

Schlackentagung im Haus der Technik

Die gewaltigen Anforderungen, die die rege Bauftätigkeit des Dritten Reiches an die Leistungsfähigkeit der Bauwirtschaft und damit an den Baustoffmarkt stellt, lenken die Aufmerksamkeit noch mehr als bisher auf einen längst bewährten Baustoff, dem noch nicht in allen Kreisen die nötige Beachtung geschenkt wird, nämlich die Hochofenschlacke. Heute, wo es gilt, die großen Bauvorhaben des Staates, des Verkehrswesens und der Wirtschaft sowie das Wohnbedürfnis von Hunderttausenden mit größter Beschleunigung und den einfachsten und billigsten Mitteln zu erfüllen, erscheint es besonders wichtig, alle geeigneten Baustoffe heranzuziehen. Dazu kommt noch, daß die Hochofenschlacke ohne besondere Gewinnungsarbeiten zur Verfügung steht und bei dem ständig steigenden Anfall schon aus volkswirtschaftlichen Gründen unbedingt nutzbringend verwertet werden muß, um das weitere Anwachsen der Halden zu verhüten.

Nun hat aber die Hochofenschlacke, wie jeder Baustoff, gewisse Besonderheiten, und die mangelhafte Kenntnis ihrer Eigenschaften hat zweifellos manchen Mißerfolg verschuldet. Darum gilt es, gerade die Verbraucherkreise im weitesten Sinne mit den Erzeugnissen aus Hochofenschlacke bekanntzumachen und sie über ihre Beschaffenheit und Eigenarten aufzuklären. So war es denn ein glücklicher Gedanke, daß das Haus der Technik zusammen mit dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute im Herzen des Industriegebietes, in Essen, eine besondere Tagung veranstaltete, auf der anerkannte Fachleute aus den verschiedensten Gebieten der Schlackenverarbeitung und -verwendung über ihre reichen Erfahrungen berichteten. Mehr als 250 Teilnehmer aus dem Kreise der Eisenindustrie und der Bauwirtschaft hatten Gelegenheit, alles Wissenswerte über die verschiedenartigen Verwendungsmöglichkeiten der Schlacke zu erfahren.

In den nachfolgenden Berichten wird zunächst die Entstehung und Zusammensetzung der verschiedenen Schlackenarten behandelt und weiterhin über die Bedeutung der Hochofenschlacke als Eisenbahn-, Straßen- und Wasserbaustoff (einschl. Pflastersteine), wie auch als Betonzuschlag gesprochen, Gebiete, die den größten Teil der Schlacke aufnehmen. Für den Hochbau ist wichtig der Schlackensand und die daraus hergestellten Hüttenmauersteine, wie auch der Hüttenbims und die Hüttenchwemmsteine für die Leichtbauweise. Neben dem Hüttenbims und den Hüttenchwemmsteinen, deren Entstehung und Anwendung in einem besonderen Film veranschaulicht wurden, spielt auch die Schlackenwolle eine besondere Rolle als Dämmstoff gegen Wärme, Kälte und Schall. Daß auch die schon lange bekannte Zementerzeugung aus Hochofenschlacke dank der wissenschaftlichen Forschung besonderer Institute sich den neueren, höchsten Anforderungen angepaßt hat, wird in dem letzten Vortrag besonders unterstrichen.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Hochofenschlacke aus dem früher lästigen Nebenprodukt der Hochofenwerke heute zu einem wertvollen Baustoff geworden ist. Wenn die Tagung diese Erkenntnis weiten Kreisen vermittelt hat, wozu auch das vorliegende Sonderheft beitragen soll, so hat sie ihren Zweck voll und ganz erfüllt.

Technische und wirtschaftliche Bedeutung der Hochofenschlacke*)

Von Direktor W. Schäfer, Friedrich-Alfred-Hütte, Rheinhausen

Die Absicht des Hauses der Technik, in größerem Rahmen etwas über Schlacken vorzutragen zu lassen, mag bei manchem Leser des Programmes Befremden hervorgerufen haben, denn was gibt es schon viel über so minderwertige und lästige Stoffe, wie es die Schlacken sind, zu sagen. Sie sind indessen schon seit geraumer Zeit zu einem Problem geworden, besonders deshalb, weil manche von ihnen, wie z. B. die Hochofenschlacke, in so gewaltigen Mengen anfallen, daß es zur gebieterischen Notwendigkeit geworden ist, sich mit ihnen zu befassen und zu versuchen, sie in möglichst weitem Umfange einem nutzbringenden Zweck zuzuführen.

Versuchen wir zunächst einmal, uns einen Begriff über das zu verschaffen, was Schlacken sind.

Bei allen Schmelzvorgängen im Eisen- und Metallhüttenwesen, sei es bei der Abscheidung des Metalles aus seinen Erzen, sei es bei Umschmelz- und Reinigungsarbeiten, bilden sich neben dem Metall Schmelzen nichtmetallischer Art, die alle diejenigen Stoffe aufnehmen, die nicht im Metall bleiben, während andere mit den Gasen, die bei der metallurgischen Arbeit anfallen, fortgehen. Diese Schmelzen nennt man Schlacken; sie bestehen zur Hauptsache aus Sauerstoffverbindungen, auch Oxyde genannt, die einerseits zum Teil schon vorhanden waren und andererseits während des Schmelzvorganges entstehen. Teilweise bilden diese Oxyde Verbindungen unter sich, teilweise lösen sie sich ineinander und nehmen auch andere Verbindungen, z. B. sulfidischer Natur, auf.

Die bei der Gewinnung von Nichteisenmetallen auftretenden Schlacken, die häufig Schwefel, Arsen und andere Verbindungen enthalten, führen die Bezeichnung Steine oder Speisen. Sie sollen hier nicht weiter behandelt werden.

Es sei hier eingeschaltet, daß die Abfallstoffe von Feuerungen keine Schlacken in dem Sinne der gemachten Ausführungen sind; man sollte sie daher stets Aschen nennen, wohingegen die eigentlichen Schlacken als Gesteinsschmelzen anzusehen sind. Sie haben vielfach auch die Eigenschaften der Naturgesteinsschmelzen, z. B. die des Basaltes.

Die Schlacken sind also Nebenprodukte, die bei der Durchführung der metallurgischen Verfahren unvermeidbar sind, da es ihre Aufgabe ist, Bestandteile aufzunehmen, die nicht in das Metall gehen oder aus ihm entfernt werden sollen; ferner bilden sie einen Schutz für das Metall gegen unerwünschte Beeinflussung durch Luft und Gase, und endlich rufen sie beabsichtigte Änderungen im Metall hervor.

Man kann im allgemeinen zwischen Silikat-, Phosphat- und Eisenschlacken unterscheiden, ohne daß es jedoch möglich wäre, diese Schlackenarten gegeneinander genau abzugrenzen. Vertreter der Silikatschlacken sind saure Hochofenschlacken und die Schlacke des Krupp-Renn-Verfahrens, deren Hauptbestandteil die Kieselsäure ist. Ähnliche Schlacken treten auch bei der Gewinnung des Kupfers aus dem Mansfelder Kupferschiefer auf. Als Phosphatschlacken sind uns die bei der Umwandlung des Thomasroheisens in Stahl anfallenden Schlacken bekannt. Sie sind besonders wertvoll, weil sie in Form von Thomasmehl einen sehr geschätzten Phosphorsäuredünger darstellen. Die aus den Wärmöfen der Walzwerke stammenden Schlacken kann man als Eisenschlacken bezeichnen, da sie vorwiegend Eisen als Oxyd und Oxydul, in Verbindung mit Kieselsäure, enthalten. Sie werden ihres Eisengehaltes wegen eisenreichen- und gangartsarmen Erzes enthält, d. h. in der Eisenhüttenindustrie selbst wieder verwendet.

Eine Schlackenart, die erst vor ganz kurzer Zeit bei der Metallurgie des Eisens aufgetreten ist, ist die Sodaschlacke. Sie entsteht bei der Entschwefelung von Roheisen, und zwar insbesondere desjenigen Roheisens, das beim sauren Schmelzen entfällt. Bei diesem Verfahren ist die Hochofenschlacke wegen ihres sauren Charakters nicht befähigt, den Schwefel bei der Beschickung des Hochofens im vollen Umfang aufzunehmen, so daß ein erheblicher Teil des Schwefels in das Roheisen übergeht, aus dem er mittels schnellflüssiger Soda entfernt wird. Ihre Mengen sind bisher noch gering, sie hat, wie hier schon vorweggenommen werden mag, in beschränktem Umfange Verwendung zum Aufschließen von Rohphosphat gefunden, um deren Phosphorsäure in eine für Pflanzen aufnehmbare Form zu überführen.

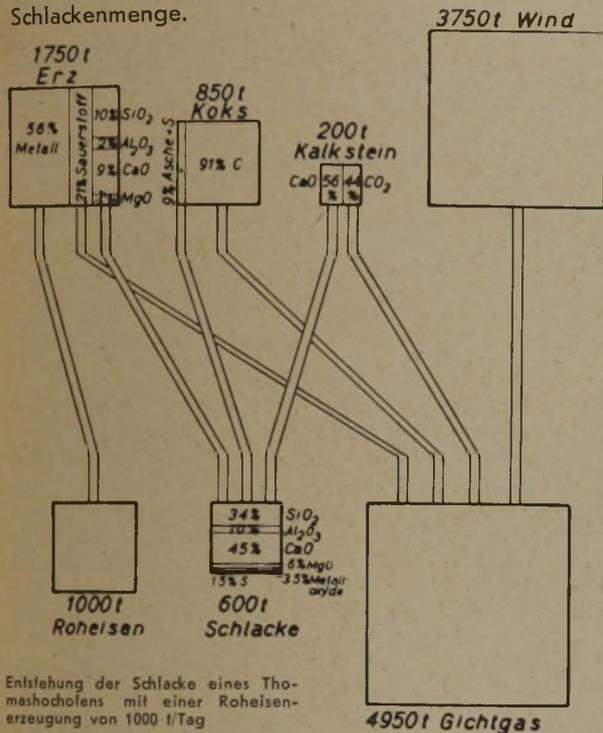
Die bei weitem mengenmäßig überragende Schlackenart ist die im Eisenhüttenbetriebe anfallende Hochofenschlacke. Sie soll daher hier näher betrachtet werden. Sie entsteht bei der Gewinnung des Roheisens aus Eisenerzen, die im wesentlichen Verbindungen des Eisens mit Sauerstoff sind. Roheisen ist bekanntlich das Grunderzeugnis, aus dem alle weiteren Abarten des Eisens, insbesondere Stahl, gewonnen werden. Die Verarbeitung der Eisenerze geschieht in hohen Schachtöfen, die deswegen den Namen Hochofen führen. Eine nähere Beschreibung des Hochofens kann an dieser Stelle unterbleiben, da dieser Ihnen allen bekannt ist. Er verschmilzt die Eisenerze mit Hilfe von Koks, der einmal die Rolle des Brennstoffes zur Erzeugung der für die Durchführung des Hochofenschmelzens erforderliche Wärme liefert und der zum anderen den Sauerstoff aus dem Erz abbaut.

Außer den Sauerstoffverbindungen des Eisens enthalten alle Eisenerze mehr oder weniger große Mengen erdiger Bestandteile, die man mit Gangart bezeichnet, unter denen die Kieselsäure, die Tonerde und der Kalk die Hauptrollen spielen. Diese sind auch zugleich die Hauptbestandteile der Koksasche. Alle drei Stoffe sind für sich allein nur bei sehr hohen Temperaturen schmelzbar, sie bilden jedoch in bestimmtem Mengenverhältnis leicht schmelzbare Verbindungen oder Gemische von solchen. Selten sind die drei Stoffe in den Erzen in solchem Mengenverhältnis vorhanden, daß ohne weiteres eine schmelzgerechte Schlacke zu erwarten ist, meist fehlt es an Kalk; dieser wird dem Erzgemisch, das der Hochofen verarbeitet, in Form von Kalkstein zugeschlagen. Die entstandene Schlacke verläßt den Hochofen in flüssigem Zustande. Je nach der Art des erblasenen Roheisens erhält man kalkreichere oder kalkärmere Schlacken. Die kalkreichen Schlacken, die vorzugsweise bei Gießerei- und Hämatitroheisen anfallen, finden Verwendung in der Zementindustrie, während die kalkärmeren Schlacken in erster Linie als Begleiter von Thomasroheisen auftreten. Sie überragen in ihrer Menge bei weitem die kalkreichen Schlacken. Ihr geringerer Kalkgehalt verleiht ihnen gesteinsartige Eigenschaften, weshalb sie vorwiegend zu Straßenbaustoffen, Gleisschotter und Betonzuschlagstoffen verarbeitet werden.

Die flüssige Schlacke wird in großen Pfannen vom Hochofen weggefahren, sofern man sie nicht unmittelbar am Hochofen körnt, was meist durch Einlaufenlassen der Schlacke in einen Wasserstrom geschieht, wobei sie zu einem scharfkantigen Sande, dem Schlackensand, erstarrt. Die Körnung kann aber auch auf trockenem Wege mittels Dampf oder Luft bewirkt werden. Über die weitere Verarbeitung der Hochofenschlacke sollen die noch folgenden Vorträge Aufschluß geben.

*) Abbildungen des Verfassers.

Es ist wichtig, sich über die Mengen an Hochofenschlacken, die bei uns in Deutschland anfallen, Rechenschaft zu geben. Bei der bisher üblichen Roheisenherstellung wurde ein Erzgemisch, auch Möller genannt, verschmolzen, das einen großen Anteil ausländischen, eisenreichen und gangartsarmen Erzes enthielt, d. h. es entfallen bei dieser Arbeitsweise je Tonne Roheisen etwa 600 kg Hochofenschlacke. Das Bild 1 gibt Ihnen eine zeichnerische Darstellung der Mengenverhältnisse von Erz, Kalkstein und Koks, bei der Erzeugung von 1000 t Thomasroheisen und der dabei entfallenden Schlackenmenge.



Entstehung der Schlacke eines Thomashochofens mit einer Roheisenerzeugung von 1000 t/Tag

Je ärmer an Eisen und je reicher an Gangart die zu verschmelzenden Eisenerze sind, um so größer ist ihr Kalksteinbedarf und um so höher wird der Entfall an Hochofenschlacke. Wie Ihnen aus Fachzeitschriften, aus der Tagespresse und aus Vorträgen bekannt sein wird, sind nun gerade die deutschen Eisenerze, im Gegensatz zu den meisten Auslandserzen, solche mit geringem Eisen- und hohem Gangartgehalt. Die steigende Verwendung der deutschen Erze in den deutschen Eisenhütten hat daher zu einer beträchtlichen Vermehrung der Schlackenmengen je Tonne Roheisen geführt, die infolge der Steigerung der Roheisenerzeugung an sich schon stärker gestiegen sind. Während im allgemeinen je Tonne Roheisen — wie schon gesagt — etwa 600 kg Schlacke entfallen, steigt diese Zahl bei Verwendung deutscher Erze auf 1000 kg und mehr. Wie sieht es nun mit der Verwertung der großen anfallenden Schlackenmengen aus?

Bezogen auf das Jahr 1936 hat etwa ein Drittel des Schlackenfalls für Baustoffe im Straßenwesen, ein weiteres Drittel für Stoffe der Bauwirtschaft Verwendung gefunden, dagegen ist ein volles Drittel unverwendet geblieben. Auf die voraussichtlichen Verhältnisse des Jahres 1940 übertragen, heißt das, daß rund 7 Millionen Tonnen Schlacke als unbenutzbar auf die Halde gebracht werden müßten. Nimmt man nun das Raummetergewicht der Schlacke zu 2 Tonnen an, so nimmt diese Schlackenmenge einen Raum von 3,5 Millionen cbm ein. Würde man die Schlacke 10 m hoch auftürmen, so würde hierfür ein Platz von 350 000 qm oder 35 ha beansprucht werden, was einer mittleren Bauernstelle entsprechen würde. Diese Zahlen zeigen also, ein wie bedeutsames Problem in der Schlackenverarbeitung liegt.

Um nun auf die Verwendung der Hochofenschlacke im einzelnen, wenn auch nur oberflächlich einzugehen, sei bemerkt, daß die Bestrebungen, die Hochofenschlacke zu verwerten, recht weit zurückliegen.

Schon in der Mitte des vorigen Jahrhunderts, als mit dem Übergang von der Holzkohle zum Koks die Entwicklung des Eisenhüttenwesens zur Großindustrie begann, wandte man sich den Fragen der wirtschaftlichen Unterbringung der Schlacke zu. 1859 begann Lürmann in Osnabrück mit der Herstellung von Mauersteinen aus Hochofenschlacke, und 1862 entdeckte Langen in Troisdorf die hydraulischen Eigenschaften des Schlackensandes, womit seine Fähigkeit gekennzeichnet wird, unter bestimmten Bedingungen zementartig zu erhärten. Hieraus entstand nach Überwindung vieler Schwierigkeiten und nach langen Kämpfen mit der älteren Portlandzementindustrie die Hüttenzementindustrie, die der deutschen Wirtschaft in Form von Eisenportlandzement und Hochofenzement vollwertige hydraulische Bindemittel zur Verfügung stellt. Bei Hochofenschlacke hat man ganz allgemein zwischen zwei Zustandsformen zu unterscheiden: dem glasigen und dem kristallinen Gefügebau. Den glasigen oder amorphen Gefügebau erhält man bei schnellem Abkühlen der flüssigen Schlacke, so daß zur Abscheidung von Kristallen keine Zeit bleibt. Läßt man dagegen die Schlacke allmählich erkalten, so bildet sich der kristalline Zustand heraus. Die glasige Schlacke besitzt wertvolle hydraulische Eigenschaften und findet daher ausgedehnte Anwendung zur Herstellung von hydraulischen Bindemitteln. Die kristalline Schlacke hat, wenn sie thermisch richtig behandelt wird, gesteinsartige Eigenschaften und nähert sich in ihrer Festigkeit dem Basalt, von dem sie oft mit bloßem Auge nicht zu unterscheiden ist. Die glasige Schlacke gewinnt man — wie schon erwähnt — in Form von Schlackensand, indem man flüssige Schlacke in einen starken Wasserstrahl laufen läßt, oder auch dadurch, daß man sie mit Dampf oder Luft zerstäubt. Hierbei wird die Schlacke in kleine Teilchen zerrissen und erstarrt so schnell, daß sie nicht kristallisiert, sondern im glasigen Zustande verharrt. Die hydraulischen Eigenschaften des Schlackensandes werden erst nach Zusatz eines Erregers wirksam. Als solchen kann man die fein gemahlene kristalline Schlacke benutzen, gebräuchlicher aber sind gelöschter Kalk oder Zement. Zur Herstellung von Mörtel wird deshalb der Schlackensand mit gelöschtem Kalk oder Zement gemischt; zur Erzeugung von normgemäßem, den staatlichen Anforderungen entsprechendem Zement mahlt man den Sand mit Zementklinkern zusammen, und zur Herstellung von Mauersteinen, den sogenannten Hüttensteinen, wird der Sand mit gemahlener, kristalliner Schlacke gemischt und gepreßt. Die Erhärtung erfolgt in einem Strom von kohlenstoffhaltigen Gasen, die im Eisenhüttenbetrieb meist in großen Mengen zur Verfügung stehen. Andere Verfahren bedienen sich der Erhärtung an der Luft, was indessen wesentlich länger dauert. In diesem Falle wird als Zusatz meist gelöschter Kalk gewählt.

Die kristalline Hochofenschlacke wird seit über 50 Jahren als Straßenbaustoff, als Gleisbettungstoff und als Betonzuschlag benutzt. Für diese Zwecke muß die Schlacke raumbeständig und widerstandsfähig gegen Druck und Schlag sein; sie muß also möglichst fest und dicht sein. Zur Gewinnung der verschiedenen Baustoffe, wie Pflastersteine, Packlage, Kleinschlag und Splitt wird eine geeignete Schlacke auf einem entsprechend vorbereiteten Bett ausgegossen, nach dem Abkühlen zerklüftet und nötigenfalls durch Sieben in die verschiedenen Korngrößen geteilt. Wichtig ist, daß die Schlacke

in möglichst dicker Schicht gegossen wird, damit sie langsam abkühlt. Hierdurch wird ein gutes Kristallgefüge und eine große Festigkeit erreicht. Man kann die Schlacke auch in Kübeln zu großen Blöcken erstarren lassen, die dann in geeigneter Weise zerkleinert und klassiert werden. Mit Teer überzogener Schotter aus Hochofenschlacke findet in steigendem Maße Verwendung im sogenannten Teerstraßenbau als tragende Decke.

Für die Lieferung aller Baustoffe aus Hochofenschlacke bestehen Normen und Richtlinien, so daß dafür gesorgt ist, daß für jeden Zweck stets die bestgeeignete Schlacke geliefert wird. Allerdings muß, wenn eine Höchstleistung erzielt werden soll, auch der Verarbeitende mit den besonderen Eigenschaften der Schlacken-erzeugnisse vertraut sein und ihnen Rechnung tragen. Zur Zeit unterliegen diese Richtlinien einer Neubearbeitung.

Als jüngste Erzeugnisse aus Hochofenschlacke sind die Schaumschlacke und die Schlackenwolle zu nennen.

Zur Gewinnung von Schaumschlacke — wegen ihrer Ähnlichkeit mit dem Naturbims des Neuwieder Beckens allgemein Hüttenbims genannt — bringt eine geeignete Schlacke mit wenig Wasser zusammen. Der entstehende Dampf bläht die Schlacke zu einer großstückigen, porigen Masse auf. Durch Brechen und Sieben werden verschiedene Korngrößen gewonnen, die als Isolierstoff verwendet werden, oder mit Zement zu Leichtsteinen und Leichtbeton verarbeitet werden.

Schlackenwolle ist ein hochwertiger Schall- und Wärmedämmstoff. Sie entsteht, wenn man eine geeignete Schlacke in dünnem Strahl der Einwirkung eines Dampfstrahles aussetzt, der unter hohem Druck aus einer Düse austritt. Dadurch wird die Schlacke in lange dünne Fäden zerrissen. Diese werden als Wärmeschutz von Rohrleitungen usw. benutzt.

In letzter Zeit ist der Hochofenschlacke noch ein neues Anwendungsgebiet erschlossen worden, nämlich die Verwendung als Kalkdüngemittel in der Landwirtschaft. Es ist das Verdienst von Professor Kappen (Bonn), auf die Bedeutung der Hochofenschlacke als Kalkdüngemittel hingewiesen und ihre Brauchbarkeit hierfür durch eingehende Versuche nachgewiesen zu haben. Diese fanden durch weitere amtliche Versuche ihre volle Bestätigung, so daß die Hochofenschlacke heute als Kalkdüngemittel, und zwar gleichwertig mit kohlen-saurem Kalk, der schon länger für diesen Zweck Verwendung findet, amtlich zugelassen ist. Der jährliche Kalkbedarf der deutschen Landwirtschaft wird auf etwa 20 Millionen Tonnen geschätzt, während bisher nur etwa 2 Millionen Tonnen verbraucht wurden. Hier können also in Zukunft beträchtliche Mengen Hochofenschlacke nutzbringend verwertet werden.

Schließlich ist noch die Verwendung der Hochofenschlacke als Bergersatz und für Anschüttungszwecke zu erwähnen. In letzter Zeit ist hier besonders die Reichsautobahn als Großabnehmer hervorgetreten. Eine unmittelbar wirtschaftliche Verwendung kann jedoch hierin nicht erblickt werden, da sie meist mit Zubußen für die Lieferer verknüpft ist.

Für jedes der zahlreichen Verwendungsgebiete ist jeweils eine Schlacke am besten geeignet. Zur Zementherstellung braucht man eine kalkreiche Schlacke, für Straßenbaustoffe ist nur eine Schlacke mit weniger Kalk brauchbar usw.

In neuer Zeit fällt eine besondere Art von Hochofenschlacke an, die beim sogenannten sauren Schmelzen entsteht. Über dieses Verfahren ist vor kurzem von anderer Seite schon mehrfach berichtet worden, so daß ich an dieser Stelle nicht näher darauf einzugehen brauche. Man vermeidet bei dieser Art des Schmelzens hohe Kalksteinzuschläge, wie sie zur Erzielung einer normalen Schlacke notwendig wären, um einmal die Schlackenmenge zu senken und zum anderen den Koksbedarf des Hochofens zu vermindern. Diese Schlackenart ist besonders reich an Kieselsäure und daher nur schwer verwertbar. Jedoch wird auch an diesem Problem eifrig gearbeitet.

Der in den Hochofenschlacken — allerdings nur in geringen Mengen — enthaltene Schwefel legte es nahe, seine Gewinnung ins Auge zu fassen, da bislang noch beträchtliche Mengen elementaren Schwefels zur Deckung des deutschen Bedarfes eingeführt werden müssen. Jedoch gibt es eine andere Quelle, aus der Schwefel gewonnen werden kann. Es sind die Kokereigase, die so viel gewinnbaren Schwefel enthalten, daß damit der gesamte deutsche Bedarf gedeckt werden kann.

Erwähnt sei auch noch, daß die Hochofenschlacke auch als Devisenschaffer wirkt, da nicht unerhebliche Mengen ausgeführt werden, und zwar meist nach Holland, einem an Naturgesteinen armen Lande.

Es gibt also eine Reihe von Verwendungsmöglichkeiten für die Hochofenschlacke. Wenn sie noch nicht restlos ausgeschöpft werden können, so liegt das zum Teil daran, daß immer noch Vorurteile gegen die Hochofenschlacke vorliegen, die nicht begründet sind. Insbesondere ist es die gewissen Hochofenschlacken anhaftende Zerfallsgefahr, die manchen Stellen die Verwendung von Schlacken nicht ratsam erscheinen läßt. Jedoch sind solche Schlacken mittels bestimmter Prüfungsverfahren zu erkennen und können ausgeschieden werden. Weitere Hemmungen in der Verwendung der Hochofenschlacke sind darin begründet, daß sie als Wettbewerber gegen Naturgesteine auftritt, deren Industrie man dagegen schützen zu müssen glaubt. Auch durch zu weitgehende Forderungen der Bauaufsichtsbehörden wird der Absatz der Hochofenschlacke eingengt.

Aufbau metallurgischer Schlacken, ihre Eigenschaften und Beeinflussungsmöglichkeiten*)

Von Dr. F. Hartmann, Dortmund

Mitteilung aus der Kohle- und Eisenforschung (Forschungsgesellschaft der Vereinigte Stahlwerke AG.), Dortmund

Herr Direktor Schäfer hat Ihnen eben eine Übersicht gegeben über die wichtigsten Schlackenarten und dabei die Hochofenschlacke entsprechend ihrer über-ragenden Bedeutung in besonderem Maße berücksichtigt. Er hat ferner betont, daß Schlacken metallurgischer Prozesse längst nicht mehr lästige Abfallstoffe sind, sondern daß sie der Ausgang geworden

sind für wichtige Produkte, die sogar — wie im Falle der Hochofenschlacke — devisenbringende Bestandteile unseres Auslandshandels sein können. Auch im Inlandhandel bedeutet die Wiederverwertung der Hochofenschlacke für die verschiedensten Zwecke wesentliche Umsätze, die, rückwirkend auf die Gestehungskosten des Stahles angerechnet, eine spürbare Entlastung des Eisenpreises bedeuten. Es muß

*) Abbildungen des Verfassers

jedoch betont werden: Es war nicht immer so! Es hat harter Arbeit, zäher Forschung und größter Anstrengungen bedurft, ehe es gelungen war, das ehemalige Abfallprodukt Hochofenschlacke zu einem vielseitig verwendbaren, hochwertigen Rohstoff für die verschiedensten Zwecke zu machen. Dabei darf vor allem nicht der Kaufleute vergessen werden, die durch ihre zähe, unermüdlige, die Gegensätze zwischen Hersteller und Verbraucher ausgleichende Arbeit es verstanden haben, den Markt für die Verwertung der Schlacke vorzubereiten, zu festigen und so zu verankern, daß heute ein dauernd befriedigender Absatz gesichert ist. Dieser Einsatz für die Verwertung der Schlacke ist heute noch nicht abgeschlossen. Es sind im Gegenteil gerade jetzt besonders viel Probleme entstanden, die in vollem Fluß sind. Auch heute ist beispielsweise, wie auch Herr Direktor Schäfer mitteilte, noch etwa ein Drittel der Hochofenschlacke unverwertbar, und dabei bringt die Steigerung der Rohstahlproduktion immer größere Schlackenmengen hervor, die zum Teil, soweit sie dem sauren Hochofenschmelzverfahren entstammen, zunächst noch wenig brauchbar sind.

Voraussetzung für einen gleichmäßigen Absatz solcher Schlacken wäre nun, wenn es dem Hüttenmann gelänge, ein immer gleiches Schlackenprodukt herzustellen, dessen Eigenschaften festgelegt werden können. Das ist nun aus folgenden Gründen nicht unbedingt möglich: Für den Roheisenerzeuger ist der oberste Gesichtspunkt die Herstellung eines gleichmäßigen einwandfreien Roheisens nach verschiedenen Güteansprüchen. Er hat aber dabei voraus die Schwierigkeit, daß seine Rohstoffe außerordentlich wechselnd sind, daß er überdies auf manche Versuche mit eigenartiger Hochofenführung sich einlassen muß, bei denen sein einziges Hilfsmittel zur Beeinflussung des metallurgischen Vorganges die zweckmäßige Anpassung der Zusammensetzung der Schlacke ist. Es kommt noch dazu, daß heute die Produktionseinheiten, z. B. der vorhandene Hochofenraum, so voll ausgenützt sind, daß Betriebsversuche nicht mehr nebenbei in kleinen Ofeneinheiten erledigt werden können. Ebenso wie die Hochofener hat aber auch der Metallurge bei seinen sonstigen Schmelzprozessen folgende Schwierigkeiten: Die während des Schmelzens entstehenden Schlacken setzen sich zusammen aus solchen Bestandteilen, die mit den Rohstoffen eingebracht sind und an sich zwecklos oder sogar unerwünscht sind, und die dann durch den metallurgischen Prozeß mitverarbeitet werden müssen. Sie bestehen andererseits aus solchen Bestandteilen, die absichtlich zugegeben werden, um in den metallurgischen Vorgang einzugreifen und ihn in eine gewünschte Richtung zu zwingen. Dieses Spiel der Gegensätze, diesen Zwiespalt zwischen Drang und Zwang möchte ich an einigen Beispielen erläutern.

Abb. 1 zeigt von oben nach unten eine Übersicht über die wichtigsten Schlackenarten des Eisenhüttenbetriebs. Die Schlacken sind nach ihrer Zusammensetzung und Entstehungsart gekennzeichnet. Um einen Anhalt zu geben, mit welchen Mengen man zu rechnen hat, ist das Verhältnis von Schlacke und damit gleichzeitig erzeugtem Roheisen bzw. Stahl in der nächsten Spalte für jede Schlacke eingetragen. In den nächsten Spalten folgen dann der Kalk-

gehalt der Hochofenschlacke und das Verhältnis von Kalk zur Kieselsäure, welches meist zur ersten Kennzeichnung von Schlacken angegeben wird. Die nächste Spalte enthält dann Angaben, welche unvermeidlichen Bestandteile die Schlacken enthalten und welche absichtlichen Zusätze gegeben werden. Aus der letzten Spalte ist der Zweck ersichtlich, zu dem die Zusätze gemacht werden.

Die basische Hochofenschlacke beispielsweise steht zu dem gleichzeitig erzeugten Roheisen im Verhältnis 0,6 bis 1. Diese Zahl ist abhängig und veränderlich mit dem Mengenverhältnis der eingesetzten Erze. Diese Zahl ist abhängig und veränderlich mit dem Mengenverhältnis der eingesetzten Erze. Diese ist bei reichen Erzen mit 50 bis 60% Fe nur gering, aber sehr groß bei armen Erzen, die vielleicht nur 30% Fe und darunter enthalten. Der Koks hinterläßt in der Schlacke etwa 10 bis 12% seines Gewichts als Asche, und zwar von wechselnder Zusammensetzung. Der basische Hochofengang ist nun gekennzeichnet dadurch, daß der gesamte Schwefel nach Möglichkeit aus dem Roheisen entfernt und an die Schlacke gebunden wird. Dies wird hauptsächlich erreicht durch hohen Kalkzusatz. Solche Schlacken enthalten üblicherweise 38 bis 44% CaO. In der gleichen Richtung arbeitet der Zusatz von Siemens-Martin-Schlacke und anderen manganhaltigen Stoffen, da manganhaltige Schlacke ebenfalls entschwefelnd wirkt. Gleichzeitig regeln diese Zusätze in der richtigen Menge gegeben auch den Flüssigkeitsgrad der Schlacke in günstiger Weise. Dieses Arbeitsverfahren war allgemein üblich so lange, wie der Kieselsäuregehalt der Schlacken und die zwangsläufig entstehende Schlackenmenge noch nicht allzu groß waren. Als man jedoch dazu überging, immer mehr Erze mit hohem Kieselsäuregehalt und mit steigendem Gangartgehalt zu verarbeiten, da wurde die Grenze erreicht, wo sich die Einstellung eines hohen Kalkgehaltes von etwa 38 bis 44% nur durch Zugabe sehr großer Kalkmengen hätte aufrecht erhalten lassen, die wiederum zu ihrem Schmelzen einen übermäßig großen Koksbeitrag verlangt hätten. Aus diesem Zwang heraus wurde zum sauren Schmelzen übergegangen, bei dem die Erze ohne Kalkzusatz oder nur mit geringem Kalkzusatz heruntergeschmolzen werden. Auf diese Weise gelingt es, das Eisenoxydul der Erze fast restlos zu reduzieren und bei nur wenig veränderten Temperaturen ähnlich wie beim basischen Schmelzen den Hochofen zu betreiben. Die entstehenden Schlacken setzen sich dann zur Hauptsache zusammen aus der Gangart der Erze und aus der Koksasche. Da eine solche Schlacke den

Betrieb	Kennzeichnung	Schlacke Eisen	CaO in %	CaO SiO ₂	Unvermeidliche Bestandteile	Absichtliche Zusätze	Zweck der Zusätze
Hochofen	basisch	0,6 - 1,0	38 - 44	1,2 - 1,6	Erzgangart Koksasche	Kalk, Manganträger	Entschwefelung Verflüssigung
	sauer	1 - 1,5		0,5 - 1,0	Erzgangart Koksasche	wenig Kalk Tonerdehaltige Stoffe	Verflüssigung
	ultra-sauer	wechselnd	gering	< 0,4	Erzgangart Koksasche	Alkalien	Verflüssigung
Soda-schlacke	Alkali-reich				Hochofenschlacke	Soda	Entschwefelung
Roheisenmischer	basisch	1 : 50	40 - 50	> 1,4	Hochofenschlacke	Kalk	Versteifung Entschwefelung
Thomasbirne	basisch		50 - 60		Kieselsäure, Phosphorsäure, Kalk, Mangan-, Vanadinsäure, Dolomit	Manganträger, Kieselsäure	Versteifung Phosphorbindung

Abb. 1: Zusammensetzung und Entstehung verschiedener Hütten Schlacken

Schwefel des Roheisens nicht mehr zu binden vermag, muß dieser nachträglich aus dem Roheisen entfernt werden. Man erreicht dies durch Behandeln des aus dem Hochofen abgestochenen Roheisens mit flüssiger Sodaschlacke. Auch die Verwendung solcher Sodaschlacken nach dem Gebrauch stellt zur Zeit ein Problem dar, an dem von verschiedenen Seiten gearbeitet wird.

Beim sauren Schmelzverfahren können nun die verschiedensten Schlacken entstehen. Ihre Zusammensetzung wird nur insofern durch geeigneten Zusatz zum Möller oder durch besondere Zuschläge geregelt, daß die entstehenden Schlacken nicht zu zähflüssig werden.

Nachdem es sich gezeigt hat, daß das saure Schmelzen mit nachfolgender Sodabehandlung des Roheisens sich auch im großen mit Erfolg durchführen läßt und sich tatsächlich im großen eingeführt hat, wird jetzt erwogen, noch einen Schritt weiter zu gehen, zum sogenannten „ultrasauren Schmelzen“, wobei Schlacken entstehen, deren CaO-SiO₂-Verhältnis unterhalb von 0,4 liegt. Um diese Schlacken, die meist sehr zähflüssig sind, zu verflüssigen, ist der Zusatz von Soda im Hochofen vorgeschlagen worden. Die Verwertung solcher zäher Schlacken ist ebenfalls noch ein ungelöstes Problem.

Das flüssige Roheisen wird bekanntlich nach Verlassen des Hochofens im Mischergesammelt (große trommelförmige Behälter von etwa 1000 t Fassungsvermögen). Über dem Roheisenbade sammelt sich dann die Mischerschlacke an, die zunächst ähnlich wie die Hochofenschlacke zusammengesetzt ist, dann aber oft Zusätze von Kalk erhält, damit sie steifer und das Mauerwerk nicht so angegriffen wird. Ferner soll sie dadurch auf das Roheisen stärker entschwefelnd wirken. Bei der Mischerschlacke handelt es sich allerdings nur um geringe Mengen.

Dagegen entsteht bei der nächsten Stufe der Stahlerzeugung, dem Thomasverfahren, wieder eine wichtige Schlackenart in großen Mengen, die Thomasschlacke. Sie ist hochbasisch und enthält meist über 50% Kalk. Sie besteht zur Hauptsache aus dem in die Thomasbirne eingefüllten Kalk. Aus dem Dolomittfutter nimmt sie Magnesia und Kalk auf. Sie enthält aber vor allem die Stoffe, die beim Frischen aus dem Roheisen entfernt werden. Außer Manganoxydul und Eisenoxydul ist der wertvollste Bestandteil der Phosphor. Um nun den Phosphatgehalt in die geeignete Form überzuführen, wird heute häufig vor dem letzten Durchblasen noch Quarzsand zugegeben. Dadurch steigt der Wert der Thomasphosphatschlacke als Düngemittel noch erheblich an, weil nun alle Phosphorsäuren in einer Form vorliegen, in der sie von den Pflanzen leicht abgebaut werden können.

Außerdem ist es in der letzten Zeit noch gelungen, einen weiteren wichtigen Stoff aus den Thomasschlacken zu gewinnen, das Vanadin. Vanadin ist besonders wertvoll als Legierungsbestandteil von hochwertigen Stählen. Es hat u. a. die wertvolle Wirkung, daß es viele legierte Stähle leichter schmiedbar macht. Die meisten Erze, aber auch die Koksaschen, enthalten nun geringe Mengen von Vanadin

(0,5%). Ein großer Teil davon geht im Hochofen in das Roheisen über. Bei geeigneter Leitung des Thomasverfahrens gelingt es, in der ersten Stufe den größten Teil des Vanadins aus dem Roheisen zu verbrennen und in die Thomasschlacke überzuführen. Man unterbricht das Blasen, zieht diese erste Schlacke ab und gewinnt hieraus die Vanadinsäure nach bekannten chemischen Verfahren. Auf diese Weise ist es gelungen, in sehr fühlbarer Weise dem empfindlichen Mangel an deutschen Vanadinerzen abzuwehren, ohne daß die übrige Thomasschlacke in ihrer Güte beeinflusst wurde. Allerdings muß hier der Stahlwerker einen unerwünschten Zeitverlust mit in Kauf nehmen.

Eine besonders wichtige metallurgische Rolle (Abb. 1a) spielen die Schlacken im Siemens-Martin-Verfahren. Zunächst entstehen Zwischenschlacken, die von wechselnder Zusammensetzung sind. Sie enthalten als wesentliche Bestandteile große Mengen von Eisenoxydul und Manganoxydul. Da solche Schlacken das Dolomittfutter des Herdes stark angreifen, gehen große Mengen von Magnesia und Kalk in Lösung. Alle Zuschläge enthalten ferner auch Nebenbestandteile, die sich in der Schlacke wiederfinden. An absichtlichen Zusätzen sind zu nennen: Wird die Schlacke zu zähflüssig, so werden verflüssigende Mittel, wie Flußspat

Betrieb	Kennzeichnung	Schlacke Eisen	CaO in %	CaO/SiO ₂	Unvermeidliche Bestandteile	Absichtliche Zusätze	Zweck der Zusätze
Basischer Siemens-Martin-Ofen	Zwischenschlacken	wechselnd	wechselnd		Eisenoxydul, Dolomittfutter, Gangart der Zuschläge	Manganträger, Kalk, Bauxit, Flußspat	Absteifung oder Verflüssigung
	Endschlacken	wechselnd	wechselnd		Mangan, Phosphor, Schwefel, SiO ₂ , Dolomittfutter	wie oben	
Saurer Siemens-Martin-Ofen	Saure Schlacken	wechselnd	wechselnd		Saures Futter, Manganoxyd, Eisenoxyd	Bauxit, Flußspat	Verflüssigung
Lichtbogenofen	basisch	1 10	> 60	wechselnd	Ofenfutter	Kalk, Flußspat, Bauxit	Absteifung der Schlacke, Völlige Reaktion von Fe, Mn, Cr ₂ O ₃ und sonstigen Metalloxyden

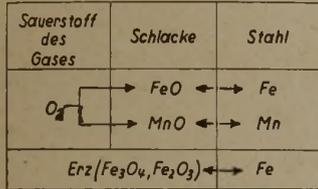
Abb. 1a: Zusammensetzung und Entstehung verschiedener Hüttenschlacken

oder Bauxit, eingeworfen, dann kommen die Reaktionen, gekennzeichnet durch das Kochen des Stahles, in Gang, die Wärmeübertragung verbessert sich und die Schmelzföhrung wird verkürzt. Andererseits werden der Siemens-Martin-Schlacke große Mengen von Kalk zugegeben, wenn die Schlacke versteift werden soll oder um das Gleichgewicht zwischen Stahl und Schlacke zu beeinflussen. Hierzu muß ich einige nähere Ausführungen machen, da sich an dem Beispiel der Siemens-Martin-Schlacke besonders gut zeigen läßt, wie die Zusammensetzung der Schlacke den Ablauf der Reaktion zwischen Stahl und Schlacke beherrscht.

Die zum Einschmelzen in den Siemens-Martin-Ofen eingesetzte Beschickung (Abb. 2) enthält nach dem ersten Einschmelzen meist eine größere Menge von Bestandteilen, die nun durch die Schmelzarbeit daraus entfernt werden müssen. Würde man beispielsweise Roheisen einsetzen, so enthielte dies

0.2 % C
1.5 % Si
2.0 % Mn
0.5 % P
0.1 % S

Nr.		Roh Eisen %	Stahl %	Djff. %	Entfernt aus dem Rohstahl durch Reduktion mit	als
1	Kohlenstoff	3,5	0,25	3,2	Erz, Luftsauerstoff, FeO und MnO	CO oder CO ₂ (Gas)
2	Silicium	1,5	0,7	0,7	FeO, Kalk, MnO	SiO ₂ (Schlacke) CaSiO ₃
3	Mangan	2,0	0,7	1,3	FeO, MnO, CaO	MnO (Schlacke) bzw. MnSiO ₃
4	Phosphor	0,2	0,04	0,46	FeO, MnO, CaO	P ₂ O ₅ (Schlacke) / (CaO) ₃ P ₂ O ₅
5	Schwefel	0,1	0,03	0,07	FeO, MnO, CaO Flußspat	CaS, MnS, FeS als S-Fluor-Verbindung



1	$C + FeO = Fe + CO$
2	$Si + 2 FeO = 2 Fe + SiO_2$
3	$Mn + FeO \rightleftharpoons Fe + MnO$
4	$2 Fe_3P + 5 FeO \rightleftharpoons P_2O_5 + 11 Fe$ $3 CaO + P_2O_5 \rightleftharpoons (CaO)_3 P_2O_5$
5	$CaO + FeS \rightleftharpoons FeO + CaS$ $Mn + FeS \rightleftharpoons Fe + MnS$

Abb. 2: Schlackenarbeit im basischen Siemens-Martin-Ofen

Ein guter Stahl dagegen enthielte beispielsweise

0.25	% C
0.01	% Si
0.5	% Mn
0.04	% P
0.03	% S

Durch die Schmelzarbeit ist in unserem Beispiel zu entfernen

~ 3.2	% C
1.49	% Si
1.5	% Mn
0.16	% P
0.07	% S

Alle diese Stoffe müssen oxydiert werden. Nur zu einem äußerst geringen Teil kann die Oxydation durch den Sauerstoffgehalt der Gase selbst unmittelbar besorgt werden; denn gleich nach dem Niederschmelzen der Beschickung hat sich im Siemens-Martin-Ofen bereits eine Schlackendecke über dem Metall gebildet, welche die Heizgase von dem Metallbad fernhält. Alle Reaktionen der Oxydation müssen deshalb durch die Vermittlung der Schlacken durchgeführt werden. Es gilt dafür also, wie es unten links angedeutet ist, daß der Sauerstoff des Gases als FeO oder MnO in der Schlacke gebunden wird und daß Eisenoxydul und Manganoxydul wiederum unter Reduktion zu Metall Sauerstoff abgeben. Der zur Oxydation der unerwünschten Roh-eisenbegleiter notwendige Sauerstoff kann ferner auch noch durch Zugabe von Erz (Fe₂O₃ bzw. Fe₃O₄) geliefert werden. Dies löst sich in der Schlacke auf, und auch in diesem Fall geht also die Sauerstoffzufuhr zum Metallbad über die Schlacke. Die rechts unten eingetragenen Gleichungen 1 bis 5 geben nun in roher Weise an, in welcher Weise Schlacke und Stahl reagieren. Kohlenstoff, Silicium und Mangan und der wahrscheinlich als Eisenphosphid gebundene Phosphor werden dabei durch die Vermittlung von FeO oxydiert unter Bildung von Eisenmetall. Diese Reaktion verläuft auch bei sauren Schlacken in gleicher Weise, beispielsweise im sauren Siemens-Martin-Ofen. Bei der Entfernung von Schwefel und Phosphor ist dagegen die Anwesenheit eines Kalküberschusses nötig, wie die Gleichungen 4 und 5 erkennen lassen. Auch der Vorgang der Gleichung 2 wird durch einen höheren Kalkgehalt der Schlacke entscheidend gefördert, wobei sich dann Kalziumsilikat bildet. Der obere Teil der Abbildung läßt ferner erkennen, daß die unten aufgeführ-

ten Reaktionen im wesentlichen durch das FeO und MnO in der Schlacke vermittelt und durch Kalküberschuß entscheidend gefördert werden. Schwefel kann ferner noch durch Flußspat zum Teil verflüchtigt werden, wahrscheinlich bildet sich dabei eine ihrer Zusammensetzung nach noch nicht bekannte flüchtige Schwefelfluorverbindung.

Wurde Mangan durch Vermittlung von FeO zu MnO oxydiert, so geht es besonders leicht in saure Schlacke mit höherem Kieselsäuregehalt über. Das ist beim üblichen Siemens-Martin-Verfahren jedoch unerwünscht, da Mangan als wertvoller Stahlbegleiter dem Metall möglichst erhalten werden soll. Auch hier

regelt der Kalkgehalt wieder den Manganabbrand. Je basischer eine Schlacke ist, desto geringer ist ihre Aufnahmefähigkeit für MnO. Beim basischen Siemens-Martin-Verfahren ist also der Manganabbrand durch den Kalküberschuß der Schlacke verlangsamt und in gewissen Grenzen regelbar. Bei richtiger Wahl der Temperatur und des Kalkgehaltes gelingt es sogar, einen Überschuß von Mangan wieder aus der Schlacke in den Stahl zurückzugewinnen, trotzdem gleichzeitig unerwünschte Stahlbegleiter noch aus dem Bad durch Oxydation entfernt werden.

In der rechten Spalte des Bildes ist nun zu ersehen, welche Bestandteile der Siemens-Martin-Schlacke durch die Reaktion zwischen Stahl und Schlacke zugeflossen sind: Verflüchtigt hat sich nur der Kohlenstoff als CO oder CO₂ und ein mäßiger Teil des Schwefels bei der Zugabe von Flußspat, dagegen erhielt die basische Siemens-Martin-Schlacke große Mengen von CaO, die, wie gezeigt, für die Gleichgewichtseinstellung bei den Reaktionen gebraucht wurden, etwas Kieselsäure aus dem Abbrand, gebunden als Kalziumsilikat, viel MnO und FeO, den gesamten abgebrannten Phosphor als Kalziumphosphat und den größten Teil des Schwefel-einsatzes gebunden als Kalziumsulfid, Mangansulfid und Eisensulfid und möglicherweise auch als Kalziumsulfat.

Beim basischen Siemens-Martin-Verfahren werden nun häufig eine oder mehrere Zwischenschlacken gebildet und diese werden, wenn sie ausreagiert haben, abgezogen. Aus dem gegebenen Überblick geht hervor, daß diese Zwischenschlacken und auch die Endschlacken die verschiedensten Zusammensetzungen haben können. Damit nun die wertvollen Bestandteile der Siemens-Martin-Schlacke, vor allem Mangan und Phosphor nicht verlorengehen, wird die Siemens-Martin-Schlacke im ganzen im Hochofen wieder eingesetzt, wobei ihre wertvollen Bestandteile durch Reduktion wiedergewonnen werden.

Bei einem Blick auf Abb. 1a finden wir nun noch Angaben über die Schlacken, die beim sauren Siemens-Martin-Verfahren entstehen. Sie enthalten viel Eisenoxydul und Manganoxydul; außer ihrem Hauptbestandteil Kieselsäure sind darin noch die üblichen Zusätze Bauxit, Flußspat, die zur Verflüssigung zugegeben wurden, gelöst. Eine besondere Verwendung solcher Schlacken ist mir nicht bekannt.

Die Abbildung enthält dann noch in der letzten Reihe Angaben über die Schlacke, die im basischen Lichtbogenofen entsteht. Es sind keine allzu großen Mengen. Sie enthalten sehr viel Kalk, zum Teil in der Form von Kalziumkarbid, ferner die als Verflüssigungsmittel evtl. zugegebenen Zusätze von Bauxit oder Flußspat. Durch die außerordentlich stark reduzierende Wirkung des Lichtbogens und der glühenden Elektrodenkohle, durch die hohen Temperaturen und den völligen Luftabschluß werden die zunächst vorhandenen Mengen von FeO, MnO, Cr₂O₃ und von anderen Metalloxyden fast völlig reduziert. Die Endschlacken sind so basisch und arm an Metalloxyden, daß sie meist beim Erkalten zu Staub zerrieseln. Diese Schlacken werden nicht weiter verwendet.

Nach diesem Überblick möchte ich mich nun den Eigenschaften der Schlacken zuwenden. Im voraus kann dazu gesagt werden: Die Untersuchung der Hüttenschlacke ist noch sehr jung, und es fehlen deshalb noch manche grundlegenden Meßwerte. Es besteht noch große Unklarheit über so wichtige physikalische Daten wie beispielsweise die Bildungswärme der Schlacken; vor allem fehlen noch die für die Berechnungen von Wärmebilanzen dringend notwendigen Zahlen der Schmelzwärme und der Spezifischen Wärme der Schlacken. Auch sind die Kristallisationswärmen nicht bekannt. Außerdem ist unsere Kenntnis der Gefüge der kristallisierten Schlacken noch recht bescheiden; lediglich auf dem Gebiet der Thomasschlacke ist durch die grundlegenden Arbeiten von Schneiderröhren und von Trömel etwas Klarheit über einige Gefügebestandteile geschaffen worden. Dagegen wären noch sehr erwünscht genauere Angaben über das Gefüge der zur Zementherstellung dienenden Hochofenschlacken. Gänzlich im argen liegen noch unsere Kenntnisse über die Erstarrungsbedingungen der Hüttenschlacken: über die Kristallisationsfolgen der einzelnen Kristallarten, über die Mischkristallbildung und vor allem über Wege zu ihrer Beeinflussung. Vollkommen unzulänglich sind noch unsere Kenntnisse über die Struktur der flüssigen Schlacken. Dieses kommt insbesondere am stärksten zum Bewußtsein bei der großen Unsicherheit, die allen Berechnungen der Reaktionsgleichgewichte anhaftet.

Gut erforscht sind die Schmelzpunkte von Zwei-, Drei- und Vierstoffsystemen, die die hauptsächlichsten Grundstoffe der Schlacken bilden. Gut untersucht sind vor allem die Systeme CaO — SiO₂ — Al₂O₃ — MgO und Kombinationen dieser Oxyde mit FeO, MnO, Cr₂O₃ usw. Hier waren es insbesondere amerikanische Forscher, die mit unendlicher Mühe und großem Materialaufwand grundlegende Forschungsarbeit geleistet haben. Über die Zustandsgebiete dieser Systeme im festen Zustand ist manches zu ersehen aus den einschlägigen mineralogischen Arbeiten, auf die ich hier nur verwiesen haben möchte.

Etwas genauer ist eine für alle metallurgischen Vorgänge wichtige Eigenschaft erforscht: die Viskosität flüssiger Schlacken. Hier möchte ich einige Beispiele bringen: Abb. 3 zeigt eine Übersicht über die Viskosität verschiedener Eisenhüttenschlacken in Abhängigkeit von der Temperatur. Am dünnflüssigsten sind Mischerschlacken, dann folgen die üblichen Hochofenschlacken; deren Zähigkeit kreuzt sich teilweise mit der der Siemens-Martin-Schlacken. In weitem Abstand davon liegen die Thomasschlacken, die besonders hochschmelzend sind und deshalb erst bei hohen Temperaturen flüssig werden.

Die nächste Abbildung (Abb. 4) gibt einen Überblick über die Viskosität von Hochofenschlacken. Hier sind für eine ganze Anzahl von Hochofenschlacken die Bereiche der Verflüssigung eingetragen, die sich zwischen

150 bis 5 Poise erstrecken (150 Poise ist der Zähigkeitsgrad des Teers oder des Honigs, bei denen diese Stoffe zähflüssig sind. Eine Schlacke von 5 Poise ist dagegen richtig beweglich, sie fließt auf schräger Ebene rasch ab, schlägt Wellen und übersprudelt sich beim freien Fall). Die Abbildung zeigt nun für verschiedene Hochofen-

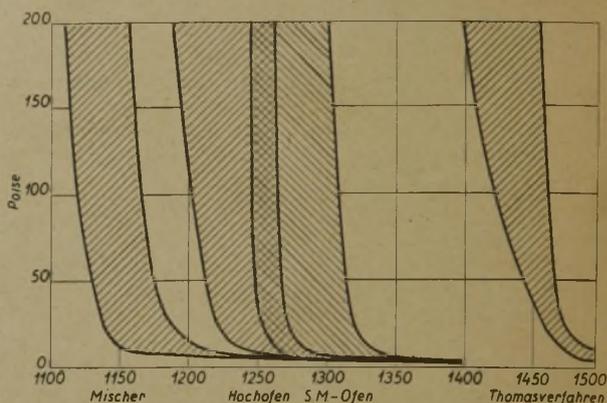


Abb. 3: Viskositätsbereich der Eisenhüttenschlacken

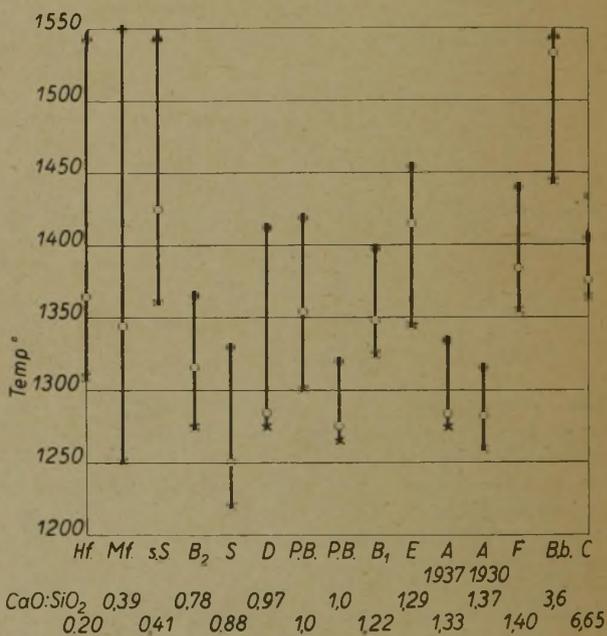


Abb. 4: Zähigkeit von basischen und sauren Hochofenschlacken

schlacken recht verschieden breite Verflüssigungsbereiche. Bei einzelnen Schlacken beträgt der durch die Länge des schwarzen Striches angedeutete Verflüssigungsbereich etwa 100° — das ist das übliche —, bei anderen Schlacken dagegen mehrere 100°. Einzelne

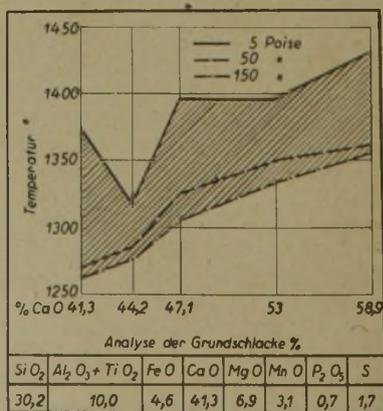


Abb. 5: Isoviskosität einer Hochofenschlacke mit Kalkzusatz

solcher Schlacken sind selbst bei 1500°, am Endpunkt unserer Messungen im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke AG., noch nicht dünnflüssig. Aus der Abbildung ist noch etwas Interessantes abzulesen: Die Schlacken sind hier geordnet nach ihren Basizitätsverhältnissen, nach dem Verhältnis von Kalk zu Kieselsäure. Ganz links sind die ultrasauren, rechts die hochbasischen Schlacken. Das Bild zeigt, daß das Kalk-Kieselsäure-Verhältnis bei sonst beliebiger Zusammensetzung der Schlacken nicht bestimmend für die Viskosität einer Schlacke ist. Die Viskosität wird vielmehr durch die Menge der einzelnen Bestandteile insgesamt bestimmt. Hierzu einige Beispiele:

Eine Grundschlacke (Abb. 5) von der im Bild angegebenen Zusammensetzung mit 41,3% CaO hatte die Viskosität (ganz links) 150 Poise bei 1260° und 5 Poise bei 1350°. Von links nach rechts steigt nun der Kalkgehalt an; die schraffierte Fläche bedeutet die Isozähigkeit. Bei Steigerung des Kalkgehaltes wird die Schlacke zunächst leichtflüssiger, bei weiterer Steigerung wieder zähflüssiger. In

ähnlicher Weise wie hier beim Kalk haben wir auch den Einfluß einer Steigerung

anderer Bestandteile der Schlacken auf die Viskosität gemessen. Aus diesen Untersuchungen bringe ich noch ein Beispiel (Abbildung 6): Durch Steigerung des Titansäuregehaltes einer Schlacke werden die so entstehenden Schlacken flüssiger. Das günstigste Mini-

mum der Zähigkeit lag bei 10% TiO₂ für diese gegebene Grundschlacke. Im übrigen zeigt die Kurve noch 2 Minima der Viskosität. Dieses Beispiel solcher systematischer Viskositätsmessungen soll Ihnen lediglich zeigen, daß die Abhängigkeit der Viskosität von der Zusammensetzung einer Schlacke nicht vorausgesagt werden kann, sondern in jedem Falle gemessen werden muß, solange wir die Gesetzmäßigkeiten der Viskosität noch nicht kennen.

Eine weitere Eigenschaft der Schlacken, die elektrische Leitfähigkeit, hat man zunächst nur aus theoretischem Interesse untersucht. So wurde beispielsweise nachgeprüft, ob elektrische Leitfähigkeit und Viskosität gesetzmäßig verknüpft sind. Während nun einige Forscher Formeln für den Zusammenhang zwischen Viskosität und elektrischer Leitfähigkeit angeben, gibt es andererseits auch Meßergebnisse, die dem widersprechen. Aus den Messungen von Weynarth bringe ich wenigstens ein Beispiel (Abb. 7) für den Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Schlacken auf die elektrische Leitfähigkeit: Die Abbildung zeigt die elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur von Schlacken aus FeO und Kieselsäure bei steigendem Kalkgehalt. Die oberste Kurve wurde gemessen an einer Schmelze von der Zusammensetzung 2 FeO · SiO₂. Von rechts nach links gehört der fast horizontale Ast zum festen Zustand, der Sprung nach oben entspricht der Verflüssigung; die nach links ansteigende Parabel entspricht der Leitfähigkeit des flüssigen Gebiets.

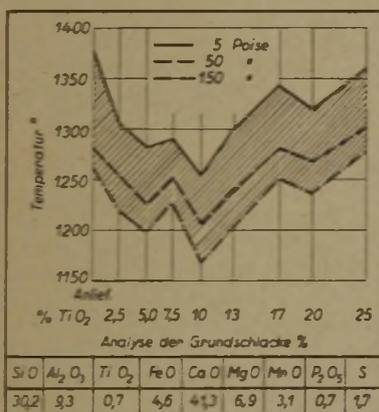


Abb. 6: Isoviskosität einer Hochofenschlacke nach Zusatz von Titandioxyd

Recht verschieden sind noch unsere Erkenntnisse über die Reaktionsfähigkeit von Schlacken. Wohl hat man die Grenze der Reaktionsfähigkeit, die Einstellung von Gleichgewichten in manchen Fällen eingehend untersucht, aber die Einzelheiten solcher Reaktionen, von denen Beispiele beim Siemens-Martin-Verfahren genannt wurden, liegen häufig noch ganz im dunkeln. Das hat seinen Grund vor allem darin, daß die Schlacken weder im flüssigen Zustand analysiert werden können, noch daß ihre Struktur im flüssigen Zustand genauer bekannt ist. Den Meßversuchen steht als größte Schwierigkeit entgegen, einen geeigneten Tiegelwerkstoff für die Behandlung von Schlacken im flüssigen Zustand zu finden, der nicht angegriffen wird.

Es gibt noch eine Reihe von weiteren Eigenschaften der Schlacken insbesondere im flüssigen Zustand, die noch untersucht werden müßten. Jedoch steht im allgemeinen vor dem rein theoretischen Interesse des Physikers dringender die Erledigung solcher Fragen, die uns die Praxis stellt und die sich aus dem Zwang zur praktischen Verwertung der Schlacken ergeben. Auch hier möchte ich ein Beispiel nennen: den Vorgang des Zerfalls der Hochofenschlacke. Der Grundvorgang, der Zerfall des Dikalziumsilikats bei der γ/α -Umwandlung ist klar, aber die Abhängigkeit des Eintritts dieses Zerfalls von der Zusammensetzung der Hochofenschlacke ist ein verwickelter Vorgang. Der Zerfall der Schlacke hängt ab von der Menge und dem Verhältnis der einzelnen Schlackenbildner, von der Schmelztemperatur und von der Erstarrungsgeschwindigkeit der Schlacke.

Ich habe bisher noch nicht hingewiesen auf die Fragen, die mit der Verwendung der Schlacke als Zement in Berührung stehen. Ich möchte dies aber auch unterlassen, weil hierüber Herr Prof. Grün im 4. Vortrag dieser Tagung eingehend berichten wird. Jedoch stellt gerade diese Verwendungsart der Hochofenschlacke und, wie man weiter sagen kann, auch die Verwendung der bei anderen technischen Verfahren entstehenden zementähnlichen Schlacken, beispielsweise beim Basset-Verfahren, eine Fülle von Problemen theoretischer und praktischer Art dar, die noch gelöst werden müssen.

Insbesondere beschäftigt sich die Forschung, ange-regt durch das Streben nach der Verwertung der sauren Schlacke, sehr eingehend mit den Möglichkeiten der Beeinflussung der Schlacke im flüssigen, plastischen und festen Zustand, mit dem Ziel, eine kristallreiche, mechanisch

starke Schlacke für verschiedene Verwendungszwecke zu erzielen. Für die Beeinflussung im flüssigen Zustand sehe ich nur die Möglichkeit, die Viskositätsverhältnisse sehr genau zu studieren und günstige Felder der Viskosität aufzusuchen. Es gelingt dann, erwünschte Reaktionen schon bei tieferen Temperaturen durchzuführen und unerwünschte Reaktionen durch Versteifung der Schlacke an der richtigen Stelle zu verzögern. Auch erweitert sich so der Bereich der Schlacken, der durch die Gesetze der Gleichgewichtseinstellung, beispielsweise zwischen Gasphase und Schlacke oder zwischen Schlacke und Metallbad, ge-

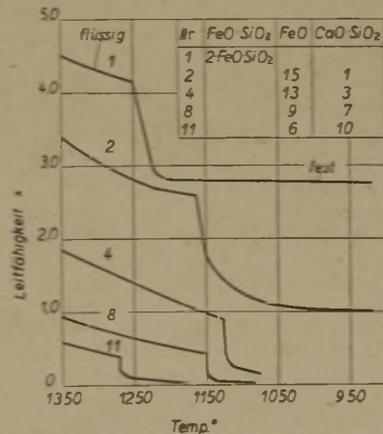


Abb. 7: Elektrische Leitfähigkeit von FeO-SiO₂-CaO-Schmelzen

geben ist. Für den plastischen und festen Zustand sei hingewiesen auf den bereits früher wiederholt beschränkten Weg der Temperung der basisch erstarrten Schlacken, der neuerdings auch im großtechnischen Maß aufgenommen wurde.

Damit möchte ich meine Ausführungen schließen, die naturgemäß nur eine ganz gedrängte, lückenhafte Übersicht über unsere Kenntnisse der Eigenschaften von Hüttenschlacken und die Möglichkeit ihrer Beeinflussung geben konnten.

Über die Verwendung der Hochofenschlacke im Bauwesen^{*)}

Von Regierungsbaumeister W. Kosfeld, Dortmund

Etwa zwei Drittel der rund 20 Millionen Tonnen betragenden Jahreserzeugung an Hochofenschlacke unserer Eisen-, Kupfer- und Bleihütten gehen als Baustoffe in die Bauindustrie und das Baugewerbe, teilweise in dem Zustande, wie sie am Hochofen entfallen, teilweise nach Aufbereitung.

Die gerade in den letzten Jahren gesteigerte Vielseitigkeit der Verwertungsarten zwingt uns zur Ordnung unserer Kenntnisse und zum Vergleich unserer praktischen Erfahrungen, um den Baustoff Hochofenschlacke in unsere Bauaufgaben richtig einsetzen zu können.

Einige allgemeine, aber grundlegende Feststellungen sind vorher unerlässlich, um einen festen Boden für die gemeinsamen Aufgaben zu schaffen, die auf den Hauptnenner der Leistungssteigerung im Bauwesen zu bringen sind; mit dem geringsten Aufwand an Stoff, menschlicher und Maschinenarbeit muß höchste Leistung erzielt werden.

Der Rohstoff HO-Schlacke entfällt zwangsläufig beim HO-Schmelzvorgang, braucht also nicht besonders erzeugt oder gehoben zu werden, im Gegenteil, je eher er vom Hochofen fortkommt und im Bau Verwendung findet, um so weniger belastet er die Verkehrseinrichtungen und um so weniger Platz beansprucht er.

Nicht jede Schlacke eignet sich gleichermaßen für jeden Zweck. Ist ein Kippen auf Halden vorübergehend nicht zu umgehen, so sollte das nach dem späteren Verwendungszweck, entsprechend den jeweiligen Eigenschaften der Schlacke, geschehen, die Aufbereitung ist dann nachher einfacher, wirtschaftlicher und vor allem gegen Fehlschläge gesichert. Wenn früher bei der Einrichtung unserer Hüttenwerke diese Fragen noch keine Bedeutung hatten, so berühren sie heute bereits deren Lebensnerv. Die durch technischen, wissenschaftlichen und sozialen Fortschritt gebotene Ausweitung unserer Hüttenwerke in Verbindung mit den neuen hüttentechnischen Aufgaben geben die Richtung an, nach der aus der Stoff- und Raumbelastung durch Schlacke eine Entlastung für die Hütten werden kann.

Erforderlich ist, daß auch die Behörden als öffentliche Auftraggeber den Verhältnissen Rechnung tragen. Jede unnötig auf Halde gekippte Tonne Schlacke verursacht durch Zwischenlagerung und Platzverlust Auslagen, die mit RM. 0,70 bis 1,00 je Tonne nicht zu hoch eingesetzt sind. Es darf bei der bleibenden außerordentlichen Größe unseres Bauvolumens keine unverwertbare Schlacke geben, und diene sie auch nur als Füll- und Schüttstoff.

Weiter ist grundsätzlich die Gleichmäßigkeit der Güte eines Baustoffes für das Bauwesen wichtiger als Spitzeneigenschaften, die selten ausgenutzt werden können und sich gelegentlich, und dann vielleicht an einer empfindlichen Stelle, ins Gegenteil umkehren. Von jedem verwendeten Baustoff hängt irgendwie Leben und Gesundheit von Menschen ab, ganz zu schweigen von den wirtschaftlichen Folgen etwaiger Baumängel. Nur selten kann das Versagen eines Bau-

gliedes in einem Bauwerk durch bessere Güte eines anderen ausgeglichen werden.

Beim Bauen handelt es sich um die Vereinigung und Verbindung mehrerer oder vieler Baustoffe und Bauglieder mit verschiedenen Eigenschaften und Aufgaben zu einem Ganzen. Klingt das Ganze in Stoff und Form harmonisch zusammen, sprechen wir von einem architektonisch schönen Bau, der auch anständige Baugesinnung der Beteiligten zur Voraussetzung hatte.

Wirtschaftlich und technisch, auch luftschutzttechnisch, günstig ist die Erstellung eines Bauwerkes, wenn man den verschiedenen Baustoffen getrennte Aufgaben zuweist, wie im Gerippebau; er lohnt sich aber nur bei großen Belastungen. Das Gerippe übernimmt die Lastübertragung und Sicherung gegen Erschütterungen, der Füllstoff zwischen den Rippen schützt gegen Wetter, Wärme, Kälte und Schall. Im allgemeinen Wohnungsbau wird die technische und wirtschaftliche Güte besser erreicht mit Baustoffen, die sowohl genügend tragfähig sind als auch eine raumabschließende, dichtende und dämmende Wirkung haben. Leichtbeton erfüllt diese Bedingungen in erwünschtem Maße. Wir kommen darauf zurück, müssen uns aber vorher einen Überblick verschaffen.

Leichte und schwere Baustoffe und Bauteile lassen sich gleichermaßen aus Hochofenschlacke herstellen. Vier verschiedene Formen von Hochofenschlacke sind zu unterscheiden:

1. **Schlackensand**, dessen Name schon den Verwendungszweck verrät, und der außerdem den Ausgangsstoff für die Herstellung von Hochofen- und Eisenportlandzement bildet;
2. **Hochofenschlackschlacke**, ausgezeichnet durch große Porigkeit und daher geringes Gewicht. Zerkleinerte Hochofenschlackschlacke heißt „Hüttenbims“, „Kunstabims“ oder Thermostat;
3. **Schlackewolle**, das höchstwertige Erzeugnis aus Hochofenschlacke, bildet den Übergang vom Baustoff zum Ausbaustoff und dient besonders als Dämmstoff gegen Wärme, Kälte und Schall;
4. **Klotz- und Bettenschlacke** mit dem Hauptmerkmal großer Festigkeit über 2500 kg/qcm.

Über einige Hochofenerzeugnisse liegen Normen vor; Eisenportland- und Hochofenzement sind nach Din-Blatt 1164 den Portlandzementen gleichgesetzt, sie werden in einem besonderen Vortrag behandelt.

Die Haupteigenschaften von Hüttensteinen, früher Schlackensteine genannt, und Hüttenchwemmsteinen sind in den Din-Blättern 398 und 399 festgelegt. Über die Lieferung und Verwendung von Klotzschlacke haben die beteiligten Behörden und privaten Stellen Richtlinien aufgestellt für

1. Straßenbau-,
2. Gleisbettungs- und
3. Betonzuschlagstoff.

^{*)} Abbildungen des Verfassers

Die „Richtlinien über die Beschaffenheit der Hochofenschlacke als Straßenbaustoff“ sind vor kurzem unter Berücksichtigung der Erfahrungen und der Bedürfnisse des neuzeitlichen Straßenbaus neu gefaßt worden. Nach den neuen Eisenbetonbestimmungen ist Schlackensand und Hüttenbims auch als Zuschlagstoff für Eisenbeton zugelassen.

Schlackensand als Mörtelstoff ist in der Bauwelt so verbreitet und anerkannt, daß darüber nur wenig gesagt zu werden braucht. Er gibt einen leichten Mörtel und kann auch dem Beton als Gewichtsverminderer zugegeben werden. Seine latent-hydraulische Eigenschaft kommt der Festigkeit des Mörtels oder Betons als lange wirksame Nacherhärtung zustatten. Der dem frischen Sand gelegentlich anhaftende Schwefelgeruch verliert sich schnell. Bisher ist es meist üblich, für jede, auch die kleinste Baustelle besondere Einrichtungen und Fachkräfte zur Mörtelherstellung anzusetzen. Da heute aber in Fahrzeugen und Straßen geeignete Transportmöglichkeiten gegeben sind, ist es an der Zeit, diese verschwenderische und oft unzuverlässige Art der Mörtelherstellung zu verlassen und dafür an den Gewinnungsstellen des Hauptmörtelbestandteils, nämlich des Sandes, Mörtelwerke zu erstellen, die die Baustellen im weiteren Umkreise mit einwandfreiem, gleichmäßigem Mörtel versorgen. Laufende, am Bauwerk meist unmöglich durchzuführende Prüfungen sind dabei einzuschalten. Bei HO-Schlackensand ließen sich außerdem seine latent-hydraulischen Eigenschaften nach teilweiser Zerkleinerung in einem Kollergang ausnutzen, was eine weitere Ersparnis an Bindemitteln ergibt. Der Verbraucher bekommt einen geeigneten preiswerten Mörtel auf die saubere Baustelle, für die Bauwirtschaft werden Arbeitskräfte, Baustoffe, besonders Bindemittel und Transportmittel frei. Nichteingeweihten sei gesagt, daß z. B. in Berlin mehrere Mörtelwerke mit bestem technischen und wirtschaftlichen Erfolg arbeiten, von denen das größte eine Tagesmenge von etwa 2000 cbm liefert; einleitende Versuche brauchen also nicht wiederholt zu werden.

Hüttensteine werden aus Schlackensand, Zement und Kalk in der Größe 25 12 6,5 cm in drei Klassen mit 100, 150 und 250 kg/qcm Druckfestigkeit hergestellt. Besonders in Kellerwänden sind sie wegen ihres hellen Aussehens und ihrer guten Form sehr beliebt und machen Putz und Anstrich überflüssig; schwere Maschinenfundamente aus Hüttensteinen in Hüttenzementmörtel errichtet, zeugen von ihrer großen Festigkeit; auch hier wie bei allen Bauteilen aus Schlackensand und Schaum- schlacke tritt der Vorteil einer mit dem Alter zunehmenden Festigkeit in Erscheinung.

Hütten schwemmsteine, meist in der Größe 25 12 9,5 cm mit dem Raumgewicht 1,0 haben 20 kg/qcm, Sonder-Hütten schwemmsteine bei 1,2 Raumgewicht 30 kg/qcm mittlere Druckfestigkeit und können im Mauerwerk mit 3 bis 4 bzw. 5 bis 6 kg/cm² belastet werden (Din 1053). Die Wärmeleitzahl der

Hütten schwemmsteine ist $\frac{0,2 \text{ kcal}}{m \cdot h \cdot C}$. Voilfugige Wände aus Hüttensteinen und Hütten schwemmsteinen von 12 cm Dicke gelten als feuerbeständig, bei 6 cm Dicke als feuerhemmend.

Von Bedeutung ist, daß weder Hütten- noch Hütten schwemmsteine zu ihrer Herstellung Brennstoff benötigen; beide erhärten entweder an der Luft oder in den kohlen säurehaltigen Abgasen der Gasmaschinen.

Der Gedanke, vom Hütten schwemmstein zur monolithischen Bauweise, also zum Leichtbeton aus Hüttenbims, überzugehen, ist sehr früh verwirklicht worden. Tausende von Wohnungen sind bereits mit Hüttenbimsbeton erstellt; gerühmt wird besonders ihre gute Wärmehaltung.



Abb. 1: Siedlungshäuser, Außenwände sind in Hüttenbimsbeton hergestellt



Abb. 2: Hüttenbimsbeton-Häuser während ihrer Bauausführung. Tafelschalung

Auch angelehrte Arbeiter können diese Betonleichtbauweise gut und schnell ausführen, oft verwendete Tafelschalungen erleichtern die Arbeit und bewirken Holzeinsparungen. Im allgemeinen wird Leichtbeton ohne Stampfarbeit nur geschüttet. Dabei erreicht man mit nur 120 kg Zement auf 1 cbm loses Haufwerk Hüttenbimsbetonfestigkeiten über 20 kg/qcm. Geringe Stampfarbeit erhöht die Festigkeit. Bei Eisenbetonhohlziehlen, früher Stegzementziehlen genannt, muß nach Din-Blatt 4028 die Würfel Festigkeit des Leichtbetons Wb_{25} mindestens 80 kg/qcm betragen. Putz auf porigem Beton darf nicht zu fett sein, er muß den Schwind- und Dehnungsverhältnissen des Leichtbetons Rechnung tragen. Die trockene Anlieferung zur Baustelle verlangt ein Befeuchten des Hüttenbims vor der Verarbeitung, damit dem Mörtel des Betons nicht das Wasser entzogen wird. Auch im Eisenbetonbau ist Hüttenbims laut Runderlaß des Preußischen FM. vom 16. Februar 1937 als Zuschlagstoff zugelassen. In diesem Erlaß heißt es: „Der in der Hochofenschlacke geeigneter Zusammensetzung als Calcium-Sulfid vorhandene Schwefel ist unschädlich.“ Ein Angriff auf andere Baustoffe findet nicht statt.

Befürchtungen, daß Schwemmsteine und poröser Leichtbeton wegen Ansaugens von Wasser als Baustoff weniger geeignet seien, sind unbegründet. Verschiedene von Bauten geholte Ziegel- und Schwemmsteine wurden hier heute morgen hochkant in 5 cm hohes Wasser gestellt. Jetzi, nach etwa 6 Stunden, ist das Wasser durch den ganzen Ziegelstein bis oben hingedrungen, in den Schwemmsteinen aber nur einige Zentimeter hoch; ausschlaggebend für das Wasseransaugen ist nämlich die Kapillarporigkeit, die im Ziegelstein stärker ausgeprägt ist als im Schwemmstein. Wichtig jedoch als die Wasseransaugung ist die

Wasserabgabe, die beim Schwemmstein besonders schnell vor sich geht. Ohne auf diese wichtigen Verhältnisse näher einzugehen, soll nur eine Tatsache hervorgehoben werden: Der Gesundheitszustand der Tiere in den Ställen hängt ausschlaggebend von dem Verhalten der Stallwände und -decken gegenüber Aufnahme und Abgabe von Wasser ab. Mit porigem Leichtbeton, der das Wasser ohne Tropfenbildung aufnimmt und wieder abgibt, sind bei Stallbauten gute Erfahrungen gemacht worden. Das geringe Gewicht, das Freisein von organischen Bestandteilen und die günstige Wärmeleitzahl ($\frac{0,09 \text{ kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}^\circ}$ bei Korn 0—3 und 50° C) machen den losen Hüttenbims ebenso als Füllstoff für Decken und Wände geeignet.

Die Arbeitsgemeinschaft zur Erforschung von Leichtbeton hat mit den zuständigen Stellen praktische Versuche gemacht und gute Aufklärungsarbeit geleistet, so daß die zweckentsprechende Verwendung der Hochofenschlackschlacke in Form von Leichtsteinen, Leichtbeton und Füllstoff bereits wesentlich dazu beiträgt, unser umfangreiches Wohnungsbauprogramm zu erfüllen. Geringes Gewicht und einfache, billige Transporte von den verschiedenen Erzeugungsstellen ermöglichen die günstige Verwertung dieses vielseitigen Baustoffs in allen Bezirken unseres Großdeutschen Reiches.

Während wir im Hüttenbims noch einen Baustoff von bestimmter Festigkeit haben, der gleichzeitig als Wärmeschutz dient, ist die Schlackenwolle ein ausgesprochener Dämmstoff gegen Wärme, Kälte und Schall und preislich das wertvollste Schlackenerzeugnis. Die überaus vielseitige Verwendbarkeit hat nach fünfzigjähriger Erfahrung die Schlackenwolle im Bau- und Isoliergewerbe unentbehrlich gemacht (Wärmeleitzahl: $\frac{0,027 \text{ kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}^\circ}$). Da sie außerdem fäulnissicher, geruchlos, bakterienfrei und feuerbeständig ist, ist die Schlackenwolle viel begehrt und kaum noch als Baumwolle, sondern fast nur als Dämmstoff und für hygienische Zwecke zu erhalten.

Die Hauptmerkmale der gegossenen Pflastersteine sind ihre gute Form, die gleichmäßige Fugen und damit geräuscharmes Fahren ermöglicht, die Griffigkeit der Oberfläche und Staubfreiheit, schnelle Trockenfähigkeit, geringe Abnutzung und schließlich: keine Blendwirkung bei nassem Wetter.

Etwa ein Viertel des gesamten Schlackenabsatzes findet als Gleisschotter, Wegebau- und Betonzuschlagstoff in

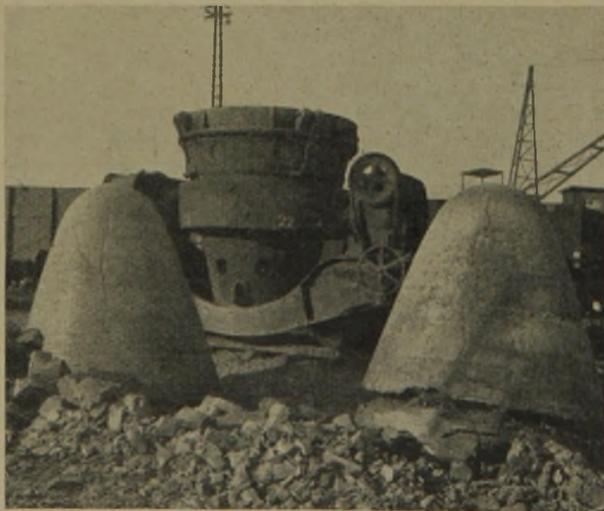


Abb. 3: In der Pflanze erstarrte Schlacke wird gekippt und als Klotzschlacke verarbeitet

der Bauindustrie Verwendung. In Frage kommen hier nur Schlacken mit geringem Kalkgehalt unter 45% und hohem Kieselsäuregehalt über 29%.

Schon 1911 hat eine Kommission aus Vertretern der beteiligten sechs Ministerien, der Industrie und des Handels die Aufstellung der drei Richtlinien zur Lieferung und Verwendung von HO-Schlacke als Straßenbaustoff, als Gleisbettungsstoff und als Zuschlagstoff für Beton und Eisenbeton in Angriff genommen. In den „Richtlinien über die Beschaffenheit der HO-Schlacke als Straßenbaustoff“ sind Wasseraufnahme, Widerstandsfähigkeit gegen Druck und Schlag, ferner Schüttgewicht (über 1250 kg/cbm) festgelegt. Ge-teerte HO-Schlacke hat eine große Verbreitung für schwarze Straßendecken gefunden, besonders im Bergsenkungsgebiet ist sie wegen ihrer Elastizität sehr beliebt. Als gleichwertig mit der HO-Schlacke gelten die Mansfeldschen Kupferschlacken, die Bleischlacken der Staatlichen Bleihütten (Preußische Bergwerks- und Hütten-AG.) und die als Syntholit bezeichnete, bei der Erzeugung von Phosphorsäure anfallende kristallisierte Kalziumsilikatschmelze der I. G. Farben. Bleischlacke ist besonders schwer und hart und wird auch als Betonhärtemittel verwendet.

Als Gleisschotter verwandt muß die Schlacke den Schlag der Stopfhacke aushalten können, die Druckfestigkeit ist nicht so wesentlich, da sie nicht ausgenutzt werden kann. Wichtig ist die Raum- und Wetterbeständigkeit der Schlacke, die in der Bettung keinen Staub und Schlamm bilden darf.

Für die Güte des Betons aus Hochofenschlacke spielt die splitterige Oberfläche der Schlackenkörner im Gegensatz zum glatten runden Kieskorn eine wichtige Rolle, besonders wird die Zugfestigkeit und das Maß der elastischen Durchbiegung günstig beeinflusst. Die nach den Eisenbetonbestimmungen verlangte Mindestfestigkeit der Würfel von Tagen Alter $W_{b28} = 120 \text{ kg/qcm}$ läßt sich mit Schlackensplitt ohne weiteres erreichen, bei Verwendung von Edelsplitt (zweimal gebrochen und zweimal gesiebt) wird auch die für die Zulassung hoher Spannungen vorgeschriebene Betonwürfel Festigkeit von $W_{b28} = 225 \text{ kg/qcm}$ erzielt.

Selbstverständlich muß das Korngemisch „richtig“ gemäß den Leitsätzen für die Bauüberwachung im Eisenbetonbau zusammengesetzt sein, unter Berücksichtigung zweier Eigenschaften, die den Hochofensplitt von Kies unterscheiden. Zunächst soll der Anteil des Kornes 0—7 mm, davon etwa die Hälfte 0—3 mm, wenigstens 60% betragen, damit zwischen den Grobkörnern genügend Mörtel für die Ausfüllung der Einbuchtungen zur Verfügung steht. Ferner ist der Wasserbedarf wegen der geringen natürlichen Feuchtigkeit und der rauhen Oberfläche der Einzelkörper größer als bei Kies. Am besten wird der Mehrbedarf an Wasser von etwa 30 l/cbm dem losen Hautwerk durch Anfeuchten vor dem Mischvorgang zugegeben.

In Abb. 4 wird eine Versuchsreihe von Betonsäulen aus Hochofenschlacke gezeigt, die sämtlich aus der gleichen vorher untersuchten Sendung Hochofenschlacke betoniert wurden. Ein Teil dieser Säulen wurde absichtlich mit falsch bemessenem Wasserzusatz und ungenügender Mischung hergestellt. Zwei Jahre lang haben diese Säulen im Freien gestanden. Nach dieser Zeit waren die gut gemischten und in der Wasserzugabe ordnungsgemäß hergestellten Säulen unverändert, aber alle aus gleichem Stoff, nur mit ungenügendem Wasserzusatz und ungeeigneter Mischung errichteten Säulen waren vollkommen zerfallen: Nicht der Stoff, sondern nur seine falsche Verarbeitung war die alleinige Ursache der Zerstörung gewesen.

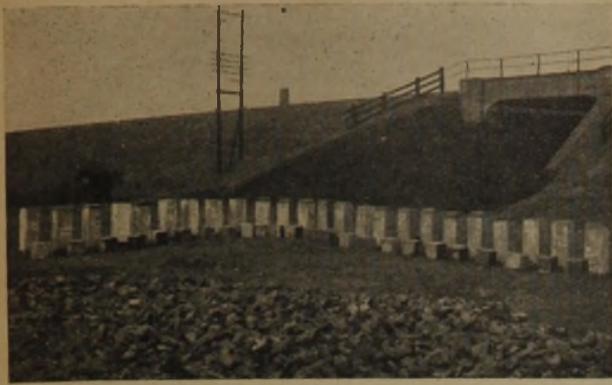


Abb. 4: Versuchsreihe von Betonsäulen und Würfeln aus Hochofenschlacke

Bei Beanstandungen gegen die Hochofenschlacke wird meist die Schwefelfrage angezogen. Die Schlacke enthält Schwefel, aber dieser ist an Kalk gebunden und unschädlich. Seit Jahrzehnten sind mir keine Schäden bekannt geworden durch Schwefel, der in der Schlacke enthalten ist.

Interessenten mögen u. a. das ausführliche Gutachten von Prof. Buchartz, Berlin-Dahlem, im Archiv für das Eisenhüttenwesen 8, Jahrgang 1934/35, Heft 5, nachlesen, dessen Schlusssätze hier mitgeteilt werden, weil sie für Bauleute wichtig sind.

„Hochofenschlacke, als Zuschlag zu Mörtel und Beton verarbeitet, gibt keine ins Gewicht fallenden Mengen Sulfide bei Gegenwart von Wasser an dieses ab. Eine Oxydation der Sulfide tritt dabei in nur sehr geringem und praktisch bedeutungslosem Maße ein. Eine Schädigung von schlackenhaltigem Mörtel oder Beton durch Oxydation der Sulfide zu Sulfat ist daher nicht zu erwarten und die gegen die uneingeschränkte Verwendung von Hochofenschlacke als Zuschlag zu Mörtel und Beton bei Wasserbauten erhobenen Bedenken sind hinfällig.

Dieses Ergebnis ist um so bemerkenswerter, als beim Versuch für die Oxydation der Sulfide in den Schlacken besonders günstige Verhältnisse geschafft waren; denn erstens waren die Versuchsmörtel sehr mager und daher wenig dicht, so daß der Zutritt von Luft und Feuchtigkeit erleichtert war, und zweitens waren die benutzten Schlackenzuschläge ziemlich feinkörnig (Korn unter 2 mm), während im Bauwesen die Stückschlacke als Betonzuschlag meist in groberer Körnung zur Verwendung gelangt.

Die auf Grund der Ergebnisse gezogenen Schlußfolgerungen gelten daher nicht nur für Stückschlacke, wie sie zu den Versuchen benutzt worden ist, sondern können ohne weiteres auch auf die im Bauwesen verwendete gekörnte Schlacke, wie Schlackensand und Schlackenbims (Kunstabims, Thermostit usw.) übertragen werden.“

Eine andere Erscheinung, die in der Schlacke auftreten kann, ist der sogenannte Kalkzerfall. In der Analysenquarzlampe haben wir eine einfache und sichere Möglichkeit, Kalkzerfall sofort festzustellen; alle Lieferwerke sind heute mit diesen Lampen ausgerüstet. Bei dem noch seltener vorkommenden Verdacht auf Eisenzerfall genügt eine Lagerung von Schlackenstücken in Wasser. Tritt eine Vermehrung der Stücke oder Sandbildung auf, so haben wir es mit Eisenzerfall zu tun. Die Seltenheit des Schlackenzerfalls darf die Erzeuger- und Lieferfirmen niemals in Sicherheit wiegen. Die laufenden Untersuchungen werden sie aber um so eher vornehmen, als sie ja die Gewähr zu leisten haben, daß keine Zerfallsschlacke abgegeben wird.

Bei richtig zusammengesetzter Betonmischung aus Hochofenschlacke lassen sich wetterfeste Betons von hoher Festigkeit herstellen, deren Oberfläche auch nicht aus Schönheitsrücksichten verdeckt zu werden braucht, wenn man sie richtig behandelt. Mit Recht wirft man dem Beton, auch dem Kiesbeton, vor, daß

seine Sichtflächen unschön sind, die eintönige graue Farbe und die fehlende Flächenaufteilung geben ihm ein häßliches kaltes Aussehen, das meist noch durch Risse, Arbeitsfugen, Sand- und Steinester und Schalungsabdrücke verstärkt wird. Alle diese Mängel sind zu beheben, wenn man guten dichten Beton herstellt, die Oberfläche nach dem Ausschalen mit einem feinen, der Betonzusammensetzung entsprechenden Mörtel behandelt und dann die Flächen wenig anschleift, bis das dichte Betongefüge mit den angeschliffenen einzelnen Steinen sichtbar wird. Auch Fugen lassen sich aussparen oder nach dem heutigen Stand der Schleiftechnik leicht ausschleifen. Die gezeigten Muster, die nicht besonders für diesen Zweck hergestellt sind, sondern irgendwelchen anderen Versuchsreihen entstammen, zeigen das schöne Aussehen des Betongefüges, sie sagen mehr als Worte. Hier liegen noch große Gebiete technischer Entwicklungen frei, nach denen auch das Vorsetzen von Tafeln und das Auftragen von Putz überflüssig werden. Eine Eisenbetonwand mit vorgeseztem Eisenfachwerk und Klinkerausmauerung entspricht nicht unseren technischen, wirtschaftlichen und künstlerisch-ästhetischen Anforderungen.

Ein Wort über Zusatzmittel: Schon immer ist bekannt gewesen, daß man Mörtel und Beton durch Zusatz von Traß verbessern, d. h., daß man ihn vor allem dichter und damit auch fester und widerstandsfähiger machen kann. Neben den natürlich vorkommenden Zusatzmitteln wie Traß gibt es auch künstliche, zu denen Thurament gehört. Thurament besteht aus ausgesuchter Hochofenschlacke. Außer der mechanischen Dichtung beruht seine günstige Wirkung darauf, daß die aufschließbare Kieselsäure dieser Hochofenschlacke mit dem Kalk des Bindemittels Verbindungen eingeht, die ihn hydraulisch machen, so daß der Mörtel oder Beton unter Wasser erhärtet. Kalkreichen Zementen (Portlandzement) gibt man mehr, kalkarmen Zementen (Hochofen- und Eisenportlandzement) weniger Thurament zu.

Auf dem Gebiete der Bauforschung sind die Tore weit geöffnet, jede Mithilfe ist willkommen. Wer aber auf diesem Wege die hohen und engen Pässe ernster Arbeit in Forschung und Praxis nicht mit durchschreiten will oder kann, der möge wenigstens die Achtung vor der Leistung anderer haben und nicht glauben, die in der Natur der Dinge liegenden Schwierigkeiten durch Buchungen, Briefe und Statistiken begleichen oder aus der Welt schaffen zu können. Festigkeit, Elastizität, Schwinden, Dehnen, Kriechen, Wärmeentwicklung beim Abbinden, Verhalten gegen Einflüsse von Wetter, Wasser, Wärme und Schall, Verhalten in Zusammenhang mit Stahlbewehrung, Vorspannung, Stahlsaitenbeton, Entwicklung der Zemente — man braucht nur aus dem Betonbau einige Fragen herauszugreifen, um die technischen Entwicklungslinien zu sehen, auf denen wir weiterarbeiten müssen, die Vielheit der Erscheinungen zu erkennen und die teilweise vorhandenen Widersprüche zu lösen.

Man wird die Schweißung von Stahlkonstruktionen trotz Fehlschläge nicht verdammen, trotz mehr als 100jähriger Forschung sind unsere Kenntnisse über Zemente nicht abgeschlossen. Für jeden Baustoff gilt, daß er so gut ist, wie man ihn richtig verwendet. Voraussetzung ist, daß die Lieferwerke und Verbraucher die Sorgfalt anwenden, wie sie jedem Baustoff zukommt. Dann wird die Hochofenschlacke im Bauwesen eine vollkommene Hilfe als guter Baustoff und bei der Einsparung von Arbeitskräften sein. Dann wird die Hochofenschlacke auch nicht mehr auf Halden getürmt, eine Verunzierung des Stadt- und Landschaftsbildes sein, sondern sie wird den Hütten eine räumliche und wirtschaftliche Entlastung bringen.

Zemente aus Hochofenschlacke und ihre Verarbeitung

Von Prof. Dr. Richard Grün, Direktor des Forschungsinstituts der Hüttenzement-Industrie, Düsseldorf

Um das Jahr 1820 meldete der Maurer Aspdin in Südengland ein Patent an zur Herstellung von Zement, den er aus dem Staub von kalkbefestigten Landstraßen brannte und **Portlandzement** nannte. Den Namen wählte er deshalb, weil das neue Bindemittel nach seinen Angaben zu derselben Festigkeit erhärtete, wie der Portlandstone, der in Südengland ein beliebtes Baumaterial bildete. Der Name ist dann in Deutschland auf die hier erzeugten ähnlich hergestellten Zemente übergegangen. Viele Jahrzehnte lang beherrschte der Portlandzement allein den Markt, bis ungefähr zwei Menschenalter nach seiner Einführung ihm Zemente an die Seite traten, die man aus Hochofenschlacke erzeugte. Man mischte bei dieser Erzeugung dem Portlandzement Hochofenschlacke zu. In der ersten Zeit der Herstellung derartiger Zemente traten zunächst schwere Rückschläge ein, und zwar deshalb, weil derartige Mischzemente in manchen Fällen zu ausgezeichneten Festigkeiten führten, in anderen wieder versagten. Trotz größter Sorgfalt der die Herstellung überwachenden Chemiker gelang es zunächst nicht, festzustellen, woher dieses gänzlich verschiedene Verhalten der so erzeugten Bindemittel kam. Man analysierte die Schlacke sorgfältig und verwendete immer die gleiche Schlacke, und dennoch blieben die Mißerfolge nicht aus. Erst **P a s s o w** gelang es um die Jahrhundertwende, das Rätsel, das für die Chemiker zunächst unlösbar war, zu lösen. Er führte nämlich das Mikroskop in die Hüttenzementherstellung ein, und mit seiner Hilfe gelang es, zu ermitteln, daß in bezug auf die Erhärtungsfähigkeit der Schlacke dann ein großer Unterschied besteht, wenn diese in verschiedener Weise gekühlt wird. Er ermittelte, daß die glasigen Schlacken (Abb. 1) bei Zusatz von Portlandzementklinker ausgezeichnete Erhärtungsfähigkeit aufwiesen, daß entglaste Schlacke dagegen unbefriedigend oder gar nicht erhärtete.

Der glasige Formzustand, der im allgemeinen gleichbedeutend ist mit dem amorphen, also dem kristalllosen Zustand, hat hydraulische Eigenschaften, der entglaste dagegen nicht (Abb. 2). Zunächst wurde diese Tatsache rein empirisch festgelegt. Später gelang es dann, zu ermitteln, daß durch die schnelle Kühlung, also durch Wasser- oder Luftgranulation, die Schlacke in einen Formzustand übergeführt wird, der wesentlich energiegeladener ist als der entglaste Formzustand. Man muß sich vorstellen, daß bei der langsamen Kühlung Energien verbraucht werden zur Bildung von chemischen Verbindungen, z. B. Meliliten, und zu deren Kristallen, die in der Schlacke erhalten

bleiben, während durch schnelle Abkühlung der Zusammenschluß der Oxydmoleküle zu Großmolekülen verhindert wird. In dem Dünnschliff einer Schlacke, die durch Aufspritzen von Wasser auf die glühendflüssige Schmelze an der Oberfläche gekühlt wurde und die innen langsam erstarrte, lassen sich die verschiedenen Formzustände besonders gut erkennen (Abb. 3). Man sieht hier einerseits das vollkommen amorphe, aber energiegeladene Glas, auf der anderen Seite die schön gestreiften Melilitkristalle, zu deren Bildung die im Glas vorhandenen Energien verbraucht wurden. Man kann sehr einfach den Energieunterschied der beiden Formzustände dadurch ermitteln, daß man entweder die glasige Schlacke langsam erhitzt und die auftretenden Temperaturen mißt, oder dadurch, daß man die Lösungswärme beider feststellt. Bei Feststellung der Lösungswärme haben die glasigen Schlacken erheblich höhere Werte als die entglasten, bei langsamer Erhitzung (Abb. 4) tritt die Wärmeerhöhung in dem Augenblick ein, in dem die glasige Schlacke bei Wiedererreichung der inneren Beweglichkeit durch die hohen Temperaturen zu entglasen, d. h. zu kristallisieren beginnt. Die entsprechenden Kurven für die entglasten Schlacken verlaufen entsprechend der Kurve im Ofen selbst und unterscheiden sich nicht von dieser (Abb. 5). Die granulierten Schlacken dagegen zeigen starke Temperaturanstiege bei Beginn der Kristallisation, es tritt also hier eine exotherme Reaktion ein, die aufgespeicherte Energie wird in Form von Wärme frei. Daraus ist für die Praxis die Lehre zu ziehen, daß glasige Schlacken bei der Trocknung nicht über 800° erhitzt werden dürfen, da sie sonst entglasen. Wie stark sie hierbei ihre hydraulischen Eigenschaften verlieren, geht aus dem Kurvenverlauf bei der Erhärtung (Abb. 5) hervor, der deutlich die gewaltige Erhärtungsenergie der glasigen Schlacke im Gegensatz zu der geringen Erhärtungstendenz der entglasten Schlacke trotz gleicher chemischer Zusammensetzung zeigt. Aus dieser Erkenntnis heraus ergibt sich die Notwendigkeit,

1. die Schlacken durch geeignete Vorrichtungen (Abb. 6) schnell zu kühlen, besonders wenn sie hochbasisch sind, in diesem Falle neigen sie nämlich zur Entglasung, da sie leicht kristallisieren, und
2. die gekühlte Schlacke bei der Trocknung nicht zu stark zu erhitzen.

Selbstverständlich sind die Eisenportland- und Hochofenzemente, also diejenigen Zemente, die unter Zusatz granulierter Hochofenschlacke hergestellt werden, ebenso wie der Portlandzement genormt. In diesen Normen ist für die chemische Zusammensetzung der Schlacke (Abb. 7) eine empirisch festgelegte Formel gegeben, der im allgemeinen weitaus die meisten Schlacken entsprechen. Nur besonders saure Schlacken sinken unter die in dieser Formel gegebene Größe 1 ab. Es besteht durchaus die Möglichkeit, derartige Schlacken später gleichfalls als Zumahlschlacke zu verarbeiten, wenn es nur möglich ist, sie so fein wie irgend tunlich zu mahlen. Schon jetzt besteht die Möglichkeit, Schlacken heranzuziehen, die früher nicht verarbeitet werden konnten. Durch die Einführung



Abb. 1 (links): Pulverpräparat einer glasigen Schlacke: die Schlacke ist optisch inaktiv, sie enthält keine Kristalle — Abb. 2 (Mitte): Pulverpräparat einer entglasten oder kristallisierten Schlacke, die einzelnen Stücke zeigen deutlich Kristalltrümmer — Abb. 3 (rechts): Dünnschliff der Grenzschicht zwischen glasiger und entglaster Schlacke. Auf der einen Seite sind die gestreiften Kristalle deutlich zu erkennen, auf der anderen Seite ist das optisch inaktive amorphe Glas, welches das Gesichtsfeld im polarisierten Licht ohne Aufhellung läßt

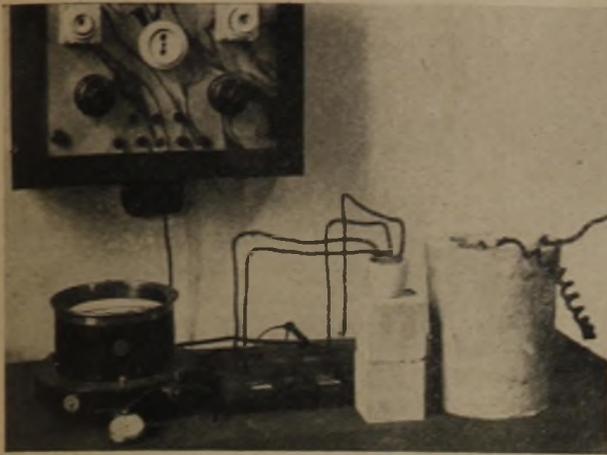


Abb. 4: Ansicht eines Laboratoriumofens zur langsamen Erhitzung glasiger Schlacke und Feststellung des Temperaturanstiegs bei der Entglasung

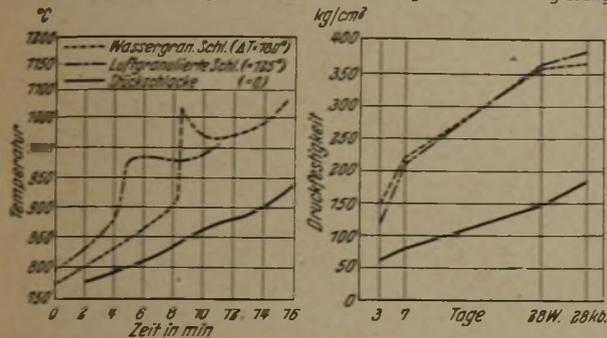


Abb. 5: Unterschied glasiger und entglaster Schlacke in bezug auf Verhalten beim Erhitzen und Erhärten

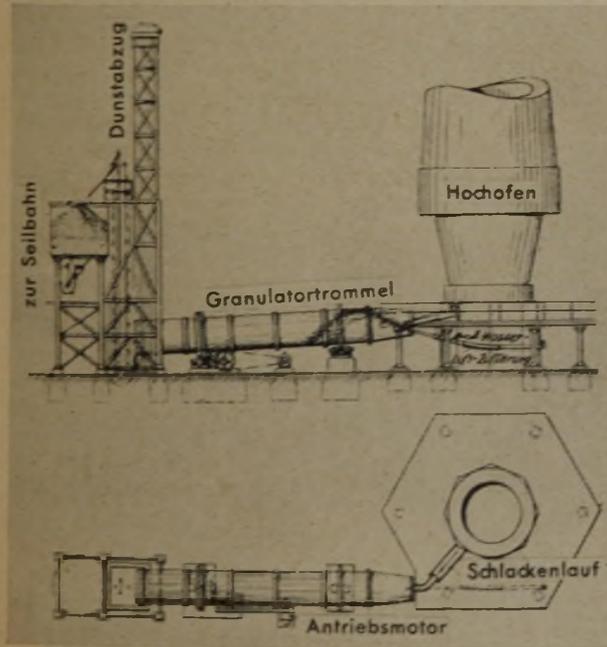


Abb. 6: Buderus-Granuliertrommel zur schnellen Kühlung glühendflüssiger Schlacke

unserer modernen Stahlmühlen, besonders mit Umluftwindrichter, wird voraussichtlich dieses Gebiet noch stark erweitert. Die chemische Zusammensetzung der fertigen Zemente (Abb. 8) richtet sich nicht nur nach der Schlacke, sondern auch nach der Menge von Schlacke, die angewendet wird. Bekanntlich gibt es zwei Hüttenzementarten, den Eisenportlandzement mit nur 30% Schlacke und den Hochofenzement mit über 50% Schlacke. Da die Schlacke selbst durchweg einen tieferen Kalkgehalt hat als der zugemahlene Portlandzementklinker, haben die zusammengesetzten Zemente Kalk-

gehalte, die erheblich hinter dem Kalkgehalt der Portlandzemente zurückbleiben. Diesen tiefen Kalkgehalt strebt man überall an, da es sich erwiesen hat, daß Zemente mit tiefem Kalkgehalt, besonders wenn der tiefe Kalkgehalt erzwungen ist durch reaktionsfähige Puzzolane, besonders widerstandsfähig gegen aggressive Lösungen sind und geringe Abbindewärme haben. Der Grund für die hohe Widerstandsfähigkeit ist die Tatsache, daß die Puzzolane den aus jedem Portlandzement bei der Erhärtung freigesetzten Kalk binden, der Grund für die geringe Abbindewärme wird darin gefunden, daß die Schlacke zu steinartigen Erzeugnissen erhärtet in ähnlicher Weise wie der Portlandzement, ohne aber so viel Wärme freizusetzen wie dieses reaktionsfähige Produkt. Aus diesem Grunde wurde auch in Deutschland von der Portlandzementindustrie der Traßzement geschaffen, welcher unter Heranziehung der natürlichen Puzzolanen-Trasse hergestellt wird. Im Ausland, wo es keinen Traß gibt, werden Ziegelmehl-Zemente, Moler-Zemente (Kieseigur-Zemente), Gaize-Zemente und ähnliche Produkte erzeugt. Aus diesen Erfahrungen ergibt sich das Schema für die Herstellung der Hüttenzemente sehr einfach (Abb. 9). Zunächst fügt man der Schlacke so viel Kalk zu, daß das Enderzeugnis auf die Zusammensetzung des Portlandzementes kommt, und brennt das so erzeugte Rohmehl zu Klinker. Den Klinker mischt man dann für Eisenportlandzement mit 30%, für Hochofenzement mit mehr Schlacke und mahlt das Mischerzeugnis unter Zufügung von Gips möglichst fein. Das Mischprodukt besteht dann einerseits aus Klinker, andererseits aus glasiger Schlacke, und mit dem Mikroskop ist ohne weiteres zu sehen, welche Art von Zement, Portland-, Eisenportland- oder Hochofenzement (Abb. 10) vorliegt.

Die oft in der Literatur auftauchende Angabe, daß die Hüttenzemente in ihrer Zusammensetzung ungleichmäßig seien, ist unrichtig, denn jedem Hüttenmann ist bekannt, wie gleichmäßig die Hochofenschlacke gehalten werden muß, wenn man ein gleichmäßiges Eisen erzeugen will (Abb. 11). Schon aus diesem Zwang heraus ergibt sich für die Hochofenschlacke ein sehr viel gleichmäßigeres Erzeugnis, als es jemals ein Naturprodukt wie der Mergel sein kann, da die Hochofenschlacke ja künstlich aufbereitet wird, der Mergel aber in der Natur rein zufällig entstanden ist.

Aber nicht nur der Klinker dient als Anreger für den latent hydraulischen Hochofenschlackenanteil, sondern auch der Gips kann zu diesem Zweck herangezogen werden, und zwar ist es wichtig, zu wissen, daß die Hochofenschlacke im Gegensatz zu Portlandzement sehr hohe Gipsmengen verträgt. Während bei Portland-

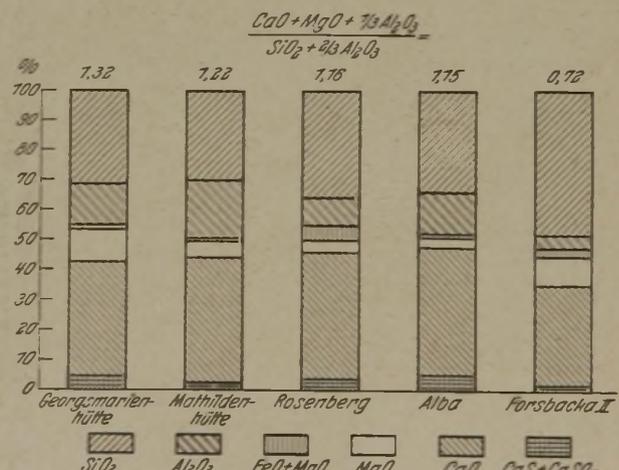


Abb. 7: Unterschied in der chemischen Zusammensetzung verschiedener Schlacken

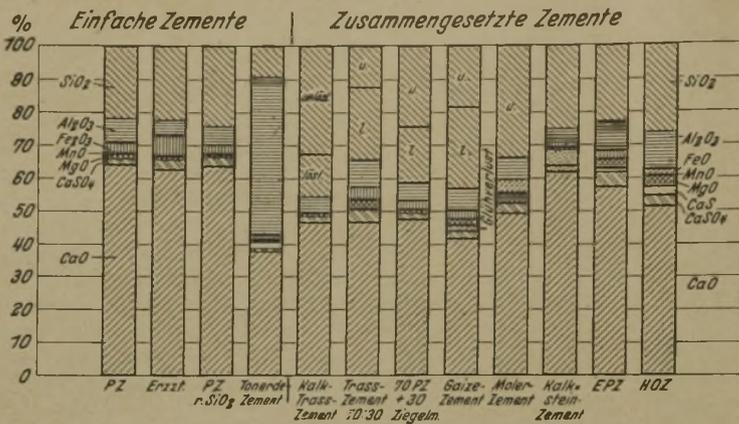


Abb. 8: Unterschied in der chemischen Zusammensetzung einfacher und zusammengesetzter Zemente

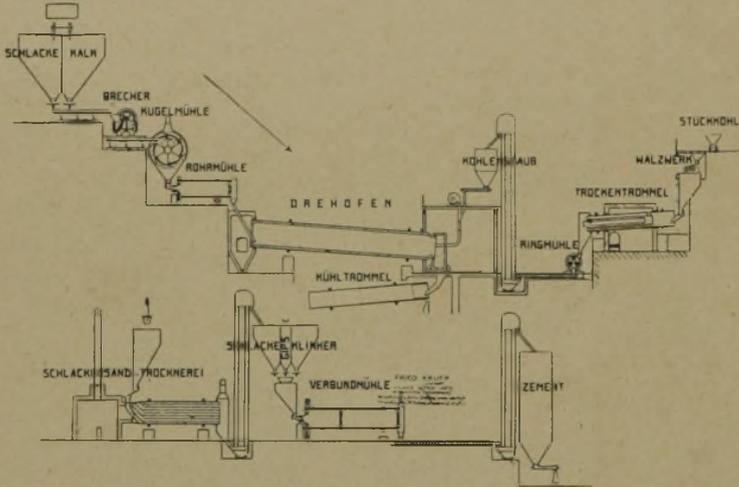


Abb. 9: Schema einer Hüttenzementfabrik: im oberen Teil Herstellung des Klinkers, im unteren Teil Aufbereitung und Zumahlung der Schlacke

Abb. 10: Pulverpräparat eines Hochofenzementes: die hellen Anteile sind die glasigen Schlacken, die dunklen Anteile der zur Anregung zugesetzte Portlandzement-Klinker

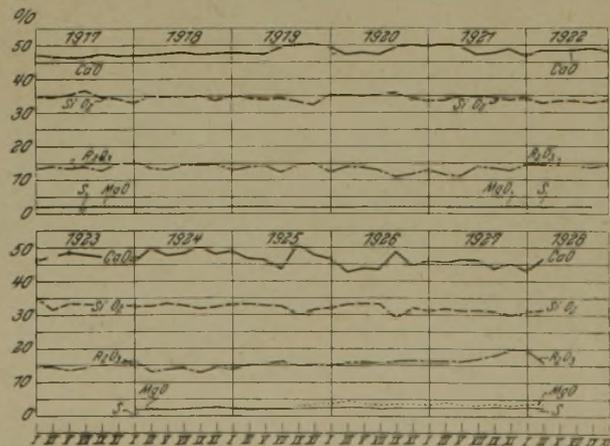


Abb. 11: Gleichmäßigkeit der Hochofenschlacke eines Hochofens während zwölf Jahren

zement der Gipsgehalt infolge der Treibgefahr auf 3% beschränkt werden mußte, ist es durchaus möglich, aus Hochofenschlacke Erzeugnisse herzustellen, die bis zu 12% Gips und mehr enthalten. Die einzelnen Hochofenschlacken verhalten sich bei einer Vermahlung zu Gipschlackenzement durchaus verschieden (Abb. 12), und man muß deshalb sorgsam wählen, welche Schlacken bei diesem Verfahren herangezogen werden können. Die fertigen Erzeugnisse haben den Vorteil, daß sie hohe Salzwasserbeständigkeit aufweisen; sie lagern aber leicht ab, und der fertige Mörtel pflegt abzusanden. Man mischt deshalb dem Gipschlackenzement stets etwas Klinker zu, um zunächst die träge Anfangserhärtung auszuschalten und um weiter dieses unangenehme Absanden und vor allem die Frostempfindlichkeit zu vermeiden. Im allgemeinen zieht man in Deutschland die normalen Hochofenzemente den Gipschlackenzementen vor, da sie krisenfester sind, also nicht so sehr abhängig sind von der Schlacke, der Mahlfeinheit, dem Frost und Absanden. In Frankreich dagegen haben sich die reinen Gipschlackenzemente, allerdings unter Zusatz von 5% und mehr Klinker, als Cilor-Zement ein erhebliches Anwendungsgebiet, besonders für Hafengebäuden und für Bauten, bei denen eine geringe Abbindewärme verlangt wird, erobert. Neben der Festigkeit spielen bekanntlich auch andere Eigenschaften, wie Schwinden der Zemente, eine erhebliche Rolle. Die Gipschlackenzemente und Hochofenzemente haben keineswegs ein so hohes Schwindmaß, wie ursprünglich angenommen wurde, sondern bei genügendem Gipszusatz bleiben sie wenigstens im

Mörtel durchaus in zulässigen Grenzen (Abb. 13). Wenn auch die Mörtelschwindung nicht auf die Beton-schwindung übertragen werden soll, sei dieser Umstand der Laboratoriumsuntersuchungen doch der Vollständigkeit halber erwähnt. In der Praxis sind die Festigkeiten der Hüttenzemente durchaus in gleichem Maße gestiegen wie diejenigen der Portlandzemente, und aus in dem gleichen Laboratorium durchgeführten Vergleichsversuchen geht dieser Umstand durchaus befriedigend hervor (Abb. 14). Obgleich es anfangs den Anschein hatte, als ob die Hüttenzemente mit ihrem großen Anteil an träge erhärtender Schlacke mit dem Portlandzement nicht Schritt halten könnten, hat die Maschinenindustrie mit ihren ausgezeichneten

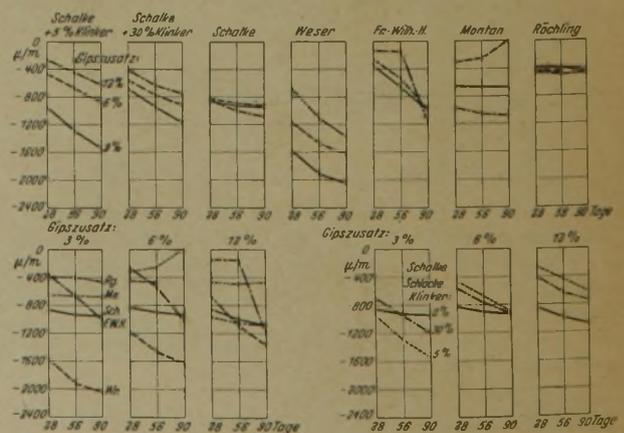


Abb. 12: Gegenüberstellung der Erhärtung von Hochofenzement und Gipschlackenzement aus verschiedenen Schlacken

Mahleinrichtungen zur rechten Zeit eingegriffen und durch Weitertreiben der Feinmahlung die Reaktionsfähigkeit der Schlacken ausgeglichen. Es ist selbstverständlich, daß durch Zusatz erheblicher Mengen der latent hydraulischen Schlacke zu dem energisch erhärtenden Portlandzement zunächst die

schlackenfreie Portlandzemente, besonders dann, wenn die Schlacken tonerdereich sind. Ganz anders verhalten sich, es sei dies zum Vergleich angeführt, Zemente mit Zusätzen von anderen Puzzolanen, wie z. B. Traß (Abb. 16). Hier fallen die Festigkeiten wesentlich stärker ab, fast ebenso stark wie bei Zusatz des inerten Sandmehles, weil eben der Traß nur sehr langsam in die Erhärtung eingreift. Im allgemeinen zeigt sich bei einem 20% Traß übersteigenden Zusatz schon eine erhebliche Festigkeitseinbuße, so daß die Bestimmung der Richtlinien für die Ausführung von Bauwerken im Moor oder Meerwasser, den Traß als Zuschlagsanteil zu werten, zu Recht besteht.

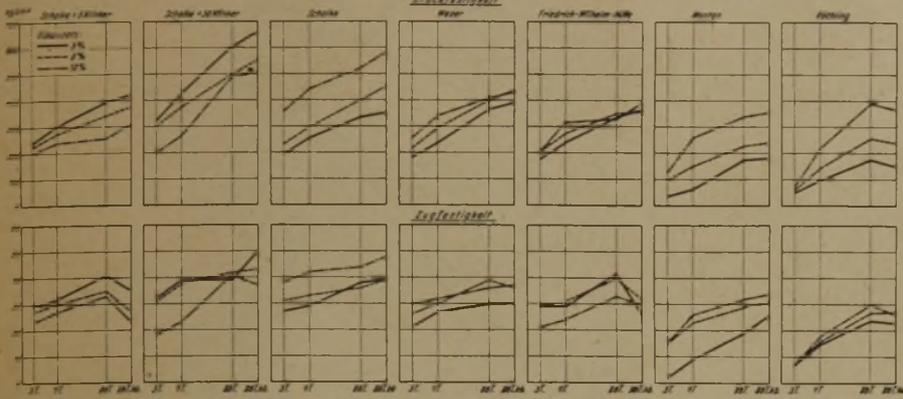


Abb. 13: Gegenüberstellung der Schwindung von Hochofenzement und Gips-Schlacken-Zement aus verschiedenen Schlacken

Anfangsfestigkeiten herabgesetzt werden. Diese Herabsetzung ist aber gering und trifft nur diese Anfangsfestigkeit. Die einzelnen Schlacken verhalten sich dabei nur wenig verschieden (Abb. 15). Bemerkenswert ist, daß bei der in den Normen vorgeschriebenen Festigkeit nach 28 Tagen meist sogar eine Verbesserung erzielt wird. Erst bei Zusatz von 70% gehen hier die Festigkeiten bemerkenswert zurück. Dieser Rückgang ist nach zwei Jahren noch weniger ausgesprochen. Im Gegenteil, hier verhalten sich Zemente mit bis zu 90% Schlacke ebenso wie

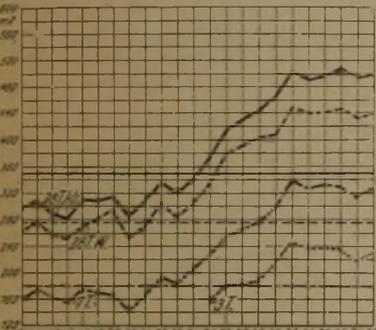


Abb. 14: Qualitätsverbesserung (Festigkeitsanstieg) der Hochofenzemente in den letzten 15 Jahren

Zemente mit bis zu 90% Schlacke ebenso wie

Die sehr wichtige Salzwasserbeständigkeit wird zweifellos durch steigenden Schlackengehalt heraufgesetzt. Bei einem Vergleich der Festigkeit von Körpern, die einerseits in Magnesiumsulfat, andererseits in Wasser gelagert hatten, zeigt sich ein steiles Ansteigen der Magnesiumsulfatfestigkeiten mit steigendem Schlackengehalt (Abb. 17).

Die Wichtigkeit der Abbindewärme und ihr unheil-

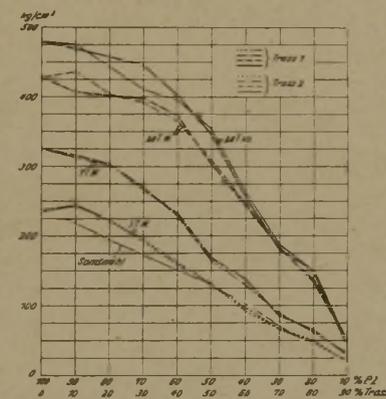


Abb. 16: Einwirkung des Ersatzes von Portlandzement im Bindemittel durch Traß und Sandmehl. Bereits bei 30% Traß sind, hauptsächlich in der Anfangserhärtung, starke Festigkeitsherabsetzungen festzustellen, die nicht weit hinter diejenigen des zum Vergleich zugesetzten inerten Sandmehles zurückbleiben

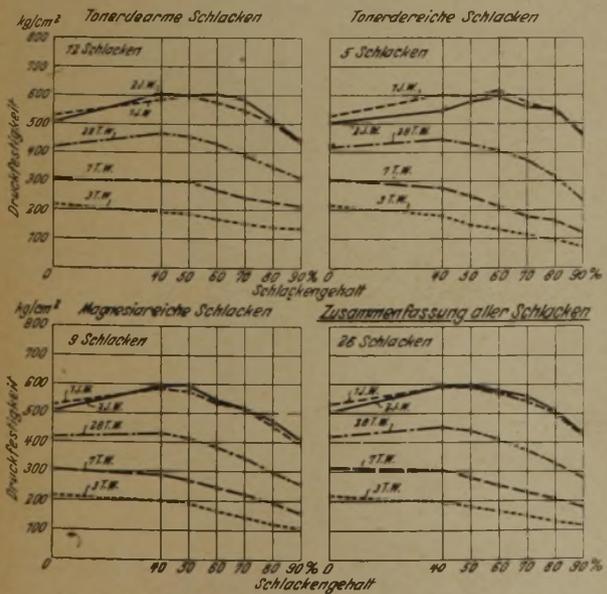


Abb. 15: Einfluß des Ersatzes von Portlandzement-Klinker durch Hochofenschlacke bei steigendem Zusatz bis zu 90% Hochofenschlacke und 10% Klinker bei verschiedenen Schlackengruppen. Bis zu 60-70% Zusatz bleibt die Hochofenschlacke ohne wesentliche Einwirkung auf die Festigkeit

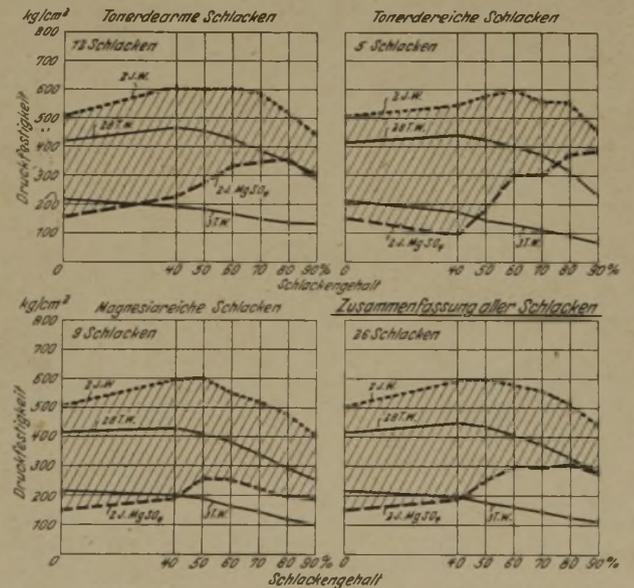


Abb. 17: Einwirkung des Schlackenzusatzes auf die Salzwasserbeständigkeit von Zementen bei 2jähriger Lagerung in Magnesiumsulfat: Die schlackenhaltigen Zemente halten sich im allgemeinen in der Sulfatlösung besser als die schlackenfreien, und zwar steigt die Beständigkeit mit steigendem Schlackenzusatz. Das Feld, das den Unterschied zwischen Wasser- und Sulfatlagerung nach 2 Jahren angibt, verengt sich also nach rechts

voller Einfluß haben sich im letzten Jahrzehnt herausgestellt, als man zum Bau von großen Betonkörpern überging. Es hat sich nämlich gezeigt, daß in einem solchen großen Betonkörper dann leicht Risse eintreten, wenn die schrumpfende Oberfläche sich über einem heißen Kern, der sich nachträglich noch weiter erhitzt,

bindewärme in recht bescheidenen Grenzen blieb, jedenfalls in bescheideneren als bei Portlandzementverwendung allein. Dennoch hatte der Kern der Talsperre nach einem Jahr noch die beträchtliche Temperatur von 47° , die nach zwei Jahren erst auf 35° gesunken war (Abb. 18). Bei Laboratoriumsmessungen von schlackenhaltigen Zementen zeigte es sich, daß tatsächlich durch Hochofenschlackenzusatz die Abbindewärme stark herabgedrückt werden kann (Abb. 19). Mit dieser Herabdrückung allein ist es aber nicht getan, denn man kann z. B. auch durch Trafo- oder Sandzusatz die Abbindewärme drücken, da ja bei Ersatz eines Teiles des Zementes durch inerte Stoffe in die Mörtleinheit weniger Zement kommt als bei Verarbeitung unverdünnten Zementes. Es ist deshalb notwendig, jeweils den Temperaturanstieg auf die erreichte Druckfestigkeit zu beziehen, d. h. zu ermitteln, welche Wärmemenge freigesetzt wird je Kilogramm erreichter Festigkeit. Durch Sandmehlzusatz sinkt z. B. die gemessene Höchsttemperatur in ganz ähnlicher Weise wie durch Schlackenzusatz; die Druckfestigkeit sinkt aber wesentlich stärker, da die Schlacke ja in die Erhärtung eingreift, das Sandmehl aber nicht. Dementsprechend ist der Temperaturanstieg je Kilogramm erreichter Festigkeit bei Sandmehlzement nicht kleiner, sondern sogar größer als bei unverdünntem Zement, da durch die Verdünnung durch das Sandmehl der Zement zu stärkerer Hydratation angeregt wird, also mehr Wärme in Freiheit setzt, ohne daß die Festigkeiten entsprechend zu steigen vermögen (Abb. 20).

I. Anmachwasser

Ein wichtiges Kapitel ist neben der Heranziehung des Zementes das Anmachwasser, und glücklicherweise kann man sagen, daß weitaus die meisten Wässer zum Anmachen von Zement brauchbar sind. Sogar saure Wässer, also solche, die freie Säure enthalten und die den fertigen Boden in kurzer Zeit zerstören würden, kann man heranziehen, und zwar deshalb, weil beim Anmachen die für den fertigen Beton schädliche Säure sofort neutralisiert wird (Abbildung 21). Hierbei wird allerdings ein klei-

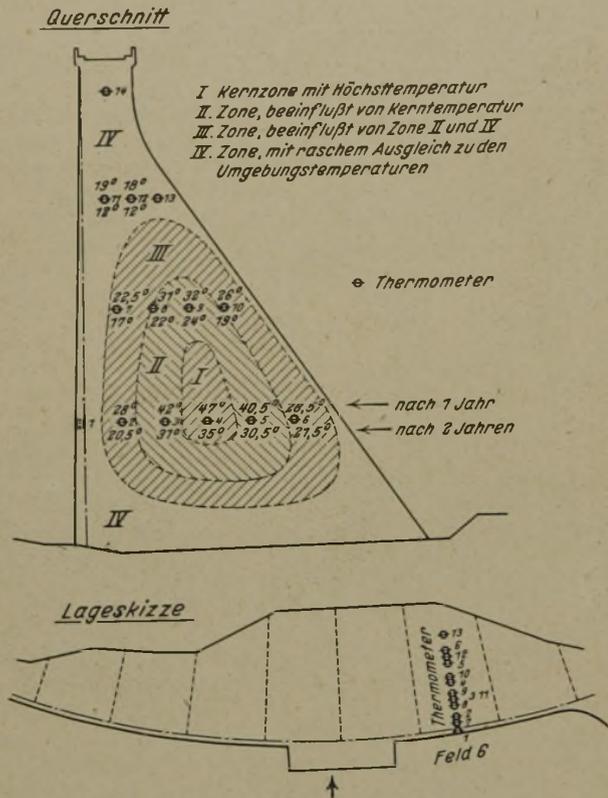


Abb. 18: Temperatur im Innern einer Talsperre nach mehreren Jahren. Der geringe Temperaturabfall im Verlaufe eines Jahres ist bemerkenswert

zusammenzieht. Es treten dann Risse ein, die besonders für eine Talsperre nachteilig werden können. Die Bleilochtalsperre ist gebaut unter Verwendung von Thurament, d. h. unter Heranziehung feingemahlener, schwach gegipster Hochofenschlacke, und zwar hat man recht erhebliche Mengen des Zementanteils durch Thurament ersetzt, da man aus Versuchen erkannt hatte, daß bei Zufügung dieses Thuramentes die Ab-

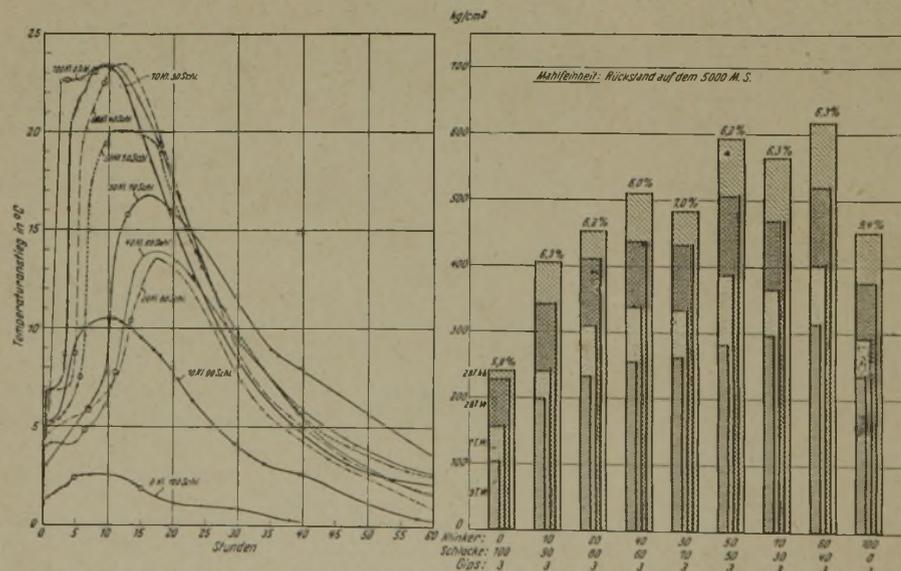


Abb. 19: Herabsetzung der Abbindewärme eines Zementes durch Ersatz des Klinkeranteils durch Hochofenschlacke: die Abbindewärme wird durch steigenden Schlackenzusatz herabgesetzt, die Festigkeit (rechte Tabelle) aber nicht im gleichen Maße zurückgedrängt

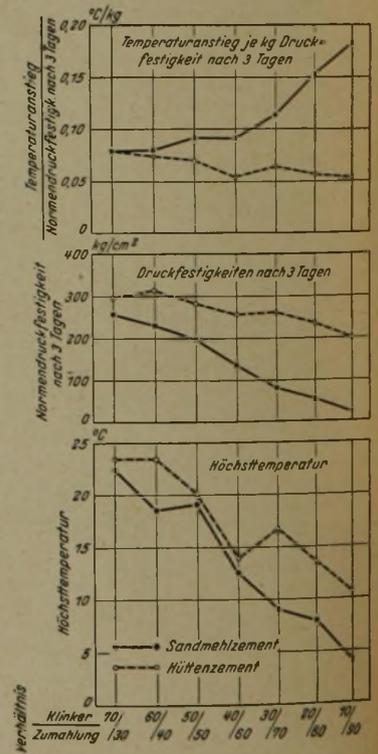


Abb. 20: Beziehung zwischen Temperaturanstieg und Festigkeit an sandmehl- und hochofenschlackenhaltigen Zementen: auch der sandmehlhaltige Zement hat eine geringere Abbindewärme als der reine Portlandzement, durch den Sandmehlzusatz wird aber die Festigkeit stark vermindert, der Zement wird also lediglich verdünnt

ner Teil des Zementes für diese Neutralisation verbraucht und zerstört. Die hier in Frage kommende Menge ist aber so unerheblich, daß sie praktisch keine Rolle spielt. Salzsäurezusatz hat sich sogar besonders gut bewährt, weil bei ihrer Anwesenheit aus dem Kalk des Zementes und der Salzsäure Kalziumchlorid entsteht. Dieses Kalziumchlorid findet gerade bei Frost

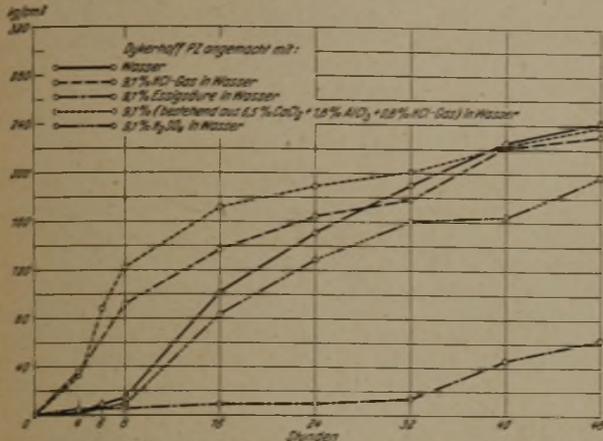


Abb. 21: Erhöhung der Mörtelfestigkeit in den ersten Stunden der Erhärtung durch Säuregehalt des Anmachwassers

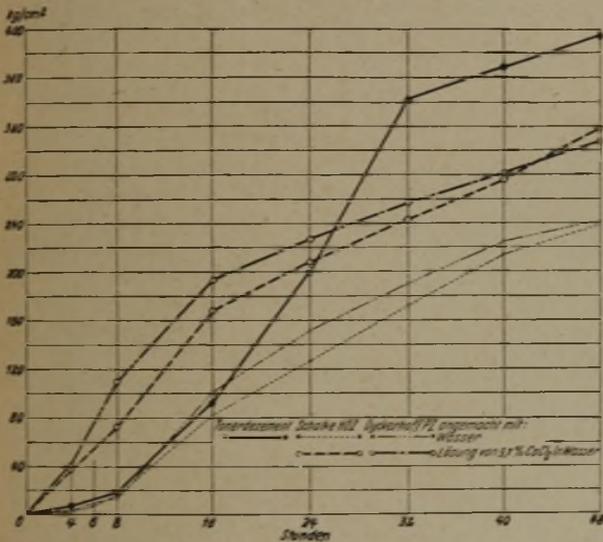


Abb. 22: Vergleich der Festigkeit von mit Chloralkalium angemachtem Normenzement gegenüber dem schnell erhärtenden Tonerdezement; das Chloralkalium wirkt günstig

und wenn schnelle Erhärtung verlangt wird, ein großes Anwendungsgebiet. Es setzt die Anfangsfestigkeit eines normalen Zementes bis 24 Stunden über diejenige des leeren und empfindlichen Tonerdezementes (Abb. 22). Die einzelnen Marken verhalten sich hierbei verschieden, zwischen Portlandzement und Hüttenzement ist generell aber kein Unterschied. Wenn Ausblühungen des fertigen Betons nicht befürchtet werden, ist somit Kalziumchlorid ein ausgezeichnetes Mittel, um bei schnellfertigzustellenden Arbeiten oder bei Frost den Beton rasch zu guter Erhärtung zu zwingen.

Normzusammensetzung von Beton-Kiessand nach den Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton 1932.

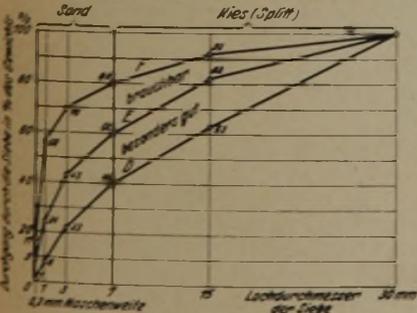


Abb. 23: Kurven für die günstige Zusammensetzung des Betonsandes aus den Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton

II. Zuschlagstoffe

Für die Korngröße der Zuschlagstoffe sind vom Deutschen Ausschuss für Eisenbeton seit einigen Jahren besondere Felder festgelegt (Abb. 23). Im allgemeinen besagen diese, und diese Faustregel kann man sich

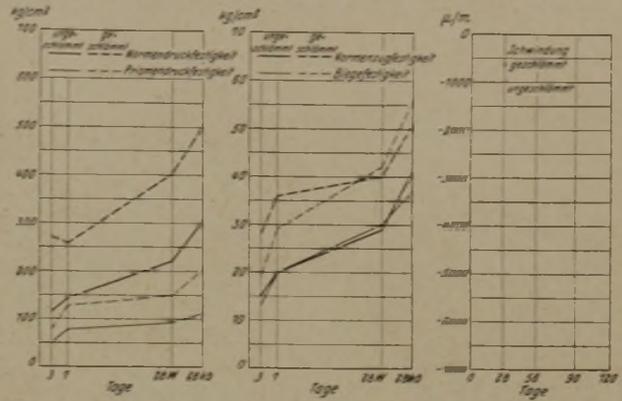


Abb. 24: Einfluß der abschlämmbaren Bestandteile auf Festigkeit und Schwindneigung eines Mörtels

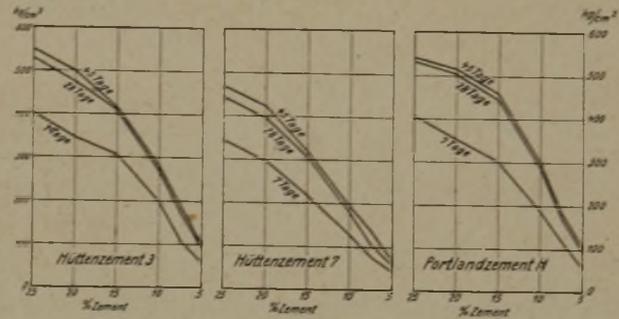


Abb. 25: Einwirkung fallenden Zementgehaltes auf die Betonfestigkeit: die Kurven sind in der Mitte nach oben gebogen, bei 15% ist also der Zement am besten ausgenutzt

gut merken, daß ein guter Zuschlag ein Drittel feine Anteile haben soll. Als feine Anteile sind hierbei diejenigen Anteile zu rechnen, die 10% derjenigen Größe haben, die der größte Anteil des Zuschlages aufweist.

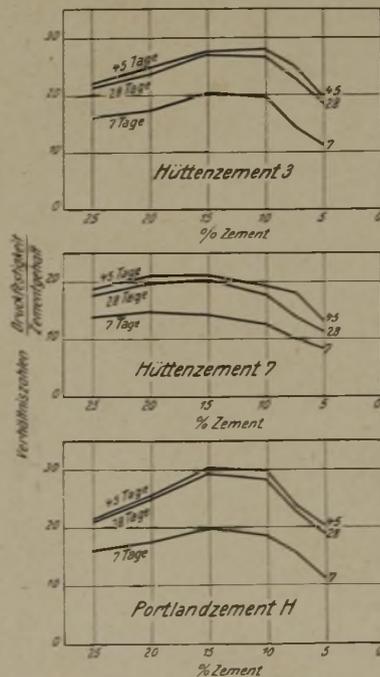


Abb. 26: Die Zahlen der Kurventafel 25 prozentual ausgewertet, also je kg zugesetzten Zementes erhaltene Festigkeit. Bei 15% Zement wird der Zement am besten ausgenutzt

Die abschlämmbaren Bestandteile setzen zwar häufig die Festigkeit herab (Abb. 24), bisweilen rentiert sich aber ein Waschen des Kiesel nicht, da die geringen Festigkeitsabfälle in Kauf genommen werden können und weil die abschlämmbaren Bestandteile die Wasserdichtigkeit des Betons häufig erhöhen. Vorsicht bei der Ablehnung von Sanden, die abschlämmbare Bestandteile aufweisen, ist deshalb geboten. Auch die organischen Substanzen, deren Anwesenheit häufig mit Hilfe der Natronlaugeprobe festgestellt wird,

wirken keineswegs immer so nachteilig, wie in der Literatur beschrieben ist. So wurden beispielsweise mit einem Sand, der bei der Prüfung mit Natronlauge sehr starke Verfärbung zeigte, noch recht gute Festigkeiten ermittelt, wogegen ein Sand, der schwache Färbung hatte, schlechtere Festigkeiten ergab. Ausschlaggebend

wenn noch andere gute Eigenschaften, wie Wasserdichtigkeit oder Zerschmetterfestigkeit, erreicht werden sollen.

Mit steigendem Wassergehalt fallen bekanntlich die Festigkeiten erheblich, und zwar in viel höherem Maße, als im allgemeinen angenommen wird (Abb. 27). Ein Unterschied zwischen den einzelnen Normzementen besteht hier nicht. Ausschlaggebend ist aber die Tatsache, daß mit steigendem Alter die Schädigung durch erhöhten Wasserzusatzen nicht ausgeglichen wird, also bestehen bleibt. Will man also auch bei Gußbeton hohe Endfestigkeiten haben, so muß man mit stark erhöhtem Zementzusatz arbeiten.

Als Beimengung kommt neben Traß auch Bitumen in Frage. Die Frage, ob Traß auch zu Hochofenzement zugesetzt werden kann, läßt sich dahin zusammenfassen, daß geringe Traßzusätze zur Erhöhung der Verarbeitbarkeit durchaus möglich sind, besonders bei Verarbeitung im Wasser. Festigkeitseinbußen sind bei Ersatz des Zementes naturgemäß zu erwarten, aber keineswegs in höherem Maße als bei Portlandzement (Abb. 28 und 29). Bitumen im Anmachwasser hat zweifellos gewisse Aussichten, denn bei der Prüfung der Festigkeit von bituminierten Betons wurden nur geringe Festigkeitseinbußen gefunden (Abb. 30), dagegen die Wasserdichtigkeit durchweg in günstigem Sinn erhöht (Abb. 31) und die Schwindneigung stark herabgesetzt (Abb. 32).

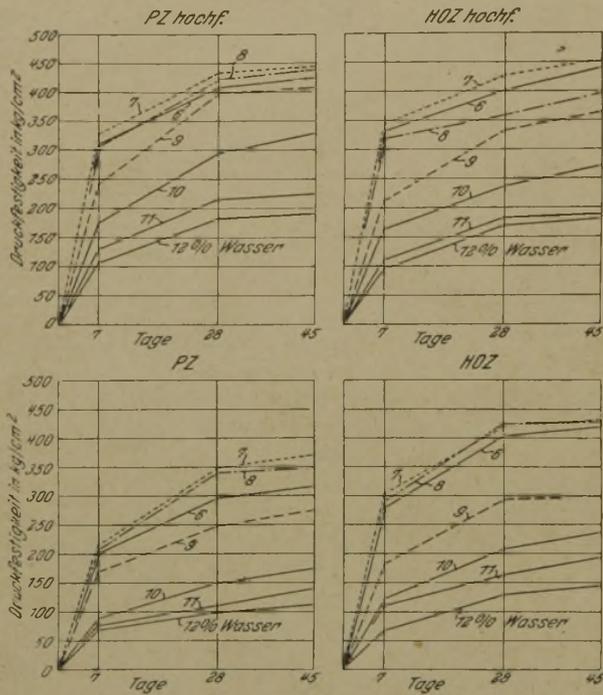


Abb. 27: Sinken der Festigkeit mit steigendem Wasserzusatz. Bei über 8% Wasser, also bei plastischem Beton und besonders bei Gußbeton liegen die Festigkeiten weit unter denjenigen des erdfeuchten Betons

III. Verarbeitung Leichtbeton

Beim Beton selbst ist zu unterscheiden zwischen Leicht- und Schwerbeton. Vom ersten verlangt man möglichst hohen Luftgehalt, da eingeschlossene Luft das beste wärmedämmende Material ist. Man kann diese Luft in den Beton hineinbringen entweder von der Zementseite oder von der Zuschlagseite her. Arbeitet man von der Zementseite her, so schlägt man entweder den Zement zu Schaum, oder man fügt ihm solche chemischen Stoffe zu, die Gas entwickeln, wie Wasserstoffsperoxyd, das Sauerstoff freigibt, oder Aluminiumpulver, das mit dem Kalk des Zementes Wasserstoff entwickelt. Dieser Wasserstoff treibt dann den Zement auf (Abb. 33). Die so hergestellten Körper schwinden aber stark, und es ist deshalb zweckmäßig, sie in der Fabrik herzustellen und später zu vermauern. Da sie nicht besonders kantenfest sind, hat sich in der letzten Zeit mehr der Bimsbeton eingeführt, und zwar entweder unter Verwendung von Naturbims, also einer natürlich entstandenen, durch entweichende Gase aufgeblähten Gesteinsschmelze oder unter Heranziehung von Hüttenbims, der aus

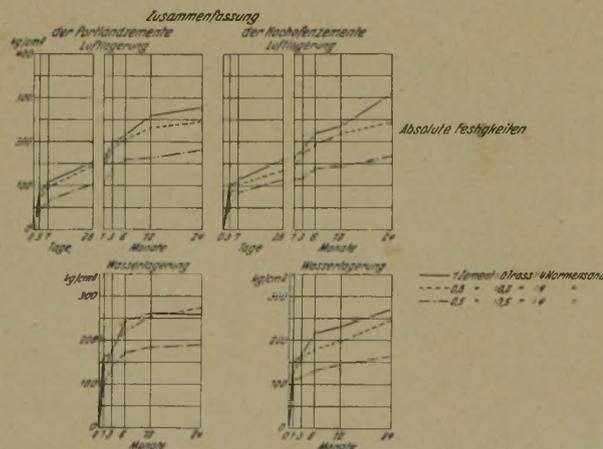


Abb. 28: Einwirkung des Ersatzes von Normzement durch Traß: Jeder Ersatz von Normzement durch Traß drückt die Festigkeit, besonders bei Luftlagerung

in solchen zweifelhaften Fällen sollte also stets die Prüfung als Beton sein.

Der Zementgehalt muß desto höher sein, je höhere Festigkeiten verlangt werden (Abb. 25). Die Ausnutzung ist im allgemeinen bei ungefähr 15%, also im Mischungsverhältnis 1:6, wie auch unser moderner Eisenbeton hergestellt wird, am besten. Sie fällt bei niedrigerem oder höherem Zementgehalt, d. h. also, der Zement ergibt je Einheit dann die höchste Druckfestigkeit, wenn er in diesem Mischungsverhältnis verarbeitet wird (Abb. 26). Dennoch kann man keineswegs immer bei diesem Mischungsverhältnis stehenbleiben, sondern es ist häufig zweckmäßiger, mit höherem Zementgehalt zu arbeiten, hauptsächlich dann,

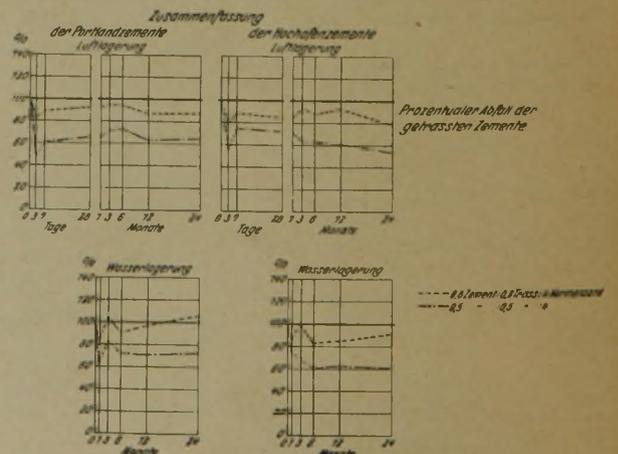


Abb. 29: Prozentuale Auswertung der Kurventafel 28. Traß als Zementersatz setzt die Festigkeiten stets herab, Traß ist kein Zement

Hochofenschlacke gleichfalls durch Gasentwicklung, nämlich Wasserdampf aufgebläht wird. Man unterstützt die Gasentwicklung dadurch, daß man heißes Wasser nimmt, aus dem sich durch die glühendflüssige Schlacke die Wasserdämpfe schneller entwickeln als aus kaltem Wasser.

Druckfestigkeiten von HOZ Schalke mit verschiedenem Bitumengehalt im Anmachwasser.

(* Bitumina: Dispersion Y, Emulsion Colas Z, Suspension VAT_I u. Emulsion VAT_{II}.)

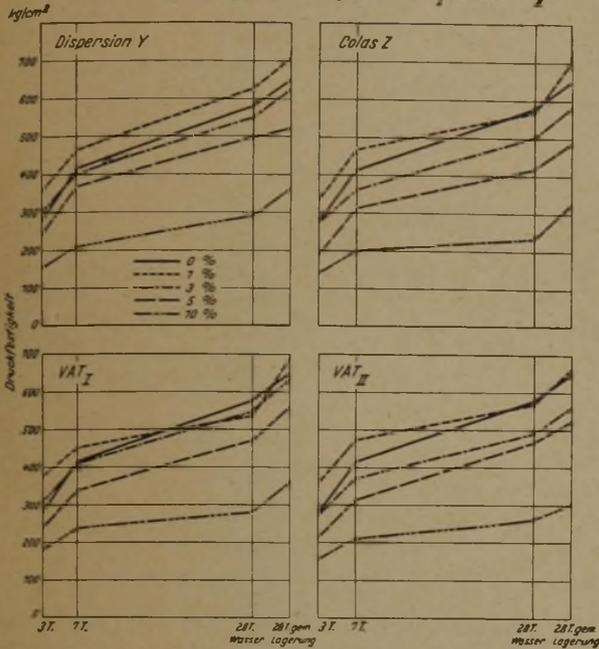


Abb. 30: Einwirkung von Bitumenzusatz zum Anmachwasser: das Bitumen setzt die Festigkeit bei steigendem Gehalt herab, bei geringem Gehalt nur unbedeutend

Schwerbeton

Bei Schwerbeton spielt zunächst der Wasserzusatz eine ausschlaggebende Rolle, weiter auch die Verdichtung. Diese Verdichtung durch geeignete Rüttelgeräte läßt einen besonders geringen Wasserzusatz zu und dadurch eine Verarbeitung von erdfeuchtem Beton unter besonderen Umständen wie z. B. bei Talsperren, wo er früher nicht verwendet werden konnte, da er nicht wasserdicht war.

In der letzten Zeit wurde von besonderer Wichtigkeit das Betonieren bei tiefen Temperaturen. Hier ist festzuhalten, daß man sich sehr gut selbst unter den widrigsten Verhältnissen helfen kann durch Verwendung geeigneter Salze wie Kalziumchlorid, Aluminiumchlorid oder Mischungen dieser Salze, die eine schnelle Erhärtung des Zementes erzwingen. Neben diesen chemischen Substanzen kommt aber auch in Frage die Einführung von Wärme in den Betonkörper durch den Beton selbst. Häufig nimmt man angewärmtes Anmachwasser, eine Maßnahme, die lediglich dazu dient, dem Verarbeiter Sand in die Augen zu streuen, da die wenigen Prozent Anmachwasser in bezug auf die ganze Betonmasse keine Rolle spielen. Sehr viel wichtiger ist, daß die Zuschlagstoffe erwärmt sind und daß das Heranziehen gefrorener Zuschlagstoffe, die häufig vollkommen trocken aussehen, weil sie stauben, wenn sie kalt sind, unter allen Umständen vermieden wird.

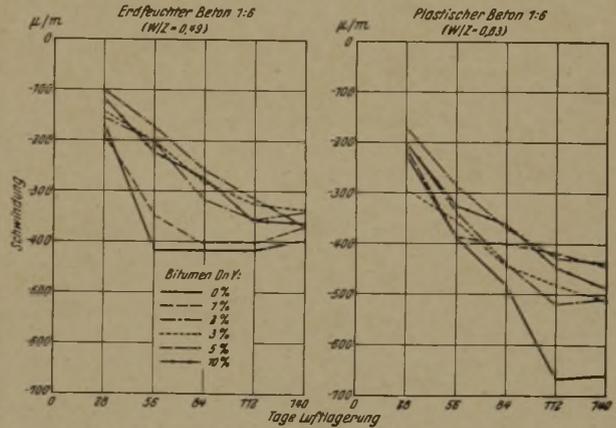


Abb. 32: Schwindung von Beton (K. T. 30 und 31) bei steigendem Bitumenzusatz. Das Bitumen setzt die Schwindung herab

Gegen Zutritt der Kälte sind deshalb mit angewärmten Zuschlagstoffen hergestellte Betone sehr weitgehend geschützt. Sie können noch weiter geschützt werden durch Ummantelung, wobei darauf zu achten ist, daß Hochfenzementbeton infolge seiner geringeren Abbindewärme hier etwas empfindlicher ist als Portlandzement- oder Tonerdezementbeton.

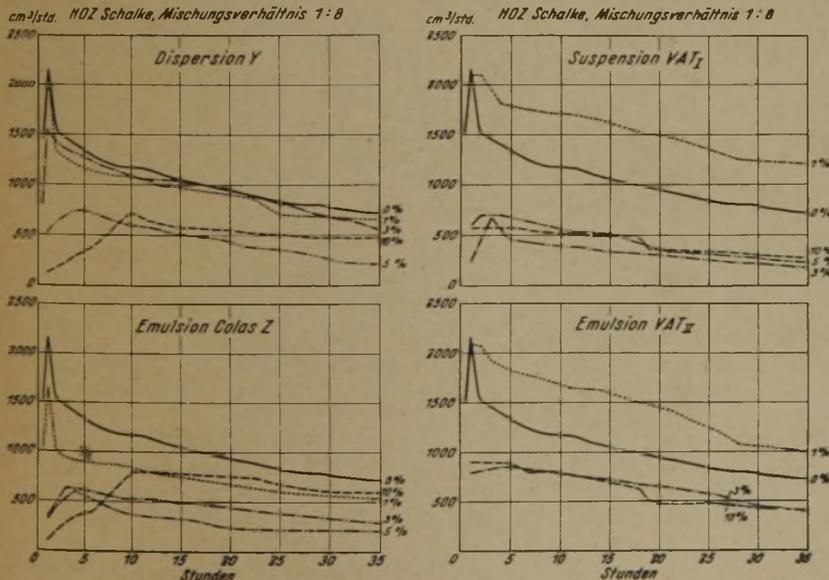


Abb. 31: Erhöhung der Wasserdichtigkeit durch Bitumengehalt des Anmachwassers. Der Bitumenzusatz erhöht die Wasserdichtigkeit

Zum Schluß sei noch kurz ein neues von Amerika herübergekommenes Verfahren erwähnt zur Zementverwendung, das die Oberflächenhärtung von Flugplätzen und Straßen im Auge hat. Bei diesem Verfahren wird zunächst die Erde aufgeraut und dann wieder mit Stachelwalzen verdichtet, nachdem der Zement, ohne daß er in einen Betonmischer kommt, ihr bei dem Aufrauen zugemischt worden ist. Es wurde bei diesem Verfahren eine Festigkeit von 30 bis 40 kg/cm² erzielt, die durchaus genügt für einfache Straßen, Flugplätze und dergleichen. Es ist zu wünschen, daß in Deutschland bald die Apparatur geschaffen wird, um dieses Verfahren auch bei uns einzuführen.

Zusammenfassung

Dem altbekannten Portlandzement traten um die Jahrhundertwende die unter Verwendung von Hochofenschlacke hergestellten Eisen-

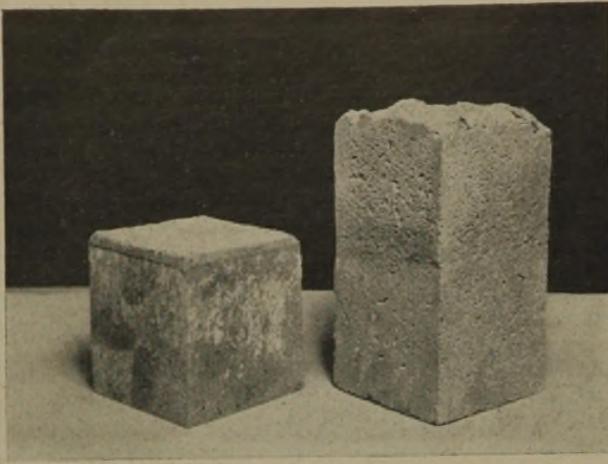


Abb. 33: Gleiche Menge Zement, links als gewöhnlicher Mörtel, rechts als Porenmörtel, aufgetrieben durch Gasentwicklung

portland- und Hochofenzemente an die Seite. Diese bestehen aus latent-hydraulischer, wassergranulierter Hochofenschlacke und Portlandzement und tragen den Sammelnamen „Hüttenzemente“, da sie in der Hüttenindustrie erzeugt werden.

Die schon Anfang des Jahrhunderts hergestellten Gipschlackenzemente, welche keinen oder nur geringen Portlandzementanteil, dafür aber große Gipsmengen enthalten, werden neuerdings in Frankreich unter der Bezeichnung „Cilor-Zement“ und „Sealithor-Zement“ hergestellt. Die Festigkeit der Hüttenzemente ist gleich der der alten Portlandzemente, und sie sind deshalb und auch, weil ihre Eigenschaften im allgemeinen mit denjenigen von Portlandzement übereinstimmen, unter dem Sammelnamen „Normenzemente“ mit diesem in den deutschen Normen für Zement zusammengefaßt.

Die Schwindung der Hüttenzemente bleibt in geringen Grenzen, sie haben sich deshalb sowohl bei probeweisem Verlegen als auch bei Verlegung im großen bei den Reichsautobahnen gut bewährt. Die mit ihnen hergestellten Straßen liegen eben und rissfrei.

Die Abbindewärme steigt mit steigender Errichtung von Massenbetonbauwerken in ihrer Wichtigkeit, da eine hohe Abbindewärme besonders bei großen Bauabmessungen leicht zu Spannungserscheinungen führt. Durch Zumahlung von Hochofenschlacke ist es möglich, die Abbindewärme zu senken, ohne die Festigkeit des Bauwerkes zu beeinträchtigen.

Bekanntlich werden in seltenen Fällen Betonbauwerke durch wenige Salzwässer, wie z. B. magnesiumhaltiges Meerwasser angegriffen. Eine Erhöhung der Salzwasserbeständigkeit des Betons ist möglich durch recht dichte Verarbeitung und geringen Wasserzusatz sowie durch Heranziehung geeigneter Zemente. Als solche Zemente haben sich die hochofenschlackenhaltigen Zemente bewährt, da sie einerseits verhältnismäßig kalkarm sind, und andererseits der aus jedem Portlandzementklinker beim Abbinden freiwerdende Kalk von der Hochofenschlacke gebunden wird.

Als Anmachwasser bewähren sich weitaus die meisten Wässer, selbst dann, wenn sie freie Säure enthalten, und zwar deshalb, weil diese freien Säuren sofort beim Zusatz neutralisiert werden. Die geringen Mengen hierbei zerstörten Zementes spielen gar keine Rolle.

Auch Bitumen hat zweifellos auf dem Gebiete der Zusätze eine gewisse Bedeutung.

Die Zuschläge bilden das Gerüst des Betons und sind deshalb besonders wichtig. Ihre Korngrößen sind so zu

wählen, daß das Gerüst besonders dicht und stabil wird, denn der Zement spielt lediglich eine Rolle bei der Ver kittung. Er muß deshalb in genügenden Mengen herangezogen werden. Ein Mischverhältnis von 15% Zementzusatz, also ungefähr 1:6 Gewichtsteilen ist das günstigste für die Ausnutzung der Zemente. Bei höherem Zementzusatz wird zwar der Zement je Kilogramm weniger stark ausgenutzt, häufig werden aber dennoch Erfolge erzielt, die im Sinne der Verwendung von Beton wünschenswert sind, wie z. B. besonders große Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Einflüsse oder hohe Zerschmetterungsfestigkeit.

Als natürliche Beimengungen kommen die abschlämmbaren Bestandteile des Sandes in Frage, deren Gefahr aber häufig überschätzt wird.

Weniger wichtig ist der Traf, den man besonders heranzieht, um die Verarbeitbarkeit, d. h. die Geschmeidigkeit des Betons zu erhöhen. Umfangreiche Versuche haben ergeben, daß auch Hochofenzemente den Trafzusatz nicht nur ertragen, sondern auf geringen Trafzusatz ebenso wie Portlandzement gut ansprechen. Der Traf darf aber nicht als Zementersatz gerechnet werden.

Bei der Verarbeitung zu Leichtbeton kann man zunächst vom Zement selbst ausgehen, indem man diesen durch Gasentwicklung porös macht. Hier verhalten sich die Normenzemente mit Hochofenschlacke nicht anders als die Portlandzemente. Sie lassen sich auch dann verarbeiten, wenn man zur Erzielung der Leichtigkeit ausgeht von den Zuschlagstoffen, wenn man also Bims heranzieht. An die Seite des altbekannten Naturbimses aus dem Laacher-See-Gebiet ist neuerdings mit bestem Erfolg der Kunstbims aus Hochofenschlacke getreten.

Bei Schwerbeton ist der Wasserzusatz, wenn hohe Festigkeiten erzielt werden sollen, gering zu halten, die Verdichtung aber weit zu treiben, eine Maßnahme, die durch die modernen Rüttelmaschinen ohne weiteres möglich ist.

Tiefe Temperaturen treffen die Hüttenzemente bisweilen etwas stärker als die Portlandzemente infolge deren geringerer Abbindewärme, da der Beton sich nicht selbst aufheizt. Man kann aber dennoch die Zemente ohne weiteres heranziehen, und sogar bei verhältnismäßig tiefen Temperaturen arbeiten, wenn man an die Stelle der häufig üblichen, aber so wenig wirksamen Erhitzung des Anmachwassers die Erhitzung der Zuschlagstoffe setzt.

Als neuestes und letztes Verfahren sei zum Schluß noch erwähnt die Möglichkeit der Verdichtung von Flugplätzen und dergleichen durch oberflächlich eingemischten Zement, dem eine Verdichtung des Bodens folgt, der bei dieser Bearbeitungsweise der Mischmaschine überhaupt nicht zugeführt zu werden braucht.

Die Zementerzeugung aus Hochofenschlacke ist ursprünglich eine Notmaßnahme gewesen zur Beseitigung der Schlacke, aus der man Zement machte, nachdem man ihre hydraulischen Eigenschaften erkannt hatte. Später hat man dann weiter erfahren, daß die hergestellten Zemente besondere Eigenheiten haben. In den Normeneigenschaften sind sie identisch mit den Portlandzementen, und deshalb sind alle drei Zementarten, Portlandzement, Eisenportland- und Hochofenzement, in den deutschen Normen für Zement vereinigt. In bezug auf geringe Abbindewärme und Salzwasserbeständigkeit haben sie aber bestimmte zusätzliche Eigenarten, die sie für besondere Bauwerke besonders geeignet machen, während sie für normale Bauten genau so wie Portlandzement verarbeitet werden können.

Technikerfeindliche Stadtverwaltungen*)

Die Sorge um den technischen Nachwuchs und die Anforderung von technischem Nachwuchs seitens aller Kreise der Verwaltungen geben Anlaß, nicht nur für den notwendigen technischen Nachwuchs besorgt zu sein, sondern auch einmal nachzuprüfen, inwieweit die Verwaltungen selbst dazu beitragen können, daß der technische Nachwuchs freudig in ihre Dienste tritt.

Der nachfolgende Aufsatz beschäftigt sich zunächst mit der Vernachlässigung gehobener technischer Dienststellen bei den städtischen Verwaltungen. Wenn die hier mitgeteilten Feststellungen geändert werden, wird dies wesentlich dazu beitragen, die Arbeitsfreudigkeit des technischen Personals zu steigern und auch den Nachwuchs zum Eintritt anzuregen.

Dr. Todt

Die Technik hat in Industrie und Verwaltung entscheidende Aufgaben für den Neubau des Reiches zu lösen. Der Ausbau der Wehrmacht, der Vierjahresplan, die Sicherung unserer Grenzen, der Ausbau unseres Verkehrsnetzes erfordern bei den für die Lösung der Aufgaben gestellten kurzen Fristen bestes Können und rücksichtslosen Einsatz. Für die führenden Stellen sind die fähigsten Köpfe gerade gut genug, und zwar nicht nur in der Industrie, sondern auch in der Verwaltung. Denn letzten Endes hat die Bauverwaltung Entwurf und gesamte Disposition der großen Bauvorhaben in der Hand und ist für den Erfolg einer ergriffenen Maßnahme entscheidend verantwortlich.

Leider ist im Staatsdienst dem Techniker noch lange nicht die Aufstiegsmöglichkeit geöffnet, die beim Zugang zum technischen Verwaltungsdienst besten Kräften einen entsprechenden Anreiz bieten könnte. Hiervon soll an einer anderen Stelle gesprochen werden. Daß aber bei den Gemeindeverwaltungen, bei denen die notwendigen Vorrückungsstellen vorhanden sind, eine Mißachtung des Technikers in vielen Fällen dazu geführt hat, vorhandene Aufsteigungsmöglichkeiten absichtlich vorzuenthalten, das muß einmal deutlich herausgestellt werden. Für den Techniker, der ein gesundes Streben zum Vorwärtskommen besitzt, ist im Gemeindedienst kaum ein Anreiz gegeben. Früher drängten sich gerade die besten technischen Kräfte in den Kommunaldienst. Neben dem höheren Gehalt, das die Städte boten, um besonders gute Kräfte an sich zu ziehen, war es vor allem die angesehene Stellung, die ein Stadtbaurat, namentlich in einer Großstadt, genoß. Es war selbstverständlich, daß er Magistratsmitglied, in den Städten des Westens, die schon damals die Bürgermeisterei-verfassung hatten, Beigeordneter war. In großen Städten gab es meist sogar drei Stadtbauräte, je einen für den Hochbau, den Tiefbau und die Versorgungswerke einschließlich der Straßenbahn. Heute ist der leitende technische Beamte einer Stadt als Beigeordneter fast schon zur Seltenheit geworden. Zunächst einmal ist die Zahl der Stadtbauräte einer Stadt fast allgemein auf eins herabgesetzt worden, sodann aber bleiben die Stadtbauratsstellen in großer Zahl lange Zeit hindurch unbesetzt und werden von nicht technisch vorgebildeten Beamten verwaltet. Die leitenden technischen Beamten sind dann nur noch nachgeordnete Magistratsbeamte. Die Vertretung ihrer Arbeitsgebiete

beim Oberbürgermeister liegt in den Händen von Nichtfachleuten.

In Frankfurt a. M., das früher drei Stadtbauräte als Magistratsmitglieder hatte, werden seit rund zwei Jahren die sämtlichen technischen Verwaltungszweige von einem Juristen als Dezernenten geleitet. Die Stadtbauratsstellen für Hoch- und Tiefbau sind unbesetzt.

Auch in der Reichshauptstadt sind diese beiden Stellen unbesetzt, die erstere schon seit mehr als zwei Jahren. Es kann dem dienstlichen Bedürfnis unmöglich genügen, daß die Mitvertretung dieser beiden Riesenarbeitsgebiete dem einzigen technischen Beigeordneten der Hauptverwaltung, dem Leiter des Siedlungswesens, überlassen bleibt. Noch schlimmer liegen die Verhältnisse bei den 20 Bezirksverwaltungen Berlins, unter deren 153 Beigeordneten sich nur 13 Techniker befinden, von denen aber kaum mehr als einer auf Grund des von ihm ausgeübten Amtes in das Beigeordnetenverhältnis berufen wurde. Die Dezernenten für das Bauwesen in den Bezirksverwaltungen sind zu mehr als einem Drittel Juristen.

In Hamburg gibt es statt der früheren drei Oberbaudirektoren in Ministerialdirektorstellung nur noch einen. Die Stadt Karlsruhe hatte bis 1933 vier Bürgermeister, davon war einer Techniker, der die gesamten technischen Arbeitsgebiete beim Oberbürgermeister vertrat. Dieser technische Bürgermeister ist abgebaut worden, und die leitenden technischen Beamten sind nur noch nachgeordnete Magistratsbeamte. Die technischen Dezernate liegen in Händen von Juristen. Entsprechend liegen die Verhältnisse in den Städten Mannheim, Heidelberg und Freiburg.

Selbst im Deutschen Gemeindetag, der Zentralbehörde der kommunalen Verwaltung Deutschlands, hat man es nicht für nötig gehalten, auch nur eine einzige technische Beigeordnetenstelle einzurichten.

Es ist hohe Zeit, hier Wandel zu schaffen. Der Techniker hat zu den großen politischen Erfolgen des letzten Jahres in vorderster Linie beigetragen. Die Statistik der Hochschulen läßt immer noch einen bedenklichen Rückgang des technischen Studiums im Verhältnis zu anderen Disziplinen erkennen. Ein entscheidendes Mittel, um fähige Köpfe für die technische Laufbahn zu gewinnen, ist die Einräumung der verwaltungsmäßigen und gesellschaftlichen Stellung, die der führende Techniker auf Grund seiner Arbeit beanspruchen muß.

*) Abdruck aus „Deutsche Technik“, März 1939

Buchbesprechungen

Das Schaltwerk der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin-Siemensstadt. Hans Dominik. Band 11 der Schriftenreihe „Deutsche Großbetriebe“. 2. Auflage. 80 Seiten und 75 Abbildungen und mehrere Tafeln. Halbl. 2,30 RM. 1939. Verlag J. J. Arnd (Übersee-Post), Leipzig C 1.

Die 2. Auflage ist völlig neu bearbeitet und durchweg mit neuen Bildern ausgestattet. Die Schaltgeräte der letzten Jahre werden eingehend beschrieben, insbesondere der ölose Hochleistungsschalter der Siemens-Schuckert-Werke, der Expansionsschalter, dessen Herstellung im Schaltwerk einen breiten Raum einnimmt.

Aus lebendiger Schilderung erkennen wir, wie Schalter, Anlasser, Regler, Sicherungen, Spezialgeräte, ganze Schaltanlagen usw. in großen Serien oder auch in wenigen Stückzahlen meistens in Fließfertigung entstehen. Neben der wirtschaftlichen Herstellung vieler Schalter wird auch auf die Prüfverfahren näher eingegangen. Zunächst wird das angelieferte Rohmaterial in der Materialprüfstelle untersucht, der auch die Werkstoffbearbeitung obliegt. Dann werden die Einzelteile und schließlich das fertige Fabrikat mechanisch und elektrisch geprüft. Der Leser wird überrascht sein, daß von den verschiedenen Laboratorien, den Versuchs- und Prüffeldern allein das Hochleistungsprüffeld eine elektrische Leistung zur Verfügung hat, die einem Kraftwerk von 45 000 kVA entspricht.

Neben der neuzeitlichen Organisation des Werkes ist ein ausführlicher Abschnitt der Lehrlingsausbildung und ein weiterer den sozialen Einrichtungen gewidmet.

Die allgemein verständliche und sehr anschauliche Ausdrucksweise des Buches gibt dem Leser, der sich über Fragen der Werkorganisation und der Rationalisierung des Arbeitsablaufs unterrichten will, einen genauen Einblick in einen modernen Industriebetrieb, dessen Größe und Bedeutung eine Belegschaft von 6000 Köpfen beweist.

Georg Simon Ohm. Ein Forscher wächst aus seiner Väter Art. Von Heinrich Ritter von Führtbauer. DIN A 5, 254 Seiten, mit 28 Bildern. VDI-Verlag G. m. b. H., Berlin, 1939. Gebunden 7,50 RM. (VDI-Mitglieder 6,75 RM.).

Dem ersten Pionier der messenden Elektrizitätskunde, dem Entdecker der Grundgesetze des elektrischen Stromes, Georg Simon Ohm, verdankt die Welt die Erkenntnis vom Verhältnis zwischen elektrischer Spannung, Stromstärke und Leitungswiderstand, bekannt unter der Bezeichnung „das Ohmsche Gesetz“. Im vollen Umfange wurde der große Wert seiner Forschungen für Wissenschaft und Technik erst lange nach seinem Tode klar, und ihm zu Ehren wurde im Jahre 1881 die Einheit des elektrischen Widerstandes „Ohm“ benannt. So wird sein Name der Nachwelt für alle Zeiten erhalten bleiben.

Um so mehr ist es verwunderlich, daß über diesen Mann bisher kein umfassendes, der ganzen Größe des Forschers würdiges Werk vorlag. Es ist daher zu begrüßen, daß jetzt ein Lebensbild des Gelehrten geschaffen wurde, das den Forscher, den Erfinder, aber auch den Menschen Ohm als lebendige Gestalt inmitten der Seinen hervortreten läßt. Im Mittelpunkt des Buches steht das an Spannungen und Kämpfen gegen widrige Verhältnisse so reiche Leben des großen Mannes, der darin aber nicht — um ein Wort von ihm selbst zu gebrauchen — als „verbindungslos dastehendes Einzelwesen“, sondern in betontem Zusammenhang von Sippe und Umwelt erscheint.

Nahe Familienbeziehungen — der Verfasser ist ein Großnephew von Georg Simon Ohm — ermöglichten es, auf bisher größtenteils unbekanntes und unveröffentlichtes Material und vielfach auch persönliche Überlieferungen zurückzugreifen. Eine neuartige Gestaltung erfuhr das Werk dadurch, daß an Hand solcher Urkunden auch Ohms Vorfahren aus dem Schmiede- und Schlosserhandwerk eingehend behandelt und so sippenkundliche und kulturgeschichtliche Ausblicke erschlossen werden. Ein umfassendes, sorgfältig bearbeitetes Namen- und Sachverzeichnis erhöht den Wert des Buches als Quellenwerk.

Das mit reichem Buchschmuck (zahlreiche bisher unveröffentlichte Bilder und Urkunden) ausgestattete Buch wird nicht nur bei dem Mann der Technik und der Wissenschaft, dem im Handwerk Schaffenden sowie dem kulturgeschichtlich und

sippenkundlich interessierten Leser Beifall finden; auch die Erzieher werden es mit Spannung und Befriedigung lesen, betrachten doch auch sie Ohm „als einen ihrer Großen“. Aber auch der reife und strebende Nachwuchs von Technik und Handwerk, vom Erzieherberuf und von der Wissenschaft wird es mit Begeisterung und Nutzen lesen, zumal die Darstellung leichtverständlich, lebensvoll und nicht ohne Humor ist. Jeder wird das von Anfang bis zu Ende fesselnde Buch mit der Überzeugung und dem Bewußtsein aus der Hand legen: Georg Simon Ohm war ein Vorbild des deutschen Geistesarbeiters auch im Sinne unserer Zeit.

Dechema-Monographien Nr. 89—102 (Band 10). 14 Abhandlungen und 2 Referate; 178 Seiten mit 84 Abbildungen und 11 Tabellen im Text. Herausgegeben von der DECHEMA (Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen) E. V.; Verlag Chemie G. m. b. H., Berlin, 1939. Geb. 6,50 RM., für Dechema-Mitglieder 5,20 RM.

Der 10. Band der Dechema-Monographien enthält zwei Vorträge, die auf der gemeinsamen Wintertagung der DECHEMA und der Fachgruppe Apparatebau der Wirtschaftsgruppe Maschinenbau in Berlin 1937 gehalten wurden, ferner drei Vorträge anlässlich der 11. Hauptversammlung der DECHEMA 1937 in Frankfurt a. M., neun Vorträge der Gemeinschaftstagung der DECHEMA und der Gesellschaft für Korrosionsforschung und Werkstoffschutz 1937 in Frankfurt a. M. und zwei Referate.

Der erste Teil bringt Abhandlungen von O. Fuchs (Darmstadt) über „Apparatebau und Chemie“ sowie von H. Claassen (Köln) über „Die Dampfflüssigkeitsgemische, ihre Beschaffenheit und Wirkung in Verdampfern mit senkrecht stehenden Heizrohren“. Hierzu ist ein Diskussionsbeitrag von E. Kirschbaum (Karlsruhe) angefügt. Ein Referat von S. Kiehlkalt behandelt „Die Schwingmaschinen im Apparatebau“.

Der zweite Teil befaßt sich mit den „Extremen technischen Arbeitsbedingungen und ihren Erweiterungsmöglichkeiten“ und bringt Vorträge von C. Ramsauer (Berlin) über „Grenzen der Technik bei Hochdruck und Vakuum“, von R. Auerbach (Berlin) über „Feinste Zerteilung und ihre technischen Anwendungen“, und von P. Wulff (München) über „Möglichkeiten der Genauigkeitssteigerung beim Messen und Regeln“.

Im dritten Teil, der der Beständigkeit und dem Schutz der Werkstoffe im chemischen Apparatebau gewidmet ist, werden die Werkstoffe Stahl, plattierter Stahl, Aluminium und seine Legierungen, keramische Werkstoffe und Holz sowie organische und metallische Schutzüberzüge von den Fachautoren G. Schikorr, E. Baerlecken, B. Trautmann, W. Helling, H. Lichtenberg, W. Wiederholt, F. J. Peters, W. Steger und F. Kollmann ausführlich auf Grund der neuesten Erkenntnisse behandelt.

Ein Gesamtverzeichnis aller in den bisher erschienenen Bänden 1 bis 10 enthaltenen Abhandlungen beschließt das Werk.

Einführung in die Radiotechnik. Von Gewerbeoberlehrer K. Gringel. 1938. 32 Seiten mit 56 Abbildungen. Preis 0,60 RM. R. Herrosés Verlag, Wittenberg und Gräfenhainichen, Zentralverlag für Berufs- und Fachschulen.

Das vorliegende Heft bringt eine Einführung in die Radiotechnik. Dem Verfasser ist es gelungen, aus dem großen Gebiet der Radiotechnik auf kürzestem Umfang alles Wissenswerte und Grundlegende zu bringen. Die Darstellung ist einfach und klar und durch zahlreiche gute Zeichnungen unterstützt, so daß ein Einarbeiten in dieses Stoffgebiet nicht schwerfallen dürfte. Der Umfang ist dem Lehrziel der Berufsschule angepaßt. Dadurch wird die zeitraubende Niederschrift gespart. Außerdem wird dem Schüler die Anschaffung umfangreicher und daher teurer Lehrbücher, die doch nicht ganz besprochen werden können, erspart.

Der Lehrstoff ist klar gegliedert und läßt sich daher leicht zu Lehrinhalten zusammenfassen. Mathematische Formeln sind vermieden worden. Andererseits sind, um die Begriffe zu klären, Beziehungen geknüpft worden zu den bereits gewonnenen Vorstellungen aus der Durcharbeitung des im gleichen Verlage erschienenen Lehr- und Experimentierbuches, welches der Verfasser der Radiotechnik mit Gewerbeoberlehrer Hutschenreiter gemeinsam bearbeitet hat.