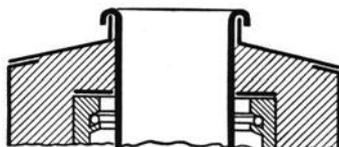


Abb. 197. Dichtungsrand eines Salzbadtiegels. (Durferrit G. m. b. H., Frankfurt a. M.)

Tiegel vor vorzeitiger Zerstörung zu schützen<sup>1</sup>. Daneben hat man Anzeigevorrichtungen gebaut, die durch darauffließende Badflüssigkeit kurzgeschlossen werden

den. Sie bestehen im wesentlichen aus zwei an der tiefsten Stelle des Heizraums eingebauten Elektroden, die bei Kurzschluß eine Alarmvorrichtung auslösen<sup>2</sup>.

Außenbeheizte Salzbäder werden für hohe Temperaturen (höher als 950°) u. U. auch durch Silitstäbe beheizt, wie aus Abb. 198 ersichtlich. Derartigen Ausführungen begegnet man nicht allzu häufig. An ihrer Stelle werden oft unmittelbar beheizte Bäder (siehe S. 278) verwendet.

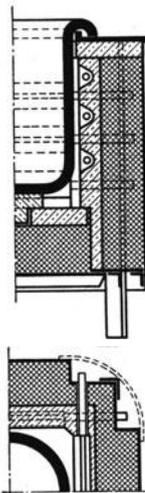


Abb. 198. Hochtemperatursalzbad (Uhlen-dorff, Berlin).

Die Silitstäbe aneinanderstoßender Seitenwände sind gegeneinander versetzt. Der Tiegel steht am Boden auf, wodurch er mechanisch entlastet ist. Der äußere Mantel ist an den Enden der Heizkörper ausgeschnitten, damit durch die Anschlüsse der Silitstäbe nicht zu viel Platz verloren geht. Die Platzersparnis wird durch etwas höhere Wärmeverluste erkauft.

## C. Mitteltemperaturöfen.

### 1. Öfen mit natürlicher Atmosphäre.

#### a) Öfen ohne besondere Beschickungs- und Transporteinrichtungen.

α) Gewöhnliche Öfen mit vertikaler Öffnungsebene. Abb. 199 zeigt einen im ganzen transportablen Ofen. Die Tür ruht im geschlossenen Zustand auf der Schaffplatte. Die Türbewegung wird durch die Kette bewerkstelligt, wobei das Türgewicht durch das Gegengewicht ausgeglichen wird. Die Bodenheizkörper sind durch eine Platte aus hitze-

<sup>1</sup> D.R.P. Anm. SSW S. 87366.

<sup>2</sup> AEG: D.R.G.M. 1043084.

beständigem Guß abgedeckt; selbst wenn die Platte sich werfen<sup>1</sup> sollte, so daß Zunder hinter die Platte fallen kann, gelangt dieser zunächst nicht an die Bodenheizkörper, sondern in den Raum *A*. Erst wenn dieser mit Zunder gefüllt ist und weiterer Zunder anfällt, ehe der Ofen gereinigt wird, können die Seitenheizkörper angegriffen werden.

Einen Blick in einen Kammerofen bringt auch die früher gezeigte Abb. 105. Bei Abb. 200 ist der Zunderschutz besonders sorgfältig aus-

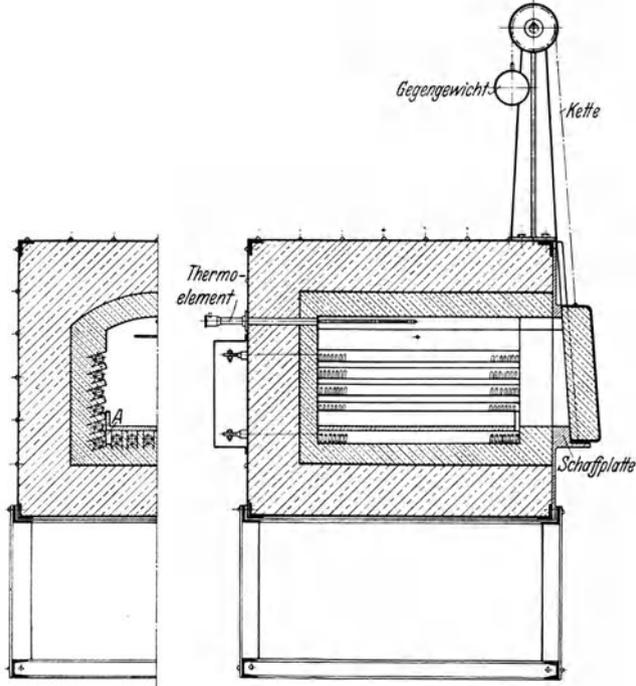


Abb. 199. Transportabler Kammerglühofen (W. C. Heraeus, G. m. b. H., Hanau a. M.).  
Dichtung der Türe durch eigenes Gewicht. (Schräglage!)

gebildet: die Herdplatte ist aufgekröpft (*A*), wodurch die Seitenheizkörper gegen Zunder gesichert sind. Außerdem greift die Herdplatte mit Rippen *B* in einen freigelassenen Raum. Durch diese Anordnung ist ein gewisser Mindestabstand des Gutes von den Heizwiderständen gewährleistet; selbst wenn, wie es bei Einsatzbetrieb mit eisernen Einsatzkästen häufig vorkommt, Zunder abspringt, fällt dieser auf, nicht hinter die Platte; sollte aber dennoch Schmutz hinter die Platte gelangen, so kann er sich bei *B* sammeln und gefährdet wiederum nicht die Heizwiderstände. Man beachte auch das Überkragen der Platte *C*

<sup>1</sup> Dies ist bei Guß unwahrscheinlich; Herdplatten aus Walzmaterial neigen bei Beschickung mit kaltem Gut leicht zum Verwerfen und sollten daher möglichst vermieden werden.

am vorderen und rückwärtigen Ende des Ofens (rückwärtiges Ende auf der Abbildung ausgelassen), wodurch erreicht wird, daß auch dort kein Zunder unter die Herdplatte gelangen kann.

Die amerikanische Praxis hat die Frage des Zunderschutzes auf

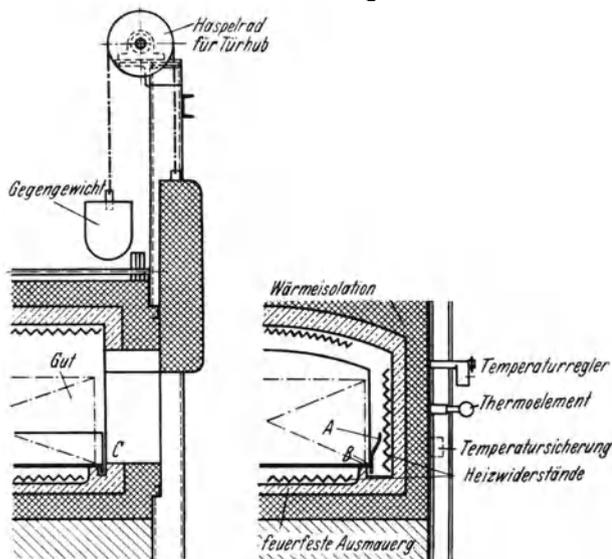


Abb. 200. Kammerglühofen (AEG, Berlin).

andere Weise gelöst<sup>1</sup>. Die Herdplatten sind hier nicht aus einem Stück gefertigt, sondern aus mehreren Stücken zusammengesetzt. Die Enden der einzelnen Platten sind in Zunderrinnen aus hitzebeständigem Metall gefaßt; in diese Rinnen fällt der Zunder und kann in regelmäßigen Zeitabständen entfernt werden (vgl. hierzu auch die Anordnung von Heraeus, die oben besprochen wurde; S. 178). Die Abb. 201 zeigt einen anderen Vorschlag zur Beseitigung des Zunders: in den Bodentragsteinen (1) sind Öffnungen (3) vorhanden, durch die Zunder in eine unter dem Herd liegende Rinne (5) fallen kann, von wo er leicht zu entfernen ist. (S. S. 178.)

β) Gewöhnliche Öfen mit horizontaler Öffnungsebene. Für manche Zwecke eignen sich Öfen, bei denen sich die Öffnung statt an einer Seitenwand an der Decke oder am Boden befindet; im ersten

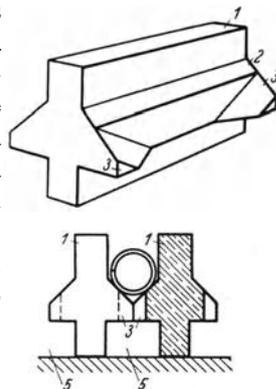


Abb. 201. Zunderschutzanordnung (SSW, Berlin).

<sup>1</sup> El. Furnace Co.: USA.-Pat. 1647726 und General Electric Co.: USA.-Pat. 1731166.

Fall spricht man allgemein von Tief- oder Muldenöfen, während sich für die anderen Öfen kein einheitlicher Name eingebürgert hat.

Die Abb. 202 zeigt den Schnitt

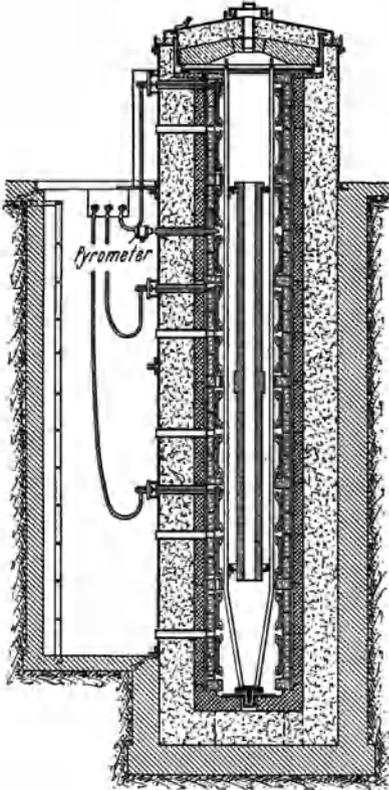


Abb. 202. Tiefofen (Industrie-Elektroofen G. m. b. H., Köln).

Ofentiefe 4000 mm; nutzbarer Durchmesser 375 mm. Anschlußwert 80 kW. Der Ofen dient zum Anwärmen von Rohren, zwecks Härtung, die an einer eigenen Vorrichtung unterhalb des Deckels aufgehängt werden. Sie werden mit Hilfe eines Krans mitsamt der Vorrichtung ausgewechselt. Beachte die Abdichtung des Deckels gegen den Ofen und des Schau Lochs gegen den Deckel mit Hilfe von Sandtassen. Einseitig ist ein Einsteigschacht mit Leiter (links in der Zeichnung) vorgesehen.

durch einen Tiefofen (Schachtofen). Das Gewicht einer normalen Charge (Geschützrohre) beträgt etwa 480 bis 500 kg; wenn der Ofen vorgewärmt ist, benötigt man zum Durchwärmen

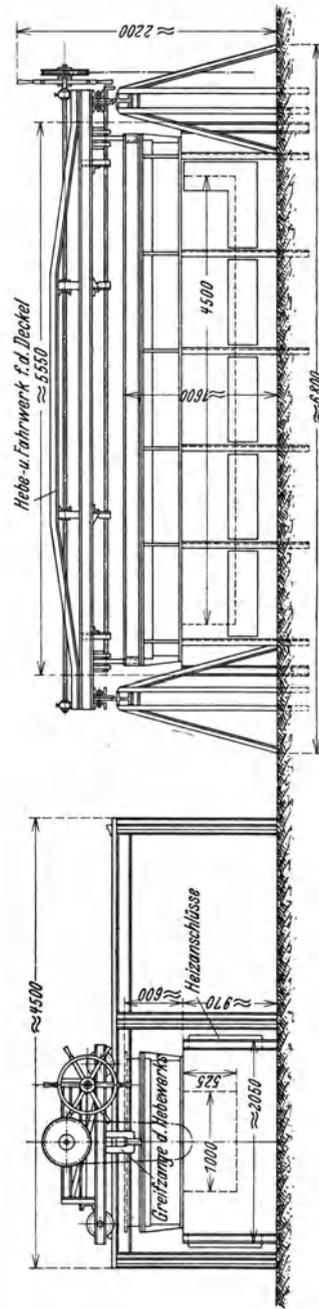


Abb. 203. Deckelfahrwerk für einen großen Muldenofen. (SSW, Berlin.)

der Charge 3 Stunden bei einem Stromverbrauch von etwa 470 kWh/t\*.

Der Deckel wird bei diesem Ofen mit Hilfe eines Krans abgehoben und beiseite gesetzt. Die Gefahr für die Haltbarkeit des Deckels steigt bei einer derartigen Konstruktion mit der Ofengröße schnell an, und deshalb hat man größere Deckel fahrbar gemacht. Sie werden mit einem Windwerk in einem Deckelwagen hochgehoben und dann in diesem Zustand mit dem Deckelwagen verfahren (Abb. 203). Nach diesem Prinzip gelingt es auch, Deckel für große Rundöfen mit einem Durchmesser von über 3 m zu verfahren.

Muldenöfen und Tieföfen können unmittelbar im Erdreich gelagert werden und haben dann sehr niedrige Wärmeverluste, weil das umliegende Erdreich an der Isolation teilnimmt. Andererseits ist die Speicherwärme dieser Öfen sehr groß, wodurch die Auskühlung des voll durchwärmten Ofens oft viele Tage dauert. Die Beschickung der Öfen gestaltet sich bei robustem Gut einfach; es kann z. B. mit Hilfe von Ketten eingebracht werden; sollen allerdings mehrere Stücke nebeneinander auf dem Ofenboden angeordnet werden, wie das z. T. gefordert wird, so ist eine geordnete Verteilung des Gutes kaum möglich, da man sich nicht über den offenen heißen Ofen beugen kann. Die Entleerung ist bisweilen unbequem, da bei den hohen Temperaturen das Gut oft nicht ausreichende Festigkeit hat und der Gefahr der Deformation unterworfen ist. Glühunterlagen, die man z. B. unter zu glühende Rohre oder Stangen schiebt, müssen, damit sie ihre Festigkeit bewahren, schwer ausgeführt werden und vermehren so das tote Gewicht.

Bei Muldenöfen sowohl wie bei Öfen mit hebbarer Haube ist die Dichtung der horizontalen Öffnungsfläche leichter einwandfrei zu gestalten als bei der vertikalen Öffnung von Türen gewöhnlicher Kammeröfen; dadurch werden die Leerverluste herabgedrückt. Abb. 204 zeigt die Prinzipskizze eines Ofens mit hebbarer Haube. Das Gut wird auf einen beheizten Sockel gestapelt, wobei die Schichtung planmäßig und sorgfältig erfolgen kann. Dann wird eine ebenfalls beheizte Haube über das Gut gestülpt und die Erwärmung kann beginnen. Während der Erwärmung wird auf einem anderen Sockel die nächste Charge vorbereitet, so daß die Heizhauben, die den größten Teil der Wärmemenge ge-

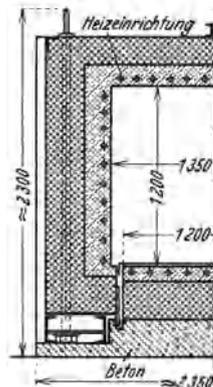


Abb. 204. Haubenofen (SSW, Berlin.)

Die Widerstände nebst Schamotte (zusammen als Heizeinrichtung bezeichnet) sowie der Wärmeschutz sind in einem festen Metallgehäuse angeordnet. Durchgehende Tragstangen verbinden die auf der Ofendecke befindlichen Tragösen mit dem unten befindlichen Stützgerüst aus Profileisen.

\* Lt. freundlicher Auskunft der Bismarckhütte.

speichert haben, praktisch nicht auskühlen. Nur die in den Sockeln enthaltene Wärme geht mit der des Gutes verloren. Um bei der Haube entsprechende Lebensdauer zu erzielen, müssen die Öfen sorgfältig behandelt werden. Sie sind aber in der Beschaffung billiger als Öfen mit senkbarem Boden (diese arbeiten nach dem umgekehrten Prinzip wie Öfen mit hebbarer Haube) und werden im Abschnitt „Öfen mit Beschickungseinrichtungen“ (S. 253) besprochen werden.

Bei kleineren Öfen wird die Haube oft nur an Ort heb- und senkbar ausgeführt. Nach Anheben der Haube kann das Gut von dem darunter befindlichen Sockel entfernt werden. Die Haube ist geringeren Beanspruchungen ausgesetzt als bei der in der Abbildung gezeigten Ausführung.

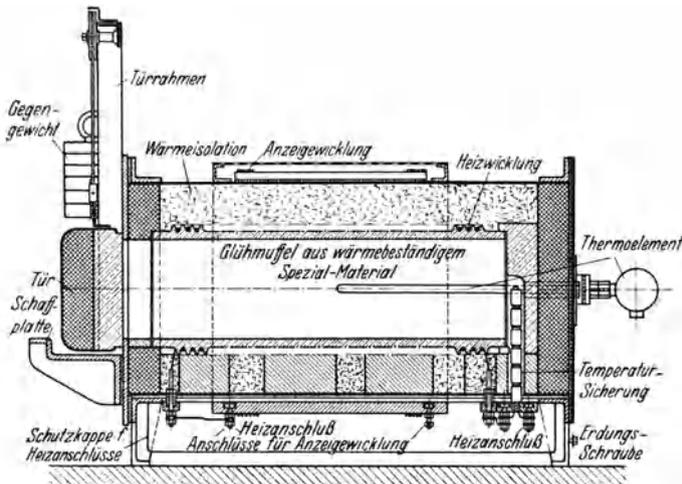


Abb. 205. Schnitt durch einen Wild-Barfield Ofen (AEG, Berlin).

**γ) Sonderöfen. Härteöfen mit selbsttätiger Haltepunktanzeige.** Es ist bekannt, daß man, um Stahl zu härten, diesen bis zum Umwandlungspunkt erwärmen und dann abschrecken muß. Die Bestimmung der richtigen Temperatur für die Abschreckung erfolgt meist so, daß der betreffende Ofen möglichst nahe der gewünschten Härtetemperatur gehalten wird und das Gut in dem Ofen so lange erhitzt wird, bis es — meist nur nach Schätzung des Bedienungsmannes — die Ofentemperatur erreicht hat. Mit Rücksicht auf die unvermeidliche Abkühlung des Gutes zwischen der Zeit der Entnahme des Gutes aus dem Ofen und dem Abschrecken muß das Gut stets auf eine Temperatur, die um einige Grade höher liegt als die des Umwandlungspunktes, erwärmt werden. Der Beobachter kann hierbei natürlich nur die Oberflächentemperatur ungefähr schätzen. Diese Unsicherheit hat man bei elektrischen Öfen durch verschiedene Konstruktionen zu vermindern gesucht. Dabei ging man

von der Tatsache aus, daß die metallurgische Umwandlung meist von thermischen und magnetischen Erscheinungen begleitet ist, die beide für die Anzeige des Umwandlungspunktes ausgenützt wurden.

Wild-Barfield Ofen. Die Abb. 205 zeigt einen Schnitt durch solchen Ofen, dem die die Umwandlung begleitenden magnetischen Erscheinungen zugrunde liegen. Abb. 206 zeigt die Schaltung des Ofens. Der Ofen ist — elektrisch gesehen — ein eisenloser Transformator (Heizwicklung, Anzeigewicklung), der sekundär gegen einen zweiten „Hilfstransformator“ geschaltet ist, der einen Eisenkern besitzt und primär mit dem „Ofentransformator“ parallelgeschaltet ist. Bei leerem Ofen wird der verschiebbare Kern des Hilfstransformators (Kompensation) so eingestellt, daß sekundär kein Strom fließt, was an einem Wattmeter abgelesen werden kann. Wird der Ofen mit magnetisch leitendem Material beschickt, so wird die Koppelung des „Ofentransformators“ verbessert, die Sekundärspannung steigt und es fließt ein am Wattmeter ablesbarer Strom. Wird das Gut dann im Laufe der Erwärmung unmagnetisch, so kehrt das Instrument wieder in die Nullage zurück. Daran erkennt der Bedienungsarbeiter, daß das Stück den Umwandlungspunkt erreicht hat.

Die Öfen sind für alle diejenigen Stähle verwendbar, bei denen der thermische Umwandlungspunkt mit dem magnetischen zusammenfällt, was im allgemeinen bei unlegierten Stählen mit über 0,66% C der Fall ist. Bei legierten Stählen fällt der magnetische mit dem thermischen Umwandlungspunkt in der Regel nicht zusammen, weswegen der Wild-Barfield-Ofen für diese Stähle nicht verwendbar ist. Die Öfen werden bis zu einem Fassungsvermögen von etwa 0,1 m<sup>3</sup> gebaut; darüber hinaus werden die elektromagnetischen Verhältnisse zu ungünstig. Einwandfreies Arbeiten ist nur zu erwarten, wenn das Gut nach Material und Größe gleich ist, da die Anzeige am Wattmeter natürlich erst verschwindet, wenn die ganze Charge unmagnetisch geworden ist; auch ist die volle Durchwärmung (bis zum Umwandlungspunkt) selbst bei gleichem Werkstoff (vgl. S. 23) von den Abmessungen abhängig.

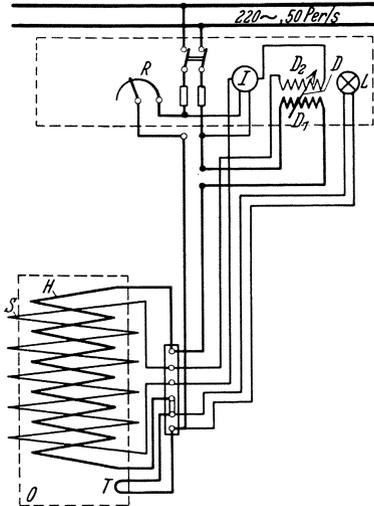


Abb. 206. Schaltbild des Wild-Barfield-Ofens (AEG, Berlin).

O Ofen, mit H Heizwicklung, zugleich Primärwicklung des „Ofentransformators“, S Sekundärwicklung des Transformators (Anzeigewicklung), D Kompensation („Hilfstransformator“): D<sub>1</sub> Primärwicklung, D<sub>2</sub> Sekundärwicklung, I Wattmeter, T Temperatursicherung, L Signallampe, leuchtet auf, wenn T durchgebrannt, R Regulierwiderstand.

Ugine Infra-Ofen. Er beruht gleichfalls auf Veränderung der magnetischen Eigenschaften beim Umwandlungspunkt. Die Stücke

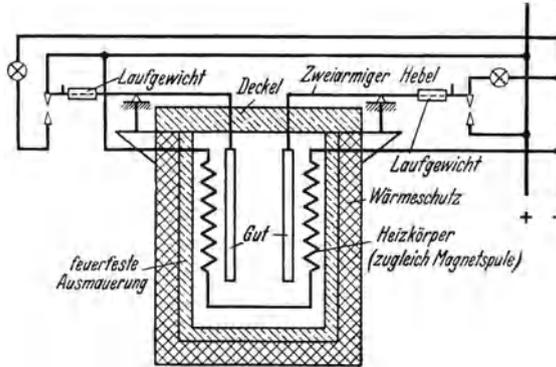


Abb. 207. Härteofen mit selbsttätiger Haltepunktsanzeige; (Ugine Infra, Grenoble).

werden an Waagebalken (zweiarmiger Hebel, s. Abb. 207) aufgehängt und durch die magnetische Wirkung der Heizwicklung in den Ofen gezogen. Werden sie unmagnetisch, so überwiegt ein Gegengewicht am Hebelarm und zieht das Gut hoch; dabei

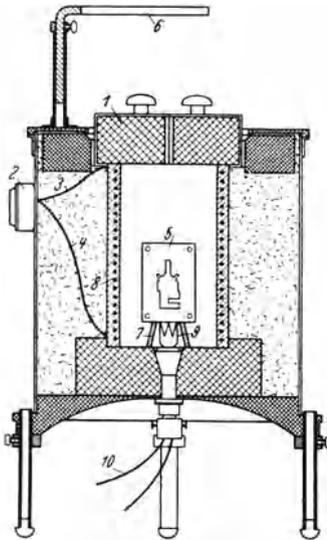


Abb. 208. Schnitt durch einen Humpofen (Leeds & Northrup, Philadelphia).

1 geteilter Deckel, 2 Anschlußdose, 3 obere Stromzuführung, 4 untere Stromzuführung, 5 Werkzeug (Gut), 6 Gutträger, 7 Stütze für Gut, 8 Heizwiderstand, 9 Thermoelement, 10 Anschlüsse des Thermoelements.

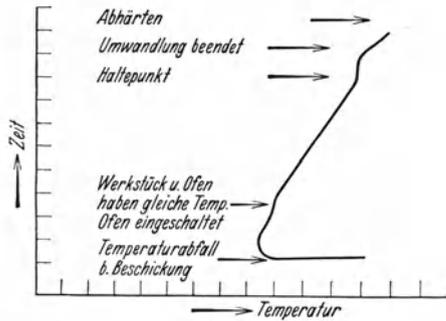


Abb. 209. Zeit-Temperaturkurve (Leeds and Northrup Co., Philadelphia.)

schließt der Hebelarm einen Kontakt (Abb. 207). Siehe hierzu ZV 70 und Paschikis ZV 71. Dieser in Frankreich erfundene Ofen<sup>1</sup> hat sich bisher in Deutschland nicht eingeführt; auch in Frankreich ist er inzwischen durch eine Art Induktionsofen verdrängt worden (siehe S. 282). Die Gründe hierfür sind dem Verfasser nicht

bekannt geworden; der Ofen ist einfach im Aufbau und hat

<sup>1</sup> Ugine Infra: Engl. P. 297826.

den Vorteil, bei Verwendung mehrerer Waagebalken die Erwärmung mehrerer Stücke verschiedener Durchwärmungszeit zu ermöglichen.

Ähnlich ist folgende deutsche Konstruktion<sup>1</sup>: Das Gut wird durch seinen eigenen Magnetismus im Ofen festgehalten und fällt beim Unmagnetischwerden selbsttätig durch den Ofenboden heraus. Durch Führung des Gutes auf einer schrägen Bahn wird seine Glühzeit soweit wie erforderlich verlängert.

Humpofen. Dieser Ofen beruht auf sehr genauer Temperaturmessung mit einem Präzisionsmeßgerät (Potentiometerregler S. 221)

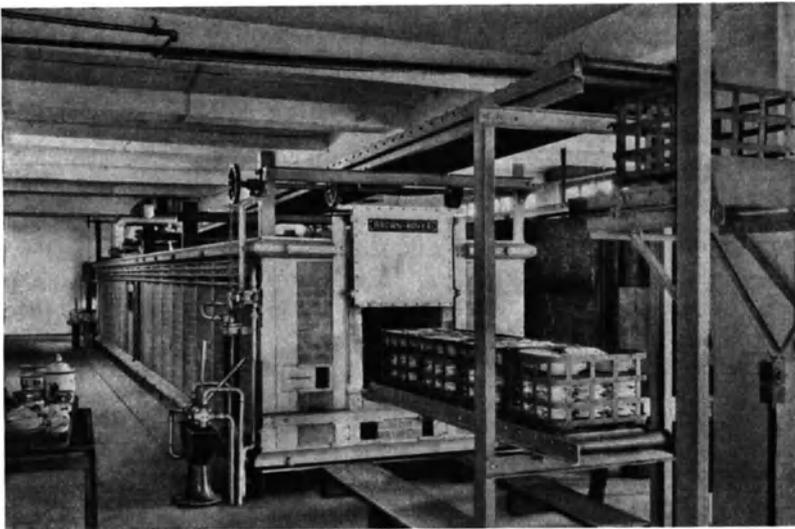


Abb. 210. Ofen zum Einbrennen von Farbe auf Porzellan (BBC, Baden).

und Aufzeichnung der Zeittemperaturkurve. Der Ofen wird ohne selbsttätige Temperaturregelung mit konstanter Wärmezufuhr betrieben; da die Umwandlung ein endothermer Prozeß ist, wirkt sie sich auf der Zeit-Temperaturkurve als Knick (englisch Hump) aus. Die Heizkörper sind bei diesem Ofen in eine keramische Masse gebettet, wie oben S. 194 Abb. 134 beschrieben. Auch dieser Ofen arbeitet natürlich nur dann zuverlässig, wenn gleichartiges Gut gleichen Materials symmetrisch zur Ofenwand eingebracht wird; es könnten sonst einzelne außenliegende Teile des Gutes den Umwandlungspunkt erreicht haben, während andere im Wärmeschatten liegende noch nicht umgewandelt sind; man würde einen undeutlichen, verzerrten Knick erhalten. Die Abb. 208 zeigt einen Humpofen, die Abb. 209 eine typische Zeit-Temperaturkurve.

<sup>1</sup> Hoesch: D.R.P. 464828.

b) Öfen mit besonderer Beschickungs- und Transporteinrichtung.

Ofen mit Stößelvorrichtung zum Brennen von Farbe auf Porzellan (ohne Wärmerückgewinnung) (Abb. 210). Die mit Porzellan

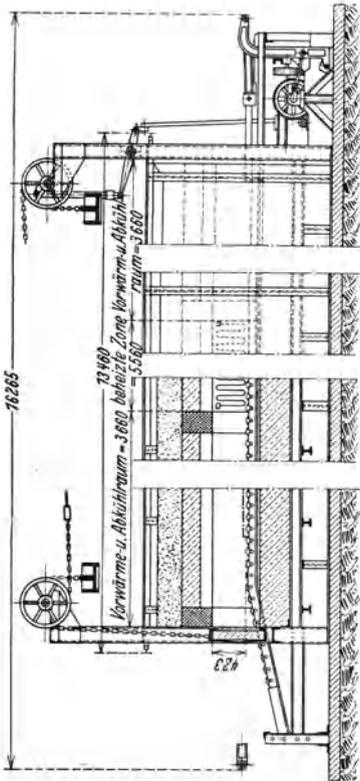
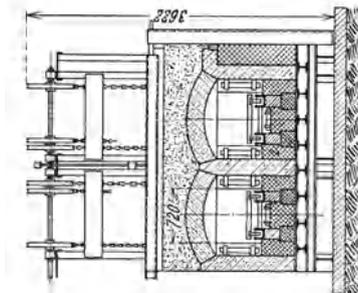


Abb. 211. Vierkammer-Einsatzofen (BBC, Baden). Im Querschnitt sind nur 2 Kammern gezeigt. Bandwiderstände, Hochwertige Pulverisolation an der Decke.



gefüllten Körbe werden durch ein mit Druckwasser betätigtes Stößel auf Rollen durch den Ofen befördert. Die leeren Körbe laufen, nachdem sie ebenfalls hydraulisch hochgehoben sind, auf einer oberhalb des Ofens befindlichen Rollenbahn zur Aufgabeseite zurück, wo sie mit einem hydraulischen Aufzug gesenkt werden, um neu beladen zu werden. Die Türbetätigung ist gleichfalls hydraulisch. Die Länge des Ofens beträgt 14 m, davon entfallen nur 2 m auf die eigentliche Heizzone, während auf die Vorwärmezone 5,5 m, auf die Abkühlzone 6,5 m entfallen. In der Heizzone liegen zwei getrennt regelbare Stromkreise von je 65 kW Aufnahme. Der größte Durchsatz beträgt 3 bis 4 t Porzellan je 24 Stunden. Bei einem Durchsatz von 2,8 t/24 h (= 117 kg/h) beträgt der Stromverbrauch 76 kWh/100kg.

Einen Ofen für ähnliche Zwecke aber mit Wärmerückgewinnung beschreibt Aschmann (ZV 72).

Ofen mit Stößelvorrichtung zum Zementieren (Einsetzen) mit Gegenstromprinzip. Abb. 211 zeigt einen aus 4 Bahnen bestehenden Ofen für Einsatzzwecke (925<sup>0</sup>)<sup>1</sup>. Das Gut läuft auf der ersten und dritten Bahn im entgegengesetzten Sinne wie auf der zweiten und vierten. Auf beiden

Seiten des Ofens befinden sich Rollbahnen zur Rückbeförderung der

<sup>1</sup> Die Anlage dürfte wohl eine der größten für Einsatzzwecke in Europa sein.

leeren Einsatzbehälter. Die Aufgabe der Behälter erfolgt ebenfalls mit Stößel. Jede Kammer ist 13,5 m lang, hat eine Breite von 600, eine Höhe von 300 mm, einen Anschlußwert von 80 kW und kann gesondert geregelt werden. Die Länge der eigentlichen Heizzone beträgt nur 5,5 m.

Mit Rücksicht auf den Transport durch Stößel müssen die Einsatzkisten schwer gemacht werden. Ihr Gewicht beträgt etwa das 2,5fache des Nutzgewichts. Dazu kommt noch das Gewicht des Einsatzpulvers,

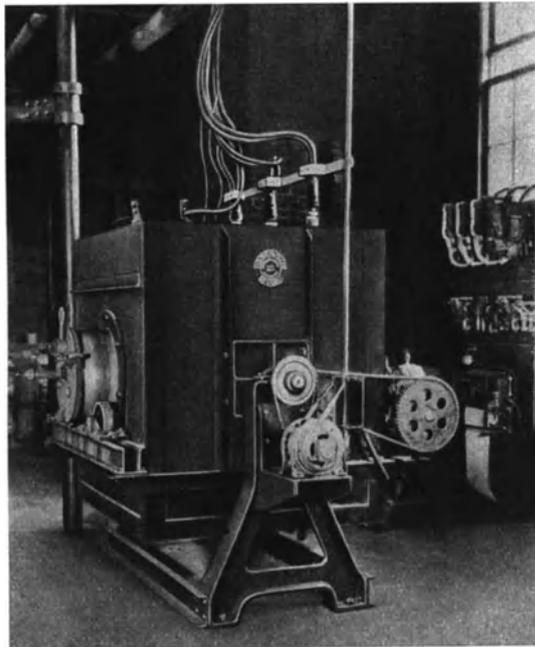


Abb. 212. Trommelofen für Einsatzzwecke (Rockwell Furnace Co, New York). Beschickung und Entnahme durch den abschraubbaren Verschlussdeckel. Vorne auf der Abbildung der Kippmotor, an der Seite rechts Triebmotoren für Rotation. Beachte die Stromzuführung an der Decke: einfach, haltbar.

so daß das Verhältnis Brutto- zu Nettogewicht 1:4 wird. Bei einem Bruttodurchsatz von 8 t/24 h und Kammer, also 32 t/24 h für die ganze Anlage, beträgt der Stromverbrauch etwa 220 kWh/t brutto oder etwa 880 kWh/t netto. Bei Betrachtung dieser Zahlen ist zu bedenken, daß das Gut langsam erkalten muß. Die Durchgangszeit durch Vorwärme-, Heiz- und Abkühlzone beträgt 12 Stunden.

Trommelofen für Einsatzzwecke. Das Einsetzen (Zementieren) geschieht bekanntlich im allgemeinen in der Weise, daß das Gut in kohlenstoffabgebende Mittel (Lederkohle u. dgl.) eingepackt und in Behältern in den Ofen gebracht wird. Die Dauer der Zementation hängt

von der verlangten Zementationstiefe ab. Die „Zementationsdauer“ wird erst von dem Augenblick an gerechnet, in dem das Gut die zur Zementation erforderliche Temperatur erreicht hat, was lange dauert, da das Einsatzpulver ein schlechter Wärmeleiter ist; dadurch ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sehr in Frage gestellt. Man sucht die Wirtschaftlichkeit des Einsetzens zu verbessern, indem man die Einsatzbehälter fortläßt und das Gut mit dem Einsatzpulver zusammen unmittelbar in eine Trommel füllt und darin erwärmt. Die Abb. 212

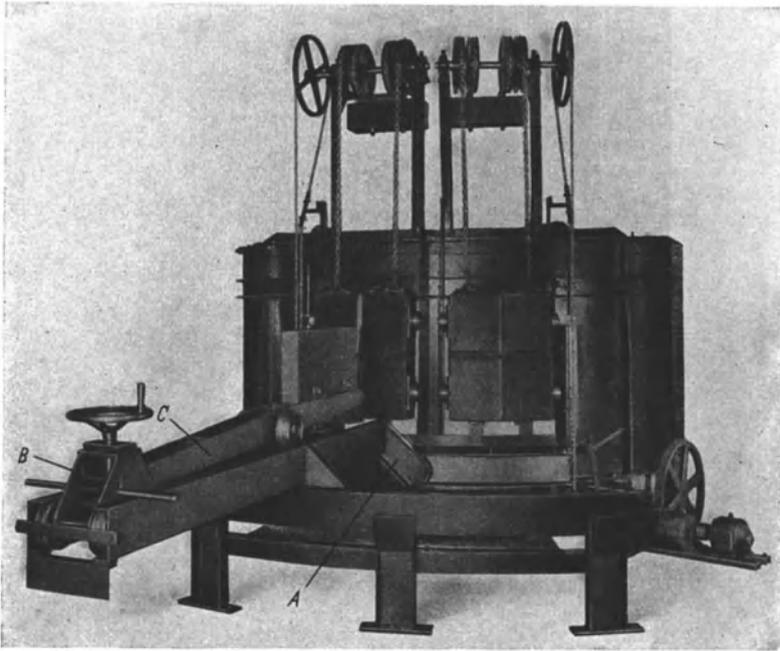


Abb. 213. Ringherdofen (BBC, Baden).

zeigt einen solchen Einsatztrommelofen. Die Trommel hat einen Durchmesser von 460 mm und eine Länge von 920 mm; der Anschlußwert beträgt 70 kW. Der Stromverbrauch, der natürlich von der Einsatz-tiefe und der Chargengröße sehr stark abhängig ist, beträgt im Mittel 710 kWh/t netto Einsatz (bezogen auf 6 Stunden Chargendauer). Diese Chargendauer bei Trommelöfen darf natürlich nicht ohne weiteres mit derjenigen bei gewöhnlichen Kammeröfen mit Einsatztöpfen verglichen werden, denn das Anheizen geht beim Trommelofen erheblich schneller als bei diesen<sup>1</sup>. Der Stromverbrauch weicht nicht sehr von dem oben

<sup>1</sup> Auch die Zementationsdauer ist beim Trommelofen kürzer, weil beim Trommeln das Gut immer wieder mit neuer, aktiver Kohle in Berührung kommt.

genannten für Kammeröfen ab, ist also ziemlich erheblich. Dennoch ist die Verwendung von Trommelöfen für Einsatzzwecke zu empfehlen, denn die ganze Arbeit des Einpackens des Gutes in die Kästen fällt fort, ebenso die Kastenabnutzung, die oft sehr erheblich ist. Auch kann man infolge der kurzen Einsatzzeit etwa 75% des Einsatzmittels wieder verwenden.

Ringherdofen (Drehherdofen) zum Anwärmen von Walzblöcken (Nichteisenmetalle) (Abb. 213). Der Ofen hat eine Herdfläche von 5,34 m<sup>2</sup>. Das Aufgeben und Entnehmen an den beiden Türen erfolgt mit Hilfe des am Umfang des Ofens fahrbaren Gestells *A*, auf dem radial eine Art Beschickwagen *B* läuft, der die Walzblöcke mit Hilfe zweier Arme *C* erfaßt. Derartige Öfen haben namentlich in der amerikanischen Automobilindustrie breite Anwendung gefunden, sind aber, wie ersichtlich, auch für Walzwerke sehr geeignet (Temperatur 500 bis 950°).

Öfen mit senkbarem Boden (Abb. 214). Der Ofen ist für das Glühen von Blech, für das Glühen von Draht- und Bandringen und Stangen oder auch für die Wärmebehandlung schwerer Stücke geeignet. Für die erstgenannte Aufgabe ist er wiederholt ausgeführt worden. Die Wärmeverluste sind, ebenso wie bei den Öfen mit hebbarer Haube, kleiner als

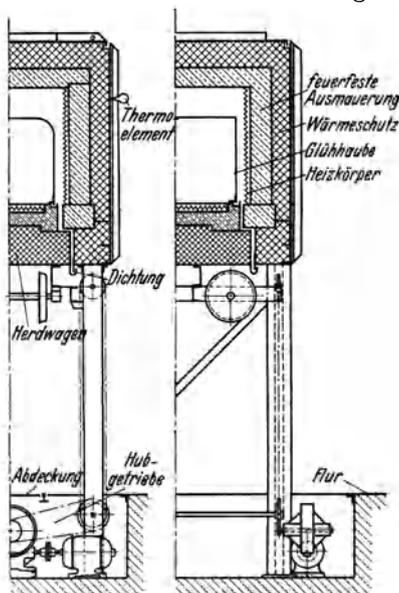


Abb. 214. Ofen mit senkbarem Boden (A.E.G., Berlin).

bei solchen mit seitlichen Türen. Durch eine Sandtasse oder Wasserdichtung am Boden wird das Eindringen von Luft in den Ofenraum verhindert. Der in der Abbildung gezeigte Ofen arbeitet mit einer Glühhaube, die gegen den Ofen durch eine an der Oberkante des Bodens angebrachte Dichtung abgeschlossen ist. Das Hochheben des Herdes erfolgt elektrisch oder hydraulisch; in der gehobenen Lage wird der Ofen zwecks Entlastung der Hubvorrichtung durch Keile festgehalten. Nach Absenken des Bodens kann dieser entweder, wie hier vorgesehen, seitlich fortfahren, so daß ein neuer, inzwischen beschickter Herd hochgehoben werden kann; oder Beschickung und Entnahme des Herdes erfolgt mit Hilfe einer Beschickungseinrichtung nach Art der auf Seite 206 beschriebenen. In diesem Falle arbeitet der Ofen außerordentlich wirtschaftlich, da kein Verlust von Speicherwärme auftritt, die

Leerverluste klein sind und Beschickung und Entleerung des Ofens sehr schnell erfolgen kann. Ein derartiger Ofen mit einer Herdfläche von  $2,1 \times 0,6 \text{ m}^2$  (Paschkis ZV 73) hat nur 12,2 kW Leerverlust und glüht bei einem Anschlußwert von 130 kW 3,0 . . . . 3,5 t Bleche in 8 h.

Kammerofen mit seitlicher Türe (Rohrglühofen, Abb. 215). Der in der Abbildung gezeigte Ofen eignet sich zum Glühen von Rohren, Draht- und Bandringen oder auch Stangen (Tama ZV 63). Die Beschickung erfolgt mit Hilfe eines Krans, der eine Reihe von Armen hat, die in entsprechende Schlitze am Boden greifen. Quer über die Arme liegt das Gut. Die Arme können gesenkt werden und legen das Gut auf den

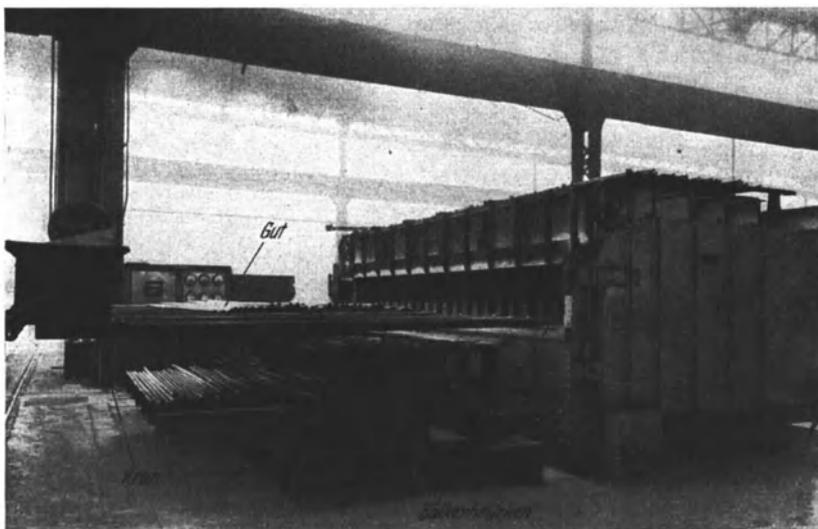


Abb. 215. Rohrglühofen (Hirsch-Kupfer, Finow).

Brücken im Ofen ab. In dem beschriebenen Fall ist die Türe als Senktüre ausgebildet. Wenn das Gut nicht allzu schwer ist, werden durch die ausgiebige Unterstützung des Gutes durch die Brücken besondere Glühunterlagen, wie sie sonst gebräuchlich sind, um eine Deformation des Gutes zu verhindern, entbehrlich. Bei Messingrohren kommt man bei einer Stunde Glühzeit und einer Glüh­temperatur von  $600^{\circ}$  auf einen Verbrauch von 127 kWh/t. Der Ofen hat eine Länge von 7 m, eine Breite von 2,2 m und einen Anschlußwert von 240 kW und kann einen Durchsatz von etwa 1 t/h erzielen. Der Ofen besitzt kein Gewölbe, sondern eine Hänge­decke, wie sie bereits oben besprochen wurde (siehe S. 192) und die in der Abb. 216 erkenntlich ist.

Kammerofen mit Beschickmaschine (Abb. 217). Der Ofen dient zum Anwärmen von Brammen (Messing) für das Walzen. Die

Brammen mit einem Stückgewicht von 300 kg werden mit der Beschickmaschine zu viert und mehr in den Ofen eingesetzt; zu diesem Zweck werden die unten am Ofen sichtbaren kleinen Hilfstüren geöffnet. Die Tragholme der Beschickmaschine fahren in entsprechende Schlitze des Herdes ein und werden dann abgesenkt, wobei das Gut auf die feststehenden Brücken des Ofens zu liegen kommt. Um gute Dichtung zu erzielen, werden die Türen mit Preßschrauben angedrückt. Der Anschlußwert des Ofens beträgt 160 kW; die Heizung ist gleichmäßig an Seiten, Decke und Boden verteilt. Die Herdfläche beträgt  $2 \times 1,5 \text{ m}^2$ , die nutzbare Höhe der Kammer 0,6 m (Tamele ZV 74). Beschick-einrichtung wie auf S. 207, Abb. 153 beschrieben.



Abb. 216. Montagebild des Rohrglühofens (Hirsch-Kupfer, Finow).

An der Decke sind erst einige Widerstände eingelegt; sie hängen an Isolatoren, die in den oberen Rillen liegen. — Die Deckensteine sind an Doppel-T-Eisen aufgehängt, deren Enden zu sehen sind. Im Boden sieht man die Schlitze für die Beschickmaschine.

Emaillierofen mit Beschickmaschine. Die soeben besprochene Ofen- und Beschickungsart ist sozusagen die klassische für Emaillierkammeröfen. Der in Abb. 218 gezeigte Ofen ist im Prinzip sehr ähnlich gebaut. Das Gut muß an möglichst wenig Stellen mit der Unterlage im Ofen in Berührung kommen und wird daher auf einem Rost

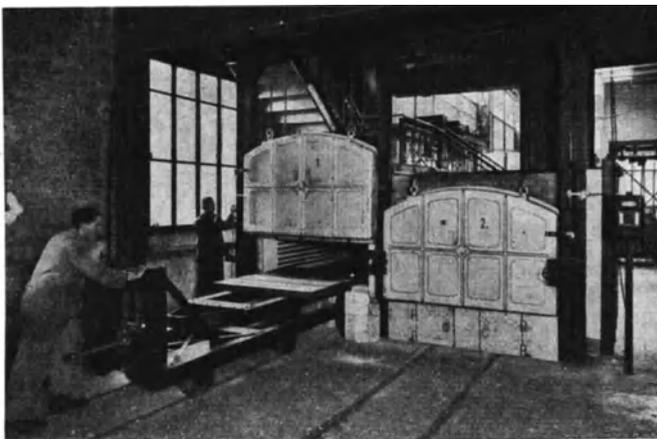


Abb. 217. Doppelkammerofen für Messingbrammen (SSW, Berlin).

unter Zuhilfenahme von Emaillierspitzen und anderen Werkzeugen in den Ofen eingebracht. Es bleibt nur ganz kurzzeitig im Ofen, etwa 1,5 bis 5 min. Man muß daher Ein- und Ausfahren des Rostes möglichst vereinfachen. Zur Erleichterung der Bedienung wird während des Fahrens die Gabel durch Gegenrollen gehalten und erst in der Endstellung wird sie durch Umlegen des Hebels *A* mit dem Rost gesenkt. Bisher haben sich in Deutschland elektrische Emaillieröfen nicht in nennenswertem Maße einzuführen vermocht — in Amerika sind sie weit verbreitet, was darauf zurückzuführen ist, daß man in den Ver-



Abb. 218. Emaillierofen (BBC, Baden).

einigten Staaten niedriger schmelzende Emaillearten verwendet als bei uns. Auch das in den Vereinigten Staaten günstigere Verhältnis von Lohn- zu Strompreis wird diese verschiedene Entwicklung beeinflußt haben, denn das elektrische Emaillieren wird meist erst durch Lohnersparnis wirtschaftlich oder, wenn man die Wärmekosten allein in Betracht zieht, erst bei Strompreisen, die bei den deutschen Verhältnissen nicht gewährt werden können.

Emailliertunnelofen (Abb. 219). Das Bild zeigt einen Emailierwanderofen, z. B. für das Emaillieren von Eismaschinengehäusen. Der Ofen ist als Tunnelofen mit oberhalb des Tunnels laufender Kette ausgebildet. An der Kette hängen die Traghorden, auf denen die Emaillierspitzen befestigt sind, die ihrerseits das Gut tragen. Die Bahn des Gutes im Ofen hat U-Form, wobei die Heizzone so hoch-

gelegt ist, daß ihr Boden höher ist als die Decke des Auslaufs (siehe Abb. 220). Auf diese Weise ist eine Ausstrahlung aus der Heizzone vollkommen, die Konvektion in weitem Maße verhindert. Ein- und ausgehender Warenstrom stehen in Wärmeaustausch miteinander. Die Mittellinie der Heizzone ist etwas über 10 m lang. Die Kettengeschwin-



Abb. 219. Emailiertunnelofen (General Electric Co., Schenectady).

digkeit schwankt zwischen 0,9 und 5,4 m/min. Bei einer normalen Betriebstemperatur von etwa  $920^{\circ}\text{C}$  und einer höchsten Betriebstemperatur von  $950^{\circ}\text{C}$  beträgt der Durchsatz 15 bis 17 t/23 h. Das mittlere Stückgewicht ist 0,5 kg. Der zweite und dritte Brand wird bei niederen Temperaturen ( $815$  bis  $850^{\circ}$ ) ausgeführt. Das Gut bleibt im Mittel 3 min in der Heizzone. Der Anschlußwert beträgt 450 kW (ZV 75).

Drehtelleröfen (Abb. 221). Um auch in Kammeröfen eine gleichmäßige Durchwärmung des Gutes zu erzielen und namentlich um auch die in der Ofenmittelebene liegenden Gutteile schnell und sicher zu durchwärmen, hat man Öfen gebaut, bei denen sich das Gut während der Durchwärmung langsam um die eigene Achse dreht. Dieses Prinzip ist natürlich nur für Gut anwendbar, das einigermaßen symmetrisch zur Drehachse ist. Der Antrieb der Drehteller liegt außerhalb der heißen Zone und erfordert natürlich einige Wartung; auch muß für richtige Kühlung gesorgt werden. In dem in der Abbildung gezeigten Ofen sind 4 Drehteller von je 1 m Durchmesser hintereinander angeordnet. Die Beschickung erfolgt mit ähnlichen Maschinen wie bei dem Ofen der Abb. 215 (Paschkis ZV 73).

Wagenglühofen für Stahlblöcke (Abb. 222). Das Glühen von schwerem Gut stellt insofern eine besondere Aufgabe dar, als die Be-

Paschkis, Elektroöfen.

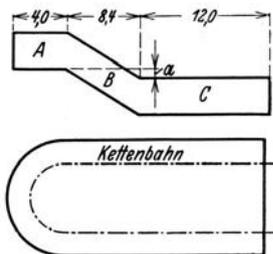


Abb. 220. Schema zu Ofen Abb. 219.

A Heizzone, B schräger Anstieg; Neigung so, daß Abstand  $a > 0$  ist. C Vorwärm- und Kühlraum.

wegung schwerer Stücke bei hohen Temperaturen Schwierigkeiten bereitet. Herd, Beschickungs- und Transporteinrichtungen müssen hohen

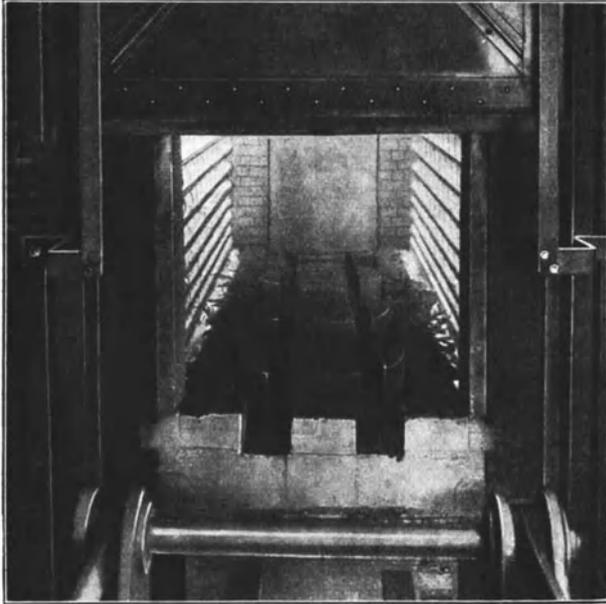


Abb. 221. Drehtellerofen (AEG, Berlin).

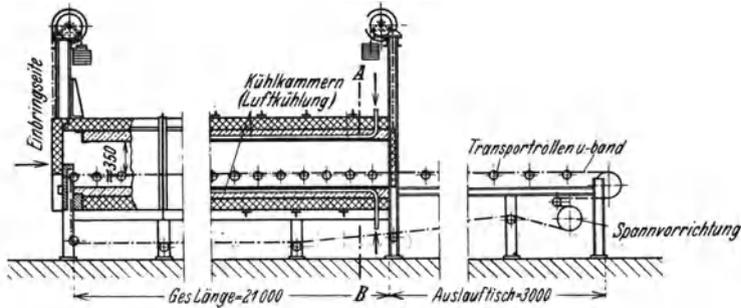
Druckbeanspruchungen gewachsen sein. Der Ofen der Abb. 222 hat einen Herd von 14 m<sup>2</sup>; bei einem Chargengewicht von 20 t verbraucht er



Abb. 222. Wagentlühofen für Stahlblöcke (SSW, Berlin).

250 kWh/t bei einer Glühtemperatur von 800<sup>0</sup> und langsamem Erkalten des Gutes im Ofen. Da bei dem in der Abbildung gezeigten Ofen die

Charge langsam erkalten muß, geht die Speicherwärme des Ofens ohnedies verloren; durch den Herdwagen entsteht also kein besonderer Nachteil. Der Verlust an Speicherwärme des Ofens könnte nur durch Verwendung eines Fließofens mit Zonen verschiedener Temperatur behoben werden, der aber ein Vielfaches an Platz beanspruchen würde. Da der beschriebene Ofen fast durchwegs mit Nacht- und Sonntagsstrom beheizt werden kann, können sich trotz höheren Stromverbrauchs gegenüber einem derartigen Fließofen unter Umständen geringere Strom-



kosten ergeben. Die Heizung liegt allseitig, auch am fahrbaren Herd. Hier sind die Heizwiderstände durch hitzebeständige Metallplatten abgedeckt und mit einem flexiblen Kabel angeschlossen. Die Türe ist als Standtüre auf dem Herdwagen aufgebaut und wird parallel zu ihrer Ebene herausgefahren. Der Anschlußwert (Schaubild ZV 76) beträgt 350 kW.

Glaskühlofen (Abb. 223).

Bekanntlich muß Glas nach dem Erwärmungsprozeß langsam abkühlen, und zwar nach einem bestimmten Zeit-Temperaturverlauf (Tabelle ZV 77). Diesen Verlauf kann man in einem ortsfesten Ofen durch entsprechende Veränderung der Leistung erzielen. Oder man kann auch, wie das bei dem gezeigten Ofen der Fall ist, die Temperatur zeitlich an jeder Stelle des Ofens konstant halten, sie aber von Querschnitt zu Querschnitt verändern. Das Gut — Glas, das aus der Presse oder von den Glasbläsern kommt — durchwandert auf einer Kette den 24 m langen Ofen in ca. 3 Stunden. Beheizt ist nur der erste Teil des Ofens, und zwar vom Eintritt an 6 m. Im übrigen Teil wird das Gut mit Luft gekühlt, die in Kanälen im Mauerwerk läuft.

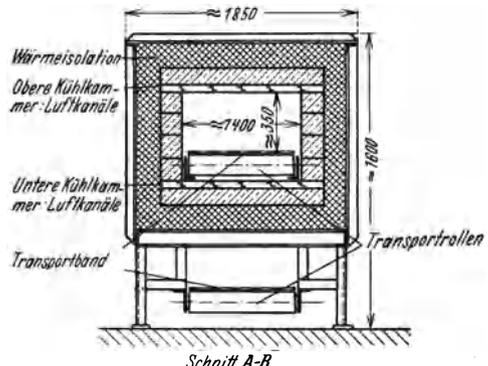


Abb. 223. Glaskühlofen (SSW, Berlin).

Die Heizung im ersten Teil des Ofens dient dazu, die Abkühlung des Glases zu verzögern; sie hat die Differenz zwischen Leerverlusten und

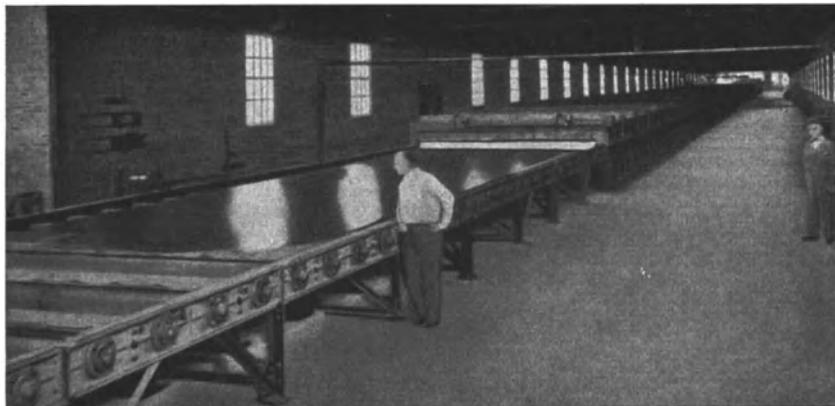


Abb. 224. Glaskühlofen (General Electric Co., Schenectady).

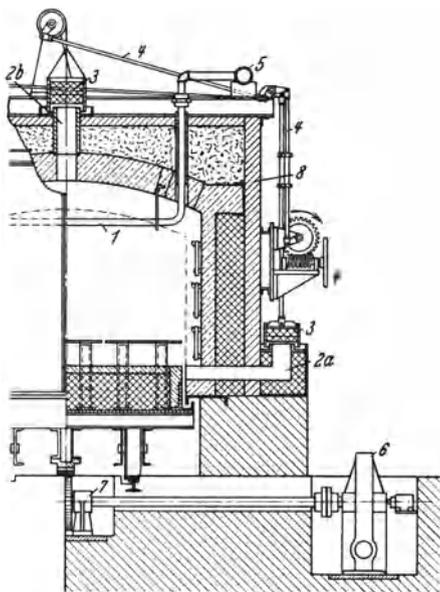


Abb. 225. Ofen mit künstlicher Kühlung (General Electric Co., Schenectady).

1 Kühlrohre, 2a Luftzutrittsrohr, 2b Luftaustrittrohr mit Hebelanordnung, 3 wärmeisolierter Deckel, 4 Handrad mit Hebelanordnung, 5 Luftauslaß (indirekte Kühlung), 6 Motor für Herdwagentransport, 7 Vorgelege für Herdwagentransport, 8 rotes Ziegelmauerwerk (als Ofenaußenwand).

Wärmebedarf der Kette einerseits und der durch das Glas eingebrachten Wärme andererseits zu decken. Es ergibt sich hier der sonderbare Fall, daß mit steigendem Durchsatz der Stromverbrauch nicht nur relativ (d. h. auf den Durchsatz bezogen) sinkt, sondern auch absolut, da ja mit steigendem Durchsatz die durch das Glas eingeführte Wärmemenge steigt. Die beheizte Zone ist in zwei Abschnitte geteilt, die von je einem Temperaturregler gesteuert werden. Der Gesamtanschlußwert beträgt 60 kW. Bei ununterbrochenem Betrieb beträgt der Verbrauch rund 70 kWh/t Glas bei einem Durchsatz von 10 t/Tg.

Die Abb. 224 zeigt einen amerikanischen Glaskühlofen für Tafelglas. Der Ofen mit einer Gesamtlänge von 220 m dürfte der größte

Ofen der Welt sein. Seine Breite beträgt über 4 m. Bei einem Anschlußwert von 1600 kW beträgt der Durchsatz bis 12 t Glas je Stunde.

Ofen mit künstlicher Kühlung. Bei verschiedenen Arbeitsprozessen ist eine künstliche Kühlung zweckmäßig, um trotz der Erfordernis eines schnellen Temperaturabfalls den Ofen ausreichend stark isolieren zu können. Die Abb. 225 zeigt einen derartigen Ofen. Es sind zwei verschiedene Kühlmittel vorgesehen: Indirekte Kühlung durch Kühlrohre und direkte Kühlung mittels Durchblasen von Luft. Die Luftdurchlaßrohre sind durch wärmeisolierte Deckel verschließbar, die alle durch eine gemeinsame Hebelanordnung mit Handrad betätigt werden. Der Herd und die Ofenwände bestehen aus halbfestesten Steinen, wodurch die Speicherwärme stark vermindert wird. Der Herd ist ausfahrbar und kann von einem außerhalb des Ofens liegenden Motor über Ritzel und Vorgelege bewegt werden (ZV 78).

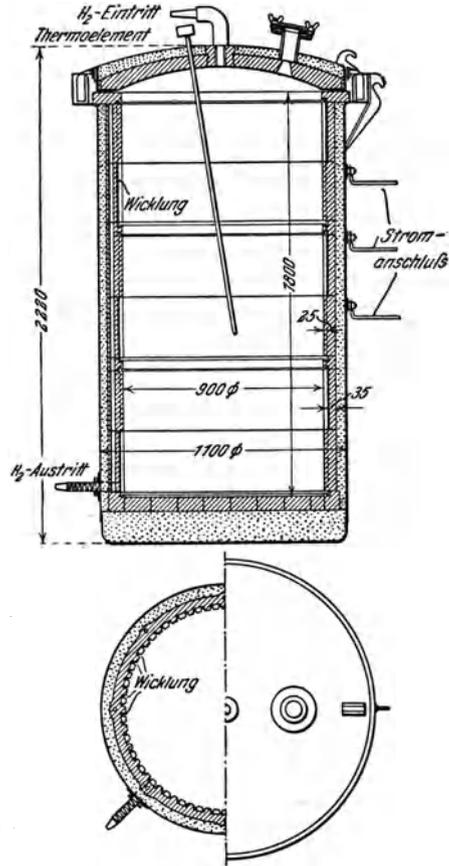


Abb. 226. Blankglühofen (Stassinot ZV 14). Beachte den Wasserstoffeintritt am Ofendeckel und die Beheizung des Wasserstoffaustritts unten, die geringe Wandstärke der Schamotte und Isolierung.

## 2. Öfen mit künstlicher Atmosphäre.

### a) Blankglühöfen.

Das Blankglühen — zunderfreies Glühen, wobei unter Umständen etwa vorhandener Zunder reduziert werden soll — gehört mit zu den älteren Anwendungsgebieten der elektrischen Beheizung. Es sind eine große Zahl von Verfahren ausgearbeitet worden, die sich auf verschiedene Metalle und verschiedene Anforderungen an Blankheit beziehen. Da es infolge der Mannigfaltigkeit nicht möglich ist, das Gebiet vollständig zu behandeln, soll im folgenden eine Übersicht über die wichtigsten Verfahren gebracht werden.

α) Blankglühen nach Stassinot-SSW (Abb. 226). Die Öfen bauen auf einem von Rohn (ZV 79)<sup>1</sup> entwickelten Verfahren auf. Darnach wird ein gasdichter Ofen nach Beschickung zunächst mit CO<sub>2</sub> durchge-

<sup>1</sup> Rohn und Heraeus-Vakuumschmelze, D.R.P. 389249.

spült, darauf mit Wasserstoff gefüllt. Der Ofen mit der Charge erkaltet nach beendeter Glühung so weit, daß er ohne Gefahr einer neuen Verzunderung des Gutes geöffnet werden kann. Da der Ofen unter Schutzatmosphäre hochgeheizt und abgekühlt wird, können Heizkörper aus Band Eisen Verwendung finden. Ein Ofen der Rohnschen Bauart, der bei einer Charge von 4 t einen Stromverbrauch von etwa 240 bis 260 kWh/t hatte, wurde von Stassinnet (ZV 14) untersucht und auf



Abb. 227. Blankglühofen (SSW, Heraeus-Rohn, Stassinnet). Der mächtige Aufbau über den Ofendeckeln ist die — während des Heizens ausgefahrne — Kühlvorrichtung. — Hinter den Öfen die Schaltanlage in einem Schaltschrank untergebracht. — Vorne links an jedem Ofen die Wasserkühlung für die Deckeldichtung.

Grund seiner Betriebsergebnisse grundlegend umgebaut. Die Schamottestärke wurde weitgehend vermindert<sup>1</sup> und das Fassungsvermögen um etwa 30% erhöht. Infolge Verminderung der Speicherwärme ist der Stromverbrauch erheblich gesunken und vor allem ist das Ausbringen je Ofen mehr als verzehnfacht. (60 bis 70 t/Monat gegen 5 bis 5,5 t/Monat bei dem Rohnschen Ofen.) Ferner zeigte es sich, daß man ohne Gefahr einer ungünstigen metallurgischen Einwirkung die Kühlgeschwindigkeit künstlich heraufsetzen kann. Zu diesem Zwecke wird in das Innere des Gutes (es wurden in dieser Art Öfen bisher fast ausschließlich Band-

<sup>1</sup> Stassinnet: D.R.P. Anm. St. 40909.

eisenringe geglüht) eine Kühlvorrichtung eingeführt. Der Gasverbrauch kann wesentlich eingeschränkt werden, wenn der Austrittsstutzen für das Gas isoliert ist, eventuell sogar durch Zusatzheizung<sup>1</sup> warm gehalten wird, so daß seine Temperatur über dem Siedepunkt des höchst-siedenden Bestandteiles der Ofenatmosphäre bleibt. Die Ofenatmosphäre ist natürlich nicht reiner Wasserstoff, sondern enthält noch die aus den Verunreinigungen des Gutes stammenden Öldämpfe und Wasserdampf. Ein ausführlicher Bericht über die nochmals umgebaute Anlage findet sich bei Stassinnet (ZV 17), wo mitgeteilt ist, daß elf solcher Öfen aufgestellt wurden. Die Abb. 227 zeigt die jetzt übliche Bauform. Als Widerstandsmaterial hat sich 29% iges Nickeisen bewährt. Da die Öfen der Anlage abwechselnd hochgeheizt und gekühlt werden, muß

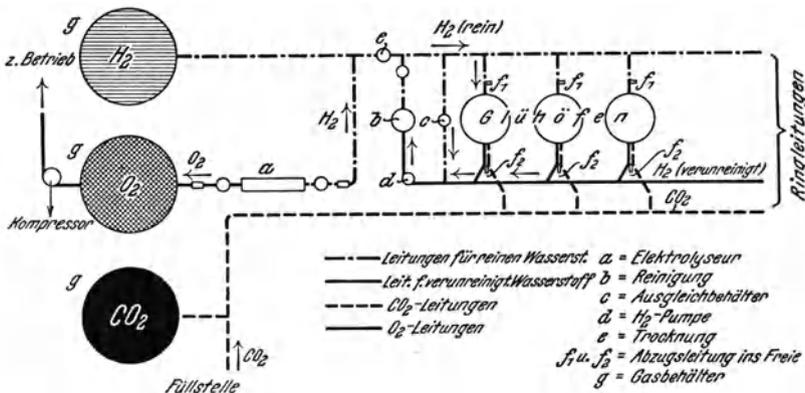


Abb. 228. Gasschaltbild für Blankglühöfen (Stassinnet ZV 17).

die elektrische Ausrüstung nur für einen Teil der Öfen beschafft werden. Bei einem Anschlußwert von 110 kW/Ofen z. B. ist für alle Öfen zusammen nur ein Transformator von 400 kVA aufgestellt. Der Stromverbrauch beläuft sich auf 186 bis 224 kWh/t Glühgut bei Chargengewichten von im Mittel 2440 kg und einer Monatsproduktion je Ofen von 52 t. Die Abb. 228 zeigt ein Gasschaltbild. Der Wasserstoff wird auf elektrolytischem Wege gewonnen (der anfallende Sauerstoff wird für Schweißzwecke verwertet); der Verbrauch an Wasserstoff beträgt 0,5 bis 1 m<sup>3</sup>/t Glühgut.

Besonderes Augenmerk mußte auf die Entfernung störender Beimengungen aus dem Schutzgas gerichtet werden. Zu diesem Zwecke muß z. B. auch vom Bau her in der Ofenwand befindliche Feuchtigkeit bei Inbetriebsetzung entfernt werden<sup>2</sup>. Ist das Gut rein, so daß das Schutzgas nach dem Glühvorgang nur Wasser enthält, so kann es über

<sup>1</sup> SSW: Engl. Pat. 262803.

<sup>2</sup> SSW: D.R.G.M. 1034743; Engl. Pat. 262766.

einen Kondensationsapparat geführt werden, in dem sich die Wasserdämpfe niederschlagen<sup>1</sup>. Man kann auch die Verunreinigungen durch verstärkten Schutzgasstrom aus dem Ofen „herausschwemmen“; dies geschieht, um Gas zu sparen, nur während der Zeit des Temperaturhaltens, während in der Anheiz- und Abkühlzeit mit schwachem Gasstrom gefahren wird<sup>2</sup>. Fügt man in den Glühräum außer dem Gut noch irgendein Mittel, das die sich bildenden Stoffe (Wasserdampf usw.) bindet, so kann man mit bescheidenem Wasserstoffverbrauch blankglühen<sup>3</sup>.

Einen besonderen Nachteil des beschriebenen Blankglühverfahrens bildet die Notwendigkeit, im Ofen zu kühlen, um blankes Gut zu erhalten. Es ist selbstverständlich, daß die verschiedensten Mittel versucht wurden, um die Kühlzeit zu verringern<sup>4</sup>.

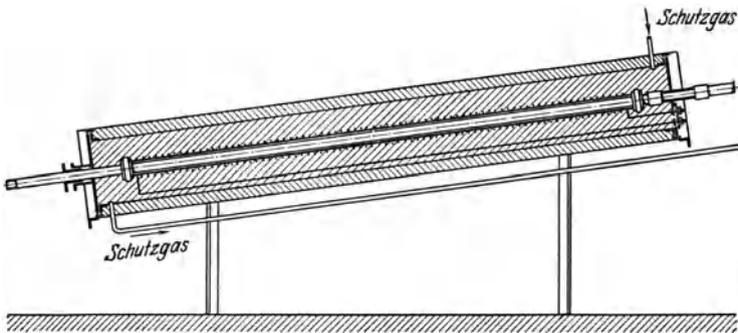


Abb. 229. Rohrblankglühofen (Rohn, ZV 80).

Die rohrförmige Metallmuffel wird durch außen aufgebrachte Widerstände beheizt und liegt in einem gasdichten Isoliermantel; Durchtritt durch den äußeren Ofenmantel mittels Stoffbuche. Der Schutzgasstrom fließt der Reihe nach durch die Muffel und um dieselbe. (Schutz der Heizwiderstände.)

**β) Ungedichtete Blankglühöfen.** Derartige, mit Dichtung versehene Blankglühöfen bringen in Bau und Betrieb der Öfen erhebliche Schwierigkeiten, vor allem die Notwendigkeit unterbrochener Betriebsführung. Man versuchte daher, Blankglühöfen zu entwickeln, die nicht abgedichtet sind. Ist z. B. das verwendete Schutzgas leichter als Luft, so kann man den Blankglühofen nach unten unbedenklich offen halten, denn das leichtere Gas (Wasserstoff) bleibt oben im Ofen. Arbeitet man umgekehrt mit dem schweren Kohlendioxyd und hält man den Ofen oben offen, kann auch kein Gas verlorengehen. Dies Prinzip ist schon sehr lange bekannt<sup>5</sup>. Auch für Zwecke des Blankglühens von langen

<sup>1</sup> SSW: USA.-Pat. 1691259.

<sup>2</sup> SSW: D.R.P. 487729.

<sup>3</sup> Westberg: D.R.P. 476513.

<sup>4</sup> Siehe u. a. BBC: Schweiz. Pat. 128083; SSW: D.R.P. 433279, D.R.P. 440938, Österr. Pat. 113665, Engl. Pat. 262433, D.R.G.M. 1037507, Österr. Pat. 116048; Heraeus Vak. Schmelze: D.R.P. Anm. H 104494.

<sup>5</sup> Siehe z. B. die amerikanische Patentschrift Hughes 868185 vom 15. 10. 07; praktisch verwirklicht wurde es jedoch erst, soweit der Verfasser weiß, von Heraeus im D.R.P. 480691 und D.R.P. 464830 und von SSW: D.R.P. 480038.

Stangen ist dieses Prinzip verwendet worden (siehe Rohn ZV 80, Abb. 229). Der Gasverbrauch ist bei diesen Öfen natürlich höher als bei den allseitig geschlossenen Öfen, doch bieten sie den großen Vorteil des ununterbrochenen Betriebes; die Speicherwärme geht nicht bei jeder neuen Beschickung verloren und man kann den Ofen richtig isolieren. Um auch die Widerstände zu schützen, kann man den Gasstrom, der zuerst durch die Ofenkammer (die aus einem gasdichten Metallkasten besteht) leiten und dann durch den Raum, in dem sich die Heizwiderstände befinden, führen.

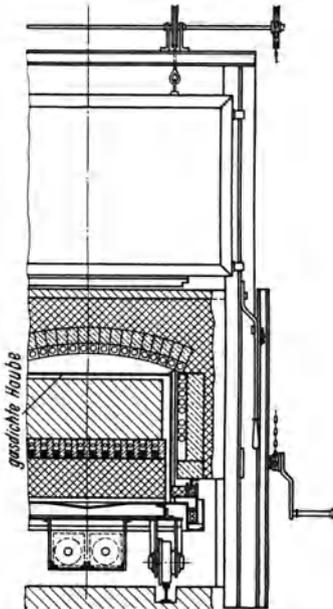


Abb. 230. Glühofen mit Beschickungswagen und gasdichter Haube (SSW, Berlin).

Beachte die gesonderte Dichtung der Haube gegen den Wagen und des Wagens gegen den Ofenmantel. Unter dem Wagen zwei Schutzgasflaschen.

γ) **Blankglühen mit Schutzhaube.** Als Weiterentwicklung der bekannten Kisten- glühung sind die Haubenblankglühöfen aufzufassen: das Gut wird auf einen Herd aufgebaut und unter Verwendung einer Dichtung eine Schutzhaube darüber gesetzt. Die Haube aus hitzebeständigem Blech kann erheblich dünner gemacht werden als eine Kiste; die Durchwärmung geht daher auch wesentlich schneller vor sich<sup>1</sup>.

Ein Wagenofen mit Haube ist in Abb. 230 dargestellt. Hauptaugenmerk ist auf die Dichtung zu legen, die in der heißen Zone liegt. Um ein Undichtwerden der Haube ungefährlicher zu machen, wird der Raum zwischen Haube und Ofenwand mit einem Gas gefüllt, das mit dem Schutzgas im Inneren der Haube nicht reagiert, also etwa Stickstoff beim Blankglühen mit

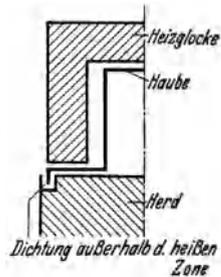


Abb. 231. Dichtung nach Tirre (Blankglühofen Osnabrück-Junker).

Wasserstoff. Dadurch wird gleichzeitig die Haltbarkeit der Widerstände erhöht. Der äußere Ofenmantel muß dann allerdings gasdicht ausgeführt werden. Dichten kann man entweder mit Sand oder aber, wenn man die Dichtung aus der heißen Zone herausverlegt, mit Wasser<sup>2</sup> (Abb. 231). Im letzteren Falle ist es wichtig, die Möglichkeit eines Ausgleichs der Flüssigkeitsspiegel inner- und außerhalb der Dichtungstasse vorzusehen<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> SSW: D.R.P. 495189.

<sup>2</sup> Tirre: D.R.P. 490639.

<sup>3</sup> SSW: D.R.G.M. 1045023.

d) **Schwarzglühöfen** (Abb. 232). Stassinot (ZV 17) hat Schutzhaubenöfen ohne Schutzgas betrieben und gefunden, daß für nicht zu hohe Ansprüche an die Blankheit des Gutes die Vermeidung von Sauerstoffwechsel namentlich während der Abkühlzeit schon zur Erzielung einer blanken Oberfläche ausreicht. Gegenüber den Öfen, bei denen das Gut im Ofen erkalten muß, erzielt er natürlich eine große Stromersparnis (etwa 140 bis 160 kWh/t gegen 180 bis

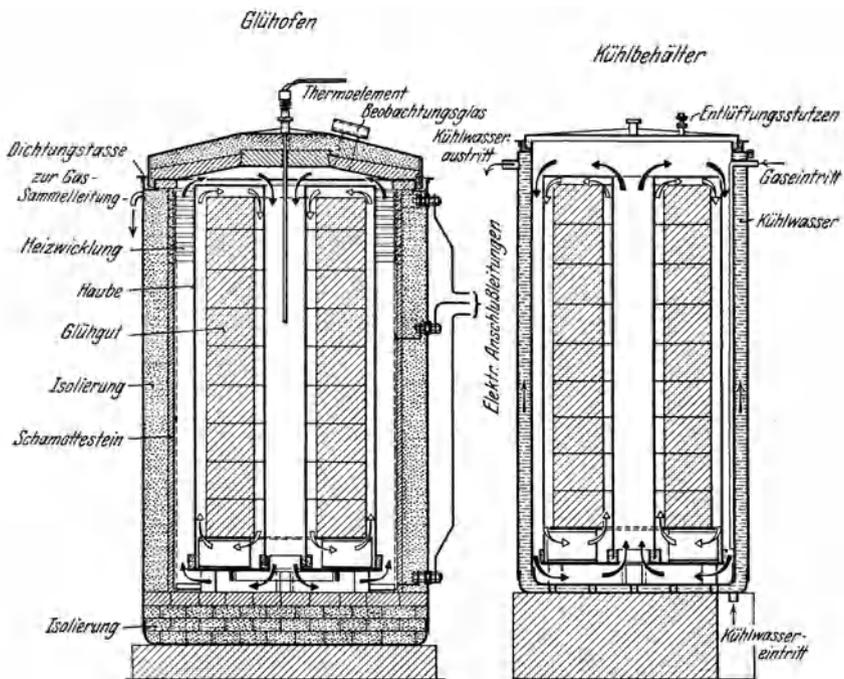


Abb. 232. Schwarzglühofen, (Stassinot, ZV 17).

Beachte die Möglichkeit des Gasumlaufs um das Gut, die sehr dünne Schamotteschicht sowie die Temperaturmessung in der Mitte der Charge. Der Anschluß des Ofens an die Gassammelleitung ermöglicht die Verwendung von Schutzgas zwischen Glühhaube und Heizwiderständen zum Schutz der letzteren. Der Kühlbehälter wird künstlich gekühlt.

220 kWh/t beim Schutzgasglühen). Nach beendeter Erwärmung (die z. B. beim Erhitzen von Bandstahl in zylinderringförmigen Hauben erfolgt, die so aufgestellt sind, daß durch die zentrale Bohrung ein Luftkreislauf stattfinden kann) kommt die Glühhaube in eine Abkühlgrube. Derartige Öfen sind ebenso vorsichtig zu behandeln wie die Öfen mit Schutzgas, da die sich bildenden Öldämpfe explosionsgefährlich sind.

ε) **Grünwald-Brown-Boveri-Ofen**. Da alle Erfahrungen dafür sprechen, daß die Oxydation des Gutes fast ausschließlich während der Abkühlung erfolgt, wird das Gut in einen Glühbehälter eingesetzt, der

ein einseitig wirkendes Ventil besitzt. Während der Erwärmung dehnt sich die Luft in dem Behälter aus und kann durch das Ventil entweichen. Ein Teil des im Behälter vorhandenen Sauerstoffs wird zur Verbrennung der dem Gut anhaftenden Ölreste verbraucht, so daß bei beginnender Abkühlung, wenn sich infolge des äußeren Überdruckes das Ventil schließt, der Behälter praktisch sauerstofffrei ist. Das Gut hängt im Behälter („Grünwaldtopf“), und zwar wird der Boden, auf dem das Gut gestapelt wird, durch Tragstangen an den Deckel des Be-



Abb. 233. Grünwald-Ofen-Anlage mit Abkühlplätzen (BBC, Baden).  
Die Öfen sind im Hintergrund. Vorn die Glühtöpfe in der Wärmeaustauschanlage.

hälters angehängt. Auch der Topf steht nicht im Ofen, sondern hängt am Ofenrand. Dadurch kann der Mantel des Topfes sehr leicht gehalten werden, wodurch Durchwärmungszeit und totes Gewicht verringert werden. Um die in Topf und Gut enthaltene Wärme zurückzugewinnen zu können, werden die Glühtöpfe u. U. in Abkühlgruben gefahren, wo sie im Gegenstrom zu vorbereiteten kalten Töpfen langsam abkühlen. Die Abb. 233 zeigt eine derartige Anlage, bei der eine große Zahl solcher Kühlplätze vorgesehen ist. Der Stromverbrauch beim Grünwaldverfahren beträgt z. B. bei einem Glühofen für 700 mm nutzbaren Durchmesser, 1700 mm Stapelhöhe und einem Durchsatz von 8500 kg

in 24 h ohne und 10000 kg in 24 h mit Vorwärmung etwa 180 kWh/t und mit Vorwärmung nur etwa 150 kWh/t. Die Zahlen beziehen sich auf einen Glühofen für Bandstahl und für eine Glüh­temperatur von 700° C.<sup>1</sup>

§) **Blankglühen über Wasserdampf** (Abb. 234). Das Schema eines solchen Ofens, wie er zuerst in Amerika entwickelt wurde (Kenworthyofen) ist in der Abbildung dargestellt. Die Methode ist für Kupfer und Messing, die in Wasserdampf nicht oxydieren, anwendbar. Das Gut wird auf einen Sockel verladen und dieser in ein Wasserbad versenkt. Darauf fährt der Ofenkörper über das Bad, die Charge wird hochgehoben und gelangt so in den Ofenraum. Von oben wird Wasserdampf

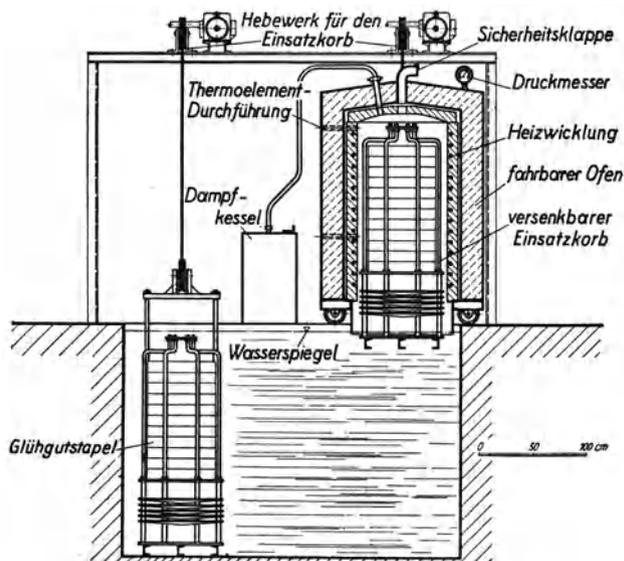


Abb. 234. Blankglühlockenofen (SSW, Berlin).

zugeführt, der die Luft aus dem Ofenraum verdrängt; nach beendeter Glühung kann das Gut ohne Schaden in das Wasserbad abgesenkt werden, der Ofen fährt auf die zweite Seite über das Bad und eine zweite inzwischen vorbereitete Charge kann in den Ofen gehoben werden. Bei einer Chargengröße von etwa 800 kg werden bei Kupfer mit einer Glüh­temperatur von 500° 90 kWh/t verbraucht (Tafel ZV 74); bei einer Charge von ca. 2000 kg (Bänder!) geht der Verbrauch auf rd. 70 kWh/t herunter.

η) **Heddernheimer Blankglühverfahren**<sup>2</sup>. Bei sehr dünnen Kupferdrähten kann während der Kühlperiode Wasserdampf schädlich sein;

<sup>1</sup> Grünewald: D.R.P. 454609 und D.R.P. 477178; ZV 81.

<sup>2</sup> Metallgesellschaft: D.R.P. 499936; BBC: D.R.P. 512173, D.R.P. 524753, D.R.P. 533636.

außerdem besteht die Gefahr, daß er sich kondensiert. In Abänderung des eben beschriebenen Verfahrens soll deswegen während der Kühlperiode Schutzgas in den Ofen eingeleitet werden und nur während der Glühung selbst soll Wasserdampf in den Ofen kommen (Nathusius BV 27), Abb. 235 zeigt einen derartigen Ofen, der im Gegensatz zur Abb. 234 nicht über einem Wasserbad steht.

Dieses Prinzip, statt der Blankglühung nur eine Blankkühlung vorzusehen, hat verschiedene Verwirklichungen erfahren<sup>1</sup>.

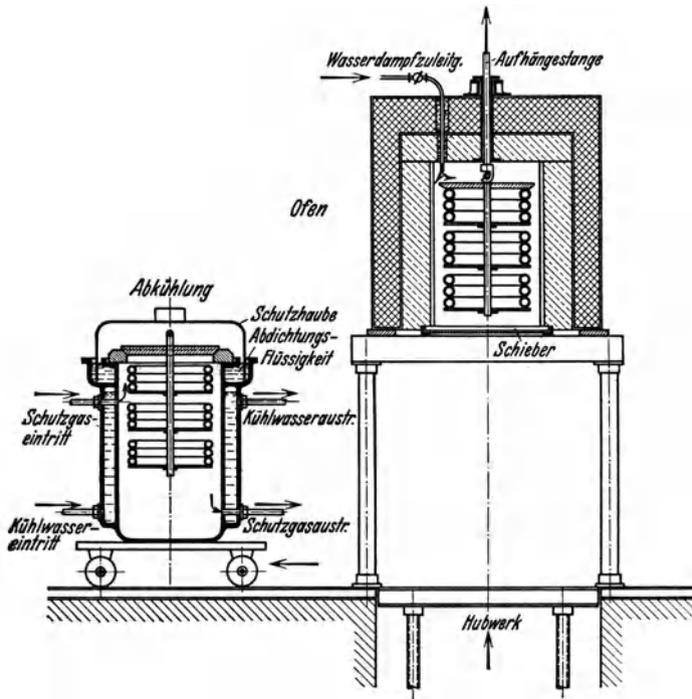


Abb. 235. Blankglühofen für Nichteisenmetalle (BBC, Baden). Glühung in Wasserdampf, Kühlung in Schutzgas.

☞) **Blankglühöfen mit senkbarem Boden** (Abb. 214). Derartige Öfen sind in Amerika in großer Zahl in Betrieb (ZV 82), und zwar ohne die in der Abbildung gezeigte Schutzhaube. Nach beendeter Glühung wird das Gut kurzzeitig durch Luft transportiert und kühlt dann wieder in neutraler Atmosphäre ab. In Amerika sind diese Öfen bis zu einem Fassungsvermögen von 16 t gebaut worden. Der Stromverbrauch soll etwa 250 kWh/t Stahl betragen. — Als Schutzgas findet Wasserstoff Verwendung; sein hoher Preis und die Gefahren, die seine Bedienung

<sup>1</sup> z. B. Tamele ZV 74; Prüfert: D.R.P. 535340; BBC: D.R.P. 524753.

mit sich bringt, waren der Anlaß, nach Ersatzstoffen zu suchen. Man versuchte es mit Stickstoff, der aber vor der Verwendung im Blankglühofen noch von anhaftenden Sauerstoffresten gesäubert werden muß. Es wurde auch eine Mischung von Wasserstoff und Stickstoff vorgeschlagen<sup>1</sup>, man kann diese Mischung unter Umständen durch Spaltung von Ammoniak erhalten. Weiter hat man Alkoholdämpfe allein<sup>2</sup> oder in Mischung mit Wasserstoff (Electrolene ZV 82) als Schutzgas in diesen Öfen angewandt.

### b) Nitrieröfen.

Die Firma Krupp hat unter dem Namen „Nitrierverfahren“ ein Oberflächenhärtungsverfahren entwickelt, das an Sonderstählen durchgeführt wird und auf einer Stickstoffaufnahme an der Stahloberfläche beruht (Fry ZV 84 und Brühl ZV 85). Zur Durchführung

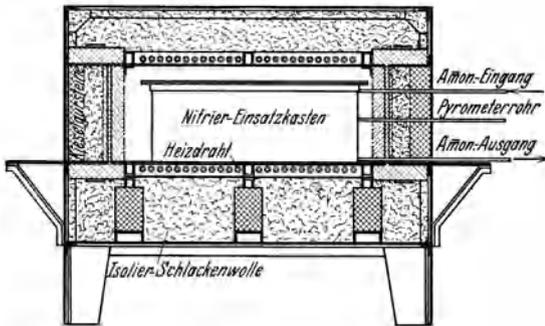


Abb. 236. Nitrierofen (Fr. Krupp & Co., Essen).

wird das Gut in Nitrier-einsatzkästen (Abb. 236) verpackt, in den elektrischen Ofen gebracht und langsam Ammoniak eingeleitet. Man erhitzt bis etwa 500° und läßt dann langsam abkühlen. Als Vorteile gegenüber der gewöhnlichen Einsatzhärtung führt die Firma

Krupp an: größere Härte, geringeren Ausschuß (da das Abschrecken fortfallen kann und dadurch die Gefahr des Verziehens beseitigt wird) und Beständigkeit der Härte bis 500° (gegen 150° bei gewöhnlichem Einsatz). Ein Ofen nach Abb. 236 mit den lichten Maßen 1750 × 1250 × 500 mm<sup>3</sup>, geeignet für einen größten Einsatzkasten von 1500 × 1100 × 350 mm<sup>3</sup> hat einen Leerverbrauch von etwa 7,2 kW. Die Nitrierdauer richtet sich nach der verlangten Nitriertiefe und beträgt z. B. bei einer Tiefe von 0,25 mm rd. 10 h, bei einer Tiefe von 0,50 mm etwa 42 h und bei einer Tiefe von 0,75 mm etwa 100 h.

### c) Kupferlötöfen.

Zum Löten von Eisen mit Hilfe von Kupfer müssen die zu verlötenden Teile völlig sauber und blank sein. Legt man die beiden zu verlötenden Eisenstücke aufeinander und über die Trennfuge einen

<sup>1</sup> Siehe z. B. SSW: D.R.P. 539078; ZV 82 und Cunningham ZV 83.

<sup>2</sup> Erdmann: D.R.P. Anm. E 34921/18c 8.

Kupferstreifen, so wird bei Erhitzung in reduzierender Atmosphäre das Eisen zunächst zunderfrei und beim Schmelzen zieht sich das Kupfer durch Kapillarwirkung in die Trennfuge hinein. So entstehen außerordentlich saubere und haltbare Verbindungen. Das Gut muß aber bei diesem Verfahren auch in reduzierender Atmosphäre erkalten. Für mittlere und große Produktion hat man Fließöfen gebaut, von denen einer in Abb. 237 gezeigt ist (ZV 82). Der hochliegende Ofen von rund 18 m Länge ist nur auf etwa  $\frac{1}{3}$  seiner Länge beheizt, die beiden hinteren Drittel dienen der Kühlung. Das Gut — in dem beschriebenen Falle Eismaschinengehäuse — wird auf Tassen verladen und durch

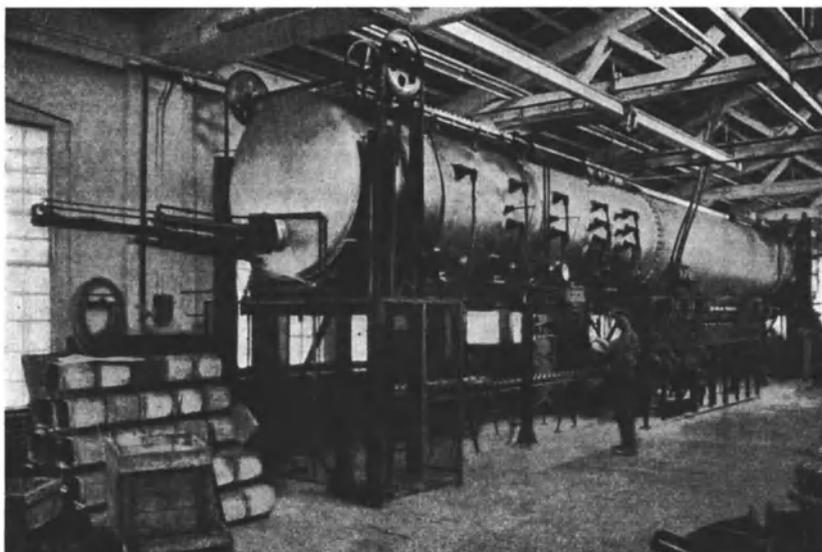


Abb. 237. Kupferlötofen (General Electric Co., Schenectady).

einen am Vorderende des Ofens gelegenen Aufzug in den Ofen hinein gehoben. Durch ein in der Ofenachse arbeitendes Stößel wird dann die Tasse in den Ofen geschoben und das Gut, wie oben (S. 201) beschrieben, im Ofen weitertransportiert. Am Ausgangsende wird die Tasse auf einen zweiten Aufzug geschoben, dieser befördert das Gut wieder bis zum Werkstattflur. Während des Beschickens und Ausbringens der Kästen ist der Ofen kurzzeitig offen, während dieser Zeit brennt das Schutzgas (in den meisten Fällen Wasserstoff) ab und muß dann erneuert werden.

d) Einsatz mit gasförmigen Zementationsmitteln.

Über das Einsetzen in gasförmiger Atmosphäre ist bisher nicht viel bekannt geworden, obwohl an diesem Problem an vielen Stellen ge-

arbeitet wird. Am längsten bekannt ist das Einsetzen mit festen Zementationsmitteln, dann arbeitete man mit flüssigen, wobei man nur eine kleinere Einsatztiefe erzielt; man kam auf einen geringeren Wärmeverbrauch (bedingt durch den Fortfall des langsamen Durchwärmens bis zum Einsatzgut und durch den Fortfall des hohen toten Gewichts). Man glaubt, beim Einsetzen in gasförmigen Zementationsmitteln die gleichen Vorteile erreichen zu können ohne die erwähnten Nachteile. In den elektrischen Öfen, die mit gasförmigen Zementationsmitteln arbeiten, wird das Gut vielfach bewegt, doch scheint dies nicht unbedingt erforderlich zu sein. Das Gas kann dem Ofen entweder als solches zugeführt werden oder es wird im Ofen durch Verdampfen einer geeigneten Flüssigkeit erzeugt. Bei der in ZV 86 und 87 beschriebenen Anlage wird das Gut in Trommeln von 375 mm  $\varnothing$  und 2100 mm Länge eingebracht; die Chargengröße ist etwa 450 . . . 900 kg. Eine Charge von 450 kg kann in ungefähr 4 Stunden auf die Arbeitstemperatur von 950° C gebracht werden und erreicht in weiteren 4 Stunden eine Einsatztiefe von 1,25 . . . 1,50 mm. Bei dem gewöhnlichen Einsatzverfahren benötigt man für dieselbe Tiefe etwa 24 Stunden. Der Anschlußwert des Ofens beträgt 90 kW. Das Schutzgas (es ist in der erwähnten Veröffentlichung nicht näher bezeichnet) wird in flüssigem Zustand bezogen und wird nach Zerstäubung in Luft mit einem Überdruck von etwa 0,7 kg/cm<sup>2</sup> dem Ofen zugeführt.

### 3. Durchziehöfen.

Die Schwierigkeiten, in Muffelöfen gleichmäßig geglühtes Gut zu erhalten, hat zur Ausbildung von Durchziehöfen geführt, die besonders für Draht und Band Anwendung finden. Die geringe Schichtstärke und das Fehlen von Luftschichten zwischen einzelnen Gutteilen läßt eine ungewöhnlich kurze Glühzeit zu. Trotzdem die Öfen also räumlich sehr schlecht ausgenützt sind, sind hohe Wirtschaftlichkeit und außerdem hervorragende Temperaturgleichmäßigkeit gewährleistet.

Durchziehöfen für Metallband; eingebettete Widerstände (S. 194). Die Abb. 238 zeigt einen Längsschnitt durch einen solchen Ofen. Um eine Beschädigung des Bandes auf dem Ofenboden — hitzebeständiges Metall oder keramischer Werkstoff — zu vermeiden, wird das Gut frei hängend durch den Ofen geführt (Tama ZV 63). Dazu muß das Band, das von einer Auflaufhaspel aus durch den Ofen gezogen wird, am freien Ablauf von der Haspel durch eine Bremse gehindert werden. Die Gesamtanordnung ist z. B. von Junker ZV 7 beschrieben.

Durchziehöfen für Metallband mit Auflage. Die Abb. 239 zeigt eine Anlage, bei der hintereinander der schräggelegte Durchziehofen, ein Beizkasten, eine Waschmaschine und ein Trockenofen durchlaufen werden. Das Band gleitet auf dem mit Asbestband belegten

Boden der Muffel<sup>1</sup>. Der Ofen hat eine Länge von 8 m, einen Durchsatz von 625 kg/h und bei einer Bandbreite von 730 mm einen Stromverbrauch von

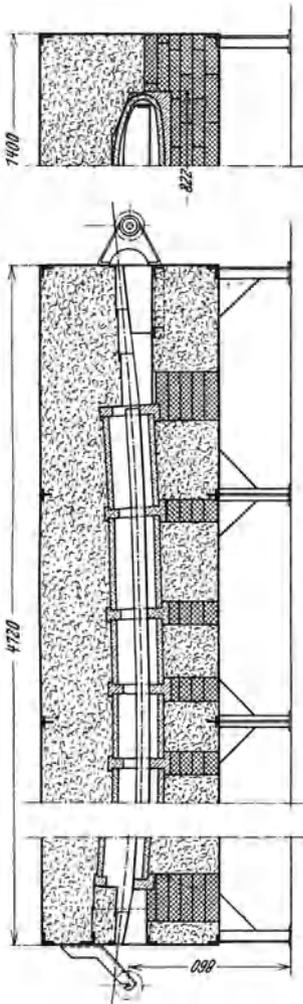


Abb. 238. Messingbanddurchziehofen (Junker G. m. b. H., Lammertorf). Beachte die Anpassung der Muffelform (gebogene Achse) an das durchhängende Band. Gekapselte Heizkörper.

etwa 100 kWh/t. Durch den Belag am Boden werden Verkrazungen des Metallbandes vermieden. Der beschriebene ununterbrochene Arbeitsgang bringt

<sup>1</sup> Mansfeld AG., Eisleben: D.R.P. 464829 und 465883.

Paschkis, Elektroöfen.

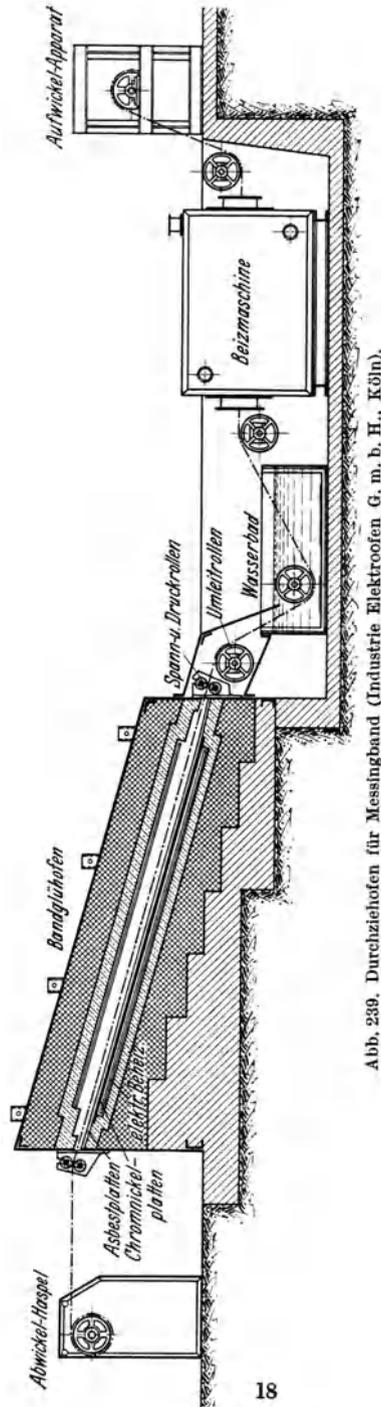


Abb. 239. Durchziehofen für Messingband (Industrie Elektroöfen G. m. b. H., Köln).

eine bedeutende Arbeitersparnis mit sich. Die Heizkörper sind über die Länge des Ofens in Abschnitte geteilt, die unabhängig voneinander geregelt werden können. Da der Ofen geneigt ist, ist die erforderliche Zugkraft nur gering, wodurch das Band trotz der großen Ofenlänge geschont wird (Ruß ZV 88).

In ähnlicher Weise sind Öfen mit einer Sohle aus glattem hitzebeständigem Blech als Auflage für das Metallband ausgeführt worden (Tamele ZV 74).

Metallbanddurchziehöfen mit Stützwalzen (Ruß ZV 88). Diese Öfen stellen eine Mittelform zwischen den beiden zuletzt besprochenen Durchziehöfen dar. Bei Durchziehöfen mit Stützwalzen kann man den Ofenraum niedriger machen als bei Öfen mit frei durchhängenden Bändern und kann außerdem auf das Schrägstellen des

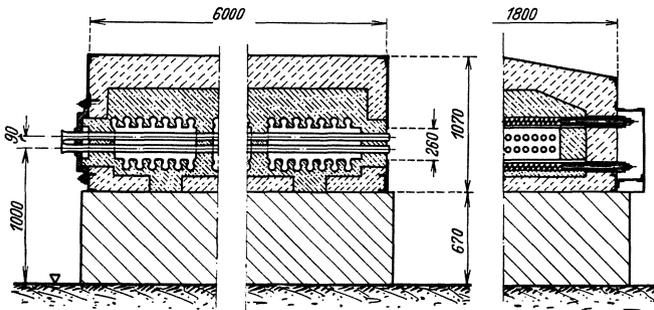


Abb. 240. Drahtdurchziehofen (Gautschi & Brandt, Singen-Hohentwiel).

Beachte die Anordnung der Kernwiderstände quer zur Durchlaufrichtung der Drähte. Dies ermöglicht die Innehaltung einer bestimmten Temperaturverteilung über die Länge des Ofens. Jeder Draht wird in einem eigenen Rohr geführt: keine Gefahr bei Reißen eines Drahtes.

Ofens verzichten. Die Aufrollwalzen aus hitzebeständigem Metall werden von außen angetrieben, und zwar so, daß ihre Umfangsgeschwindigkeit mit der Durchzugsgeschwindigkeit des Bandes übereinstimmt.

Die Stromverbrauchszahlen liegen ähnlich wie bei dem oben beschriebenen Ofen.

Drahtdurchziehöfen. Die besondere technische Schwierigkeit, die bei Drahtdurchziehöfen zu lösen ist, liegt vor allem in der Notwendigkeit, die Drähte in das Härtebad zu bringen, ohne sie mit Luft in Berührung kommen zu lassen; denn bei der geringen Materialstärke der Drähte würde auf einem längeren Wege eine zu starke Abkühlung erfolgen; es könnte Oxydation eintreten und man würde keine einwandfreie Härtung erhalten. Die Abb. 240 zeigt einen Querschnitt eines Durchziehofens für Draht. Zwecks richtiger Ausnützung müssen natürlich eine große Zahl von Drähten gleichzeitig durch den Ofen laufen, und es ist daher üblich, die Drähte einzeln in hitzebeständigen Rohren zu führen; denn bei der Spannung, unter der die Drähte laufen, besteht

natürlich immer die Gefahr, daß einmal ein Draht reißt. Außerdem haften den Drähten oft Ölreste an, deren Verbrennungsprodukte (Kohlenstoffteilchen) sich auf den Heizkörpern ablagern könnten und Kurzschlußgefahr mit sich bringen würden. Schließlich ist eine Berührung zwischen den aus dem Abschreckbad aufsteigenden Dämpfen und den Heizkörpern nicht erwünscht. Die Drähte werden daher meist in den Rohren bis in das Abschreckbad geführt. Die Heizkörper des Ofens können dann in einem normalen luftgefüllten Raum liegen, wie in einem gewöhnlichen Glühofen. Der in der Abbildung gezeigte Ofen für gleichzeitig 24 Drähte in 2 Lagen übereinander hat im Dauerbetrieb einen Verbrauch von 180 kWh/t Stahldraht, bezogen auf einen Drahtdurchmesser von 3,5 mm und einen Durchsatz von 0,45 t/h bei einer Arbeitstemperatur von 850° C.

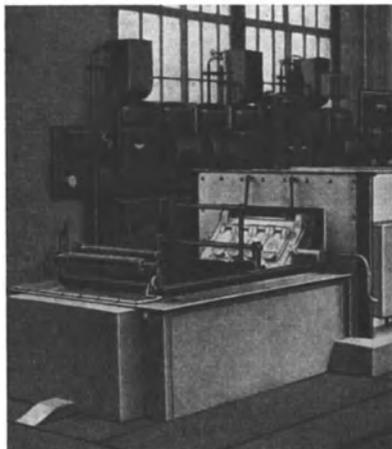


Abb. 241. Drahtdurchziehofen (SSW, Berlin).

Die Abb. 241 zeigt den äußeren Aufbau des Auslaufendes einer ähnlichen Anlage, bei der 12 Drähte einreihig durch den Ofen gezogen werden. Die von der Luft abgeschlossene Überführung in das Abschreckbad ist in der Abbildung deutlich zu sehen. Das Abschreckbad aus Blei dient in diesem Falle gleichzeitig als Anlaßflüssigkeit, wird also dauernd auf 500° gehalten, wobei von den Heizwiderständen nur die Differenz zwischen den Leerverlusten des Bades und der durch die Drähte zugeführten Energie zu erzeugen ist. Bei einem Durchsatz von 0,15 t/h, also  $\frac{1}{3}$  des in Abb. 240 gezeigten Ofens, ist der Verbrauch 300 kWh/t; der höhere Verbrauch erklärt sich aus dem geringeren Durchsatz (Scha u ZV 76).

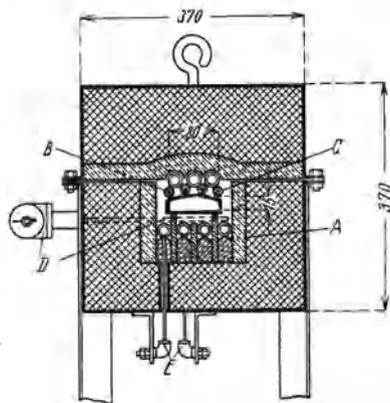


Abb. 242. Stahlbandhärteofen (W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau). Das Stahlband läuft durch eine Metallmuffel, die Rippen *B* trägt; auf den Rippen sind Isolatoren *C* angeordnet, die die Deckenwiderstände unterstützen. Muffel und Heizwiderstände liegen in einer feuerfesten Ausmauerung *A*. Selbsttätige Temperaturregelung *D*. Heizdrahtanschlüsse *E*.

Durchziehöfen für Bandstahl. Ein derartiger kleiner Ofen (Scha u ZV 76) besitzt eine Muffel, die als Heizwiderstand dient und

ihren Strom von einem unter dem Ofengestell befindlichen Niederspannungstransformator erhält. Bei einem Anschlußwert von 10 kW können 25 kg/h Bandstahl auf 850° C erwärmt werden. Die Heizmuffel ist gasdicht, so daß Schutzgas verwendet werden kann. Der Verbrauch beträgt etwa 250 bis 300 kWh/t.

Bei dem Bandstahldurchziehofen (Abb. 242) sind von der Muffel unabhängige Heizwiderstände vorhanden. Der Ofen hat eine Länge von 5 m; der Anschlußwert von 18 kW wird durch 4 selbsttätige Temperaturregler gesteuert. Der Durchsatz ist nur 15 kg/h, daher der Energieverbrauch im Vergleich zu dem vorbesprochenen Ofen wesentlich höher, nämlich etwa 530 kWh/t.

## D. Hochtemperaturöfen.

Die verwendeten Konstruktionen sind denen der Mitteltemperaturöfen sehr ähnlich. Nur verlangt die höhere Temperatur im Aufbau der Wand und der Heizkörper Besonderheiten (vgl. S. 184 und S. 199).

### 1. Schmiedeofen.

Die Abb. 243 zeigt einen Schmiedeofen im Schnitt. Beachtenswert sind die zwei Reihen Deckenheizkörper *C*, die übereinander angeordnet sind; in einer Reihe war die hohe Leistung nicht unterzubringen. Weiter

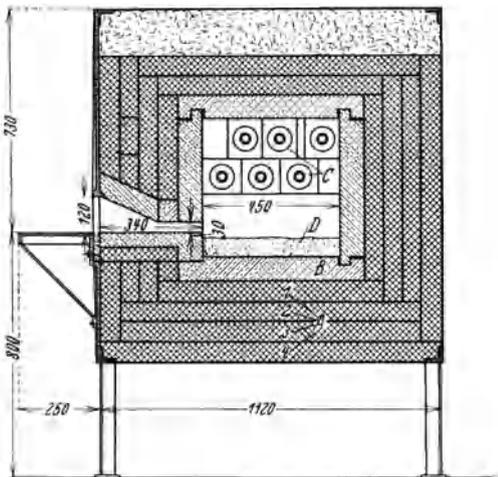


Abb. 243. Schmiedeofen (Junker, G. m. b. H., Lammersdorf) Höchsttemperatur 1400°.

ist der durch die hohen Temperaturen bedingte verhältnismäßig komplizierte Aufbau der Wand bemerkenswert. (Außer der Schamotte *B* verschiedene Schichten *1* bis *4* des Wärmeschutzes *A*). Der Ofen dient Schmiedezwecken, muß daher einseitigständig offenbleiben. Die Öffnung, die als Schlitz ausgebildet ist, muß so klein als möglich gehalten werden, um zu große Wärmeverluste zu vermeiden. Der Boden des Ofens ist mit Kohlegries *D* bedeckt, um eine Oxydation des Gutes zu verhindern.

Die Abb. 244 zeigt einen Schmiedeofen amerikanischer Bauart aus den Werkstätten von Ford mit den Schlitzmaßen 450 × 50 mm und einer Herdtiefe von 250 mm. Bei 1250° C hat der Ofen einen Leerwert von 5 bis 6 kW.

## 2. Ofen mit Schutzatmosphäre.

Für Zwecke der Härtung von Schnellstahl, der bis vor kurzem fast ausschließlich im Salzbad verarbeitet wurde und dabei leicht einer

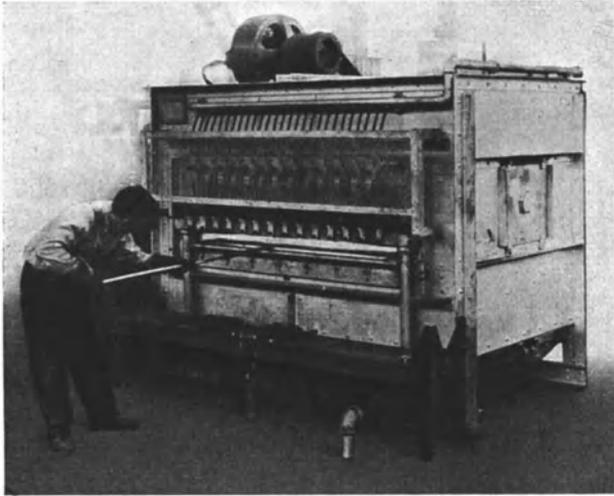


Abb. 244. Schmiedeofen (Holcroft, Detroit). 300 kW. Betriebstemperatur bis 1350°. Da der Ofen 6 Monate ohne Unterbrechung auf Temperatur bleiben soll, sind die Globalheizelemente während des Betriebes auswechselbar.

entkohlenden Wirkung ausgesetzt war, hat sich in Amerika und auch neuerdings in Europa ein Schutzgasverfahren eingeführt. Ein Ofen dieser Art ist in Abb. 245 gezeigt.

In den mit Globalstäben beheizten Ofen wird in der Nähe der Türe Schutzgas eingeblasen. Es wird in einer unterhalb der Türe gelegenen Kammer — dem Verbrennungsraum — durch unvollständige Verbrennung von Leuchtgas erzeugt, und zwar so, daß stets eine gewünschte Menge Kohlenoxyd bzw. Kohlendioxyd vorhanden ist. Gas- und Luftzufuhr können getrennt geregelt werden, und zwar von Hand oder selbsttätig; je nach der Stahlsorte ist ein anderes Mischungsverhältnis von Luft, Kohlenoxyd und -dioxyd erforderlich. Die richtige Mischung der Ofenatmosphäre kann durch einen Orsatapparat oder dgl. geprüft werden (Tour ZV 89)<sup>1</sup>.

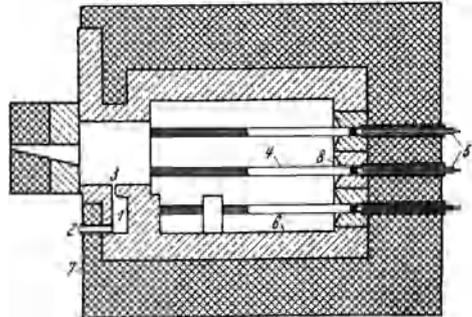


Abb. 245. Prinzip eines Hochtemperatur-Schutzgasofens (Hayes, Providence, R. I.).

1 Verbrennungsraum für Schutzgas, 2 Gaszufuhr, 3 Schlitz für fertiges Schutzgas, 4 Heizstäbe, 5 wassergekühlte Enden hierzu, 6 feuerfeste Ausmauerung, 7 Wärmeschutz, 8 Spezialsteine für Heizstäbe.

<sup>1</sup> Hayes: USA.-Pat. 1724583.

### 3. Unmittelbar beheizte Salzbäder

(unmittelbar beheizte Elektrodenwiderstandsöfen).

Die einzige Art von unmittelbar beheizten Elektrodenwiderstandsöfen, die für Zwecke der Weiterverarbeitung verwendet werden, sind die seit langem bekannten unmittelbar beheizten Salzbäder. Dem Salz wird der Strom durch Elektroden zugeführt. Das Salz (Chlorkalium [KCl], Chlorbarium [BaCl], Gemisch hiervon)<sup>1</sup> überträgt die Wärme auf das Gut und dient gleichzeitig als Schutzmittel gegen Oxydation. Die großen Querschnitte der Bäder in Verbindung mit dem geringen spezifischen Widerstand der Salze machen den Anschluß der Bäder an niedrige Spannungen erforderlich. Alle derartigen Bäder müssen daher über Transformatoren angeschlossen werden und arbeiten mit Spannungen



Abb. 246. Zündelektrode  
(AEG, Berlin.)

Nach beendeter Zündung kann die Zündelektrode aus dem Bad herausgeklappt werden.

von etwa 10 . . . 30 V. Anschluß an Gleichstrom verbietet sich wegen der hierbei unvermeidlichen elektrolytischen Wirkungen. Ist das Gut leitend, so wirkt es selbstregelnd, indem bei Beschickung der Badspiegel erhöht wird; dadurch wird der leitende Querschnitt vermehrt und so die Stromaufnahme gesteigert. Die beiden Hauptschwierigkeiten der Salzbäder sind die Inbetriebsetzung und die Undichtigkeit der Ausmauerung. Dazu kommt noch als technologische Schwierigkeit die Frage der „weichen Haut“.

Was die Inbetriebsetzung anbelangt, so müssen, da das Salz nicht leitend ist, Mittel vorgesehen werden, um das Bad auf die Temperatur zu bringen, bei der das Salz selbst die Energieumsetzung übernehmen kann. Die Abb. 246 zeigt eine noch vielfach im Gebrauch befindliche Vorrichtung<sup>2</sup>, die darin besteht, daß zwei- oder dreipolige Hilfselektroden auf das feste Salz aufgesetzt werden. An die Pole wird ein Leiter, meist ein Stück Kohle, angepreßt, der sich durch den ihn durchfließenden Strom erhitzt und das umliegende Salz schmilzt. Der Vorgang setzt sich fort, bis ein genügend großer Sumpf von Salz geschmolzen ist, um den Wärmebedarf des Mauerwerks und der noch ungeschmolzenen Salzmasse zu decken. Das Aufschmelzen geht recht langsam vor sich, weil das feste Salz ein schlechter Wärmeleiter ist. Eine Steigerung der Energiezufuhr an der Hilfselektrode verbietet sich aber, weil sonst das Salz an dieser Stelle verdampfen würde. (Es sei hier auf die Analogie mit dem Erwärmungsvorgang von Gut in mittelbar beheizten Widerstandsöfen

<sup>1</sup> Je nach der Lage des Verdampfungspunktes KCl bis etwa 880°, BaCl oberhalb etwa 1150° . . . 1350°, Gemische bei dazwischenliegenden Temperaturen.

<sup>2</sup> AEG: D.R.P. 411278, 437696.

hingewiesen, wo, wie weiter oben bemerkt wurde, die Energiezufuhr auch nicht beliebig gesteigert werden kann, weil sonst die Gutoberfläche zu heiß wird.) Die Aufgabe, die Energie während des Anheizvorgangs gleichmäßig über das ganze Salz zu verteilen, versucht man durch Verwendung eines „Zündkäfigs“<sup>1</sup> zu lösen, der die Energie aus dem geschmolzenen Sumpf über das Bad verteilt und sie sogar, bei Ausbildung als Widerstand, in dem Bad selbst erzeugt (Abb. 247). Die Abb. 248 zeigt eine ähnliche Ausführung der Siemens-Schuckertwerke<sup>2</sup>, wobei das Bad mit Hilfe eines Tauchsieders aufgeschmolzen wird.

Der Tiegel dieser Salzbadern ist aus Steinen aufgemauert, die vom geschmol-



Abb. 247. Zündkäfig (AEG, Berlin). Die in der Abbildung sichtbaren Rohre dienen erstens zur unmittelbaren Umsetzung elektrischer Energie in Wärme und zweitens bei gleichzeitiger Verwendung einer klappbaren Zündelektrode zum Ableiten der Wärme aus dem geschmolzenen Teil in den noch ungeschmolzenen Teil des Salzes.

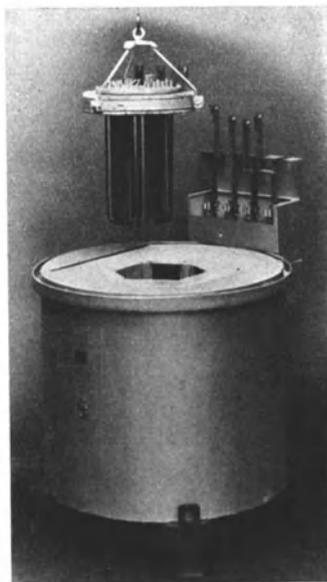


Abb. 248. Tauchsieder zum Anheizen von Salzbadern (SSW, Berlin). Über dem Salztiegel ist hängend der Anheizwiderstand gezeigt. In den einzelnen Rohren befinden sich Widerstände, die das Aufheizen des Salzes übernehmen.

zenen Salz angegriffen werden. Eine Undichtigkeit der Ausmauerung, besonders an den Fugen, wo der Mörtel ausgewaschen wird, ist daher unvermeidlich; die Isolierschicht wird vor allem innen von Salz durchsetzt werden. Man kann deswegen nicht mit hochwertigen Isolierstoffen arbeiten und hat daher, abgesehen von den Wärmeverlusten durch Strahlung an der freien Badoberfläche, auch mit verhältnismäßig hohen Verlusten an der Mantelfläche zu rechnen. Um diesen Nachteilen aus dem Wege zu gehen, hat man versucht, mit Metalltiegeln zu arbeiten, die selbst als eine Elektrode dienen, während

<sup>1</sup> AEG: D.R.P. 455 696.

<sup>2</sup> SSW: Schweiz. Pat. 138 138.

die zweite Stromzuführung mit Hilfe einer Tauchelektrode erzielt wird. Diese zweite, oft zentral angeordnete Elektrode dient gleichzeitig zur Temperaturregelung, indem man ihre Eintauchtiefe ändert. Die In-

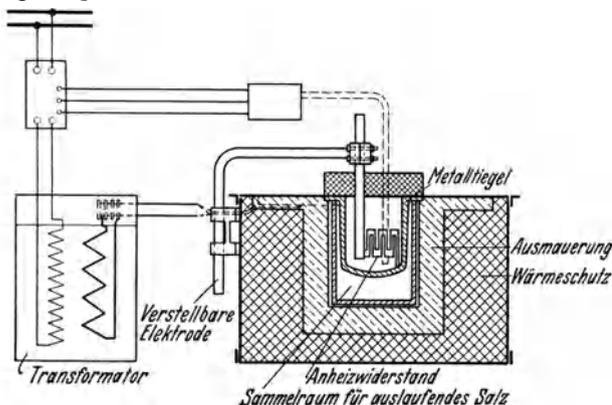


Abb. 249. Unmittelbar beheiztes Salzbad mit Metalltiegel (Bellis, Heat treating Co., Branford Conn.).

betriebsetzung erfolgt bei dieser Art von Bädern durch einen Eintauchwiderstand, der von der Elektrode zur Tiegelwand geht (Abb. 249)<sup>1</sup>. Da der Tiegel an der Außenwand von Wärmeschutzstoffen bedeckt ist und sich auf der Innenseite Salz befindet, soll seine Haltbarkeit sehr groß sein. Jedenfalls kann man den Metalltiegel richtig isolieren.

Ein ähnlicher Gedanke liegt dem Ofen nach Abb. 250 zugrunde, bei dem drei Tauchelektroden *B* in einen Metalltiegel *A* ragen; dieser selbst nimmt nicht an der Stromzuführung teil.

Die technologischen Schwierigkeiten beruhen in erster Linie darauf, daß die zu den Bädern verwendeten Salze einer Alterung unterworfen sind. Arbeitet man mit gealterten Salzen, so wirkt das Bad entkohlend auf das Gut (Rapatz ZV 90 und Kjerman ZV 91). Das

Gut nimmt dabei eine „weiche Haut“ an, die Oberfläche des Gutes ist nicht richtig gehärtet. Dies ist bei hochwertigem dünnem Gut (z. B. Werkzeug) äußerst störend. Man hat versucht, Salzbad mit Kohle-

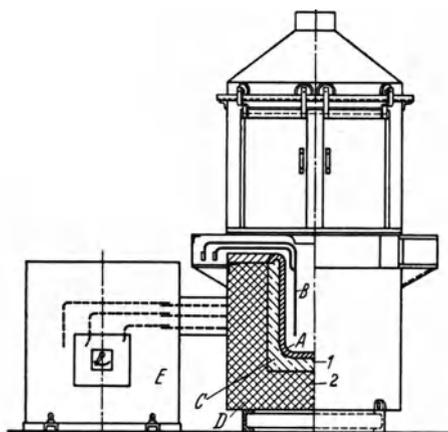


Abb. 250. Salzbad mit Metalltiegel (SSW, Berlin).  
A Metalltiegel, B Elektrode, C feuerfeste Ausmauerung, D Wärmeschutz, E Transformator.

Gut nimmt dabei eine „weiche Haut“ an, die Oberfläche des Gutes ist nicht richtig gehärtet. Dies ist bei hochwertigem dünnem Gut (z. B. Werkzeug) äußerst störend. Man hat versucht, Salzbad mit Kohle-

<sup>1</sup> Bellis: Engl. Pat. 347238.

elektroden zu bauen, die durch Abgabe von Kohlenstoff der Entkohlung des Guts entgegen arbeiten sollen (Uhlendorff, Berlin).

## E. Induktionsöfen für Weiterverarbeitung.

Der Vorteil der Induktionsheizung, die Erzeugung der Wärme im Gut, scheint zunächst dieses Erwärmungsverfahren als besonders geeignet für Zwecke der Weiterverarbeitung zu machen. Dennoch sind derartige Öfen nur ganz vereinzelt gebaut worden.

Das Prinzip der induktiven Erwärmung ist wiederholt dargestellt worden, und es kann daher darauf verzichtet werden, hier eine Erläuterung zu wiederholen. Nur soviel sei gesagt, daß jeder Ofen als Transformator aufzufassen ist, dessen Sekundärwicklung durch das Gut gegeben ist, während die Primärwicklung durch die Erregerspule gebildet ist. Man spricht von eisengeschlossenen und eisenlosen Öfen, je nachdem, ob der „Transformator“ Eisenschluß hat oder nicht. Bei eisenlosen Öfen wird die in der Spule freigemachte Energie mit um so besserem Wirkungsgrad ausgenützt, je vollkommener das Gut die Querschnittsfläche der Spule ausfüllt. Es ist also klar, daß man die Spulenform dem Gut anpassen muß. Wirtschaftlichkeit wird nach diesem Prinzip demnach nur zu erwarten sein, wenn große Mengen gleichartigen Guts in einer Spule erwärmt werden sollen, so daß sich die Amortisationsquote auf eine große Produktion verteilt. Bei eisengeschlossenen Öfen muß das Gut einen geschlossenen ringförmigen Stromkreis bilden, der den Eisenkern umschließt.

Die Anwendung derartiger Induktionserwärmung ist z. B. von Tama beschrieben (ZV 63), der über Versuche zur Glühung von Bandringen auf diesem Wege berichtet. Die Versuche führten zwar zu einem technisch einwandfreien Ergebnis, doch bot die Ausführung wirtschaftlich keine Vorteile gegenüber der mittelbaren Widerstandsbeheizung. Die unklaren Berührungsverhältnisse zwischen den einzelnen Gängen der Ringe brachten in das Verfahren eine zu starke Unsicherheit, so daß es wieder aufgegeben wurde. Es sind mancherlei Versuche bekannt geworden, das Verfahren umzugestalten: Man hat eisengeschlossene Öfen verwendet, bei denen die Ringe über den Eisenkern geschoben wurden. Weiter hat man versucht, die Oberfläche des Bandes durch einen Überzug zu isolieren, so daß eine stromführende Berührung zwischen den einzelnen Gängen ausgeschlossen ist. Bisher wurde jedoch von keiner Stelle über eine industrielle Anwendung solcher Öfen berichtet.

Ebenso scheint die Erwärmung von Bolzen im Induktionsfeld bisher nicht über das Versuchsstadium hinausgelangt zu sein.

Dagegen wurden induktiv erhitzte Bäder für Zwecke der Weiterverarbeitung schon praktisch angewendet (siehe Tama ZV 63). Ein

einphasiger eisengeschlossener Induktionsschmelzofen mit vertikaler Schmelzrinne (Ajax-Wyattofen) wird mit oben offenem Vorratsbehälter betrieben; die Messingschmelze ist zur Verhütung von Abbrand mit Borax bedeckt. In das Bad werden vorher gesäuberte Fahrradrahmen getaucht, die durch das flüssige Messing verlötet werden. Der Verbrauch beträgt etwa: 400 kWh für 240 Rahmen; 7 Lötungen je Rahmen. Die Leerverluste betragen 8,5 kW (hierin ist die Leistung für einen Ventilator zur Kühlung der Primärspule mit 0,5 kW enthalten).

Schließlich seien Versuche erwähnt, Bänder im Durchziehverfahren induktiv zu erhitzen.

Man findet Patentanmeldungen auf sehr viele Anwendungen der Induktionserwärmung, die offensichtlich noch nicht einmal in das Versuchsstadium gelangt sind, geschweige denn, daß sie irgendwo zur industriellen Verwendung gekommen sind.

Zum Schluß sei noch eine indirekte Induktionserwärmung für Weiterverarbeitung erwähnt. Es dreht sich um die bereits oben genannte Fortbildung des Systems Ugine Infra (siehe S. 248). Die neueren Öfen dieser Firma haben eine Metallmuffel, um die eine Erregerwicklung angebracht ist. Als Werkstoffe für die Muffeln werden verschiedene Legierungen verwendet, die bei jeweils anderen Temperaturen ihren Umwandlungspunkt haben. Im Augenblick, da die Muffel den Umwandlungspunkt erreicht, sinkt die Leistungsaufnahme auf einen Bruchteil der ursprünglichen, wenn, wie es geschieht, auf Nachregelung der Spannung verzichtet wird. Die Muffel hält sich demnach dauernd selbst auf einer bestimmten Temperatur. Die Konstruktion beabsichtigt, dadurch auch die Temperatur des Gutes zu regeln. Dies ist natürlich nicht völlig zu erreichen, da die Wärmeübertragung auf das Gut — ebenso wie bei den sonst in diesem Buch beschriebenen Widerstandsöfen — durch Strahlung (man könnte sogar auch hier die Konvektion zu Hilfe nehmen) erfolgt. Die Gleichmäßigkeit der Durchwärmung wird also von allen oben besprochenen Punkten abhängen, aber nicht nach den Gesetzen der Induktionserwärmung erfolgen, da ja eine unmittelbare induktive Erwärmung des Gutes durch die als Schirm wirkende Muffel hintangehalten wird. Der Ofen ist z. B. von Perrin und Sorel beschrieben (ZV 92 und 93).

## F. Gesichtspunkte zur Ofenauswahl.

Die meisten der gezeigten Ofenformen können für die verschiedensten Zwecke verwendet werden. Eine vollständige Übersicht über Anwendungsmöglichkeiten läßt sich nicht geben. Dagegen sollen einige Gesichtspunkte mitgeteilt werden, die bei der Auswahl einer Ofenform für einen bestimmten Zweck in Betracht kommen können. Diese selbst-

verständlich auch nicht vollständige Übersicht soll vor allem zeigen, wie vielgestaltig die Überlegungen sein müssen, die bei der Auswahl eines Ofens gemacht werden können und sollen.

Die erste Frage, die man sich bei der Wahl eines Ofens für einen bestimmten Zweck wird stellen müssen, ist die, ob Fließbetrieb oder absatzweise Beschickung vorzusehen sein wird. Betriebliche Momente werden hier in erster Linie berücksichtigt werden müssen. Ferner ist zu bedenken, daß, wenn ein Zeit-Temperaturverlauf vorgeschrieben ist (wenn also das Gut langsam erwärmt und wieder abgekühlt werden soll), auch bei Fehlen betrieblicher Vorteile der Fließbetrieb vermutlich günstiger arbeiten wird, weil bei absatzweiser Beschickung die Ofenwand bei jeder Charge Wärme speichert und wieder entspeichert werden muß. Auch in Fabriken, die nicht auf Fließbetrieb eingestellt sind, werden Fließöfen Bedeutung haben können, wenn man durch sie die Dauer der Erwärmung sicherstellen kann. Soll dagegen das Gut schnell erwärmt und in heißem Zustand dem Ofen entnommen werden, so ist absatzweise Beschickung, vom wärmetechnischen Standpunkt aus gesehen, dem Fließbetrieb ebenbürtig und entschieden werden in diesem Falle nur die betrieblichen Vorteile.

Die zweite Frage ist die nach unterbrochenem oder ununterbrochenem Betrieb, wodurch Wirtschaftlichkeit und Ofenform stark beeinflußt werden. Ununterbrochener Betrieb bedeutet:

1. Kleinere Öfen; daher kleinerer Kapitaldienst und Wärmeverbrauch.
2. Meist höhere Löhne; Nachtarbeit mit allen ihren Nachteilen.
3. Ermäßigung des Strompreises (Nachtstromrabatt, höhere Benutzungsstundenzahl). S. S. 155.

Sinngemäß wird ebenso die Frage des Betriebs außerhalb der Spitzenzeiten und des Betriebs als „Puffer“ zu prüfen sein: bei letzterem wird der Ofen (durch entsprechendes Zu- und Abschalten) zum Ausgleich der Leistung des Betriebes auf einen konstanten Wert verwendet. In diesem Fall wird man den Ofen nur sehr schwer als Fließofen ausbilden können.

Die dritte Frage ist die nach der Art der Beschickung. Über die Auswahl der Transporteinrichtung ist oben (S. 213) das Nötige gesagt worden. Es bleibt die Frage nach der Ofenform bei Öfen ohne Beschickungseinrichtung. Hierzu ist zu sagen, daß Öfen mit horizontaler Öffnungsebene wärmewirtschaftlich vorteilhaft sind, wenn die Chargendauer nicht zu kurz ist. Die Auswechslung des Gutes dauert hier aber im allgemeinen etwas länger als bei Öfen mit vertikaler Öffnungsebene: wird das Gut sehr oft gewechselt, so wird dieser Zeitverlust, der auch einen Wärmeverlust bedeutet, stark ins Gewicht fallen. Dreht es sich dagegen um langandauernde Erwärmungsvorgänge, so wird die Herabsetzung der Leerverluste (z. B. bei Tieföfen) den Ausschlag geben.

Die vierte Frage, die man stellen sollte, ist die nach der erforderlichen Reserve. Wenn eine gleichwertige Reserve für jeden Ofen vorhanden sein muß, so wird, weil man bei den Amortisationskosten den doppelten Betrag einsetzen muß, sich der Bau kostspieliger Fließöfen oft verbieten.

Die fünfte Frage ist die nach der Bedeutung der Leerverluste. Diese spielen bei Öfen, die einen großen Durchsatz haben, eine geringere Rolle als bei Öfen, die in Bereitschaft stehen, da der prozentuale Anteil der Verluste auf die Einheit des Ausbringens bei den letzteren wesentlich größer ist. In welcher Weise dies die Auswahl z. B. der Ofenform berühren kann, sei durch folgenden Hinweis erläutert: Bäder (Salz- oder Bleibäder) haben bei gleichem Nutzraum meist erheblich höhere Verluste als gewöhnliche Kammeröfen. Auf der anderen Seite gewährleisten Bäder eine schnellere Durchwärmung des Gutes. Man wird also, wenn vom metallurgischen Standpunkt aus keine besonderen Vorschriften gemacht sind, in Härtereien für Produktion Bäder, für Reparaturen (wobei die Öfen meist den ganzen Tag leer in Bereitschaft stehen müssen) dagegen Kammeröfen verwenden.

## Nachwort.

Es ist wiederholt hervorgehoben worden, daß das in diesem Buch behandelte Gebiet technisch noch in keiner Weise abgeschlossen ist. Es wäre eine undankbare Aufgabe, zu prophezeien, in welcher Richtung die Entwicklung gehen wird; dennoch ist es nötig, sich eine gewisse Übersicht hierüber zu beschaffen. Im folgenden ist dieses versucht. Dabei soll unterschieden werden zwischen der Fortentwicklung bestehender Konstruktionen und der Entwicklung zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

### 1. Fortentwicklung der bestehenden Konstruktionen.

#### a) Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.

Eines der schwerwiegendsten Hemmnisse der Einführung elektrischer Öfen für Weiterverarbeitung ist die nicht in allen Fällen ausreichende Wirtschaftlichkeit. Ihrer Verbesserung, der besonderes Augenmerk zu widmen ist, dienen zunächst alle Maßnahmen zur Wärmersparnis. Diese kann erzielt werden durch:

- Verringerung der Wärmeverluste und
- Verringerung der Nutzwärme.

Die Verluste wiederum werden (bei gleichem Durchsatz) verringert werden können durch Herabsetzung der Wärmeabgabe der Ofenwände je Zeiteinheit (Leerverluste) und durch Verkürzung der Zeit, während der die Verluste auftreten (Durchwärmungszeit). Die Herabsetzung der

Leerverluste wird einmal konstruktive Maßnahmen verlangen (äußerste Beschränkung der Wärmekurzschlüsse, Möglichkeit des Auskommens mit kleinem Schutzabstand, ohne die Betriebssicherheit zu verringern) und von einer Verbesserung des Materials abhängen. Die Möglichkeit, die Ofeninnenwand statt aus Schamotte aus Isoliermaterial zu bauen, wird die Verluste, die durch Schamotte entstehen, beseitigen; bei höheren Temperaturen, bei denen die Schamotte nicht nur aus Festigkeitsgründen angewendet wird, sondern auch, um die Temperatur an dem Isoliermaterial herabzusetzen, wird wieder eine Verbesserung der Wärmeschutzstoffe helfen müssen, deren Gebrauchsgrenze höher getrieben werden muß, um die erforderliche Schichtstärke der Schamotte dadurch zu verringern (Paschkis ZV 13). Damit wird gleichzeitig auch die Speicherwärme vermindert, und dadurch werden die Verluste bei unterbrochenem Betrieb verkleinert.

Die Durchwärmungszeit beeinflußt die Wirtschaftlichkeit in zweifacher Beziehung: Einmal werden bei kürzerer Durchwärmungszeit für einen vorgeschriebenen Durchsatz die Beschaffungskosten des Ofens kleiner und dann werden die Leerverluste verringert. Zu kürzerer Durchwärmungszeit führt erstens eine entsprechende Schichtung des Gutes im Ofen (um die für die Durchwärmung maßgebende Abmessung zu verringern) und zweitens die Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeübergangs. Im Sinne der „Schichtung“ geht die Entwicklung der Durchziehöfen. Bisher ergeben sie annähernd den gleichen Stromverbrauch wie andere Öfen für den gleichen Zweck; ihr Vorteil liegt vorwiegend in der hervorragenden Gleichmäßigkeit der Durchwärmung. Um ihre Wärmewirtschaft zu steigern, wird es nötig sein, höher belastbare Heizwiderstände zu bekommen, was vor allem durch Materialfortschritte erfolgen kann. Zugleich muß aber auch die Regeltechnik verbessert werden, um bei einem plötzlichen Ausbleiben des Gutes (man denke z. B. an das Reißen des Drahtes oder Bandes im Ofen) die hochbelasteten Widerstände nicht zu gefährden. Bei dem gegenwärtigen Stand der Regeltechnik würde infolge zu schlechter Charakteristik des Fühlorgans die Ausschaltung des Ofens im allgemeinen nicht schnell genug erfolgen. Eine Verringerung der für die Durchwärmung maßgebenden Abmessung (Schichtung) können auch die Öfen mit Relativbewegung der Gutteile gegeneinander herbeiführen (Entwicklung der Trommelöfen). Für viele Erwärmungsaufgaben werden sich Durchziehöfen und Trommelöfen oder dgl., überhaupt besondere Schichtung des Gutes, verbieten. Für diese gewinnt die Frage der Wärmeübertragung ganz besondere Bedeutung.

Die Verbesserung der Wärmeübertragung kann durch Erhöhung der Wärmeübergangszahl und durch besondere Gestaltung der Oberfläche, sei es des Gutes, sei es des Ofens, erfolgen. Man kann die Wärme-

übergangszahl durch Konvektion erhöhen. Die Einführung der Luftbewegung, auch für Öfen höherer Temperaturen, als für die sie bisher verwendet wurde, ist eine Lebensfrage für den Widerstandsofen. Dann wird zweifellos die Verwendung von Bädern für Zwecke der Wärmebehandlung noch ausgedehnt werden müssen, was aber erfordert, daß das Wannenmaterial und vor allem der Schutz der Heizwiderstände gegen herausdringende Badflüssigkeit verbessert und die Wärmeverluste herabgesetzt werden. — Eine Erhöhung der Wärmeübertragung durch Strahlung wird zunächst eine gewisse Grenze nicht übersteigen können, ohne die Gefahr einer Überhitzung der Oberfläche des Gutes mit sich zu bringen. Die Versuche, zu Beginn der Erwärmung mit hoher Übertemperatur zu arbeiten und mit fortschreitender Durchwärmung die Übertemperatur des Ofens zu verringern, werden auszubauen und vor allem durch Regelung automatisch zu gestalten sein.

Die Erzielung von Ersparnissen im Wärmeverbrauch durch Verringerung der Nutzwärme kann durch weitestgehende Verwendung von Wärmerückgewinnungsanlagen verwirklicht werden. Die Errichtung von Öfen, die nach diesem Prinzip arbeiten, wird neben der Verbesserung des Wärmeübergangs ausschlaggebend für das weitere Vordringen der Elektrowärme sein. Selbstverständlich können beide Maßnahmen auch bei Brennstofföfen getroffen werden. Aber mit der Verringerung der Wärmekosten steigt die Bedeutung der Nebenkosten in der Wirtschaftlichkeitsberechnung, und diese sind für den Elektroofen in sehr vielen Fällen niedriger als für den brennstoffbeheizten Ofen.

Maßnahmen zur Verringerung der Neben- und Lohnkosten. Unter den Nebenkosten nehmen die Kapitaldienstkosten (Amortisation und die Verzinsung der Beschaffungskosten) einen großen Platz ein. Eine Verbilligung der Öfen würde zweifellos ihre Einführung sehr erleichtern. Sie wird sich erzielen lassen durch Normung von Einzelteilen, ähnlich wie in diesem Buch von dem amerikanischen Trockenofenbau berichtet, sowie durch systematische Entwicklungsarbeit. Durch weitere Vervollkommnung der Automatik werden sich sonstige Nebenkosten und Lohnanteile zweifellos in vielen Fällen ermäßigen, ohne daß hierüber Allgemeingültiges gesagt werden könnte.

#### b) Erhöhung der Betriebssicherheit.

Die Erhöhung der Betriebssicherheit ist in erster Reihe eine Materialfrage; ihr wird vor allem eine Entwicklung des Widerstandsmaterials dienen müssen. Bei einem großen Teil der in Betracht kommenden Erwärmungsaufgaben ist man mit dem Widerstandsmaterial hart an der Grenze seiner Haltbarkeit, so daß schon ein kurzes Versagen der Regelung die Temperatur zu hoch treiben kann und die Widerstände gefährdet. Aber auch eine Verbesserung der sonstigen Baustoffe (Wärme-

schutzmaterial, hitzebeständige Metalle für Konstruktionszwecke) könnte noch viel zu einer Erhöhung der Betriebssicherheit beitragen: bei den hitzebeständigen Metallen vor allem eine Erhöhung der Kriechfestigkeit.

Die Meß- und Regelschaltungen werden noch fortgebildet werden müssen, um auch bei gelegentlichem Versagen einzelner Apparate nicht die ganze Anlage zu gefährden.

Der Bau von im Betrieb auswechselbaren Widerständen steht noch ganz am Anfang der Entwicklung.

Wesentlich für die Erhöhung der Betriebssicherheit ist weiter, vor allem für Mitteltemperaturöfen, die Frage des Zunderschutzes. Diese spielt besonders für die Boden- und unten liegenden Seitenwiderstände eine Rolle. Zur Vervollkommnung des Zunderschutzes werden die Herdplatten weiter entwickelt werden müssen. Zur Zeit hat man die Wahl zwischen solchen aus Walzmaterial, die dünn ausgeführt werden können und so eine geringe Übertemperatur der Bodenwiderstände ergeben, und gegossenen, die größere Sicherheit gegen Verziehen bieten. Herdplatten aus Walzmaterial neigen bei Beschickung mit kaltem Gut, wie oben (S. 242) erwähnt, zum Werfen, wodurch die Beschickung erschwert wird und die Widerstände zum Teil freigelegt werden, so daß diese gegen Berührung und gegen Zunder nicht mehr geschützt sind. Gegossene Herdplatten müssen verhältnismäßig stark ausgebildet werden und stellen dann einen erheblichen Widerstand für den Wärmefluß von den Bodenheizkörpern auf das Gut dar. Außerdem neigen sie oft zum Springen, wenn sie mit kaltem Gut beschickt werden.

Die Neuentwicklung wird einen Mittelweg suchen müssen, der die beiden Nachteile zu vermeiden gestattet. Ansätze zu einer solchen Entwicklung zeigen sich bei der Ausbildung von Platten, die in einzelne kleinere Stücke aufgelöst werden. Jedes dieser Stücke erhält einen umgebördelten Rand, der in eine Sandtasse greift. Die einzelnen Sandtassen verbinden die nebeneinander liegenden Stücke der Herdbedeckung. Durch die Verringerung der Abmessungen der einzelnen Stücke der Herdbedeckung wird trotz Verringerung der Stärke eine große Sicherheit gegen Verziehen erreicht.

#### c) Verbesserungen sonstiger Art.

Die Erkenntnis über die bei der Regelung auftretenden wahren Temperaturunterschiede und über die Unterschiede zwischen mehreren scheinbaren Kurven, die mit verschiedenen Meßgeräten aufgenommen sind, wird zweifellos zu einer Umstellung der Temperaturmeßanlagen führen. Darüber hinaus wird aber auch die Temperaturregelung selbst Fortschritte machen müssen, und zwar in der Richtung der fließenden Regelung statt der Stufenregelung. Dabei ist an eine Entwicklung der

Röhrentechnik gedacht. Doch ehe noch diese Entwicklung ausreichend weit vorgeschritten ist, wird durch Ausgestaltung der Schaltmittel erreicht werden müssen, daß der Wärmeüberschuß mit zunehmender Durchwärmung des Ofens bzw. des Gutes in mehreren Stufen vermindert wird. Die entsprechenden Schaltungen werden wesentlich vereinfacht werden müssen, um den betreffenden Anordnungen eine weitere Anwendung zu sichern.

## 2. Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

Die Erschließung neuer Anwendungsgebiete für Elektroöfen für Weiterverarbeitung kann vorwiegend durch zwei Mittel erfolgen: 1. durch gesteigerte Anwendung der Induktionsheizung und 2. durch Steigerung des Temperaturbereichs für mittelbar beheizte Widerstandsöfen. Der erste Weg — die breitere Anwendung der Induktionsheizung — ist zunächst abhängig von der Schaffung von Temperaturmeß- und Regelmöglichkeiten für diese Öfen. Diese Regelung ist heute noch so schwierig, daß sie als praktisch ungelöst gelten kann. Eine weitere Erschwerung der Einführung von induktiver Erwärmung für Weiterverarbeitung ist der hohe Preis für die Frequenzumformer. Jede Verbilligung auf diesem Gebiet ist der Einführung der Induktionsheizung außerordentlich dienlich.

Eine Steigerung des Temperaturbereichs für Widerstandsöfen erfordert Heizwiderstände für höhere Temperaturen. Die Entwicklung kann in der Richtung einer Verbesserung der nichtmetallischen Stabwiderstände, weiter in der Schaffung neuer Metallegierungen und schließlich im Auffinden völlig neuer Widerstandsformen erfolgen. Über Arbeiten an der ersterwähnten Aufgabe ist, soweit der Verfasser weiß, bisher nichts bekannt geworden. Die zweite Aufgabe sucht man z. B. mit Hilfe von Molybdänwiderständen zu lösen, wobei das Molybdän in einer neutralen Atmosphäre glühen muß, dann durch Verwendung von Legierungen aus hochoxydationsbeständigen Metallen. Die Abb. 251 zeigt einen mit Molybdänheizelementen (untere Kammer) ausgerüsteten Ofen. Die Widerstände aus Molybdän sind in einen aus zwei keramischen Rohren gebildeten Zylinderring eingebaut; der Zylinderring wird von Methylalkoholdämpfen durchströmt. Der Methylalkohol wird in einem als Schutzgaserzeuger bezeichneten Verdampfer in Kohlenoxyd und Wasserstoff gespalten. Die Verdampfungsprodukte dringen nach Verlassen des Heizraums in die Ofenwand; der äußere Ofenmantel ist gasdicht geschweißt und gestattet nur durch ein Röhrchen das Entweichen der Verbrennungsprodukte. Man erreicht in solchen Öfen Temperaturen bis 1400°. Als Beispiel für die Versuche, die dritte Aufgabe zu lösen,

seien die Öfen von Trümpler genannt<sup>1</sup>. Er formiert Heizkörper dadurch, daß er Pulver aus leitendem Material, z. B. Kohlepulver, in Rotation versetzt (etwa in einer Trommel), wobei sich das Material durch Fliehkraft am Ofenmantel absetzt. Dann wird entweder (z. B. bei chemischen Reaktionen) das Gut während der Rotation in den Ofen gebracht oder der Ofen wird unter fortwährender Rotation leer bis zur Sinterung des Widerstandsmaterials erhitzt, so daß er nur zur

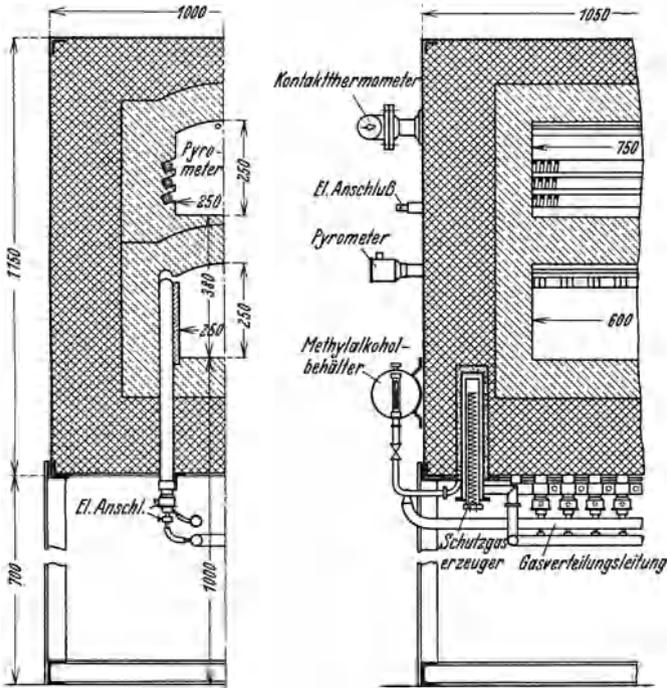


Abb. 251. Molybdänbeheizter Ofen (W. C. Heraeus G. m. b. H., Hanau). Über der unteren molybdänbeheizten Kammer ist ein Vorwärmeraum mit üblicher Chromnickelbeheizung vorgesehen.

Formierung von Heizkörpern dient. Die Heizkörper können dann bei Stillstand in dem „Formierofen“ oder an anderer Stelle verwendet werden.

Weiter ist für eine Steigerung des Temperaturbereichs für Widerstandsofen die Herstellung neuer Wärmeschutzmittel nötig.

Die heute bekannten Wärmeschutzsteine würden — um die Ofentemperatur auf eine für die Steine unbedenkliche Temperatur herabzusetzen, eine so starke Schicht aus feuerfestem Material (Schamotte) bedingen (S. 48), daß dadurch die Wärmewirtschaft des Ofens leiden würde. Viele Anwendungsgebiete, die hohe Temperaturen erfordern, würden dadurch dem Widerstandsofen verschlossen bleiben.

<sup>1</sup> Trümpler: D.R.P. 463079.

## Nachtrag.

Während der Drucklegung des Buches ist ein Bericht von Wagener in der Z. Metallkde Bd. 24 (1932) S. 35 erschienen, in dem Meßergebnisse von Versuchen zur Ermittlung der Wärmeübergangszahl gebracht werden. Die oben S. 24 gemachte Feststellung, daß die Wärmeübergangszahl zwischen Ofen und Gut, namentlich bei Strahlung, in der Regel nicht genau bekannt ist, und daß man daher meist mit einem mittleren Wert von 4,0 rechnen muß, trifft nicht mehr zu. In der erwähnten Arbeit sind vielmehr die Wärmeübergangszahlen für verschiedene Nichteisenmetalle angegeben.

Die Bedeutung der Strahlung am Wärmeübergang wird erneut bestätigt. Es wird berichtet, daß Versuche im Gange sind, den Wärmeübergang durch Strahlung künstlich zu erhöhen, indem das zu erwärmende Gut vor Einbringen in den Ofen geschwärzt wird. Diese Überlegungen decken sich mit solchen, die der Verfasser im Frühjahr 1930 angestellt hat: es handelte sich um eine Untersuchung der Möglichkeiten, die Regeldifferenz zu verringern, und er regte an, dies dadurch zu erreichen, daß man den Wärmeübergang zwischen Ofen und Schutzrohr (Wert  $K_2$ ; S. 101) durch Schwärzung der Außenfläche der keramischen Schutzrohre von Thermoelementen verbesserte. Dies wurde von der AEG zum Patent angemeldet.

Die auf S. 24 ausgesprochene Erwartung, daß eine Verbesserung der Wärmeübergangszahl und damit eine Verkürzung der Durchwärmungszeit praktisch nur durch eine Erhöhung der Konvektion erzielt werden kann, scheint nicht mehr zuzutreffen.

## Zeitschriftenverzeichnis (ZV).

1. Bulle: Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30) S. 693.
2. Paschkis: AEG-Werbedruck I 6/1176, Juni 1930.
3. Schack: Stahl u. Eisen Bd. 50 (1930) S. 1289.
4. Paschkis: Arch. Wärmewirtsch. Bd. 12 (1931) S. 356.
5. Nußbaum: Z. angew. Math. Mech. Bd. 8 (1928) 133.
6. Schack: Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 4 (1930/31) S. 469.
7. Junker: Z. Metallkde. Bd. 23 (1931) S. 124 u. 158.
8. Stansel: Gen. electr. Rev. 1927 S. 488.
9. Stäbler: Stahl u. Eisen Bd. 50 (1930) S. 381.
10. Stassinnet: Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 74, 102, 128.
11. Hechler: Refrig. Eng. 13 (1926) S. 121 u. 141. Ref. v. Jacob: Z. ges. Kälteind. Bd. 34 (1927) S. 146.
12. Langmuir, Adams, Meikle: Trans. Amer. electrochem. Soc. Bd. 24 (1913) S. 53.
13. Paschkis: Elektrotechn. Z. 53 (1932) S. 25 u. 58.
14. Stassinnet: Stahl u. Eisen Bd. 46 (1926) S. 1537.
15. Belgeri: Schweiz. techn. Z. Bd. 24 (1927) S. 437 u. 749; Bd. 26 (1929) S. 573 u. 585. Ref. Elektrotechn. Z. Bd. 52 (1931) S. 213.
16. Stansel: Gen. electr. Rev. Dez. 1928 S. 670/71.
17. Stassinnet: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 1509.
18. Mertens: Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 57.
19. — Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 92.
20. Paschkis: Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 33.
21. — Forschung Bd. 2 (1931) S. 29 und 57.
22. Rohn: Elektrotechn. Z. Bd. 48 (1927) S. 227 u. 317.
23. — Z. Metallkde. Bd. 18 (1926) S. 387.
24. Klein, G.: Elektrotechn. Z. Bd. 45 (1924) S. 300.
25. Hengstenberg u. Bornefeld: Kruppsche Mh. Bd. 12 (1931) S. 153.
26. Fritz u. Bornefeld: Kruppsche Mh. Bd. 12 (1931) S. 237.
27. Smithells, Williams u. Avary: J. Inst. Met., Lond. Bd. 40 (1928) S. 269.
28. Albers-Schönberg u. Bichowsky: Elektrotechn. Z. Bd. 50 (1929) S. 1837.
29. Örtel, W.: Ber. Werkstoffaussch. Ver. dtsh. Eisenhüttenl. Nr. 26 (1922).
30. Pomp u. Dahmen: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Düsseld. Bd. 9 (1927) Lief. 3 S. 30. Ref. in Stahl u. Eisen Bd. 47 (1927) S. 414.
31. Pomp u. Enders: Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Düsseld. Bd. 12 (1930) Lief. 10, S. 127. Ref. Stahl u. Eisen Bd. 51 (1931) S. 157.
32. Loblely u. Betts: Engineering Bd. 128 (1929) S. 422.
33. Trans. Amer. ceram. Soc. Bd. 24 (1924/25) S. 199.
34. Hirsch, H.: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 9 (1928) S. 577.
35. — Über das Erweichungsverhalten der in der feuerfesten Industrie benützten Rohstoffe. Berlin: Selbstverlag des Bundes feuerfester Erzeugnisse 1924.
36. Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 8 (1927) S. 44 u. 92.
37. Hirsch, H.: Tonind. Ztg. Bd. 54 (1930) S. 1273, 1303, 1330, 1356.
38. Raisch: Arch. Wärmewirtsch. Bd. 10 (1929) S. 369.
39. Schmidt u. Gehlhoff: Glastechn. Ber. Bd. 8 (1930) Heft 4 S. 206/28.
40. Pirani u. Wangenheim: Z. techn. Physik Bd. 10 (1929) S. 413.
41. Paschkis: Arch. Wärmewirtsch. Bd. 12 (1931) S. 9.
42. Norton: J. Amer. ceram. Soc. Bd. 8 (1925) S. 29.
43. Philips: Tonind. Ztg. Bd. 54 (1930) S. 54 u. 75.

44. Steinhoff: Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 8 (1927) S. 137.
45. Schmidt, E.: Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 71 (1927) S. 1395.
46. Cammerer: Hauszeitschrift d. V.A.W. u. d. Erftwerk AG. f. Aluminium Bd. 1 (1929) S. 221.
47. Guttman, A.: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 97.
48. Bohlander: Wärme Bd. 52 (1929) S. 492.
49. Günther: Feuerungstechn. Bd. 18 (1930) S. 194.
50. Steinhoff: Ber. Nr. 95 des Werkstoffaussch. Ver. dtsh. Eisenhüttenl.
51. Cammerer: Die Feuerung mit Sonderteil Industrieofen Bd. 7 (1931) S. 1.
52. Paschkis: Gießerei Bd. 16 (1929) S. 693.
53. Walger u. Lorenz, F. R.: Z. techn. Physik Bd. 11 (1930) S. 242.
54. Paschkis: Arch. Eisenhüttw. Bd. 2 (1928/1929) S. 487.
55. — Elektr.-Wirtsch. Bd. 29 (1930) S. 474.
56. — Elektrowärme Bd. 2 (1932) S. 54.
57. King, M. F.: Blast Furn. Steel Plant Bd. 14 (1926) S. 181.
58. Masukowitz: Z. Metallkde. Bd. 23 (1931) S. 306 u. 335.
59. Zepernick: Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 48.
60. Bulle u. Flössel: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 865 u. 903.
61. Nathusius: Stahl u. Eisen Bd. 48 (1928) S. 694.
62. Brooke: Iron Trade Rev. Bd. 73 S. 111; Ref. Stahl u. Eisen Bd. 45 (1925) S. 193.
63. Tama: Z. Metallkde. Bd. 21 (1929) S. 77.
64. Tamele: Siemens-Z. 1928 S. 162 u. 266.
65. — Siemens-Z. 1929 S. 101.
66. Schmidt, E.: AEG-Mitt. 1931 S. 638.
67. Werkst.-Techn. Bd. 24 (1930) S. 641.
68. Berwig u. Tamele: Siemens-Z. 1929 S. 765.
69. James u. Coley: Electr. Wld., N. Y. Bd. 97 (1931) S. 1057.
70. J. Four élect. Bd. 38 (1929) S. 189.
71. Paschkis: Mbl. Berlin. Bez.-Ver. dtsh. Ing. 1931 S. 49.
72. Aschmann: Keram. Rdsch. 1930 S. 171.
73. Paschkis: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 1685.
74. Tamele: Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 75 (1931) S. 383.
75. Iron Age Bd. 124 (1929) S. 1581.
76. Schau: Siemens-Z. 1931 Heft 4.
77. Tamele: Glastechn. Ber. Bd. 6 (1928) S. 225.
78. Iron Age Bd. 124 (1929) S. 353.
79. Rohn: Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 68 (1924) S. 1101.
80. — Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 69 (1925) S. 1434.
81. BBC Nachr. Bd. 16 (1929) S. 162.
82. N. E. L. A. Publ. 141 (Juni 1931).
83. Cunningham: Iron Age Bd. 128 (1931) S. 112.
84. Fry: Kruppsche Mh. Bd. 7 (1926) S. 17 u. 179.
85. Brühl: Kruppsche Mh. Bd. 11 (1930) S. 287.
86. Fuels & Furn. Bd. 9 (1931) S. 609.
87. Iron Age Bd. 127 (1931) S. 1908.
88. Ruß: Metallwirtsch. Bd. 10 (1931) S. 495 u. 513.
89. Tour: Fuels & Furn. Bd. 8 (1930) H. 9.
90. Rapatz: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 251.
91. Kjermer: Jernkont. Ann. Bd. 112 (1928) S. 595. Ref. v. H. Petersen: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 773.
92. Perrin u. Sorrel: J. Four élect. Bd. 40 (1931) S. 168.
93. — — Usine 15. 5. 31 S. 29. Ref. Gießerei Bd. 18 (1931) S. 490.

## Bücherverzeichnis (BV).

1. Kraus, F.: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und ihre Anwendung auf plattenförmige Körper. Berlin: Julius Springer 1917.
2. Gröber, H.: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs. Berlin: Julius Springer 1921.
3. — Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Berlin: Julius Springer 1926.
4. Schmidt, E.: August Föppl-Denkschrift S. 179. Berlin: Julius Springer 1924.
5. Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch Bd. 1 25. Aufl. Berlin: Wilhelm Ernst.
6. Paschkis, V.: Fachberichte 1931 des VDE (Frankfurt/Main) S. 166. Berlin: VDE-Verlag 1931.
7. Cammerer, I. S.: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin: Julius Springer 1928.
8. Grünzweig u. Hartmann: Wärme- und Kälteverluste isolierter Rohrleitungen und Wände. Berlin: Julius Springer 1928.
9. Cammerer, I. S.: Mitteilungen des Forschungsheims für Wärmeschutz, Heft 2, 2. Auflage, S. 1. München 1928.
10. — Wirtschaftlichste Isolierstärke bei Wärme- und Kälteschutzanlagen und Wärmeabgabe isolierter Rohre bei unterbrochener Betriebsweise. Berlin: Industrieverlag Hernhaußen, AG.
11. Hütte, Taschenbuch f. Eisenhüttenleute. Berlin: Wilhelm Ernst 1930. 4. Aufl. S. 794ff.
12. Rohn, W.: Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. S. 80. Hanau: Bruno Claus 1930.
13. Geiger-Scheel: Handb. Physik Bd. 10. Berlin: Julius Springer 1926.
14. Hiemenz, H.: Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. Hanau: S. 68. Bruno Claus 1930.
15. Gruber, H.: Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. Hanau: S. 45. Bruno Claus 1930.
16. Singer: Die Keramik im Dienst von Industrie und Volkswirtschaft. Braunschweig: Vieweg 1923.
17. Lunge-Berl: Chemisch-technische Untersuchungsmethoden Bd. 2 (1922) S. 764.
18. Cammerer, J. S.: Mitteilungen des Forschungsheims f. Wärmeschutz Heft 4. 2. Auflage. S. 5. München 1925.
19. Esser, Salmang, Schmidt-Ernsthausen: Zur Kenntnis der Wärmeübertragung durch feuerfeste Baustoffe. Coburg: Verlag Der Sprechsaal, Müller-Schmidt 1930, ausführlich besprochen in Stahl u. Eisen Bd. 51 (1931) S. 860.
20. Schmidt, E.: Mitteilungen des Forschungsheims f. Wärmeschutz Heft 5 S. 7. München 1924.
21. Kohlrausch, F.: Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig und Berlin: Teubner 1930.
22. Gramberg, A.: Technische Messungen. Berlin: Julius Springer 1923.
23. Knoblauch, O., u. Hencky, K.: Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen. München u. Berlin: Oldenbourg 1926.
24. Keinath, G.: Elektrische Temperaturmeßgeräte. München u. Berlin: Oldenbourg 1924.
25. Trinks, W.: Industrieöfen Bd. 2. Berlin: VDI-Verlag 1931.
26. Raisch, E., u. Schropp, K.: Mitteilung des Forschungsheims für Wärmeschutz Heft 8. München 1930.
27. Nathusius, H.: Fachberichte 1931 d. VDE (Frankfurt/Main) S. 174. Berlin: VDE-Verlag 1931.

## Sachverzeichnis.

- Abkühlung des Gutes außerhalb des Ofens 253, 266—269.  
 — — — bei Öfen mit künstlicher Atmosphäre 261, 263, 266, 269—272.  
 — — — im Ofen bei der Glasverarbeitung 259.  
 — — — im Ofen, Berechnung 85.  
 — — — zwecks Wärmerückgewinnung 86, 234, 250, 256.  
 — des Ofens, künstliche 259—261.  
 Abrieb keramischer Baustoffe 131, 195, 196.  
 Alfolisolierung 139.  
 Alterung von Widerständen 63, 76, 121, 125.  
 Ammoniak für Nitrieröfen 270.  
 Anheizversuch 38, 147.  
 Anheizzeit, praktische und theoretische, Erklärung 37, 38.  
 — — — —, Messung 147.  
 Anlaßöfen in Badform s. Bäder.  
 — mit Luftbewegung 26, 227.  
 — ohne Luftbewegung 226.  
 Anschaffungskosten 5, 59, 155, 162, 284, 286, 288.  
 Anschlußspannung s. Spannung.  
 Anschlußstücke (Enden) von Heizwiderständen, Konstruktion 174, 185.  
 — — —, Wärmeverbrauch 50.  
 Anschlußwert, Definition 64.  
 —, Regelgenauigkeit 103.  
 —, Wirtschaftlichkeit 157, 166, 171.  
 —, Zahlenwerte 229, 236, 237, 250—252, 254, 255, 257, 259, 260, 263, 272, 276.  
 Anwärmöfen 226—229.  
 Arbeitspreis 156, 171.  
 Armatur von Thermoelementen, Konstruktion 219.  
 — — — und Regelgenauigkeit 98 bis 100.  
 Asbest 188, 190, 193.  
 Asbest-Kieselgurisolierung 140, 189.  
 Asbest-Magnesiaisolierung 140, 189.  
 Atmosphäre, Öfen mit künstlicher, Hochtemperatur- 277—281.  
 —, — — —, Mitteltemperatur- 261 bis 272, 276.  
 —, — — — s. auch Schutzatmosphäre.  
 —, — mit natürlicher, Hochtemperatur- 276.  
 —, — — —, Mitteltemperatur- 241 bis 261.  
 —, — — —, Niedertemperatur- s. d. Aufnahme (Leistungsaufnahme), Definition 64.  
 — —, Leistungsverminderung durch Änderung der 92—98.  
 — — und Durchwärmungszeit 36.  
 — — und Regelgenauigkeit 103.  
 — — und Widerstände 64, 77.  
 Ausdehnungsregler 215, 218, 219, 222.  
 Auskühlung des Ofens 58, 59, 62.  
 Ausnützung, räumliche 31.  
 —, — vgl. auch Schichtung des Gutes.  
 Ausschaltdauer und Regelung 101—103.  
 — und Wärmeverluste 58.  
 Außenfläche des Ofens s. Mantelfläche.  
 Austrocknen feuchter Öfen 142, 263.  
 Bäder, Berechnung der Durchwärmungszeit 21.  
 —, — der Wärmeverluste 52, 53.  
 —, — der Widerstände (Spannungsbereich) 77.  
 —, Entwicklungsaufgaben für 286.  
 —, Konstruktion der Tiegeldichtung 240.  
 —, — der Widerstände 181.  
 —, — von induktiv beheizten 281.  
 —, — von mittelbar beheizten 237 bis 241.  
 —, — von unmittelbar beheizten (Elektrodenöfen) 278—281.  
 Balkenherdofen s. Hubbrückenofen.  
 Band, endloses als Beschickungseinrichtung, s. Kette.  
 — für Widerstände, Umrechnung auf Draht (s. auch Kantenverhältnis) 67.

- Band, Glühen im Durchziehverfahren, s. Durchziehöfen.  
 —, — in Ringen 253, 254, 267, 268.  
 Banddurchziehofen s. Durchziehofen.  
 Bandringe, Blankglühen von 263, 266 bis 268.  
 —, Glühen von 253, 254.  
 —, Glühen im Induktionsofen 281.  
 Baustoffe s. Ofenbaustoffe.  
 Beharrungszustand 4, 38, 56, 148.  
 Beheizung, mittelbare u. unmittelbare 1.  
 Belastung des Kraftwerks 8.  
 — — — s. a. Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Ofens.  
 —, spezifische der Widerstände, s. Oberflächenbelastung.  
 Benutzungsstundenzahl 156, 158, 170.  
 Berechnung der Durchwärmungszeit 6, 11—30, 83, 84.  
 — — —, Beispiel 29.  
 — der mittelbar beheizten und Elektrodewiderstandsöfen 10—91.  
 — der Nutzwärme 33—36, 89—91.  
 — — —, Beispiel 36.  
 — der Ofenzahl und Ofengröße 6—8, 31, 32.  
 — — — — —, Beispiel 31.  
 — der Regeldifferenz 102, 103.  
 — der Wärmeverluste 36—63, Tafel 1, Anhang.  
 — — —, Beispiel 60.  
 — der Widerstände 63—81, 84, Tafel 2, 3, Anhang.  
 — — —, Beispiel 78.  
 — des Grenzstrompreises 155—164.  
 — einer Regelschaltung 97.  
 —, Gang der 10.  
 Beschickung des Ofens 3.  
 —, absatzweise 283.  
 —, Öfen mit absatzweiser 226—229, 231 bis 234, 237—249, 251, 253—257, 261—270, 276—280.  
 Beschickungseinrichtungen 199—214, 283.  
 —, die dauernd im Ofen bleiben 202, 213.  
 —, die ebenso lange im Ofen bleiben wie das Gut 209, 213.  
 —, die gar nicht in den Ofen kommen 200, 213.  
 —, die kurzzeitig im Ofen bleiben 206, 213.  
 — und Ofenauswahl 283.  
 —, Vergleich verschiedener 205, 208, 213.  
 Beschickungswagen s. Wagen.  
 Beständigkeit gegen Auflagematerialien, metallische Baustoffe 116.  
 — — —, nichtmetallische Widerstände 125.  
 — gegen Ofenatmosphäre, metallische Baustoffe 113.  
 — — —, nichtmetallische Widerstände 125.  
 Betrieb, unterbrochener 8.  
 —, —, bei Blankglühöfen 264.  
 —, —, und Ofenauswahl 283.  
 —, —, und Wärmeverluste 57—59.  
 —, —, und Wirtschaftlichkeit 166.  
 —, ununterbrochener s. Beharrungszustand und Dauerbetrieb.  
 Betriebsfahrplan 169, 283.  
 Betriebsführung 32, 57.  
 — und Wirtschaftlichkeit 169—170.  
 Betriebskostenvergleich 162.  
 Betriebssicherheit, Erhöhung der 286.  
 Bimetallregler 217.  
 Blankglühen (Blankglühöfen) 261—270.  
 —, Hedderheimer Verfahren 268.  
 — im Durchziehverfahren 275—276.  
 — mit senkbarem Boden 269.  
 — mit Schutzhaube 265.  
 — nach Stassinot 261—264.  
 — ohne Schutzgas 266, 267.  
 — — — nach Grünwald 267.  
 — über Wasserdampf (Kenworthy) 268.  
 —, ungedichtete Öfen 264.  
 Blankkühlung 269.  
 Boden s. Herd.  
 Bodenheizung und Durchwärmungszeit 27.  
 —, Heizkörper hierfür 182—184.  
 Bolzen (Schrauben usw.), Erwärmung im Induktionsofen 281.  
 —, Erwärmung im Widerstandsofen, Beispiel 29, 31, 36, 60, 78.  
 Borax, Anwendung bei Bädern 282.  
 Brennstofföfen, Wärmeverbrauch von, im Vergleich zu elektrischen Öfen 159—161.  
 Charakteristik von Reglerfühlorganen 100, 219.  
 Chemische Eigenschaften keramischer Baustoffe 136, 137.  
 Chlorbarium als Badflüssigkeit 278.  
 Chlorkalium als Badflüssigkeit 278.

- Chrom 112.  
 Chromeisenlegierungen 111—124.  
 Chromnickel 111—124.  
 Cristobalitsteine 143—144.  
 Cutaxrelais 224.
- Dauerbelastung** (mechanische Eigenschaften) bei keramischen Baustoffen s. Druckerweichungsverhalten.  
 — — — bei metallischen Baustoffen s. Kriechgrenze.  
**Dauerbetrieb** 8.  
 — bei Blankglühöfen 264—270.  
 — und Ofenauswahl 283.  
 — und Wirtschaftlichkeit 156, 171.  
 —, Wärmeverluste bei 36—56.  
**Dauerstandfestigkeit** s. Kriechgrenze.  
**Daumenkette** 201.  
**Deckel für Öfen** 198, 244, 261.  
**Deckenheizung**, Heizkörper für 177, 179, 182.  
 — und Durchwärmungszeit 27.  
**Dia** (Wärmeschutzmittel) 138, 141.  
**Diamagplatten** 139, 140.  
**Dichtung** (von Öfen mit künstlicher Atmosphäre) 265.  
 — vgl. auch Sanddichtung, Flüssigkeitsdichtung.  
**Direkt gesteuerte Öfen** (Regelung) 102.  
**Doppelsternschaltung** 94.  
**Draht**, Glühen im Durchziehverfahren, s. Durchziehöfen.  
 —, — in Ringen 253, 254, 267, 268.  
**Drahtdurchmesser** (für Widerstände), Bemessung 66—70.  
 —, Nomogramm zur Bestimmung des Tafel 2, Anhang.  
**Drahtgewicht** (bei Widerständen), Bestimmung 66—68.  
 —, Nomogramm zur Bestimmung des Tafel 3, Anhang.  
**Drahtlänge** (bei Widerständen), Bemessung 66—70.  
 —, Nomogramm zur Bestimmung der Tafel 3, Anhang.  
**Drehherdofen** s. Ringherdofen.  
**Drehtellerofen** 257.  
**Dreieckschaltung**, Bemessung der Widerstände 68.  
 — und Regelung 93, 96.  
**Dreieck-Stern-Umschaltung** 93.
- Druckerweichungsverhalten** keramischer Baustoffe, Erklärung 129.  
 — — — und Gewölbstützung 192.  
 —, Zahlenwerte 129, 141.  
 —, vgl. a. Kriechgrenze.  
**Druckfestigkeit** 129, 130.  
**Durchsatz und Nutzwärme** 33.  
 — und Ofenauswahl 284.  
 — und Ofengröße 5, 31.  
 — und Ofenkennzahl 168.  
 — und spezifischer Wärmeverbrauch 159.  
 — und Wanderöfen 82—84.  
 — und Wärmebilanz 151.  
**Durchwärmungszeit** 4, 6, 10.  
 —, Berechnung 11—30.  
 —, Definition 11.  
 —, maßgebende Abmessungen s. Schichtung des Gutes.  
 — und Entwicklungsaufgaben 285.  
**Durchwärmungszeitkurve** 6—8.  
**Durchziehöfen**, Berechnung 83, 84.  
 —, Konstruktion 272—276.  
 — mit Induktionsheizung 282.  
 — und Entwicklungsaufgaben 285.
- Eingebettete Widerstände** s. Widerstände.  
**Einschaltdauer und Regelung** 92, 101 bis 103.  
 — und Wärmeverluste 58.  
 —, relative 58, 92.  
**Einsatzöfen** 193, 240, 250, 251, 271.  
 —, Baustoffe hierzu 118.  
**Einsetzen mit festen Zementationsmitteln** vgl. a. Kistenglühen 193, 272.  
 — mit flüssigen Zementationsmitteln 240, 241, 271.  
 — mit gasförmigen Zementationsmitteln 271, 272.  
 — und Wirtschaftlichkeit 160, 166.  
**Einteilung der Öfen** 1, 172.  
**Eisen als Baustoff für Öfen** 114.  
**Elektrische Eigenschaften keramischer Baustoffe** 137.  
**Elektroden**, Bemessung der 78.  
 —, Konstruktion der 278—281.  
 —, Zünd- 278.  
**Elektrodenöfen** s. a. Bäder 1, 278—281.  
**Elektrolyse**, Angriff auf keramische Baustoffe durch 137, 278.  
**Emaillieröfen**, Berechnung der 88—91.  
 —, Konstruktion der 255, 256.

- Energiedichte s. Oberflächenbelastung.  
 Erschütterungsfestigkeit pulverförmiger Baustoffe 132.  
 Erwärmung des Gutes, Aufgabenstellung 5, 9.  
 — — —, Beispiel hierzu 11.  
 Explosionsgefahr bei Trockenöfen 86, 233, 237.  
 —, Widerstände sicher gegen 181.
- Fahrradrahmenfabrikation, Lacktrocknung 211, 236.  
 —, Lötung 282.  
 Fallbügelregler 103, 220.  
 Fallbügelrhythmus 103, 220.  
 Fassungsvermögen des Nutzraums 4, 10, 31, 283.  
 Festigkeit, mechanische, keramischer Baustoffe s. Druckerweichungsverhalten.  
 — metallischer Baustoffe s. Kriechgrenze.  
 Feuerfeste Steine 138.  
 Feuerfestigkeit keramischer Baustoffe 134.  
 Feuerleichtstein 49, 143, 144.  
 Fließöfen s. Wanderöfen.  
 Flüssigkeitsdichtung 265, 268.  
 Formenanzwärmofen 227.  
 Freistrahkende Widerstände s. Widerstände.  
 Fühlorgan eines Reglers, Ausführungsformen 214—224.  
 — — —, Einbau des 153.  
 — — —, Einfluß auf Regeldifferenz 99—101.
- Gasdurchlässigkeit keramischer Baustoffe 132.  
 Gasverbrauch, Schutzgas beim Blankglühen 263.  
 — und Stromverbrauch 159—161.  
 Gesamtstrahlungs-pyrometer 223.  
 Gewicht, reduziertes, bei kombiniertem Gut (Trockenöfen) 152, 236.  
 —, spezifisches und Durchwärmungszeit 13.  
 —, — und Raumgewicht 131.  
 —, — und Speicherwärme 56.  
 —, — und Widerstände 69.  
 —, —, Zahlenwerte 138, 140, 141, 144, 145.
- Gewicht, totes 34, 88.  
 —, — und Beschickungseinrichtung 200, 212, 213.  
 —, — und Wärmebilanz des Ofens 152.  
 Gewölbeabstützung, Konstruktion 192.  
 —, rechnerische Berücksichtigung 51.  
 — und Material 130.  
 Glas, Einbrennen von Farbe auf, s. Porzellan.  
 Glaskühlöfen 259—260.  
 Glimmerumpreßte Elemente 180.  
 Globalheizwiderstände, Ausbau im Betrieb 187.  
 —, Konstruktion der Anschlußenden 188.  
 —, Öfen mit 276, 277.  
 —, positiver Temperaturkoeffizient 127.  
 —, Wasserkühlung der Enden 50, 188.  
 Glühöfen mit besonderer Beschickungs- und Transporteinrichtung 250—261, 265, 268, 269.  
 — mit künstlicher Atmosphäre s. Blankglühöfen.  
 — ohne besondere Beschickungs- und Transporteinrichtung 241—246, 261 bis 265.  
 Grenzstrompreis, Definition 155.  
 —, Ermittlung auf Grund des Betriebskostenvergleichs 162.  
 —, — — — des Wärmekostenvergleichs 155.  
 — unter Berücksichtigung ideeller Vorteile 164.  
 Grunddiagramm zur Berechnung der Öfen 6—9.  
 Gut, Definition 3.  
 —, geschichtetes 26.  
 —, —, Beispiel hierzu 29.  
 —, nicht homogenes 27, 29.  
 Guttemperatur 13.  
 —, vgl. hierzu auch Oberflächen- und Kerntemperatur.
- Hängebahnen als Beschickungseinrichtung 212, 213.  
 —, Öfen mit 229, 256.  
 Hängedecke 192, 254.  
 Härte keramischer Baustoffe 130.  
 Härten von Schnellstahl 277.  
 Härteöfen 244.  
 — mit künstlicher Atmosphäre 277.  
 — — — — vgl. a. Nitrieröfen.

- Härteöfen mit selbsttätiger Haltepunktsanzeige 246—249.  
 — —, innere Ofenwand aus 261.  
 Haube, hebbare 245, 253.  
 —, —, Blankglühofen mit 265.  
 Heizhaube s. Haube, hebbare.  
 Heizkörper s. Widerstand.  
 Heizkörperdurchführungen s. Anschlußstücke.  
 Herd, Bedeckung des — mit Kohlegrieß 276.  
 —, Ofen mit senkbarem 253.  
 —, — — — für Blankglühen 268, 279.  
 Herdplatte 242, 243, 259, 287.  
 Hitzdrahtvakuumschalter 224.  
 Hitzebeständige Metalle s. Ofenbaustoffe, metallische.  
 Hochtemperaturöfen, Ausführungsformen 276—281.  
 —, Bäder 241.  
 —, Definition 172.  
 — mit Molybdänwiderständen 288.  
 —, Temperaturmessung und Regelung 222.  
 —, Wand, Decke, Türe 199.  
 —, Widerstände 184.  
 Hubbrückenofen 202, 206.  
 Humpofen 249.  
 Hygroskopizität keramischer Baustoffe 132.  
 — und das Trocknen von Öfen 142, 263.  
 Indirekt gesteuerte Öfen, Regelung 104.  
 Induktionsöfen 1—3, 6, 281, 282.  
 Innenbandheizkörper 237.  
 Isolation, elektrische, beim Bau von Widerständen 70, 173, 180.  
 —, —, keramischer Baustoffe 137, 145.  
 —, Wärme-, s. Wärmeschutz.  
 Isoliermaterial s. Wärmeschutzmaterial.  
 Isolierpulver, Eigenschaften von 141.  
 — und Leerverluste 54.  
 —, Verwendung 193, 194, 246, 249, 272.  
 Kammerofen, Hochtemperatur 276, 288.  
 —, Mitteltemperatur 241—245, 254, 255.  
 —, — für Nitrierzwecke 270.  
 —, — mit selbsttätiger Haltepunktsanzeige 246—249.  
 —, Niedertemperatur 226—229, 232.  
 Kammerofen, Niedertemperatur mit Umluftheizung 228, 229.  
 Kantenbrüchigkeit keramischer Baustoffe 130.  
 Kantenverhältnis quaderförmiger Öfen (Verlustberechnung) 42.  
 — rechteckiger Heizleiter, Definition 63.  
 — — — und Widerstandslänge und Gewicht 67, 69.  
 — — —, Beispiel 80, 81.  
 Kapitaldienstkosten 8.  
 — und Ofenauswahl 284.  
 — und Wirtschaftlichkeitsberechnung 162.  
 — und wirtschaftlichste Isolierstärke 59.  
 Kennzahlen zum Vergleich von Öfen, abgeleitete 165.  
 — — — — —, unmittelbare 166.  
 Keramische Baustoffe 127—145.  
 — —, Eigenschaften, Prüfung der 128 bis 137.  
 — —, Zahlenangaben 137—145.  
 Kern des Gutes 6, 11, 12.  
 Kerntemperatur und Durchwärmungszeit 12—31.  
 — und Nutzwärme 33.  
 Kerntrocknen 150—152, 236.  
 Kernwiderstände 178, 183.  
 Kette als Beschickungseinrichtung 204, 206, 209.  
 —, Öfen mit 229, 234—237, 259.  
 Kettenvorhang 198.  
 Kieselgur, Druckerweichungsverhalten 129.  
 —, sonstige Eigenschaften 141—144.  
 Kistenglühen 28, 242, 265, 270.  
 Kohlegrieß, Verwendung als Oxydationsschutz 276.  
 Kohlendioxyd als Schutzgas 264, 277.  
 — zum Vorspülen von Blankglühöfen 261.  
 Kohlenoxyd als Schutzgas 277, 289.  
 Kohlepulver zur Herstellung von Heizkörpern 289.  
 Kontaktabstand und Regelgenauigkeit 100.  
 Konvektion s. a. Luftbewegung 25, 26, 87, 286.  
 Kriechgrenze (keramischer Baustoffe) 119.  
 — s. a. Druckerweichungsverhalten.

- Kühlen s. Abkühlung.  
 Kupfer, Wärmebehandlung von 253, 268, 269.  
 Kupferlötöfen 270.  
 Kupfer-Nickellegierungen 111, 112.
- Lackrocknen 229—231.  
 —, explosions sichere Widerstände hierzu 86, 181, 233, 237.  
 —, Öfen hierzu 231—237.  
 —, Luftmenge hierzu, s. Luftmenge.  
 Lambdamaterial 139.  
 Lebensdauer von Heizwiderständen, Prüfung der 114.  
 Leerverluste 7.  
 —, Analyse der 149—150.  
 —, Berechnung der 39—56.  
 —, — —, bei Bädern 52.  
 —, — —, bei rechteckigen Öfen 41—49.  
 —, — —, bei zusammengesetzten Schichten 44—49.  
 —, — —, bei zylindrischen Öfen 49—50.  
 —, Berechnungsbeispiel 60—62.  
 —, Definition 38.  
 — durch offene Türen 52, 90.  
 — durch Strahlung von unbedeckten heißen Flächen 52.  
 —, Messung der 147—148.  
 —, Nomogramm für quaderförmige Öfen, Tafel 1, Anhang.  
 — und Beschickungseinrichtung 200.  
 — und Ofenauswahl 284.  
 — und Ofenkennzahl 167.  
 — und Wärmekurzschlüsse 50.  
 — und Wirtschaftlichkeit 159, 171.  
 —, Vergleich bei Öfen mit innen und außen beheizter Muffel 53—56.  
 —, Zahlenwerte 254, 270, 276, 282.  
 Leistungsfähigkeit eines Ofens 166.  
 Leistungsfaktor 157.  
 Leistungspreis 156, 171.  
 Leistungsverminderung, Arten der 92—98.  
 — und Entwicklungsaufgaben 286.  
 Leuchtgas als Schutzgas für Öfen 277.  
 Lichtbogenöfen 1.  
 Löhne s. Lohnkosten.  
 Lohnkosten 5, 162, 283, 286.  
 Lötöfen 270, 281.  
 Luftbewegung 26.  
 —, Öfen mit, s. a. Trockenöfen 227—229.  
 Luftmenge bei Trockenöfen 86, 237.  
 —, Messung der 151.
- Mähmaschinenmesser, Anlaßöfen für 229.  
 Magnesiaplatten 139, 140.  
 Mantelfläche, Bestimmung bei quaderförmigen Öfen 45.  
 —, Temperaturanstieg an der 38.  
 —, Temperaturmessung an der 147 bis 149.  
 — s. a. Ofenmantel.  
 Manteltemperatur s. Mantelfläche.  
 Maßhaltigkeit keramischer Baustoffe 132.  
 Maximumzählung 92, 156, 169.  
 Mechanische Eigenschaften keramischer Baustoffe 128—133.  
 Meßgeräte, trägheitslose 99.  
 — s. a. Temperaturmessung.  
 Meßverfahren der Ofentechnik 145 bis 154.  
 Metallufschichtisolierungen 139, 189.  
 Methylalkoholdampf als Schutzgas 288.  
 Mindertemperatur, Definition 13.  
 —, —, Definition 16.  
 —, — im Beispiel 29.  
 —, —, Kurven 16—18.  
 —, — und Ofenkennzahl 168.  
 Mitteltemperaturöfen, Ausführungsformen 241—276.  
 —, Bäder 239—241.  
 —, Definition 172.  
 —, Temperaturmessung und -Regelung 219—222.  
 —, Türe 194—199.  
 —, Wand und Decke 190—194.  
 —, Widerstände 172, 175—180.  
 Molybdänwiderstände 112.  
 —, Öfen mit 288.  
 Muffeln, außen beheizte, Konstruktion 194, 246, 272.  
 —, — —, Leerverluste 53.  
 —, — —, Regelung 106—107.  
 —, metallische mit Induktionsheizung 282.  
 Muldenöfen (vgl. a. Tieföfen) 244.  
 Mullit, Eigenschaften von 138.
- Nachtstromrabatt 158, 171, 283.  
 Nebenkosten 5, 9, 162.  
 — und Entwicklungsaufgaben 286.  
 — und Ofenauswahl 283.  
 Nickel 111, 112, 123, 124.  
 Nickel-Eisenlegierungen 114, 263.

- Niedertemperaturöfen, Ausführungsformen 226—237.  
 —, Bäder 237—239.  
 —, Definition 172.  
 —, Temperaturmessung und Regelung 214.  
 —, Türe 189.  
 —, Wand und Decke 188.  
 —, Widerstände 172, 173, 180, 181.  
 Nitrieröfen 270.  
 Nutzraum 6, 7.  
 —, außen beheizter s. Muffeln.  
 — und Leerverluste 41, 283, 284.  
 Nutzraumabmessungen 167.  
 Nutzrauminhalt s. a. Fassungsvermögen 7.  
 Nutzraumoberfläche 7, 41.  
 Nutzwärme, Berechnung der 33—36.  
 —, — bei Emaillieröfen 88, 89.  
 —, Definition 33.  
 —, Messung der 145.  
 —, Zahlenwerte 34.
- Oberfläche des Gutes und Durchwärmungszeit** 23, 83, 84, 285, 290.  
**Oberflächenbelastung metallischer Widerstände** 65, 69.  
 — nichtmetallischer Widerstände 74.  
**Oberflächenpyrometer** 149.  
**Oberflächentemperatur des Gutes bei Wanderöfen** 83, 84.  
 — — —, Definition 12.  
 — — — und Entwicklungsaufgaben 286.  
 — — —, Zahlenwerte 14, 19, 20.  
**Öffnungsebene, Öfen mit horizontaler** 233, 238—240, 243—246, 248, 261 bis 270, 278—280.  
 —, — mit vertikaler 226—237, 241 bis 243, 246, 250—261, 265, 270—277.  
**Ofenatmosphäre und Ofenbaustoffe s. a. Atmosphäre** 114.  
**Ofenauswahl** 282—284.  
**Ofenbaustoffe** 109—135.  
 — für nichtmetallische Widerstände 125 bis 127.  
 —, keramische 127—145.  
 —, metallische 11—124.  
**Ofendecke** 191—194.  
 — aus einem Stein 191.  
 —, Gewölbe 192.  
 —, Hängendecke 192, 255.  
**Ofenform** 45.
- Ofenform und Ofenauswahl** 283.  
**Ofengröße, wirtschaftlichste** 6—10, 283.  
**Ofeninnenfläche** 41, 54.  
 — s. a. Nutzraumoberfläche und Verlustfläche.  
**Ofenmantel, Definition** 3.  
 —, — s. a. Mantelfläche.  
**Ofenschlitze, s. Hubbrücken, Tragholme, Wagen mit Hubplattform.**  
**Ofentemperatur, Erklärung** 13.  
 — und Durchwärmungszeit 12, 17.  
 — und Entwicklungsaufgaben 288 bis 289.  
 — und Temperaturmessung 149, 153.  
 — und Temperaturregelung 92, 98 bis 109.  
 — und Verlustberechnung 39, 48, 49.  
**Ofentüre bei Mittel- und Hochtemperaturöfen** 194.  
 — bei Niedertemperaturöfen 189.  
 —, Doppeltüre 198.  
 —, Flügeltüre 190.  
 —, geteilte 196.  
 —, Hubtüre 193, 194, 197, 242.  
 —, Klapptüre 195.  
 —, Schubtüre 197.  
 —, Schwenktüre 199.  
 —, Senktüre 254.  
 —, Standtüre 259.  
 —, Berücksichtigung bei der Verlustberechnung 50.  
 —, — bei der Leerverlustmessung 150.  
 — vgl. a. Öffnungsebene u. Tür-.  
**Ofenwand, innere, Ausführungsformen bei Hochtemperaturöfen** 199.  
 —, —, — bei Mitteltemperaturöfen 190.  
 —, —, — bei Niedertemperaturöfen 188.  
 —, —, — bei Salzbädern 279, 280.  
 —, —, Definition 3.  
 — — und Baustoffe 130.  
 — — und Wärmeverluste durch Abstützung 50.  
 — — s. a. Verlustfläche.  
 —, mehrschichtige, Berechnung der Wärmeverluste 44—49.  
 —, —, Konstruktionsbeispiel 276.  
**Ofenzahl für eine gegebene Produktion** 6, 31—33.  
**Ofenzahllinie** 6, 8.  
**Oxydation s. Zunder.**
- Perenitmaterial** 139.  
**Plattenheizkörper** 180.

- Porengröße und Werkstoffeigenschaften 130, 131, 133.  
 Porosität 131.  
 Porzellan, Einbrennen von Farbe auf 250.  
 Potentiometerregler 221, 258.  
 Produktion/Stunde s. Durchsatz.  
 Programmregelung s. Temperatur-Zeit-Regelung.  
 Pyrometer, optische s. Gesamtstrahlungs- und Teilstrahlungs-pyrometer.  
 Quecksilberrelais 224.  
 Quecksilberthermometer 216.  
 Rahmenelement, Drahtdurchmesser 70.  
 —, Konstruktion 173.  
 —, Wickelvorschrift 72.  
 Raumgewicht pulverförmiger Wärmeschutzstoffe 132.  
 — und spezifisches Gewicht 131.  
 —, Zahlenangaben f. keramische Baustoffe 138, 140, 141, 144, 145.  
 Reflexisolierung 139.  
 Regeldifferenz, wahre und scheinbare 98.  
 — und Fühlorganarmatur 98.  
 — und Leistungsverminderung 104.  
 — und Ofenkennzahl 168.  
 Regelgenauigkeit (Temperatur-) 98 bis 110.  
 Regelkurve, wahre und scheinbare 99.  
 Regelschaltungen 108.  
 Regelung der Temperatur 92—111.  
 — — — bei Salzbadern 77, 208.  
 Regler 3.  
 Regler (Temperatur-), Ausführungsformen 214—224.  
 —, Anordnung im Ofen 104—107.  
 Relais 224.  
 Ringherd 203, 206.  
 —, Ofen mit 253.  
 Rohranlaßofen 228.  
 Rohrglühen 253, 254.  
 Rohrthermoelement 219.  
 Rollenherd 203.  
 Rost bei Emaillieröfen, Berechnung 89.  
 — — —, Konstruktion 255, 256.  
 Salzbadern, Salzbadtiegelofen 239.  
 —, unmittelbar beheizte 278—281.  
 —, — — mit Metalltiegel 280.  
 Salzbadern, s. a. Bäder.  
 Salze, Angriff auf keramische Baustoffe 137.  
 Sanddichtung (Sandtasse) an Herdwagenöfen 210, 211.  
 — an Öfen mit horizontaler Öffnungsebene 244, 245, 253, 265.  
 — an Ringherdöfen 204.  
 — an Türen 195.  
 Schachtofen s. Tiefofen.  
 Schaltanlagen 225.  
 Schaltgerüst 225, 267.  
 Schaltorgane 3.  
 —, Ausführungsformen 224.  
 Schaltschrank 225, 262.  
 Schalttafel 225, 254.  
 Schaltung, äußere 10, 110.  
 —, innere 92—98.  
 —, —, Einfluß auf die Widerstandsbemessung 69.  
 Schamotte, Eigenschaften 138, 139.  
 — und Speicherwärme 56, 262.  
 — und unterbrochener Betrieb 262.  
 — und Wärmedurchgangsverluste 46.  
 — und Wärmekurzschlüsse 48.  
 Schichthöhe des Gutes (-stärke, -dicke) 6, 7, 28.  
 — im Beispiel 32.  
 Schichtung des Gutes 27, 28.  
 — — — und Entwicklungsaufgaben 285.  
 Schlacke, Angriff auf keramische Baustoffe 136.  
 Schlackenwolle 139, 140, 189.  
 Schlaufenanordnung von Widerständen s. a. Widerstandsband.  
 — — —, Banddicke hierfür 70.  
 — — —, Beispiel 80, 81.  
 — — —, Konstruktion 178.  
 — — —, Wickelvorschrift 72.  
 Schmelzöfen 7, 240.  
 Schmiedeofen 276.  
 Schniewindgitter 181.  
 Schüttgewicht 132, 141.  
 Schutzabstand zwischen Heizkörper und Gut 41, 54.  
 —, Beispiel hierzu 60.  
 — und Wirtschaftlichkeit 167.  
 Schutzatmosphäre in Öfen, Zusammensetzung der, s. a. Atmosphäre 265, 270, 277.  
 Schwarzglühen 266.  
 Schwingbrückenofen s. Hubbrückenofen.

- Seitenheizung, Heizkörper hierfür 177, 179.  
 — und Durchwärmungszeit 27.  
 Serien-Parallel-Umschaltung 94, 97.  
 Silitheizwiderstände, Konstruktion der Anschlußenden 185.  
 —, Öfen mit 241.  
 —, Temperaturkoeffizient 127.  
 Siliziumkarbid-Widerstände s. Widerstände, nichtmetallische.  
 Sil-O-Cel-Fabrikate 129, 141, 144.  
 Sipa 145.  
 Spannung und Berechnung der — bei Bädern 77.  
 —, höchste, bei Widerstandsöfen 70.  
 —, Leistungsverminderung durch Änderung der 92, 96—98.  
 —, Bemessung der Widerstände 67—70.  
 Spannungsbereich bei Bädern 77, 78, 278.  
 — bei Siliziumkarbid-Widerständen 76, 77.  
 Speicherwärme als Ofenkennzahl 168.  
 —, Beispiel hierzu 61, 62.  
 —, Berechnung der 56, 57.  
 —, Definition 38.  
 —, Messung der 147, 148.  
 — und Beschickungseinrichtung 200.  
 Spezifisches Gewicht s. Gewicht, spezifisches.  
 Spezifische Wärme s. Wärme, spezifische.  
 Spieldauer und Regelgenauigkeit 103, 108.  
 — und Wärmeverluste 58.  
 Spitzenzeiten 157, 169, 170, 283.  
 Stabförmige Heizkörper 180.  
 Standard-Material 141.  
 Sterchamol-Fabrikate 141—144.  
 Sternschaltung 68.  
 — und Temperaturregelung 93, 96.  
 Steuerung von Öfen (Regelung) s. direkt und indirekt gesteuerte Öfen.  
 Stickstoff als Ofenatmosphäre 265, 270.  
 — — —, gemischt mit Wasserstoff 270.  
 Stößel 201.  
 —, Öfen mit 250, 251, 270.  
 Stopfdichte 132.  
 —, Zahlenwerte 140, 141.  
 Strahlungszahl 24, 25, 83, 84, 290.  
 —, Zahlenwerte 25.  
 Strompreis 8.  
 —, Ermittlung des 155—158.  
 Strompreis und Betriebsführung 169.  
 — und Ofenauswahl 283.  
 Superbrick 143, 144.  
 Super-Dia 129, 143, 144.  
 Superiorsteine 143, 144.  
 Tauchbäder s. a. Bäder 2, 281.  
 Tauchelektroden 280.  
 Tauchsieder 237.  
 — zum Anheizen von Salzbädern 278.  
 Teilstrahlungs-pyrometer 223.  
 Temperaturanstieg des Ofens beim Regeln (s. a. Regelkurve) 93, 101.  
 — im Gut 12, 281, 282, 286.  
 Temperaturgleichmäßigkeit im Gut s. Durchwärmungszeit.  
 — im Ofen, räumliche 27, 83, 84, 104, 154.  
 — — —, zeitliche s. Regeldifferenz.  
 — und Nutzwärme 33.  
 Temperaturkoeffizient des Widerstandes f. Metalle 112, 123, 124.  
 — — — für nichtmetallische Baustoffe 74, 126, 127.  
 — — — bei Widerstandsthermometern 218.  
 Temperaturleitfähigkeit und Durchwärmungszeit 21, 24.  
 — und Regelgenauigkeit 101.  
 — Zahlenwerte f. Metalle, Glas u. Porzellan 21.  
 Temperaturmessung 153.  
 —, Geräte hierzu 214—224.  
 — und Regelung 214—225.  
 Temperaturregelung s. Regelung.  
 Temperaturverteilung s. Temperaturgleichmäßigkeit.  
 Temperaturverlauf in der Ofenwand 47 bis 49.  
 — — — —, Beispiel hierzu 61.  
 — — — —, Einfluß auf Materialauswahl 137—144.  
 — — — — und Temperaturmessung 215, 216.  
 Temperaturverlust bei Beschickung des Ofens 17, 35, 63, 196.  
 Temperaturwechselbeständigkeit 134.  
 —, Zahlen für Schamotte 138.  
 Temperatur-Zeit-Regelung 223.  
 Thermoelement, Bau 219.  
 —, Einbau im Ofen 153.  
 — und Regelgenauigkeit 98.  
 Tieföfen, s. a. Muldenöfen 244.

- Tieföfen für Blankglühen 261, 267.  
 Trägheit des Fühlorgans für Temperaturregler 99, 153, 219.  
 Tragholme, Beschickungseinrichtungen mit 206, 208.  
 —, Öfen mit 254, 255, 257.  
 Tragsteine für Heizwiderstände, Konstruktion 173, 177, 179.  
 — — —, Materialeigenschaften für 116, 138, 144.  
 Transformator und Leistungsverminderung 77, 96—98.  
 Transporteinrichtung s. Beschickungseinrichtung.  
 Trockenöfen, Ausführungsformen 229 bis 237.  
 —, erforderliche Luftmenge 86.  
 —, Explosionsgefahr bei 86, 181.  
 —, Konstruktion der Widerstände 181.  
 —, Wander-, Berechnung der 85.  
 —, Wärmebilanz 151.  
 Trockenschrank 232.  
 Trommelöfen 204, 206.  
 — für Einsatzzwecke 251.  
 — und Entwicklungsaufgaben 285.  
 Türanpressung 207, 255.  
 Türausmauerung 196.  
 Türbetätigung, hydraulisch 250.  
 —, motorisch 207.  
 Türe s. Ofentüre.  
 Türdichtung durch Sandtassen 195.  
 —, elastische 190.  
 — und Leerverlustanalyse 150.  
 — durch Eigengewicht 196.  
 Türkontakt 207.  
 Türüberdeckung 196.  
 Übertragungsorgan (bei Temperaturreglern) 99.  
 —, Ausführungsformen hierzu 214 bis 224.  
 Ugine-Infra-Öfen m. selbsttätiger Haltepunktsanzeige 246.  
 Umluftheizung, Anlaßöfen mit 228.  
 —, Trockenöfen mit 234.  
 Unempfindlichkeit von Temperaturreglern 99, 102, 103.  
 Unregelmäßig geformtes Gut 27.  
 Unterbrochener Betrieb s. Betrieb.  
 Vakuumtrocknen 233.  
 Verbesserungsfaktor 164.  
 Vergleich verschiedener Öfen 165—168, 282—284.  
 Verluste im Beharrungszustand s. Leerverluste.  
 Verlustfläche 7, 41.  
 Verlustkurve im Ofengrunddiagramm 7.  
 Verteuerungsbewert (durch Ausschuß) 163.  
 Wärme, spezifische, s. a. Wärmeinhalt.  
 —, —, bei der Durchwärmungszeitberechnung 24.  
 —, —, bei der Nutzwärmeberechnung 33, 34.  
 —, —, bei der Verlustberechnung 56, 57.  
 —, —, — — —, Beispiel hierzu 61, 62.  
 —, —, Zahlenwerte für keramische Baustoffe (Berechnung der Speicherwärme) 138, 141, 144.  
 —, —, Zahlenwerte für einige andere Stoffe (Berechnung der Nutzwärme) 34.  
 Wärmeausdehnung bei Ausdehnungsreglern 215.  
 — keramischer Baustoffe 134.  
 — metallischer Baustoffe 122.  
 — nichtmetallischer Widerstände 126.  
 Wärmebehandlungskosten 164.  
 Wärmebilanz von Öfen, Aufnahme der 151.  
 Wärmeinhalt 33—34.  
 —, Zahlenwerte 34.  
 Wärmekosten 5, 8.  
 — bei elektrischen und Brennstofföfen 158.  
 — und Entwicklungsaufgaben 284.  
 — und Wirtschaftlichkeitsfragen 158.  
 — und wirtschaftlichste Wandstärke 59.  
 Wärmekostenanteil 164.  
 Wärmekostenlinie 7—9.  
 Wärmekurzschlüsse, Berücksichtigung bei der Rechnung 50—52.  
 —, Messung der Wärmeverluste durch 149.  
 — und Durchwärmungszeit 28.  
 — und Konstruktion der Beschickungseinrichtung 205.  
 — — — der Ofenwand 174, 181, 189, 192.  
 Wärmeleitfähigkeit, Prüfung der 133.  
 — und Berechnung der Durchwärmungszeit 13, 24.

- Wärmeleitfähigkeit und Berechnung der Leerverluste 39—56.  
 — und Materialauswahl 134.  
 —, Zahlenwerte für keramische Baustoffe (zur Berechnung der Leerverluste) 139, 142, 144.  
 —, — für Metalle, Glas und Porzellan (zur Berechnung der Durchwärmungszeit) 21.  
 Wärmepreis s. Strompreis.  
 Wärmerückgewinnung, Berechnung der 85.  
 —, Wärmeschaubild dazu 86.  
 —, Öfen mit 234, 235, 250, 251, 256, 267.  
 — und Entwicklungsaufgaben 286.  
 — und Ofenauswahl 285.  
 Wärmeschutz 3, 188—198.  
 Wärmeschutzmittel, Allgemeine Besprechung 128—144.  
 —, Berücksichtigung d. Temperaturgrenzen b. d. Berechnung 48—49.  
 —, Entwicklungsaufgaben für 289.  
 —, Wesentlichste Eigenschaften u. ihre Prüfung 128—137.  
 —, Zahlenwerte 138—144.  
 Wärmetechnische Eigenschaften keramischer Baustoffe 133—136.  
 Wärmeübergangswiderstand s. Wärmeübergangszahl.  
 Wärmeübergangszahl, Berücksichtigung bei der Durchwärmungszeitberechnung 13, 22, 26, 290.  
 —, — — —, Beispiel hierzu 30.  
 —, — bei der Messung der Leerverluste 149.  
 —, — bei der Verlustberechnung 39 bis 41, 52, 53.  
 —, — der Widerstandsberechnung 64, 65.  
 —, — — —, Beispiel hierzu 79.  
 —, — bei Wanderöfen 82, 86.  
 — und Entwicklungsaufgaben 285, 290.  
 Wärmeüberschuß und Durchwärmungszeit 36.  
 — und Entwicklungsaufgaben 285, 286.  
 — und Temperaturregelung 102, 103, 108.  
 — und Widerstandsbemessung 63, 64.  
 — vgl. a. Leistungsverminderung.  
 Wärmeverbrauch, Verhältnis des — bei elektrischen und Brennstofföfen 161.  
 Wärmeverbrauch, Zahlenwerte 229, 236, 237, 245, 250—252, 254, 258, 260, 262, 263, 266, 268, 269, 275, 276, 282.  
 —, Zusammensetzung des 167.  
 Wärmeverbrauchskurven bei leerem Ofen 38.  
 — bei verschiedenem Durchsatz 159, 160.  
 — für Durchwärmung von Eisenblöcken 36.  
 —, Messung 147.  
 Wärmeverluste, Berechnung der 36—63.  
 —, Messung der 147—152.  
 — und Entwicklungsaufgaben 284, 285.  
 — und Ofenauswahl 283, 284.  
 Wärmeverluste während der Durchwärmungszeit 7.  
 — — — — und Betriebsführung 173.  
 — — — — und Ofenkennzahlen 167.  
 — — — — und Wirtschaftlichkeitsberechnung 159.  
 Wagen mit Greiferarmen 208.  
 —, Herd- 210.  
 —, —, Öfen mit 227, 257, 265.  
 — mit Hubplattform 207, 208.  
 — — —, Ofen mit 255.  
 Walzblockanwärmung 253, 255.  
 Wanderöfen, Aufnahme der Wärmebilanz von 150.  
 —, Ausführungsformen 229, 234, 250 bis 261.  
 —, Berechnung der 82.  
 —, Beschickungs- und Transporteinrichtungen 199—214.  
 — und Ofenauswahl 283.  
 Wandstärke und Leerverluste 39—43.  
 — und Temperaturverlauf in der Wand 47—49.  
 — und Speicherwärme 56.  
 —, wirtschaftlichste 59.  
 Wasserdampf als Schutzgas für Nicht-eisenmetalle 269—270.  
 — als Verunreinigung beim Stahlglühen 264, 270.  
 Wasserkühlung von Heizkörperenden 50, 188.  
 Wasserstoff als Ofenatmosphäre 262, 265, 269, 271.  
 — — —, gemischt mit Stickstoff 270.  
 — als Schutzgas 288.  
 Wendel, Drahtdurchmesser 70.  
 —, Konstruktion 175.

- Wendel, Wickelvorschrift 73.
- Widerstandsänderung als Maß der Lebensdauer von Widerständen 115, 117, 125.
- Widerstände, auswechselbare 181, 187.
- , Berechnung der 63—81.
- , eingebettete 172, 180, 194.
- , freistrahrende 172—180.
- , Konstruktion 172—188.
- , mäanderförmige, s. Schlaufenanordnung.
- , Material 109—127.
- , metallische, Berechnung der 64—74.
- , —, —, Beispiel 78—81.
- , —, Konstruktion 173—184.
- , —, Material 109—124.
- , —, Nomogramm für Durchmesser Tafel 2, Anhang.
- , —, — für Länge Tafel 3, Anhang.
- , —, Wicklungsvorschriften 72, 73.
- , nichtmetallische, aus Kohlepulver 289.
- , —, Berechnung der 74—78.
- , —, Konstruktion 184—188.
- , —, Material 125—127.
- , Oberflächenbelastung, s. daselbst.
- zum Anheizen von Salzbädern 279.
- s. auch Band, Draht.
- Widerstand, Gruppe, Berechnung 66 bis 67.
- , Definition 63.
- , mehrere Gruppen 68—69.
- , Schaltung 92—96.
- , spezifischer, Einfluß auf die Heizkörperabmessungen 68.
- , —, Zahlenwerte für Metalle 123.
- , —, — für Nichtmetalle 74, 126.
- Widerstandsöfen, Berechnung der mittelbar beheizten und primär verbundenen Elektroden 10—91.
- Widerstandsöfen, mittelbar beheizte 2.
- , primär verbundene, s. Elektrodenöfen.
- , unmittelbar beheizte 2.
- , — —, mit induktiver Koppelung s. Induktionsöfen.
- Widerstandsthermometer 218, 219.
- Wild-Barfield-Ofen 246.
- Wirkungsgrad der Verbrennung bei Brennstofföfen 159.
- elektrischer Öfen 165.
- Wirtschaftlichkeit eines Ofens 154.
- , Erhöhung der 284.
- Wirtschaftlichkeitsfragen 154—171.
- Wirtschaftlichste Ofengröße 6 bis 10, 283.
- Wandstärke 10, 59.
- Zeitverzögerung, endliche 103, 220.
- Zementieren s. Einsetzen.
- Zerreißfestigkeit (von Metallen), heiß s. Kriechgrenze.
- — —, kalt 122.
- und Temperaturwechselbeständigkeit keramischer Baustoffe 134.
- Zinnschmelzkessel 238.
- Zündeflektrode für Salzbäder 278.
- Zündkäfig für Salzbäder 279.
- Zunder als Schutz von Metallen 114.
- des Gutes, Reduktion in Blankglühöfen 261.
- , Gefährdung der Widerstände durch 117.
- , Messung des 115, 116.
- Zundern des Gutes, Verhinderung durch Kohlegrieß 276.

\* **Das Elektrostahlverfahren.** Ofenbau, Elektrotechnik, Metallurgie und Wirtschaftliches. Nach F. T. Sisco, "The Manufacture of Electric Steel" umgearbeitet und erweitert von Dr.-Ing. St. Kriz, Stahlwerksleiter im Stahlwerk Düsseldorf, Gebr. Böhler & Co., A.-G. Mit 123 Textabbildungen. IX, 291 Seiten. 1929. Gebunden RM 22.50

Man gewinnt beim Lesen des Buches den Eindruck, daß der Verfasser sich bemüht hat, mit dem Werk nicht nur dem Hüttenmann einen klaren Überblick über alles, was mit der Elektrothermie des Ofens in metallurgischer und ofentechnischer Beziehung zusammenhängt, zu geben, sondern auch den Elektroingenieur und Ofenbauer auf ihre Kosten kommen zu lassen, indem er ihnen, wenn auch oft nur andeutungsweise, geeignete Anregungen zum Aufbau solcher Ofenanlagen bringt. Gerade die Zusammenfassung von metallurgischen und konstruktiven Gesichtspunkten gibt der Abhandlung einen ganz besonderen Vorzug, und es dürfte dem Verfasser gelungen sein, diese sich zum Ziel gesetzte Aufgabe bei der Abfassung seines Buches glücklich zu lösen...

„Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure.“

---

\* **Die Leistung des Drehstromofens.** Von Dr.-Ing. J. Wotschke. Mit 23 Textabbildungen. VI, 69 Seiten. 1925. RM 5.10

---

\* **Elektrothermie.** Die elektrische Erzeugung und technische Verwendung hoher Temperaturen. Vorträge zahlreicher Fachleute, veranstaltet durch den Elektrotechnischen Verein E. V. zu Berlin, in Gemeinschaft mit dem Außeninstitut der Technischen Hochschule zu Berlin. Herausgegeben von Professor Dr. M. Pirani. Mit 268 Abbild. VIII, 293 Seiten. 1930. Geb. RM 36.—

---

\* **Die Messung hoher Temperaturen.** Von G. K. Burgess und H. Le Chatelier. Nach der dritten amerikanischen Auflage übersetzt und mit Ergänzungen versehen von Prof. Dr. G. Leithäuser, Hannover. Mit 178 Textfiguren. XVI, 486 Seiten. 1913. RM 18.—

---

\* **Apparate und Meßmethoden für Elektrizität und Magnetismus.** Bearbeitet von zahlreichen Fachgelehrten. Redigiert von W. Westphal. („Handbuch der Physik“, Band XVI.) Mit 623 Abbildungen. IX, 801 Seiten. 1927. RM 66.—; gebunden RM 68.40

Inhaltsübersicht: Die elektrischen Maßsysteme und Normalien. Von Prof. Dr. W. Jaeger, Berlin. — Allgemeines und Technisches über elektrische Messungen. Von Prof. Dr. W. Jaeger, Berlin. — Auf Influenz- und Reibungs-Elektrizität beruhende Apparate und Geräte. Von Dr. G. Michel, Berlin. — Auf der Induktion beruhende Apparate. Von Prof. Dr. S. Valentiner, Clausthal. — Elektrische Ventile, Gleichrichter, Verstärkeröhren, Relais. Von Prof. Dr. A. Güntherschulze, Berlin. — Telefon und Mikrophon. Von Dr. W. Meissner, Berlin. — Schwingung und Dämpfung in Meßgeräten und elektrischen Stromkreisen. Von Prof. Dr. W. Jaeger, Berlin. — Elektrostatische Meßinstrumente. Von Prof. Dr. F. Kottler, Wien. — Elektrodynamische Meßinstrumente. Von Dr. R. Schmidt, Berlin. — Schwingungsinstrumente. Von Prof. Dr. H. Schering, Charlottenburg. — Auf thermischer Grundlage beruhende Meßinstrumente. — Auf elektrolytischer Wirkung beruhende Meßinstrumente. Von Prof. Dr. A. Güntherschulze, Berlin. — Meßwandler. Von Prof. Dr. H. Schering, Charlottenburg. — Messung des Stromes, der Spannung, der Elektrizitätsmenge, der Leistung und der Arbeit. Von Dr. R. Schmidt, Berlin, Prof. Dr. H. Schering, Charlottenburg, Prof. Dr. A. Güntherschulze, Berlin. — Elektrometrie. Von Prof. Dr. A. Güntherschulze, Berlin. — Widerstände und Widerstandsapparate. — Methoden zur Messung des elektrischen Widerstands. Von Prof. Dr. H. v. Steinwehr, Berlin. — Kondensatoren und Induktivitätsspulen. — Messung von Kapazitäten und Induktivitäten. Von Prof. Dr. E. Giebe, Berlin. — Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Dipolmomentes. Von Prof. Dr. A. Güntherschulze, Berlin. — Erzeugung elektrischer Schwingungen. — Wellenmesser und Frequenznormale. — Meßmethoden bei elektrischen Schwingungen. Von Dr. E. Alberti, Berlin. — Elektrochemische Messungen. Von Dr. E. Baars, Marburg/Lahn. — Messungen an para- und diamagnetischen Stoffen. Von Dr. W. Steinhaus, Berlin. — Messungen an ferromagnetischen Stoffen. — Herstellung und Ausmessung magnetischer Felder. Von Prof. Dr. E. Gumlich, Berlin. — Erdmagnetische Messungen. Von Prof. Dr. G. Angenheister, Potsdam. — Sachverzeichnis.

\* Auf alle vor dem 1. Juli 1931 erschienenen Bücher wird ein Nachlaß von 10% gewährt.

**\* Technische Thermodynamik.** Von Professor Dipl.-Ing. W. Schüle.

Erster Band: Die für den Maschinenbau wichtigsten Lehren nebst technischen Anwendungen. Fünfte, neubearbeitete Auflage.

Erster Teil: Lehre von den Gasen und allgemeine thermodynamische Grundlagen. Mit 181 Abbildungen im Text und den Tafeln I—IIa. VIII, 385 Seiten. 1930. Gebunden RM 18.—

Zweiter Teil: Lehre von den Dämpfen. Mit 140 Abbildungen im Text und den Tafeln III—IVa. VIII, 280 Seiten. 1930. Gebunden RM 16.—

Zweiter Band: Höhere Thermodynamik mit Einschluß der chemischen Zustandsänderungen nebst ausgewählten Abschnitten aus dem Gesamtgebiet der technischen Anwendungen. Vierte, erweiterte Auflage. Mit 228 Textfiguren und 5 Tafeln. XVIII, 509 Seiten. 1923. Gebunden RM 18.—

---

**\* Thermodynamik.** Die Lehre von den Kreisprozessen, den physikalischen und chemischen Veränderungen und Gleichgewichten. Eine Hinführung zu den thermodynamischen Problemen unserer Kraft- und Stoffwirtschaft. Von Dr. W. Schottky, Wissenschaftlichem Berater der Siemens & Halske A.-G., früher ordentlichem Professor für Theoretische Physik an der Universität Rostock. In Gemeinschaft mit Dr. H. Ulich, Privatdozent und Assistent für Physikalische Chemie an der Universität Rostock, und Dr. C. Wagner, Privatdozent und Assistent am Chemischen Laboratorium der Universität Jena. Mit 90 Abbildungen und einer Tafel. XXV, 619 Seiten. 1929. RM 56.—; gebunden RM 58.80

---

**\* Thermische Eigenschaften der Stoffe.** Bearbeitet von C. Drucker, E. Grüneisen, Ph. Kohnstamm, F. Körber, K. Scheel, E. Schrödinger, F. Simon, J. D. van der Waals Jr. Redigiert von F. Henning. („Handbuch der Physik“, Band X.) Mit 207 Abbildungen. VII, 486 Seiten. 1926. RM 35.40; gebunden RM 37.50

Inhaltsübersicht: Zustand des festen Körpers. Von Prof. Dr. E. Grüneisen, Charlottenburg. — Schmelzen, Erstarren und Sublimieren. Von Prof. Dr. F. Körber, Düsseldorf. — Zustand der gasförmigen und flüssigen Körper. Von Prof. Dr. J. D. van der Waals Jr., Amsterdam. — Thermodynamik der Gemische. Von Prof. Dr. Ph. Kohnstamm, Amsterdam. — Spezifische Wärme (theoretischer Teil). Von Prof. Dr. E. Schrödinger, Zürich. — Spezifische Wärme (experimenteller Teil). Von Prof. Dr. K. Scheel, Berlin-Dahlem. — Die Bestimmung der freien Energie. Von Dr. F. Simon, Berlin. — Thermodynamik der Lösungen. Von Prof. Dr. C. Drucker, Leipzig. — Sachverzeichnis.

---

**\* Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung.**

Ein Leitfaden für die Praxis. Von Dr.-Ing. Heinrich Gröber. Mit 60 Textabbildungen und 40 Zahlentafeln. X, 200 Seiten. 1926. Gebunden RM 12.—

---

**\* Die Wärmeübertragung.** Ein Lehr- und Nachschlagebuch für den praktischen Gebrauch. Von Professor Dipl.-Ing. M. ten Bosch, Zürich. Zweite, stark erweiterte Auflage. Mit 169 Textabbildungen, 69 Zahlentafeln und 53 Anwendungsbeispielen. VIII, 304 Seiten. 1927. Gebunden RM 22.50

---

**\* Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie.** Von Privatdozent Dr.-Ing. J. S. Cammerer, Berlin. Mit 94 Textabbildungen und 76 Zahlentafeln. VIII, 276 Seiten. 1928. Gebunden RM 21.50

---

\* Auf alle vor dem 1. Juli 1931 erschienenen Bücher wird ein Notnachlaß von 10% gewährt.

Nomogramm zur Bestimmung der Leerverluste  
quaderförmiger Oefen.

Formeln:  $Q_v = \Phi_{F,s} \cdot \lambda \cdot \vartheta_c \cdot \vartheta_a$   

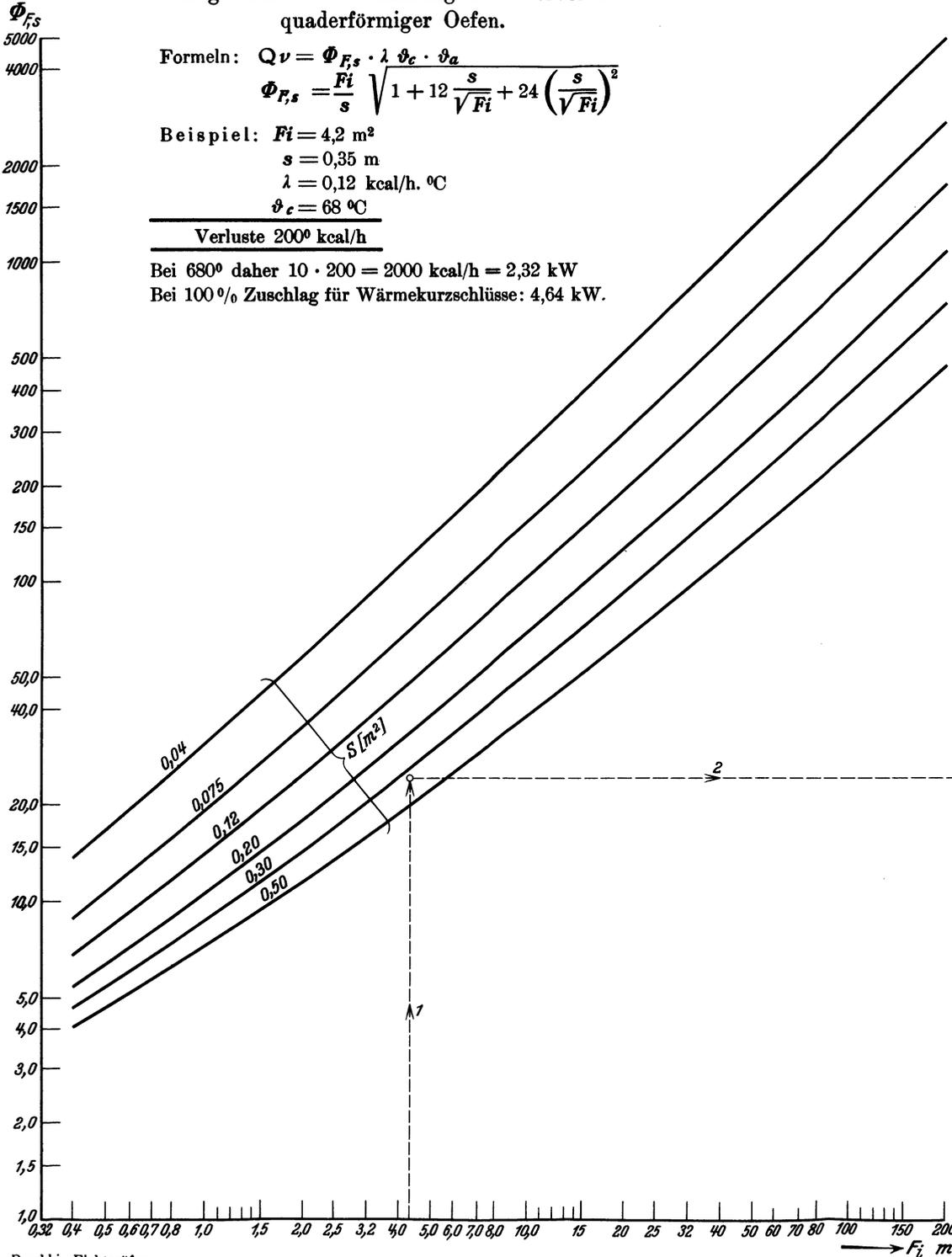
$$\Phi_{F,s} = \frac{Fi}{s} \sqrt{1 + 12 \frac{s}{\sqrt{Fi}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{Fi}}\right)^2}$$

Beispiel:  $Fi = 4,2 \text{ m}^2$   
 $s = 0,35 \text{ m}$   
 $\lambda = 0,12 \text{ kcal/h. } ^\circ\text{C}$   
 $\vartheta_c = 68 \text{ } ^\circ\text{C}$

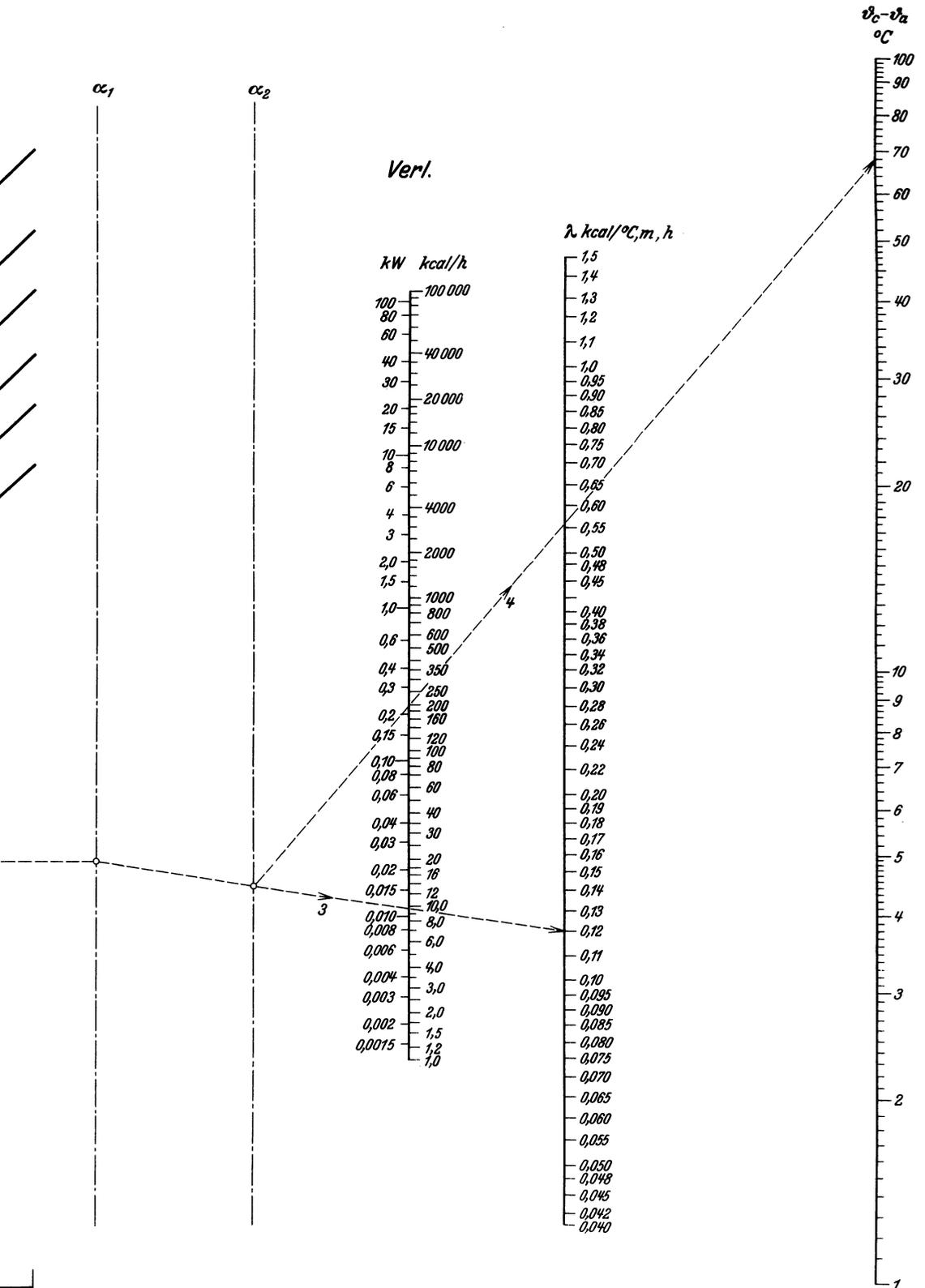
Verluste 200° kcal/h

Bei 680° daher  $10 \cdot 200 = 2000 \text{ kcal/h} = 2,32 \text{ kW}$

Bei 100% Zuschlag für Wärmekurzschlüsse: 4,64 kW.



Tafel 1.



200  
F<sub>t</sub> m<sup>2</sup>

Nomogramm zur Bestimmung des  
 runder metallischer Drähte. — Für  
 Heizleiterquerschnitte Umrechnung

Beispiele:

Strichlierte Pfeile: Für  $\nu = 1,1 \text{ W/cm}^2$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$N = 13,3 \text{ kW}$$

$$Q = 1,3 \text{ } \Omega, \text{ mm}$$

ergibt sich:

Strichpunktierte Pfeile: Für  $d = 4,35$

$$U = 380 \text{ V}$$

$$N = 13,3$$

$$Q = 1,3 \text{ } \Omega$$

ergibt sich:

$$d = \sqrt[3]{\frac{70^5 N}{U^2 \nu}}$$

3,0  
 2,8

|

Tafel 2.

des Durchmessers  
 - Für rechteckige  
 ung nach Abb. 39.

$\nu/cm^2$

$kW$

$\rho, mm^2/m$

$d = 5,60 \text{ mm}$

$4,35 \text{ mm}$

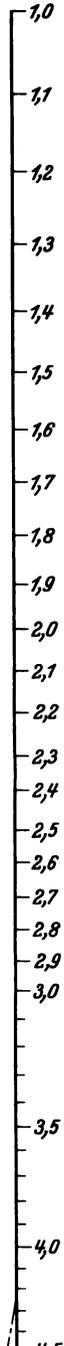
$380 \text{ V}$

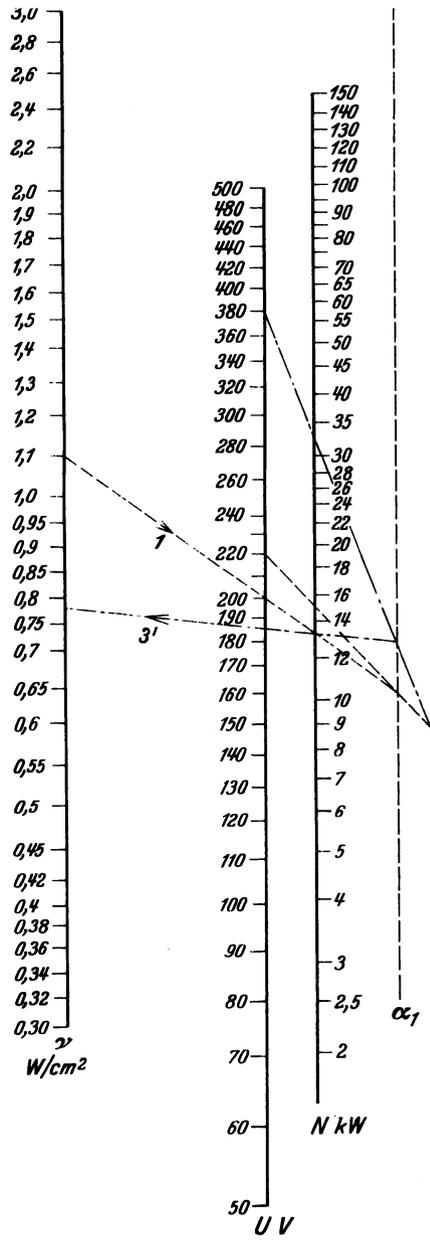
$13,3 \text{ kW}$

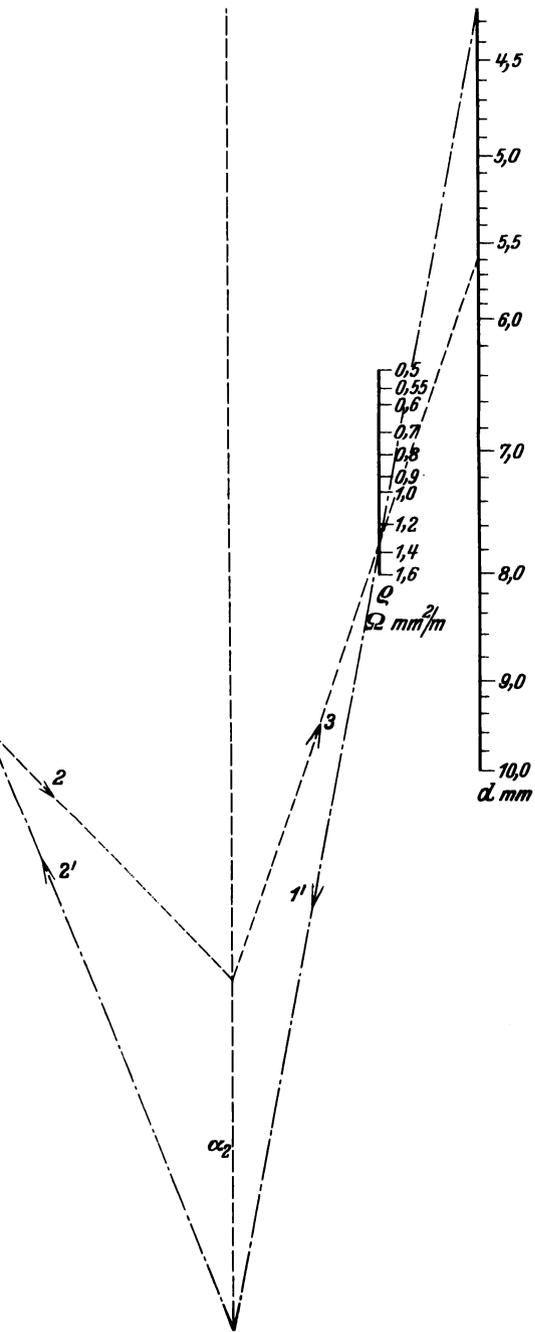
$1,3 \Omega, mm^2/m$

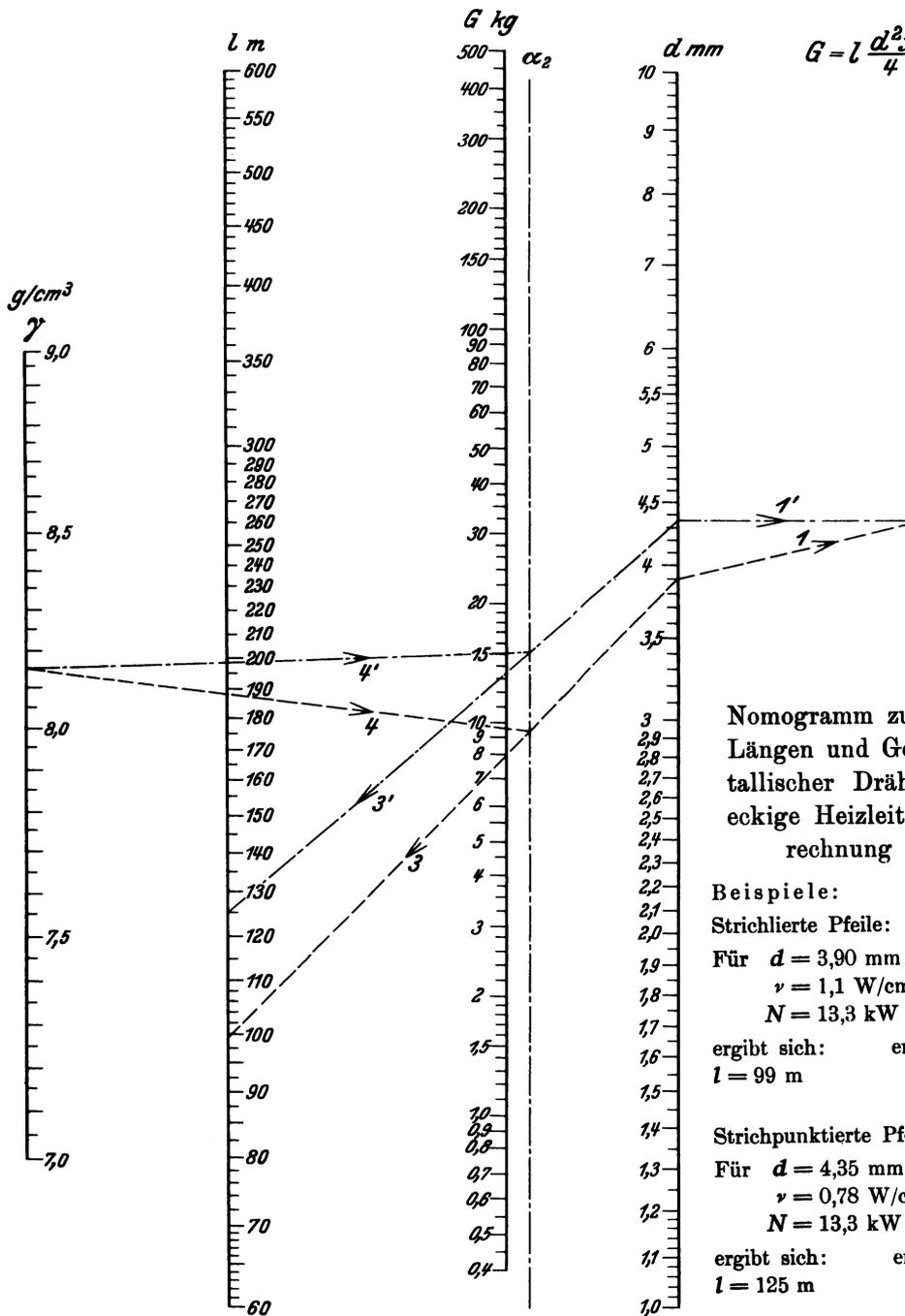
$\nu = 0,78 \text{ W/cm}^2$

$$\frac{10^5 N^2 \rho^4}{U^2 \nu \pi^2}$$









$$\frac{d^2 \pi}{4} \gamma \cdot 10^{-3}$$

$$L = 10^2 \frac{N}{\nu d \pi}$$

