

# Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton im Feuerungsbau

Von Ottokar Hallauer, Düsseldorf

## Übersicht

*Anhand des Schrifttums wird dem Bauingenieur, der sich meist nur mit dem üblichen Baubeton befaßt, eine kurze Darstellung über Beton im Feuerungsbau gegeben. Dazu wurden die Untersuchungen von Nekrassow [1], die auf die Praxis gerichteten Ausarbeitungen von Petzold und Röhrs [2] und besondere Untersuchungen mit Anwendungsbeispielen [3 bis 7] herangezogen.*

*Feuerbeton wird mit hydraulisch erhärtenden Zementen und feuerfesten Zuschlägen hergestellt; die technologischen Verhältnisse sind dabei ähnlich wie beim üblichen Baubeton. Charakteristisch für Feuerbeton ist der Übergang von der hydraulischen zur keramischen Bindung, der beim ersten Erhitzen eintritt. Hierbei sinken die Druck- und die Biegezugfestigkeit (Heiß- und Kaltfestigkeit etwa gleich) im Temperaturbereich von rd. 800 °C bis 1000 °C auf ein Minimum ab. Darüber nimmt die Festigkeit durch keramische Bindung wieder etwas zu.*

*Zunächst können die Eigenschaften des Feuerbetons in Anlehnung an die Normen für feuerfeste keramische Roh- und Werkstoffe beurteilt werden. So ist eine Einteilung der Feuerbetone je nach ihrem Widerstand gegen hohe Temperaturen durch das Bestimmen des Kegelfallpunktes nach Seger in Anlehnung an DIN 51 060 — Feuerfeste keramische Roh- und Werkstoffe; Begriffe — möglich.*

*Für die Beurteilung des Verhaltens einer Zustellung aus Feuerbeton reicht allerdings der Kegelfallpunkt nicht aus; wesentlich sind dazu noch die Druckfestigkeit, die Druckfeuerbeständigkeit (Erweichung bei hohen Temperaturen unter Druck), die Dauerstandfestigkeit (Kriechen bei hohen Temperaturen unter Druck) und die Temperaturwechselbeständigkeit.*

## 1. Allgemeines

In Feuerungsanlagen werden die begrenzenden Bauteile unmittelbar hohen Temperaturen — zum Teil bis weit über 1000 °C — ausgesetzt. Hierzu werden, häufig in Form von Vorsatzschichten oder Auskleidungen, feuerfeste Baustoffe verwendet. Diese, allgemein als feuerfeste Zustellungen bezeichnet, sollen die tragenden Bauteile vor unzulässig hohen Temperaturen schützen. Aber

auch ganze Ofensysteme, z. B. Ringöfen, können aus feuerfesten Baustoffen hergestellt werden.

Die feuerfesten Baustoffe müssen beständig gegen hohe Temperaturen sein, d. h. sie dürfen weder schmelzen noch absprengen oder zertreiben. Auch müssen ihre Volumenänderungen während des Aufheizens oder des Abkühlens innerhalb gewisser Grenzen bleiben. In vielen Fällen werden die feuerfesten Baustoffe nicht nur durch das Eigengewicht, sondern zusätzlich durch das zu erhitzende oder zu brennende Gut belastet. Es ist daher die Erweichung der feuerfesten Baustoffe infolge hoher Temperaturen bei gleichzeitig wirkender Druckspannung bedeutsam. Je nach Betriebsbedingungen können für die Lebensdauer einer feuerfesten Zustellung sowohl die Dauerstandsfestigkeit unter hohen Temperaturen als auch die Temperaturwechselbeständigkeit maßgebend sein. Bei der Auswahl der feuerfesten Baustoffe muß man ferner berücksichtigen, ob bei den hohen Temperaturen Reaktionen zwischen dem Gut oder den heißen Gasen und der Zustellung auftreten können, die möglicherweise den feuerfesten Baustoff schädigen oder unerwünschte Beeinträchtigungen der Erzeugnisse bewirken können.

In der Vergangenheit wurden als feuerfeste Baustoffe im wesentlichen Schamotte-, Silika- oder Magnesit-Erzeugnisse verwendet. Die DIN 51 060 — Feuerfeste keramische Roh- und Werkstoffe — sieht zwei Anwendungsbereiche, nach dem Seger-Kegelfallpunkt<sup>1)</sup> unterschieden, vor. Es sind dies feuerfeste keramische Roh- und Werkstoffe mit einem Kegelfallpunkt zwischen 1520 °C und 1830 °C und hochfeuerfeste Werkstoffe mit einem Kegelfallpunkt über 1830 °C.

Neben den erprobten keramischen, feuerfesten Baustoffen werden in zunehmendem Maße hydraulisch oder auch chemisch gebundene Feuerbetone verwendet. Sie können in Anlehnung an DIN 51 060 in hitzebeständigen Beton (Kegelfallpunkt unter 1520 °C) mit einem Anwendungsbereich zwischen 200 °C und 1100 °C, in feuerfesten Beton (Kegelfallpunkt zwischen 1520 °C und 1830 °C) mit einem Anwendungsbereich zwischen 1100 °C und 1300 °C und in hochfeuerfesten Beton (Kegelfallpunkt über 1830 °C) mit einem Anwendungsbereich über 1300 °C unterteilt werden. Die Bestimmung des Kegelfallpunktes nach DIN 51 063 — Bestimmung des Kegelfallpunktes nach Seger (SK) — stößt bei Feuerbeton mit einem Größtkorn von 30 mm (Höhe des Segerkegels rd. 30 mm) auf gewisse Schwierigkeiten, so daß nur eine Prüfung der Ausgangsstoffe (Zement und Zuschlag) möglich und sinnvoll ist.

Als Bindemittel für die Feuerbetone kommen Portlandzemente (PZ), Eisenportlandzemente (EPZ), Hochofenzemente (HOZ) und Tonerdeschmelzzemente (TSZ) zur Anwendung. (Bei einer chemi-

<sup>1)</sup> Aus dem Rohstoff wird ein Kegel von rd. 30 mm Höhe geformt oder aus dem Fertigprodukt herausgeschnitten. Die Probekörper werden mit genormten Segerkegeln in einen auf die Untersuchungstemperatur vorerhitzten Ofen eingebracht. Die Temperatur wird von Segerkegelfallpunkt in 5 bis höchstens 10 Minuten gesteigert, bis die Probekegel zusammensinken.

schen Bindung, die in diesem Bericht nicht weiter behandelt wird, finden Wasserglas, Magnesiabinder, Phosphorsäure und Phosphate Verwendung.) Die Feuerfestigkeit der Betone setzt besondere, feuerfeste Zuschläge voraus. Die Feuerbetone mit hydraulischen Bindemitteln unterscheiden sich in technologischer Hinsicht nur wenig von üblichen Betonen, so daß sie nach den gleichen Grundsätzen zusammengesetzt, hergestellt, eingebaut und nachbehandelt werden.

Im Gegensatz zu den traditionellen Ausmauerungen aus feuerfesten Steinen ist auch das Versetzen großformatiger Betonelemente beliebiger Form möglich. Günstig verhalten sich im Ofenbetrieb die aus Ortbeton hergestellten monolithischen Zustellungen. Allgemein ist zu beachten, daß die Zustellung aus Feuerbeton nicht in jedem Temperaturbereich gleiche Festigkeiten aufweist. Besondere Aufmerksamkeit verdient das erste Aufheizen der Zustellung, da durch die Erhitzung dann anstelle der ursprünglichen hydraulischen die keramische Bindung tritt.

Man kann bei der Beurteilung des Verhaltens eines Feuerfestbetons vom Verhalten des mit hydraulischen Bindemitteln entstandenen Zementsteins und von dem der Zuschläge des Betons unter hohen Temperaturen ausgehen. Weiter sind die Zusammensetzung, Herstellung, Verarbeitung und erste Hitzebeanspruchung von Einfluß. Hierauf und auf wesentliche Eigenschaften des Feuerbetons wird anschließend eingegangen.

## **2. Einfluß hoher Temperaturen auf die Bindemittel und die Zuschläge des Feuerbetons**

### **2.1 Hydraulische Bindemittel**

#### *2.1.1 Chemische Umwandlungen bei hohen Temperaturen*

Das erste Erhitzen des Zementsteins auf Temperaturen über 1000 °C führt entsprechend der chemischen Zusammensetzung des Zementes (PZ, EPZ, HOZ oder TSZ) zu verschiedenen Reaktionen und Phasenbildungen. Das freie und auch das chemisch gebundene Wasser des Zementsteins wird dabei ausgetrieben. Bei gleichmäßiger Erhitzung verläuft dieser Vorgang jedoch nicht kontinuierlich, sondern der Zementstein verliert je nach Bindung des Wassers in bestimmten Temperaturbereichen mehr oder weniger Wasser. Obschon die Übergänge fließend sind, kann man in Annäherung feststellen, daß zwischen 100 °C und 200 °C das freie und das physikalisch adsorbierte Wasser des Portlandzementsteines, zwischen 400 °C und 600 °C ein Teil des chemisch gebundenen Wassers und zwischen 800 °C und 900 °C der Rest des chemisch gebundenen Wassers ausgetrieben wird. Das Calciumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$ , das sich bei der Hydratation des Zementes gebildet hat, geht bei der Erhitzung in freies Calciumoxid  $\text{CaO}$  über. Beim Abkühlen auf niedere Temperaturen und bei Zutritt feuchter Atmosphäre bildet sich aus dem konzentrierter eingelagerten Calciumoxid wieder Calciumhydroxid, was mit einer örtlichen Volumenvergrößerung verbunden ist, die zu einer Rißbildung und Zermürbung des Zementsteines führen kann. Durch die Zugabe bestimmter feuerfester Stoffe, sogenannter

keramischer Stabilisatoren, wie z. B. feuerfester Ton, Chromerz, Schamotte- und Ziegelmehl, wird das freiwerdende Calciumoxid  $\text{CaO}$  bei hohen Temperaturen chemisch gebunden und reagiert bei Feuchtigkeitszutritt nicht mehr treibend. Wirkungsvolle Reaktionen zwischen dem freien Calciumoxid und den Zusatzstoffen setzen allerdings in der Regel erst oberhalb  $600\text{ }^\circ\text{C}$  ein, und eine keramische Bindung wird erst bei Temperaturen über  $900\text{ }^\circ\text{C}$  wirksam.

Bei der Hydratation des HOZ entsteht in geringerem Umfang Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , so daß kaum freies Calciumoxid auftritt und keramische Stabilisatoren nicht unbedingt notwendig werden.

Die Hydratation des Tonerdeschmelzzementes verläuft nicht unter Abspaltung von Calciumhydroxid, sondern unter Bildung von Aluminiumhydroxid  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Beim Erhitzen erfolgt eine allmähliche Wasserabgabe der verschiedenen Hydratationsprodukte des Tonerdezements mit anschließenden, sehr stabilen Phasenneubildungen. Eine Rückentwicklung von Calciumoxid zu Calciumhydroxid wie beim Portlandzement tritt nicht auf, so daß die Mischung von Stabilisatoren entfallen kann.

### 2.1.2 *Dehnung und Schwinden beim Erhitzen von Zementstein*

Das Austreiben des Wassers bei der ersten Erhitzung auf über  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  führt zu einer Volumenverminderung — einem Schwinden —, die nach Literaturangaben bei Zementstein aus Portlandzement rd.  $1,5\%$  und bei eisenreichem Tonerdeschmelzzement  $0,6\%$  bis  $1\%$  beträgt. Eine weitere Volumenverminderung um rd.  $1\%$  tritt bei anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur ein, so daß der erkaltete Zementstein eine Gesamtschwindung von rd.  $2,5\%$  bei PZ und von rd.  $2\%$  bei eisenreichem TSZ erreicht; eisenarmer Tonerdeschmelzzement schwindet nur um etwa  $1\%$ . Die Volumenverminderungen sind irreversibel, wirken sich also nur beim ersten Erhitzen aus. Sind die Reaktionen im Zementstein nach dem ersten Erhitzen abgeklungen, so zeigt der Zementstein eine normale reversible Wärmedehnung in der Größenordnung von rd.  $10 \cdot 10^{-6}/\text{grd}$  bei PZ und von rd.  $7 \cdot 10^{-6}/\text{grd}$  bei TSZ. In Bild 1 und Bild 2 sind die linearen Dehnungen von Portlandzement bzw. Tonerdeschmelzzement beim Erhitzen auf  $900\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  und beim folgenden Abkühlen dargestellt [2].

### 2.1.3 *Festigkeit*

Die Festigkeitsprüfung bei hohen Temperaturen ist nur mit besonderem Aufwand möglich, da die Probekörper gleichzeitig erhitzt und belastet werden müssen. Einfacher ist eine Prüfung im abgekühlten Zustand nach dem Erhitzen. Mälzig [8] u. a. prüften die Druckfestigkeit von erhärteten Betonzylindern sowohl bei Temperaturen bis zu  $900\text{ }^\circ\text{C}$  als auch im erkalteten Zustand. Hierbei ergaben sich nur geringfügige und unwesentliche Abweichungen zwischen den Heißdruck- und den Kaltdruckfestigkeiten, so daß Festigkeitsprüfungen nach Erhitzen und anschließendem langsamen Abkühlen für die Beurteilung ausreichend

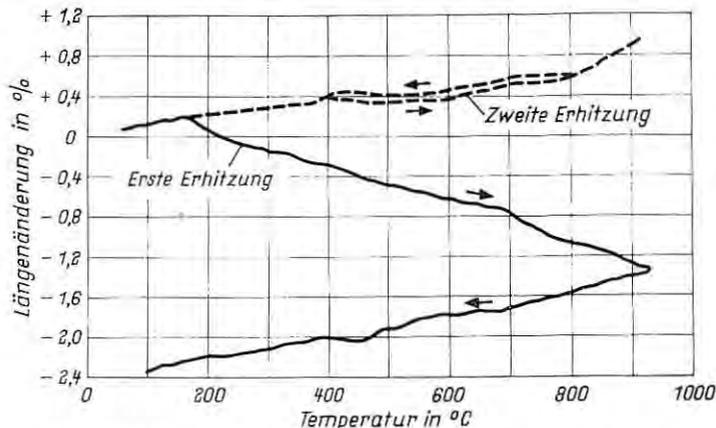


Bild 1 Dehnung und Schwinden von Portlandzementstein nach Petzold und Röhrs [2]

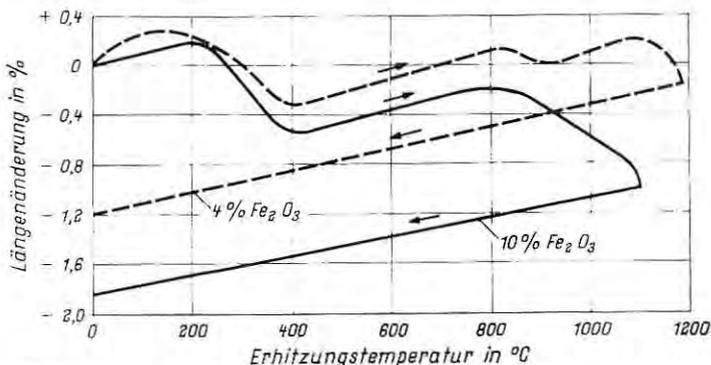


Bild 2 Dehnung und Schwinden eisenarmer und eisenreicher Tonerdeschmelzzementsteine nach Petzold und Röhrs [2]

sind. Alle Festigkeitsangaben in diesem Bericht beziehen sich auf Prüfungen nach Erhitzen und Abkühlen (Kaltdruckfestigkeit).

Während des Erhitzens über 100 °C ändert sich die Druckfestigkeit des Zementsteins. Wierig [9] schließt aus den stark streuenden Angaben des Schrifttums, daß der Verlauf der Festigkeitsänderung im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 200 °C im wesentlichen vom Hydratationsgrad des Zements abhängt. Bei Betonen aus Portlandzement, Eisenportlandzement und Hochofenzement steigt mit zunehmender Temperatur die Festigkeit zunächst an. Bei 200 °C beträgt der Zuwachs etwa 10 %. Bei weiter ansteigenden Temperaturen fällt die Festigkeit dann wieder ab und erreicht bei etwa 300 °C die Ausgangsfestigkeit. Die Festigkeitszunahme ist vermutlich auf eine verstärkte Hydratation des

anfänglich noch freies Wasser enthaltenden Zementsteins durch die höhere Temperatur und auf das Austrocknen zurückzuführen. Bei Temperaturerhöhungen über 300 °C fällt die Festigkeit sehr schnell ab und geht zwischen 900 °C und 1100 °C bis auf rd. 20 % der Ausgangsfestigkeit zurück. Dieser Festigkeitsrückgang wird durch Zerfall der Hydratphasen bei der Abgabe des Hydratwassers verursacht. Steigt die Temperatur über 1100 °C an, so nimmt die Festigkeit wieder zu. Dieser Festigkeitsanstieg ergibt sich durch die mit hoher Temperatur ausgelöste keramische Bin-

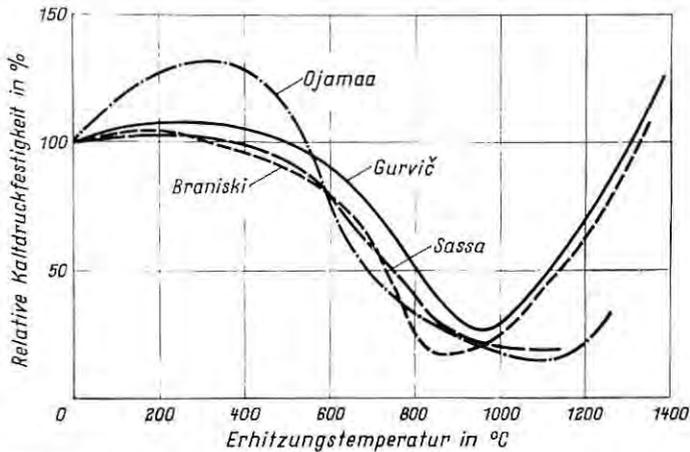


Bild 3 Relative Kaltdruckfestigkeiten von Portlandzementsteinen nach Erhitzen nach Petzold und Röhrs [2]

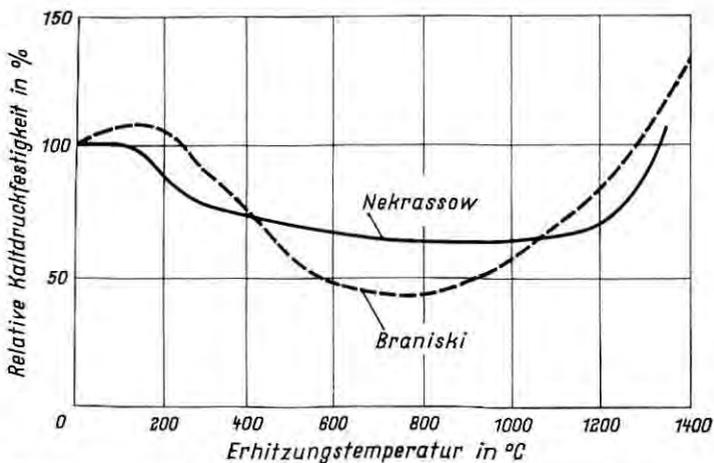


Bild 4 Relative Kaltdruckfestigkeiten von Tonerdeschmelzementsteinen nach Erhitzen nach Petzold und Röhrs [2]

derung. Wesentlich ist dabei, daß der Zementstein ein Festigkeitsminimum in einem Temperaturbereich von rd. 800 °C bis rd. 1100 °C durchläuft. Die relative Kaltdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur ist Bild 3 zu entnehmen [2]. Die einzelnen Kurven gehen nach Angaben von Petzold und Röhrs auf Gurvič, Braniski, Sassa und Ojamaa zurück.

Der Zementstein aus TSZ weist bei einer Erhitzung über 100 °C im allgemeinen keinen Festigkeitsanstieg auf. Die Festigkeit fällt in der Regel nach Temperaturen von 100 °C ab, erreicht bei rd. 900 °C ein Minimum und steigt dann wieder an. Je nach chemischer Zusammensetzung des Zementsteins aus Tonerdezement geht die Festigkeit auf 40 % bis 80 % der Ausgangsfestigkeit zurück. Zwei typische Festigkeitskurven sind in Bild 4 aufgetragen. Nach [2] gehen sie auf Nekrassow und Braniski zurück.

## **2.2 Zuschläge**

### *2.2.1 Zuschläge für hitzebeständige Betone*

Für hitzebeständige Betone können auch nichtfeuerfeste mineralische Zuschläge verwendet werden. Geeignet sind Diabas und Basalt, die sich beim Erhitzen verhältnismäßig wenig ausdehnen, weiter Bims, Andesit, verschiedene Schlackenarten, wie Hochofenschlacke, mit einem CaO-Gehalt unter 45 %, Ziegelsplitt, gebrannte Leichtzuschläge, wie Blähton, Blähschiefer, expandierter Vermiculit und Perlit. Ungeeignet sind Quarzsande, Quarzkiese und Sandsteine, da sie bei 575 °C ihr Volumen sprunghaft vergrößern.

### *2.2.2 Zuschläge für feuerfeste und hochfeuerfeste Betone*

Für feuerfeste und hochfeuerfeste Betone sind nur Zuschläge mit hohen Schmelzpunkten geeignet. Am häufigsten wird Schamotte verarbeitet. Schamotte ist ein aus natürlichen feuerfesten Kaolin- und Tongesteinen durch Brennen erzeugter Stoff; sie wird gebrochen, als mehlkornreiches Haufwerk mit einem Größtkorn bis zu rd. 30 mm zugesetzt. Weiter kommen hochtonerdehaltige Stoffe aus  $Al_2O_3 + SiO_2$ , Korund ( $Al_2O_3$ ), Sinter- oder Schmelzmagnesia bzw. Sinterdolomit ( $MgO + CaO$ ), Chromerze, Siliciumcarbid (SiC) und Stoffe mit hohem  $SiO_2$ -Gehalt als mehlkornreiche Haufwerke bis zu rd. 30 mm Größtkorn zur Anwendung.

## **3. Technologie des Feuerbetons**

### **3.1 Zusammensetzung**

Die Zusammensetzung der Feuerbetone unterscheidet sich wenig von der der üblichen Schwerbetone. Der Zementgehalt soll 300 bis 400  $kg/m^3$  betragen, und die Kornzusammensetzung der Zuschläge soll einer Sieblinie im „besonders guten“ Bereich der DIN 1045 (etwa D/E) folgen. Abweichend von den Normalbetonen werden dem Feuerbeton auf Portlandzementbasis mehlfine Zusatzstoffe — die keramischen Stabilisatoren — beigemischt, die

den Anteil der Sieblinie im Mehlkornbereich (Anteile bis 0,2 mm) erhöhen. Die Zugabemenge kann nach Nekrassow [1] sehr unterschiedlich sein und zwischen 30 und 100 Gew.-% der Zementmenge betragen; Ludera [3] gibt 25 bis 30 Gew.-% an. Die zweckmäßige Zugabemenge hängt von der Zusammensetzung des Zementes, von der Reaktionsfähigkeit des Stabilisators (das sind z. B. feuerfeste Tone, Chromerz, Schamotte- und Ziegelmehle) und von den zu erreichenden thermischen Eigenschaften des Betons ab. Sie kann nur durch Eignungsversuche ermittelt werden. Die günstigste Korngröße der Stabilisatoren ist verschieden. Ludera [3] hat z. B. die beste Wirkung mit der Kornstufe 0...0,1 mm erzielt; Nekrassow [1] nennt als obere Korngrenze 0,06 mm, Röhrs und Gibbels geben 0,075 mm an [5].

Das Größtkorn des Zuschlags hängt von der kleinsten Abmessung der Zustellung ab; es soll  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{5}$  der Wanddicke betragen, rd. 30 mm jedoch nicht überschreiten. Der Wasserzusatz ist so zu bemessen, daß ein gut verarbeitbarer, knapp weicher Beton entsteht. Durch den größeren Anteil an mehlfinen Stoffen wird eine größere Wassermenge erforderlich. Ein Begrenzung des Wasserzementwertes auf rd. 0,6 ist zweckmäßig.

### 3.2 Herstellung und Verarbeitung

Eine intensive Vermischung der nach Gewicht abgemessenen Bestandteile — Zement, ggf. Stabilisator, Zuschlag, Wasser — ist notwendig, da poröse Zuschläge, wie Ziegelsplitt, Schamotte, Blähton oder Blähschiefer, und vor allem die gesondert zugesetzten Feinstoffe, wie Ziegel-, Ton- oder Schamottemehl, sehr begierig das Anmachwasser aufsaugen und sich zusammenballen; zweckmäßig ist ein Zwangsmischer. Ein Befeuchten oder ein Vormischen der Zuschläge mit einem Teil des Anmachwassers ist zu empfehlen, wie es bei der Leichtbetonherstellung üblich ist. Angebracht ist ein Vormischen von Zement und Stabilisator. Gegenüber Normalbeton ist die Gesamtmischzeit auf mindestens 5 Minuten zu erhöhen. Die Betone sind, möglichst durch Rütteln, vollständig zu verdichten, um ein dichtes, geschlossenes Gefüge zu erreichen.

Die Feuchtbehandlung ist an den freien Flächen oder nach dem Entschalen sorgfältiger als bei dichtem Schwebbeton vorzusehen. Betone aus Tonerdeschmelzzement sind bereits vier bis fünf Stunden nach Herstellung und PZ-Betone rd. 24 Stunden nach dem Einbau mit Wasser anzuspühen oder mit nassen Tüchern zu bedecken. Der Beton soll wenigstens 7 Tage lang vor dem Austrocknen geschützt werden.

### 3.3 Erste Beanspruchung durch Hitze

Das erste Anheizen der Zustellung darf erst nach weitgehender Hydratation des Betons unter Beachtung besonderer Vorkehrungen erfolgen, da die Haltbarkeit durch die Art der Temperatursteigerung bis zur Sintertemperatur entscheidend beeinflusst wird. Bis zu einem Temperaturbereich von 600 °C soll die Tempe-

raturzunahme 10 bis 20 grd je Stunde nicht übersteigen. Anschließend kann die Temperatur um 100 grd je Stunde erhöht werden. Die Gesamtaufheizdauer bis zu 1150 °C beträgt rd. 50 Stunden. Die russischen Richtlinien zum Trocknen und Anheizen der Feuerräume von Öfen sind in Tafel 1 zusammengestellt [1].

Tafel 1 Russische Richtlinien zum Trocknen und Anheizen von Ofenaggregaten nach Nekrassow [1]

Vorgang	Ofengröße					
	klein		mittel		groß	
Temperaturanstieg bis zu 150 °C in grd/Stunde	20	40	10	20	5	.. 10
Mindestdauer der Trocknung bei 150 °C in Tagen	1/3		3		7	
Temperaturanstieg von 150 °C bis zur Betriebstemperatur in grd/Stunde	100 ... 200		50 ... 100		25 ... 50	

#### 4. Eigenschaften des Feuerbetons

Feuerbetone entwickeln durch das erste Erhitzen ihre speziellen Feuerfesteeigenschaften. Während des Erhitzens verändert der Feuerbeton seine Festigkeit und sein Volumen, wie dies unter 2.1.2 und 2.1.3 für den Zementstein beschrieben wurde. Maßgebend für die Haltbarkeit und die Temperaturbelastbarkeit einer feuerfesten Auskleidung ist aber nicht die Druckfestigkeit, die in der üblichen Kurzzeitprüfung festgestellt wird, sondern die Höchsttemperatur, bei der ein Erweichen des Feuerbetons unter einer konstanten Druckbelastung einsetzt (Prüfung der Druckfeuerbeständigkeit), und der Fließwiderstand des Feuerbetons bei den Betriebstemperaturen unter einer konstanten Druckbelastung (Prüfung der Dauerstandsfestigkeit). Wird der Feuerbeton im Betrieb sehr oft großen Temperaturunterschieden ausgesetzt, so ist für die Dauerhaftigkeit die Temperaturwechselbeständigkeit wesentlich. Alle diese Eigenschaften sind durch Eignungsversuche zu beurteilen. Sie hängen von der Art des Bindemittels und der Zuschläge, von der Reaktionsfähigkeit des Bindemittels mit den Feinstzuschlägen, vom Mischungsverhältnis, von der Kornzusammensetzung und vom Betongefüge ab.

##### 4.1 Festigkeiten

Wie beim Zementstein so stellt sich auch beim Beton ein Festigkeitsminimum zwischen 600 °C und 1000 °C ein. Auch die Betondruckfestigkeit kann bis zu Temperaturen von rd. 300 °C etwas ansteigen; sie geht auf 20 bis 50 % nach 600 °C bis 1000 °C zurück und wird bei Temperaturen darüber mit zunehmender keramischer Verfestigung wieder größer. In Bild 5 sind Druckfestigkeiten von Feuerbeton in Abhängigkeit von der Temperatur

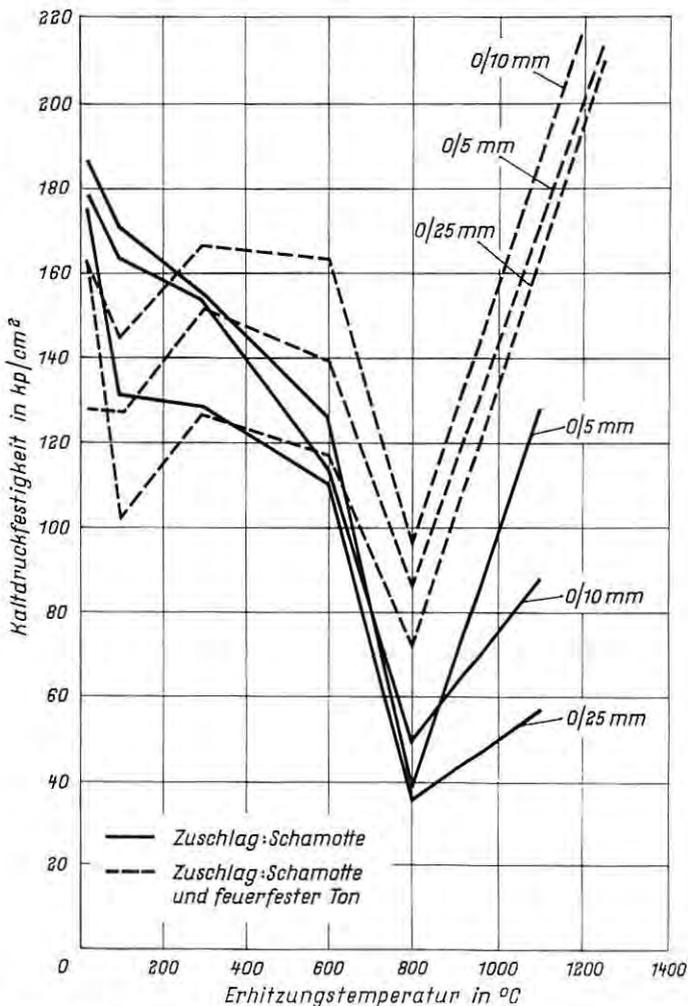


Bild 5 Kaltdruckfestigkeiten von Feuerbeton aus Portlandzement nach Ludera [3]

aufgetragen. Der Beton war aus Portlandzement und Schamotte 0/5 mm, 0/10 mm und 0/25 mm zusammengesetzt. Als Stabilisator wurde Schamottmehl oder feuerfester Ton in Mengen von rd. 35 % des Zementgewichtes verwendet [3].

Bild 6 zeigt den Festigkeitsverlauf von Feuerbeton aus Hochfenzement und Tonerdeschmelzzement in Abhängigkeit von der Temperatur. Es wurden Schamotte 0/7 mm und 0/15 mm verarbeitet, und Rohton (rd. 130 % des Zementgewichtes) wurde als Stabilisator zugesetzt [5].

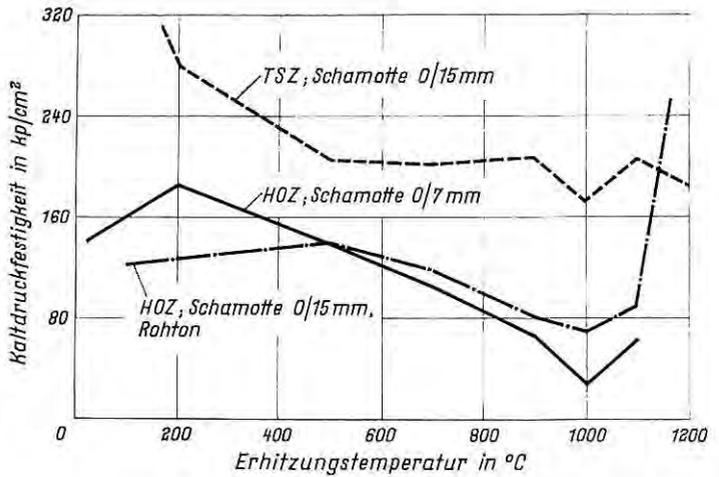


Bild 6 Kaltdruckfestigkeiten von Feuerbeton aus Hochfenzement und Ton-erdeschmelzzement nach Röhrs und Gibbels [5]

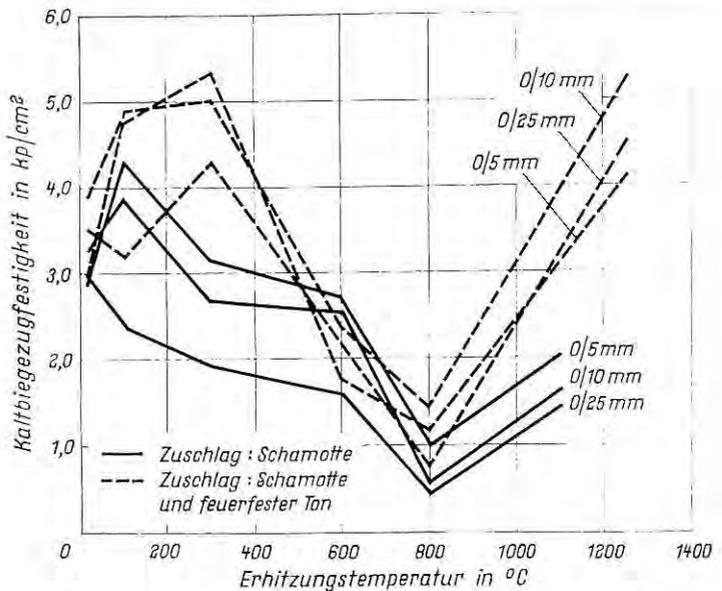


Bild 7 Kaltbiegezugfestigkeiten von Feuerbeton aus Portlandzement nach Ludera [3]

Die Zug- oder Biegezugfestigkeiten zeigten eine ähnliche Abhängigkeit von der Temperatur. Aus Bild 7 sind die Biegezugfestigkeiten der Feuerbetone zu entnehmen, deren Zusammensetzung den Betonen in Bild 5 [3] entspricht.

## 4.2 Volumenänderungen

Beim ersten Erhitzen überlagert sich das Schwinden des Zementsteins mit der Ausdehnung des Zuschlags. Durch die Zugabe der keramischen Stabilisatoren wird das Schwinden des Zementsteins stark herabgesetzt. Im Temperaturbereich von 800 °C bis 1000 °C tritt ein lineares Schwinden von 0,2 ‰ bis 0,7 ‰ ein. Das Schwinden wird durch das Mischungsverhältnis von Zement zu Zuschlag wesentlich beeinflusst und ist durch Vorversuche für eine bestimmte Zusammensetzung zu ermitteln.

## 4.3 Druckfeuerbeständigkeit

Feuerbeton kann nur solchen Temperaturen ausgesetzt werden, bei denen kein Erweichen oder Verformen durch Eigenlast auftritt. Für feuerfeste Steine ist eine Prüfvorschrift, die DIN 51064 — Bestimmung der Druckfeuerbeständigkeit an feuerfesten Steinen —, eingeführt. Nach dieser Norm werden Probekörper mit einem Durchmesser und einer Höhe von rd. 50 mm mit einer Druckkraft von 2,0 kp/cm<sup>2</sup> belastet und erhitzt. Es wird die Temperatur  $t_a$  gemessen, bei der der Körper nach Erreichen der größten Ausdehnung um 0,6 ‰ gestaucht wird, und die Temperatur  $t_e$ , wenn anschließend ein Zusammendrücken um 20 ‰ erreicht ist. Die Höhe der Anfangstemperatur  $t_a$  und der Temperaturbereich zwischen der Anfangs- und der Endtemperatur geben den Widerstand gegen Erweichen bei hohen Hitzegraden an.

Im laufenden Betrieb darf der Erweichungspunkt, der mit der Anfangstemperatur  $t_a$  gleichgesetzt werden kann, nicht überschritten werden. Um diese Temperatur zu bestimmen, sind entsprechende Versuche, wie sie oben für feuerfeste Steine angegeben wurden, mit dem Feuerbeton durchzuführen. Man kann damit rechnen, daß je nach Betonzusammensetzung die Anfangstemperaturen zwischen 1100 °C und 1200 °C und die Endtemperaturen zwischen 1250 °C und 1350 °C liegen.

## 4.4 Dauerstandsfestigkeit

Im Betriebszustand unterliegt der Feuerbeton konstanten Temperaturen und konstanten Drücken, die zu einer Zerstörung führen können, obwohl die Druckfestigkeit beim Kurzzeitversuch größer ist und die Erweichungstemperatur nicht überschritten wird, denn bei der Prüfung der Druckfestigkeit und der Druckfeuerbeständigkeit wird die Dauereinwirkung nicht berücksichtigt. Ein genormtes Prüfverfahren besteht noch nicht. Es wäre sinnvoll, die Dauerstandsfestigkeit ähnlich wie die Druckfeuerbeständigkeit zu prüfen. Der Prüfkörper sollte über längere Zeit einem Druck von 2 kp/cm<sup>2</sup> ausgesetzt und auf eine Temperatur erhitzt werden, die unter der Anfangstemperatur  $t_a$  (Erweichungspunkt) liegt. Verformt sich der Prüfkörper plastisch oder setzt ein Fließen ein, so ist die Dauerstandsfestigkeit überschritten. Nach russischen Versuchen setzt eine plastische Verformung bei 1000 °C ein und steigt an, wenn hohe Belastungen auftreten.

#### 4.5 Temperaturwechselbeständigkeit

Feuerfeste Zustellungen können je nach den Betriebsbedingungen häufigen, schroffen Temperaturwechseln unterliegen, die sie ohne wesentliche Beeinträchtigung ihrer Aufgabe überstehen müssen. Die Temperaturwechselbeständigkeit wird in einem sehr harten Prüfverfahren, das den in der Praxis auftretenden Beanspruchungen nicht entspricht, untersucht. Die Prüfkörper werden auf 850 °C oder 950 °C erhitzt und in einem Kaltluftstrom oder in Wasser abgeschreckt. Zur Beurteilung wird die Anzahl der Temperaturwechsel bis zum Auftreten der ersten Risse oder bis zum Erreichen eines bestimmten Gewichtsverlustes, z. B. durch Abplatzungen, festgestellt. Treten bei einem Prüfkörper Risse oder Zerstörungen erst nach zahlreichen Temperaturwechseln auf, so kann mit einem längeren Bestand der Zustellung im Ofen gerechnet werden, was sich auch in einer Kostensenkung und günstigeren Betriebsbedingungen auswirkt.

Gegenüber allen anderen feuerfesten Baustoffen haben die Feuerbetone eine bemerkenswert günstige Temperaturwechselbeständigkeit. Nekrassow [1] fand für PZ-Beton mit Schamottezuschlag die ersten Haarrisse nach 10 bis 15 Abschreckungen und die ersten tieferen Sprünge nach 20 bis 25 Abschreckungen. Die Druckfestigkeit fiel dabei nur um 20 % bis 25 % ab.

#### 5. Zusammenfassung

Feuerbetone können aus Portland-, Eisenportland-, Hochofen- oder Tonerdeschmelzzement mit feuerfesten Zuschlägen hergestellt werden. Mehlfeine, keramische Stabilisatoren sind dem Feuerbeton auf Portlandzementbasis zuzugeben, um den freien Kalk des Zementsteines zu binden. Durch das Erhitzen wird der Zementstein in Verbindung mit den Zuschlagstoffen chemisch und mineralogisch verändert. Die ursprünglich hydraulische Bindung geht in eine keramische Bindung über. Das Minimum der Druckfestigkeit liegt im Temperaturbereich von 800 °C bis 1000 °C. Bei der Herstellung von Feuerbeton ist folgendes zu beachten:

5.1 Der Zementgehalt soll 300 bis 400 kg/m<sup>3</sup> betragen und die Kornzusammensetzung der Zuschläge einer Sieblinie des „besonders guten“ Bereichs der DIN 1045 (etwa D/E) entsprechen. Der Wasserzusatz ist so zu bemessen, daß ein gut verarbeitbarer, knapp weicher Beton entsteht. Der Wasserzementwert ist auf 0,6 zu begrenzen.

5.2 Feuerbeton ist sorgfältig zu mischen. Die Gesamtmischzeit soll mindestens 5 Minuten betragen. Der Beton ist gleichmäßig einzubauen, möglichst durch Rütteln vollständig zu verdichten und mindestens 7 Tage lang feuchtzuhalten.

5.3 Das erste Erhitzen der Zustellung ist geregelt vorzunehmen. Bis zu Temperaturen von 600 °C soll die Temperaturzunahme 10 bis 20 grd je Stunde nicht überschreiten. Anschließend kann die Temperatur um 100 grd je Stunde erhöht werden. Die Gesamtaufheizdauer bis zu 1150 °C beträgt rd. 50 Stunden.

5.4 Im Gegensatz zu Normalbeton ist für den Feuerbeton nicht die Druckfestigkeit für Haltbarkeit und Temperaturbelastbarkeit maßgebend, sondern die Höchsttemperatur, bei der ein Erweichen unter Druck (Druckfeuerbeständigkeit) einsetzt, und der Fließwiderstand bei Betriebstemperatur unter Druck (Dauerstandfestigkeit). Treten große Temperaturschwankungen im Betrieb auf, so ist die Temperaturwechselbeständigkeit zu prüfen.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Nekrassow, K. D.: Hitzebeständiger Beton. Bauverlag, Wiesbaden 1961.
- [2] Petzold, A., und M. Röhrs: Beton für hohe Temperaturen. Beton-Verlag, Düsseldorf 1965.
- [3] Ludera, L.: Feuerbeton auf Portlandzementbasis. Zement-Kalk-Gips 12 (1959) H. 12, S. 575/581.
- [4] Sille, G., und O. Martini: Eigenschaften hitzebeständiger Betone auf Portlandzementbasis. Baustoffindustrie 7 (1964) H. 8, S. 232/237.
- [5] Röhrs, M., und H. Gibbels: Hitzebeständiger Beton mit Hochofenzement. Baustoffindustrie 6 (1963) H. 12, S. 376/379.
- [6] Lehmann, H., und H. Mitusch: Feuerfester Beton aus Tonerdeschmelzen. Schriftenreihe Steine und Erden, Band 3, Goslar 1959.
- [7] Schmid, I.: Versuche mit Feuerbeton auf Portlandzementbasis. Silikatechnik 12 (1961) H. 1, S. 22/24.
- [8] Lehmann, H., und G. Mälzig: Über die Heißdruckfestigkeit von Beton. Tonindustrie-Zeitung 84 (1960) H. 17, S. 414/417.
- [9] Wierig, H.-J.: Die Widerstandsfähigkeit des Betons gegen Feuerbeanspruchung. Zement-Taschenbuch 1966/67, Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1965, S. 269/304.

# Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton im Feuerungsbau

Ergänzung zum Beitrag von O. Hallauer  
Von Helmut Weigler, Darmstadt

Der Bericht von O. Hallauer enthält eine Darstellung der Probleme an Hand des Schrifttums. Dazu werden im folgenden einige kurze Ergänzungen gegeben.

a) Es erscheint noch nicht ausreichend geklärt, ob die Rückbildung von  $\text{CaO}$  zu  $\text{Ca(OH)}_2$  zu einer Ribbildung und Zermürbung des Betons führt, wie dies unter 2.1.1 für den Zementstein als möglich angedeutet wird. Solche Erscheinungen wurden hier an entsprechenden, bis  $600^\circ\text{C}$  erhitzten Betonproben selbst bei anschließender Wasserlagerung nicht beobachtet. Dagegen zeigten Betonproben mit Portlandzement, die im Anschluß an die Temperaturbehandlung im Exsikkator oder im Trockenschrank bei  $100^\circ\text{C}$  lagerten, eine mit der Zeit zunehmende Ribbildung und Festigkeitsabnahme.

b) Das unter 2.1.2 und in Bild 1 dargestellte Schwinden des Zementsteins bei der ersten Erhitzung und Abkühlung führt nicht ohne weiteres zu einem entsprechenden Schwinden des Betons; vergl. auch die Ausführungen unter 4.2. Es überwiegt zunächst die Wärmeausdehnung der Zuschläge, so daß unbelastete Betone aus Normalzuschlägen zumindest bei Temperaturen bis  $600^\circ\text{C}$  nach der Abkühlung wieder das Ausgangsvolumen erreichen [A]. Insgesamt ist der Dehnungs-Schwindungs-Vorgang sehr komplex und hängt von vielen Faktoren ab. Nach [2] kann er bei feuerfesten Betonen durch Art und Menge der Feinstzuschläge entscheidend gesteuert werden, und zwar bis zur völligen Aufhebung des Schwindens. In Bild A sind typische Dehnungsverläufe verschiedener feuerfester Betone dargestellt [2].

c) Bei Beton aus Leichtzuschlägen wie Blähton und Blähschiefer (vgl. 2.2.1) ist im Anwendungsbereich von 200 bis  $1100^\circ\text{C}$  ein besonderes Verhalten zu beachten. Im Gegensatz zum Normalbeton, bei dem noch bei einer Erhitzung über  $600^\circ\text{C}$  hinaus eine Ausdehnung — und zwar stärker als linear — erfolgt, ist hier auch im unbelasteten Zustand ab etwa  $200^\circ\text{C}$  praktisch keine Dehnungszunahme mehr zu erwarten, was nach der Abkühlung zu bleibenden Verkürzungen von mehreren Prozent führt [A]. Dazu kommt auch ein vom Normalbeton abweichendes Verhalten bei Erhitzung unter Dauerbelastung (vgl. unter e).

d) Die unter 2.1.3 angegebene, durch eine Temperatureinwirkung hervorgerufene Veränderung der Zementsteinfestigkeit ist nur bedingt auf den Beton übertragbar. Hier ist neben dem Hydra-

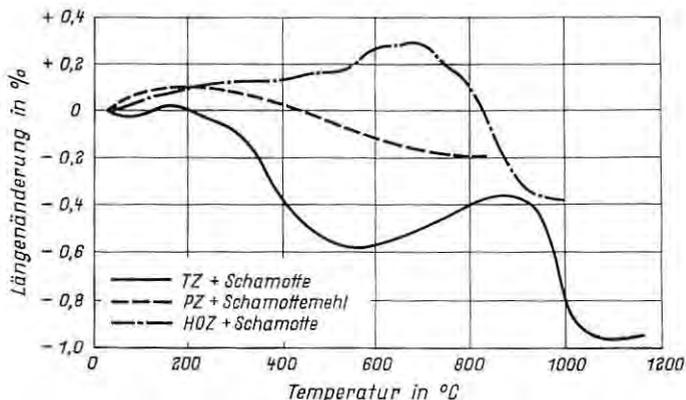


Bild A Dehnung und Schwinden von Schamottebetonen nach Petzold und Röhrs [2]

tationsgrad der Feuchtigkeitsgehalt bei Erhitzungsbeginn maßgebend. „Ausgleichsfeuchte“ Betone erfahren auch im Temperaturbereich bis 200 °C praktisch keine Festigkeitssteigerung [A].

e) Es wird in Abschnitt 1 darauf hingewiesen, daß in vielen Fällen die Bauteile nicht nur durch ihr Eigengewicht, sondern zusätzlich durch Betriebslasten beansprucht würden. Maßgebend sei dann das Festigkeits- und Verformungsverhalten unter gleichzeitiger Temperatur- und Druckbeanspruchung. Versuche an Quarz- und Barytbetonen mit Temperaturen bis 600 °C, d. h. also im Beanspruchungsbereich hitzebeständiger Betone, zeigten [A], daß eine gleichzeitig wirkende Druckbeanspruchung bis zu  $\frac{1}{3}$  der Ausgangsfestigkeit den temperaturbedingten Festigkeitsabfall verringert oder sogar verhindert. Gleichzeitig wird die Wärmeausdehnung stark verkleinert. Da aber die Abkühlkurve ähnlich wie bei unbelasteten Proben verläuft, stellten sich bereits bei einer Belastung in Höhe von  $\frac{1}{6}$  der Ausgangsfestigkeit nach der Abkühlung beachtliche bleibende Verformungen ein. Diese wurden besonders bei Leichtbeton mit Blähonzuschlag beobachtet. Hier stellten sich unter der vorgenannten Belastung bereits ab 200 °C Stauchungen ein.

Im Hinblick auf praktisch mögliche Beanspruchungen sollte die zur Bestimmung der Druckfeuerbeständigkeit und der Dauerstandsfestigkeit unter 4.4 vorgeschlagene Druckbelastung von 2 kp/cm<sup>2</sup> höher angesetzt werden.

#### SCHRIFTTUM

[A] Weigler, H., und R. Fischer: Beton bei Temperaturen von 100 bis 750 °C beton 18 (1958) H. 2, S. 33/46.