

stützen, H. 6, S. 175–182. 2. Teil: Bestimmung der kritischen Stahltemperatur. H. 8, S. 249–254.

- [23] Meyer-Ottens, C.: Feuerwiderstandsdauer von statisch bestimmt gelagerten Stahlträgern der Güte St 37 und St 52 bei dreiseitigem Feuerangriff. Schlußbericht zum Forschungsprogramm

„Trägerversuche Braunschweig“ der Europäischen Konvention der Stahlbauverbände, Unterkommision 3.1. Braunschweig: Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971, 26 Seiten.

- [24] Klement, E.; Rudolphi, R.; Stanke, J.: Das Brandverhalten

von Holzstützen unter Druckbeanspruchung. Bauen mit Holz 74 (1972), H. 5, S. 243–248 und H. 6, S. 318–330.

- [25] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.: Brandverhalten von Holzkonstruktionen im: Informationsdienst Holz (12/1977) der Arbeitsgemeinschaft Holz e. V.

Die Anwendung thermoanalytischer Methoden zur Ermittlung der Festigkeit von Stahlbeton- und Spannbeton-Bauteilen nach einer Brandbelastung

Helmut Bernhardt

Einleitung

Beton ist aufgrund seines Preises, seiner Druckfestigkeit und seiner guten Verarbeitungseigenschaften der heute am häufigsten benutzte Baustoff. Durch den Einbau im flüssigen Zustand können Bauteile und Bauten in fast jeder beliebigen Form hergestellt werden. Durch Einbetten von Stählen kann auch die für den jeweiligen Bedarf nötige Zugfestigkeit erreicht werden.

Der wichtigste Bestandteil des Betons ist der Zementstein. Er entsteht aus dem Zement beim Abbinden mit Wasser und bewirkt den Verbund zwischen den Körnern der Zuschlagstoffe. Elektronenmikroskopische Aufnahmen [1] lassen erkennen, daß eine Struktur aus miteinander verfilzten Kristallnadeln besteht. Die Verflechtung der Kristallnadeln bewirkt den Zusammenhalt und die Druckfestigkeit eines Bauteiles.

Der meistens benutzte Portlandzement besteht aus folgenden Verbindungen:

Tricalciumsilikat $C_3S^*)$	40–80 %
Dicalciumsilikat C_2S	0–30 %
Tricalciumaluminat C_3A	7–15 %
Calciumaluminatferrit C_4AF	4–15 %
Calciumsulfat (Gips) $CaSO_4$	~ 5 %

*) Der Einfachheit halber werden die in der Zementchemie üblichen Abkürzungen benutzt: C = CaO, S = SiO_2 , A = Al_2O_3 , F = Fe_2O_3 , H = H_2O .

Dipl.-Chem. Helmut Bernhardt, Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung (IfS), Kiel.

Bild 1.
Die Streckgrenze (bezogen auf den Wert bei 20°C) von Betonstählen in Abhängigkeit von der Temperatur.
1. BSt 420/450 und BSt 500/550. 2. BSt 220/340.

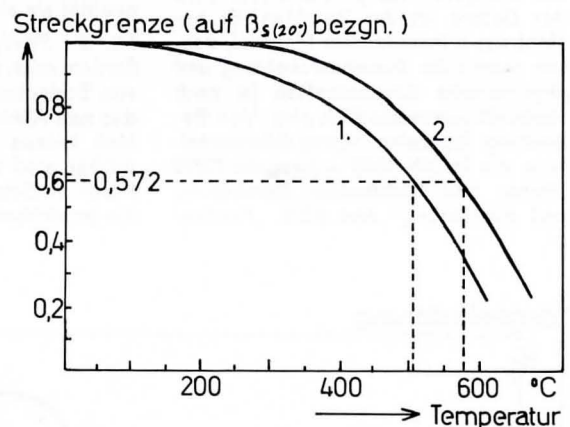
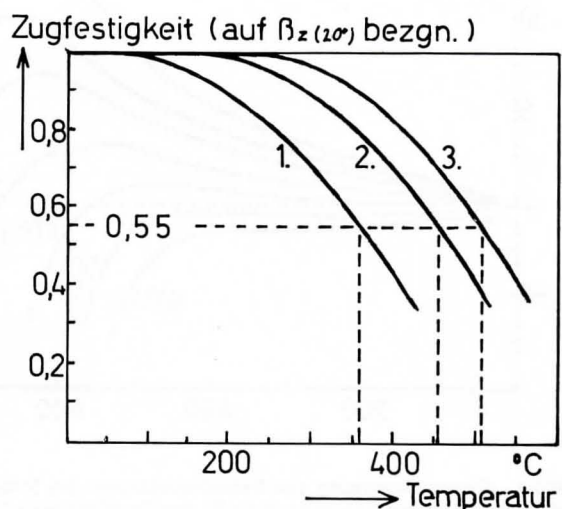


Bild 2.
Die Zugfestigkeit (bezogen auf den Wert bei 20°C) von Spannstählen in Abhängigkeit von der Temperatur.
1. St 1600/1800. 2. St 1400/1600. 3. St 800/1050.



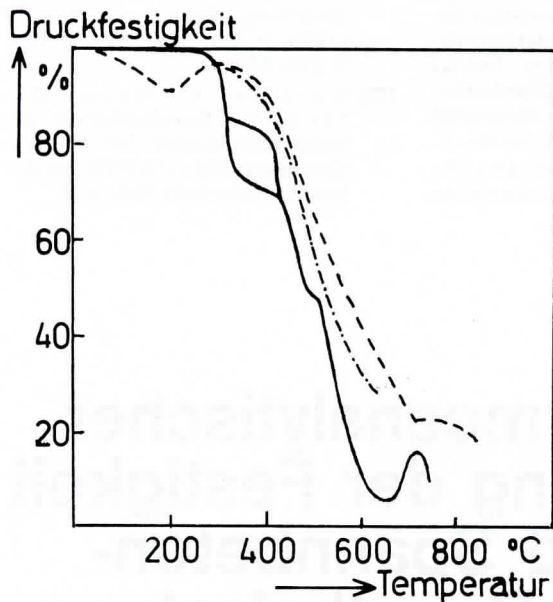


Bild 3.
Abfall der Druckfestigkeit (auf den Wert bei 20° C bezogen) von Normalbeton mit der Temperatur.

Die Verbindungen reagieren mit dem Anmachwasser und bilden kristalline Hydrate.

Der mengenmäßig größte Bestandteil des Betons ist der Zuschlag. Er besteht aus mineralischem Material, dessen chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften je nach Herkunft unterschiedlich sind. Von Bedeutung ist seine Korngrößenverteilung, die in DIN 1045 – Ausgabe 12/78 „Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung“ Abs. 6.2.2. „Kornzu-

sammensetzung des Betonzuschlags“ geregelt ist. Eine günstige Siebkurve der Korngrößen bewirkt bei gleichen Zementmengen eine höhere Betonqualität als eine weniger brauchbare.

Für die Festigkeit des Betons ist außerdem noch der Wasser/Zement-Wert von Bedeutung. Je mehr Wasser über das zum Abbinden des Zements nötige Maß hinaus zugegeben wird, desto größer sind nach dem Abbinden die Poren im Beton und desto geringer ist die erreichbare Druckfestigkeit.

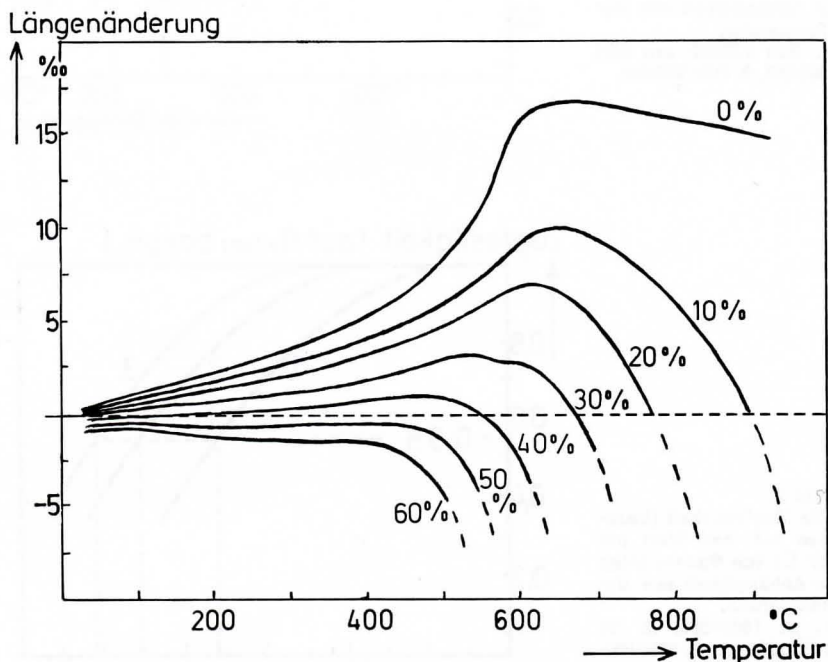


Bild 4. Gesamtverformung von Betonprobekörpern bei stationärer Wärmebehandlung unter verschiedenen Belastungen (in % der Druckfestigkeit bei 20° C), Heizrate 2° C/min.

Wärmeeinwirkung auf Stahlbeton und Spannbeton

Obwohl Beton nicht brennbar ist, kann durch einen Brand die Tragfähigkeit eines Betonbauteiles in Mitleidenchaft gezogen werden, was im ungünstigsten Fall zum Einsturz führen kann. In weniger kritischen Fällen erfolgen Abplatzungen, Rißbildungen oder auch ein Mürbewerden des Betons sowie ein Ausglühen der Stahleinlagen, wodurch die Tragfähigkeit geringer wird.

Ein Einstürzen von Stahlbeton- und Spannbetonbauten erfolgt, wenn der Stahl nach Erreichen seiner kritischen Temperatur zu fließen beginnt, d. h. bei der Temperatur, bei der die Streckgrenze für Betonstahl bzw. die Zugfestigkeit für Spannstahl auf die Gebrauchsbelastung abgefallen ist. Nach DIN 4102 Teil 4 (E) „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile“ sind bei der Konstruktion Sicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen, die die Belastung von Betonstählen auf 57,2% der Streckgrenze und von Spannstählen auf 55% der Zugfestigkeit begrenzen, um die Feuerwiderstandsfähigkeit zu erhöhen.

In den Bildern 1 und 2 sind der in [2] für einige Sorten abgebildete Verlauf der Streckgrenze für Betonstahl und der Zugfestigkeit für Spannstahl in Abhängigkeit von der Temperatur wiedergegeben, und zwar nicht die Absolutwerte, sondern die auf die Temperatur von 20° C bezogenen Werte.

Die Werte sind bei Erreichen der kritischen Temperatur auf die in der Konstruktion gemäß DIN 4102 Teil 4 (E) vorgegebenen Belastung des Bauteils abgefallen. Wenn die tatsächliche Belastung dieser theoretischen Belastung entspricht, stürzt das Bauteil bei dieser Temperatur ein.

Ist die tatsächliche Belastung geringer als die nach DIN 4102 vorgegebene Belastung, erfolgt der Einsturz erst bei einer längeren Temperatureinwirkung. Wenn die kritische Temperatur nicht erreicht wird, bleibt das Bauteil erhalten. Das heißt aber nicht, daß die Tragfähigkeit des Bauteils nach Abkühlen auf Raumtemperatur immer ihren ursprünglichen Wert annimmt. Die nach dem Abkühlen erreichte Festigkeit hängt von der erreichten Temperatur, der Erhitzungsdauer, der Abkühlgeschwindigkeit und der Stahlqualität ab [3]. Bei Spannstählen kommt noch dazu, daß nach dem Erreichen der kritischen Temperatur die Vorspannung des Stahls verlorengegangen ist und der Stahl nur noch die Eigenschaft einer schlaffen Bewehrung aufweist.

Der Beton selbst erleidet aufgrund der Gefügeschädigung durch die thermische Zersetzung der kristallinen Hy-

Tabelle 1: Kritische Temperaturen von Beton- und Spannstählen

Art	Güte	kritische Temperatur (°C)
Betonstähle	BSt 220/340	570
	BSt 420/500	500
	BSt 500/550	500
Spannstähle	St 600/900	500
	St 800/1050	
	St 850/1050	
	St 900/1100	
	St 1100/1250	450
	St 1100/1350	
	St 1250/1400	
	St 1350/1500	
Spannstahl-Drähte und -Litzen	St 1400/1600	350
	St 1500/1700	
	St 1600/1800	

Fertigteilen aus ständig gleichem Beton ökonomisch einzusetzen. In die gemessenen Schallgeschwindigkeiten würden außerdem nicht nur die Qualität der beim Brand erhitzten Schichten, sondern auch die der weniger erwärmten Schichten in größerer Tiefe eingehen, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur über die gesamte Bauteilstärke gemessen werden kann. Je nach Stärke des Bauteils wirkt sich also die brandbelastete Oberflächenschicht verschieden stark auf den Meßwert aus. Daher scheint lediglich die Entnahme von Bohrkernen und die Bestimmung ihrer Druckfestigkeit nach DIN 1048 sinnvoll zu sein. Die Rolle, die hierbei die brandbelastete Oberflächenschicht auf das Bruchverhalten des gesamten Prüfkörpers beim Druckversuch ausübt, hängt dabei vom Querschnitt senkrecht zur Druckrichtung ab. Abgesehen davon, daß dieses Verfah-

drate bei höheren Temperaturen einen Verlust an Druckfestigkeit. Bild 3 zeigt den Abfall der Druckfestigkeit, wie er von verschiedenen Autoren experimentell ermittelt wurde [4].

Die thermische Ausdehnung bei verschiedenen Belastungen wird in Bild 4 aus [5] gezeigt.

Die Beziehung zwischen Druckspannung und Stauchung zeigt Bild 5 aus [5].

Als weiteres Kriterium für die Standfestigkeit eines Bauteils ist noch der Verbund zwischen Beton und Bewehrung zu nennen. Die Abhängigkeit dieser Größe von der Temperatur ist in Bild 6 aus [6] wiedergegeben.

Prüfverfahren für die Qualität von Beton und Stahl nach Temperatureinwirkung

Die herkömmlichen Prüfverfahren für die Qualität von Beton sind für diese Untersuchungen nur bedingt oder gar nicht anwendbar. Die einfach durchzuführenden zerstörungsfreien Prüfungen mit dem Rückprallhammer nach E. Schmidt oder dem Kugelschlaghammer nach Baumann-Steinrück nach DIN 1048 Teil 2 Ausgabe 2/76 „Prüfverfahren für Beton; Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Allgemeines Verfahren“ geben nur Auskunft über die Qualität der Oberfläche eines Betonbauteiles. Da aber bei Brandbelastungen die Oberfläche bedeutend mehr als das Innere in Mitleidenschaft gezogen wird, sind die nach diesen Methoden erhaltenen Werte nicht repräsentativ. Deshalb sind diese Prüfungen nach Brandbelastung auch nicht zulässig.

Die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall [6] erfordert für die Prüfung einer bestimmten Betonart umfangreiche Eichmessungen und ist daher nur zur Qualitätskontrolle von Beton-

Bild 5. Druckspannungs-Stauchungs-Beziehungen von Normalbeton bei hohen Temperaturen.

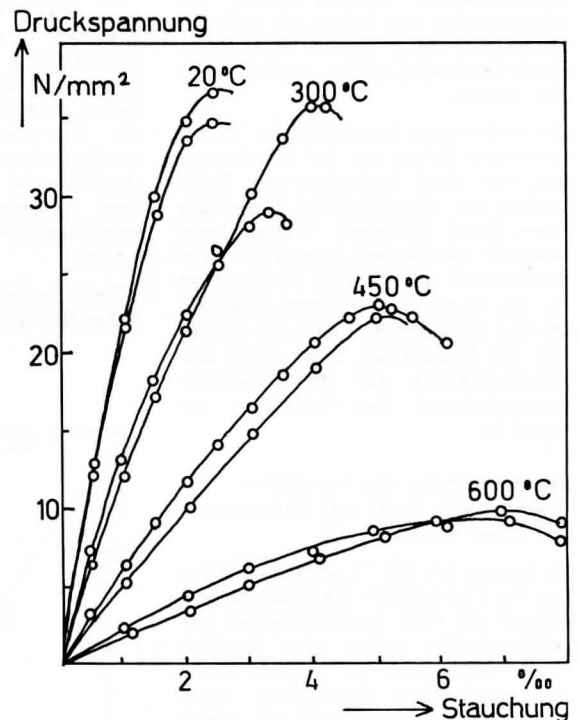
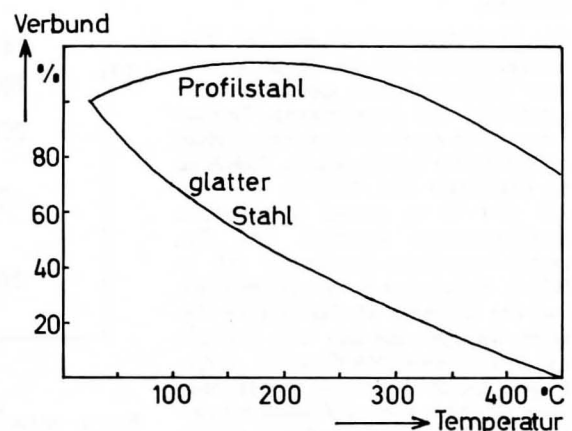


Bild 6. Verbund zwischen Beton und Bewehrung (auf den Wert bei 20°C bezogen) in Abhängigkeit von der Temperatur.



ren recht arbeitsintensiv ist, werden beim Kühlen mit Wasser durch eventuelle Rückbildung von Hydraten die mechanischen Eigenschaften verändert, so daß der entnommene Bohrkern für das untersuchte Objekt gar nicht mehr repräsentativ ist. Eine Aussage über die Stahlbewehrung muß außerdem durch ein weiteres Prüfverfahren gewonnen werden.

Ein einfach vor Ort anwendbares Prüfverfahren für Baustähle, das sich auch auf Betonstähle und Spannstähle übertragen läßt, stellen die in [5] beschriebenen Untersuchungen mit dem Poldi-Hammer und die Auswertung von Schliffbildern dar. Dies bedeutet aber für Bewehrungsstähle, daß sie für die Untersuchung freigelegt werden müssen. Außerdem ist die Interpretation von Schliffbildern für subjektive Fehler anfällig.

Es ist daher ein objektives Verfahren wünschenswert, wonach sowohl die Eigenschaften des Betons als auch der Bewehrung durch einfach durchzuführende Prüfungen sicher ermittelt werden können.

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen gehen von der Überlegung aus, daß durch Entnahme von Bohrkernen aus verschiedenen Tiefen die beim Brand erlittenen Temperaturen ermittelt werden und daraus ein Temperaturprofil erstellt wird, woraus nicht nur die Qualität des Betons beurteilt werden kann, sondern auch die Festigkeit der Bewehrung, wenn deren Betonüberdeckung aus den Konstruktionsunterlagen des Gebäudes bekannt ist.

Untersuchungen des Gewichtsverlustes von Beton und Zementstein bei hohen Temperaturen

Im Bereich bis 600 °C unterliegt lediglich der Zementstein Zersetzungsreaktionen; die von carbonatischen Zuschlagsstoffen laufen erst oberhalb dieser Temperatur ab. Deshalb wurde für orientierende Vorversuche reiner Zementstein (ca. 6 Monate alt) herangezogen.

Die Gewichtsabnahme des bei Zimmertemperatur und ca. 50–60% relativer Luftfeuchtigkeit gelagerten Zementsteins mit zunehmender Temperatur wurde durch Erhitzen von Proben auf definierte Temperaturen, Abkühlen im Exsikkator und Wägung mit einer auf $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g genau anzeigenden Analysenwaage ermittelt. Die Gewichts-Temperatur-Beziehung ist in Bild 7, Kurvenzug A, wiedergegeben. Auf der Ordinate ist das relative Gewicht, bezogen auf das nach Erhitzen auf 540 °C erreichte Gewicht, aufgetragen. Durch Auftragen dieses relativen Gewichts können Proben mit verschiedenen Einwaagen direkt miteinander verglichen werden.

Um die Gewichtsabnahme von Zementsteinproben, die schon vorher definierten Temperaturen ausgesetzt waren, mit der Gewichtsabnahme der nicht wärmebelasteten Proben zu vergleichen, wurden je zwei bzw. drei Proben des Portlandzementsteins auf 200, 300, 400 und 500 °C erhitzt und 15 Minuten bei diesen Temperaturen gehalten. Dann wurde bei ihnen ebenso wie bei der unbelasteten Vergleichsprobe der Gewichtsverlust mit zunehmender Temperatur festgestellt. Die relativen Gewichte sind ebenfalls in Bild 7 aufgetragen.

Diese Kurven verlaufen bei niederen Temperaturen zunächst horizontal und münden schließlich bei den Temperaturen, auf die die Proben vorher erhitzt worden sind, in die Kurve der nicht wärmebelasteten Probe ein.

Diese Versuchsergebnisse zeigen, daß es theoretisch möglich ist, durch Messung des Gewichts-Temperatur-Diagrammes innerhalb tragbarer Fehlergrenzen eine bereits erlittene Temperatur einer Betonprobe nach dem Erkalten noch feststellen zu können. Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von Betonbauwerken nach einem Schadenfeuer ist durch dieses Verfahren dem Fachmann eine objektive Beurteilungsgrundlage an die Hand gegeben.

Allerdings treten bei und nach natürlichen Bränden noch Randbedingungen

auf, die in dieser Versuchsreihe nicht berücksichtigt worden sind. So gelangen während des Brandes Brandgaskomponenten wie Kohlendioxid, Wasserdampf, Schwefeldioxid und eventuell Chlorwasserstoff an und in den Beton. Über die Wirkung von Chlorwasserstoff [7–10], Kohlendioxid [11] und Schwefeldioxid [12] auf Beton ist an anderen Stellen schon berichtet worden. Die Konzentrationen der Reaktionsprodukte durch diese Brandgaskomponenten im Beton sind allerdings so gering, daß eine Gewichtsabnahme im Rahmen der Meßgenauigkeit liegt und die Gewichtsmessungen zum Ermitteln der während des Brandes erreichten Temperatur dadurch voll anwendbar bleiben. Nur die Reaktion des Wasserdampfes und im ungünstigsten Fall auch die Reaktion von Löschwasser mit ausgeglühtem Beton läßt eine erneute Hydratisierung der durch thermische Zersetzung entwässerten Zementstein-Verbindungen als möglich erscheinen.

Um die Anwendbarkeit dieses Verfahrens bei Einwirkung von Wasser während oder nach einem Brand zu prüfen, wurde beispielhaft folgender Versuch durchgeführt:

Es wurde aus 1200 g Portlandzement 35 F, DIN 1164 – „Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement“ – 600 ml Wasser und quarzitischem Kies ein Betonblock der Größe 12x12x23,5 cm

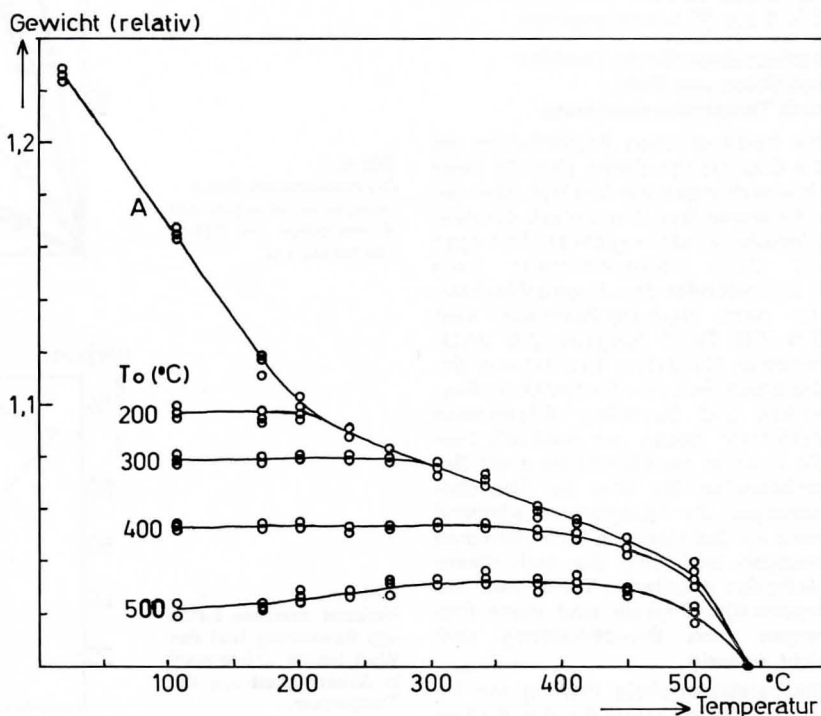


Bild 7. Abhängigkeit des Gewichts (auf den Wert, der nach Erhitzen auf 540 °C erreicht wird, bezogen) von Zementstein von der Temperatur für vorher verschieden hoch erhitzte Proben.

hergestellt. Der Kies hatte ein Größtkorn von 2 mm. In den Betonblock wurden Ni/Cr(10 %)-Ni-Thermoelemente eingebettet. Das erste Thermoelement wurde in die Mitte der Oberfläche gelegt. Die anderen Thermoelemente wurden mit ihren Meßköpfen in 5, 10, 15... bis 50 mm Abstand von der Oberfläche in den Block eingegossen. Nach vier Wochen Lagerung wurde der Betonblock mit der Fläche, in die die Thermoelemente eingearbeitet waren, vor die Öffnung eines Muffelofens gestellt und von dieser Seite her langsam aufgeheizt. Während des Aufheizens wurden die an den Thermoelement-Meßköpfen anliegenden Temperaturen über einen 12-Punkt-Schreiber gemessen und aufgezeichnet. Nach ca. 1 Stunde wurde der Betonblock vom Ofen entfernt und auf seiner erhitzten Oberfläche bis zur vorübergehend bleibenden Durchfeuchtung mit Wasser bespritzt. Kurz danach wurde abermals Wasser auf die Oberfläche gespritzt. Die Gesamtwasserbeaufschlagung betrug ca. 0,1 ml/cm².

Der zeitliche Verlauf der Temperaturen während des Erhitzens und während des Löschens an den Thermoelement-Meßköpfen ist in Bild 8 wiedergegeben. Deutlich ist ein kurzzeitiges Anhalten der Temperatur bei ca. 100 °C während des Erhitzens an den tiefer liegenden Thermoelementen zu erkennen. Die Temperatur blieb hier solange stehen, bis das anhaftende Wasser verdampft war. Der Löschvorgang zeigt sich durch das Abfallen aller Temperaturen. In den tieferen Lagen des Probekörpers ist das Abfallen der Temperaturen weniger markant und auch zeitlich verschoben. Die oberen Schichten zeigen aber ein momentanes Abfallen auf ca. 100 °C. Durch die Wärme im Inneren des Blockes wird die Oberfläche aber schnell wieder aufgeheizt.

Aus den Temperatur-Zeit-Diagrammen ließen sich nun Temperaturprofile über den Querschnitt des Probekörpers konstruieren. Bild 9 zeigt die Temperaturverteilung über den Abstand von der Oberfläche zu verschiedenen Zeiten. Der oberste Kurvenzug stellt das Temperaturprofil nach ca. 1 Stunde dar. Daraus lassen sich die beim Versuch in verschiedenen Tiefen erreichten Maximal-Temperaturen entnehmen.

90 Minuten nach dem Löschen wurden aus dem Betonblock von der erhitzten Seite her Bohrproben entnommen. Die Bohrungen wurden je 5 mm tief geführt. Dadurch wurden Proben gewonnen, die die Betonschichten 0–5 mm, 5–10 mm... 45–50 mm repräsentieren. Nach 50 Stunden Lagerung wurden ebenfalls Bohrproben entnommen. Die Bohrproben wurden jeweils sofort nach der Entnahme durch ein 0,1-mm-Maschensieb von den grob ausgeschlagenen Zuschlagskörnern befreit und in

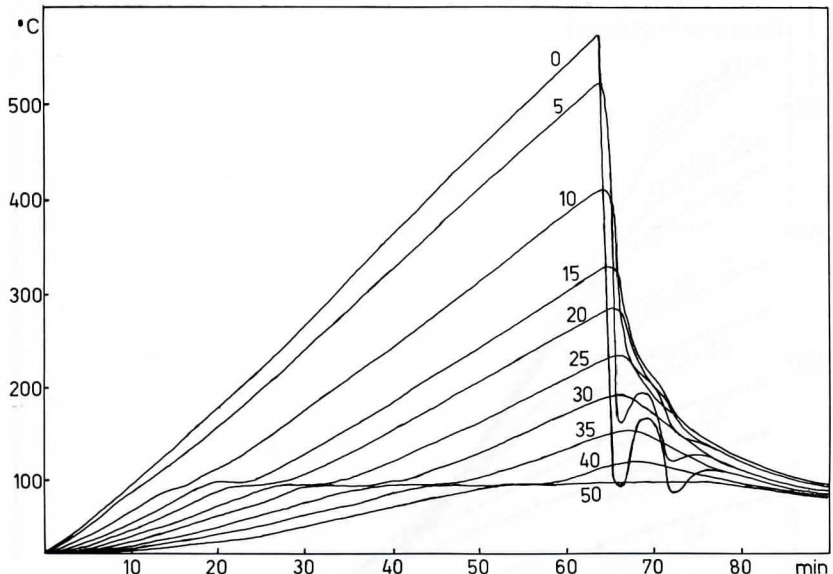


Bild 8. Zeitlicher Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen des einseitig aufgeheizten Betonblocks.

ein Reagenzglas gegeben, das sofort zugeschmolzen wurde. Dadurch wurde eine Anreicherung des Zementsteines mit Luftfeuchtigkeit während der Lagerung bis zur Untersuchung vermieden.

Die einzelnen Proben wurden auf definierte, jeweils um 50 K höhere Temperaturen erhitzt und dann einzeln im Exsikkator abgekühlt und gewogen. Die so erhaltenen Gewichts-Temperatur-Diagramme der nach 50 Stunden entnommenen Proben sind in Bild 10 wiedergegeben. Auch hier wurde auf der Ordinate das relative Gewicht aufgetragen, das durch Beziehen des ab-

soluten Gewichts auf das nach Erhitzen auf 600 °C erhaltene Gewicht gewonnen wurde.

Ein Vergleich der so ermittelten erreichten Maximaltemperaturen mit dem beim Versuch gemessenen Temperaturprofil nach ca. 1 Stunde ist in Bild 11 dargestellt. Die Übereinstimmung ist zwar gewährleistet, die Interpretation der „Einmündungsstellen“ der einzelnen Kurven läßt aber besonders bei den auf höhere Temperaturen gebrachten Bohrproben aus der Nähe der Oberfläche größere Temperaturbereiche zu.

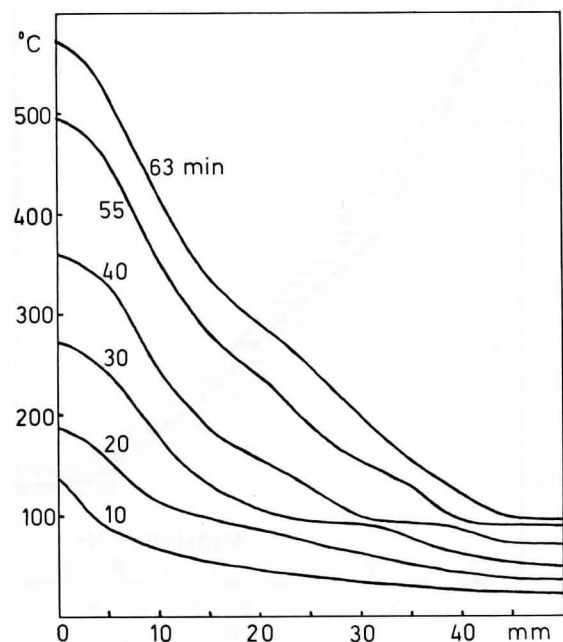


Bild 9. Temperaturprofile im Betonblock zu verschiedenen Zeiten.

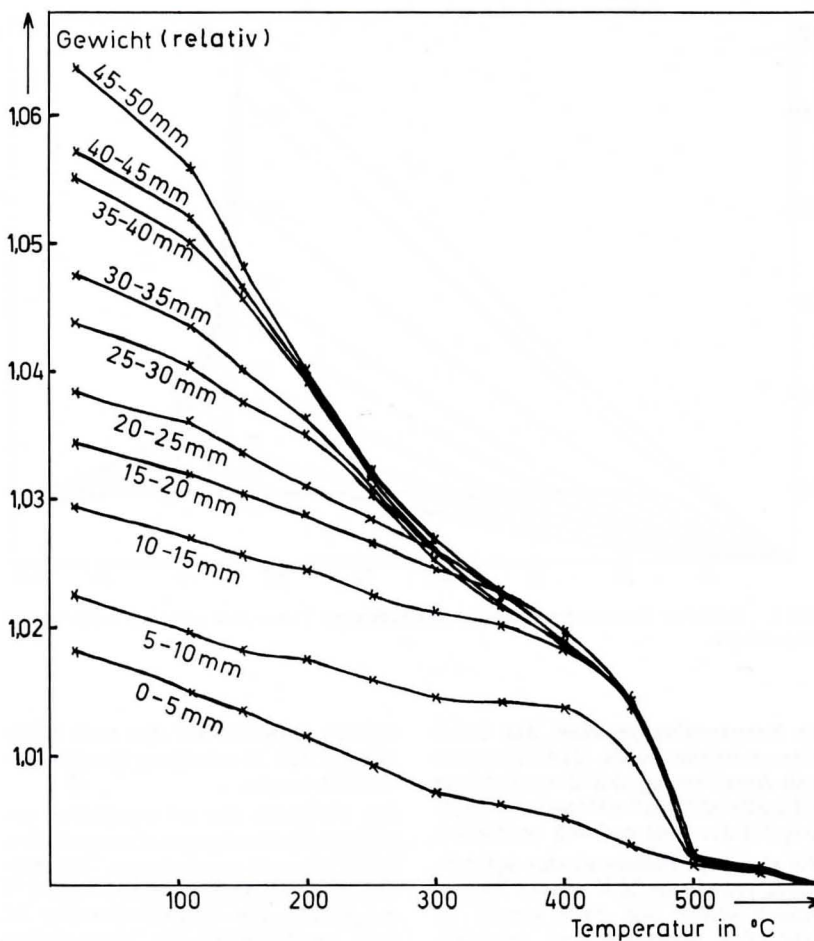


Bild 10. Gewichts-Temperatur-Beziehungen der nach 50 h aus den verschiedenen Tiefen entnommenen Bohrproben des erhitzten Betonblocks.

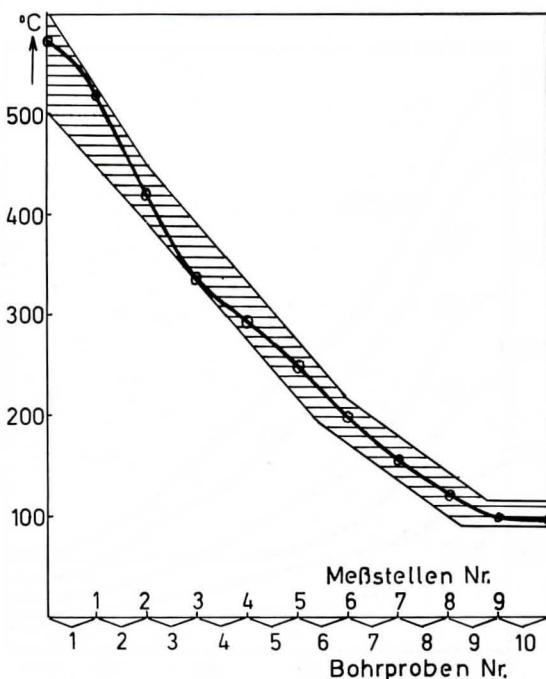


Bild 11. Vergleich der aus den Gewichts-Temperatur-Beziehungen gewonnenen und der während des Versuchs gemessenen Maximaltemperaturen.

Die Messungen der nach 90 Minuten entnommenen Bohrproben sind im Rahmen der Meßgenauigkeit identisch mit diesen Ergebnissen.

Es ist also gesichert, daß ein Auslagern des erhitzten und anschließend gelöschten Probekörpers bzw. die Verzögerung der Probennahme nach einem Brand um zwei Tage keine Veränderungen bewirkt, die eine Bestimmung der erreichten Temperaturen nicht mehr zuließe.

Weiterhin ist gesichert, daß trotz einer Wasserbeaufschlagung, wie sie hier im Versuch erfolgte, eine nachträgliche Bestimmung eines Temperaturprofils aus Bohrproben möglich ist.

Thermoanalytische Verfahren

Thermogravimetrie (TG), Differential-Thermogravimetrie (DTG)

Bei dieser Methode wird durch ein entsprechendes Meßgerät das Gewicht einer Probe bei kontinuierlichem Aufheizen in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen und über einem XY-Schreiber als Gewichts-Temperatur-Diagramm aufgezeichnet. Die Probe von 2–10 mg Gewicht hängt dabei in einem kleinen Gefäß an einem Arm einer empfindlichen Waage in einem elektrisch beheizten Ofen. Durch ein Thermoelement bzw. Widerstandsthermometer unter der Probe wird die Ofentemperatur kontrolliert. Der Ofen wird mit konstanter Heizrate bis zu der gewählten Temperatur aufgeheizt, solange Zersetzungsreaktionen zu erwarten sind, die eine Abnahme des Gewichtes der Probe zur Folge haben.

Außer dem Verlauf des absoluten Gewichtes der Probe mit der ansteigenden Temperatur läßt sich über einen elektronischen Baustein auch noch die Änderung des Gewichtes pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Temperatur messen und als 1. Ableitung des Gewichtes nach der Zeit vom Schreiber zeichnen. Die Aufnahme dieses $dW/dt=f(T)$ -Diagrammes ist die Differential-Thermogravimetrie.

Differential-Thermoanalyse (DTA)

Endotherme und exotherme Reaktionen (bei denen Wärme verbraucht bzw. freigesetzt wird) lassen sich durch die Differential-Thermoanalyse qualitativ feststellen, voneinander unterscheiden und den Temperaturen zuordnen, bei denen sie einsetzen.

Die zu untersuchende Probe und eine Vergleichsprobe (meistens Aluminiumoxid), die im gesamten untersuchten Temperaturbereich keine Reaktionen zeigt und möglichst keine Änderungen der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität zeigt, werden in einem elektrisch beheizten Ofen mit konstanter Heizrate aufgeheizt. Die Proben umgeben in entsprechend geformten Gefäßen die Meßköpfe zweier gegen-

einander geschalteter Thermoelmente. Diese Thermoelmente-Kette liefert nur dann eine Spannung, wenn in den beiden Proben verschiedene Temperaturen herrschen. Dieser Fall tritt dann ein, wenn der Ofen eine Temperatur erreicht hat, bei der in der Probe eine Reaktion mit Wärmetönung stattfindet. Handelt es sich um eine Reaktion, bei der Wärme verbraucht wird (endotherme Reaktion), so wird die der Probe vom Ofen zugeführte Wärme von nun an dazu verbraucht, diese Reaktion zu beenden und steht daher nicht mehr für das Aufheizen der Probe zur Verfügung. Die Vergleichsprobe, in der keine Reaktion stattfindet, wird indessen weiter aufgeheizt, so daß das Thermoelement der Vergleichsprobe eine größere Spannung abgibt als das der Probe. Im umgekehrten Fall, wenn in der Probe eine Reaktion stattfindet, bei der Wärme freigesetzt (exotherme Reaktion) und das Thermoelement der Probe daher schneller aufgeheizt wird als das der Vergleichsprobe, wird von diesem eine größere Spannung abgegeben. Wird die Spannung dieser Meßkette über einen Meßverstärker auf einen XY-Schreiber gegeben und gegen die Temperatur aufgetragen, so erhält man eine gerade Linie mit Abweichungen (Peaks) nach oben (bei endothermen Reaktionen) und nach unten (bei exothermen Reaktionen). Der Fußpunkt dieser Peaks zeigt auf der Temperaturachse die Reaktionstemperatur an, während die Größe des Peaks (Peakhöhe bzw. Fläche) ein ungefähres Maß für die bei der Reaktion freigesetzte bzw. verbrauchte Wärme darstellt.

Differential Scanning Calorimetrie (DSC)

Ähnlich wie die DTA mißt die DSC thermische Effekte beim Aufheizen einer Probe. Probe und Vergleichsprobe werden allerdings in zwei getrennten Öfen aufgeheizt. Durch Thermoelmente bzw. Widerstandsthermometer werden die Temperaturen der Probe und der Vergleichsprobe kontrolliert. Tritt in der Probe ein thermischer Effekt auf, so wird die Heizleistung der einzelnen Öfen so variiert, daß die Temperaturunterschiede zwischen Probe und Vergleichsprobe ausgeglichen werden. Die Unterschiede in der Heizleistung zwischen beiden Öfen werden durch einen Schreiber gegen die Temperatur aufgezeichnet. Das DSC-Diagramm ähnelt dem DTA-Diagramm, nur daß bei der DSC-Methode die Peakfläche direkt die Energie einer exothermen oder endothermen Reaktion darstellt, während durch DTA-Messung dieser Wert nur ungefähr und mit großem Eichaufwand ermittelt werden kann.

Die prinzipiellen Aussagen von thermoanalytischen Messungen sollen an

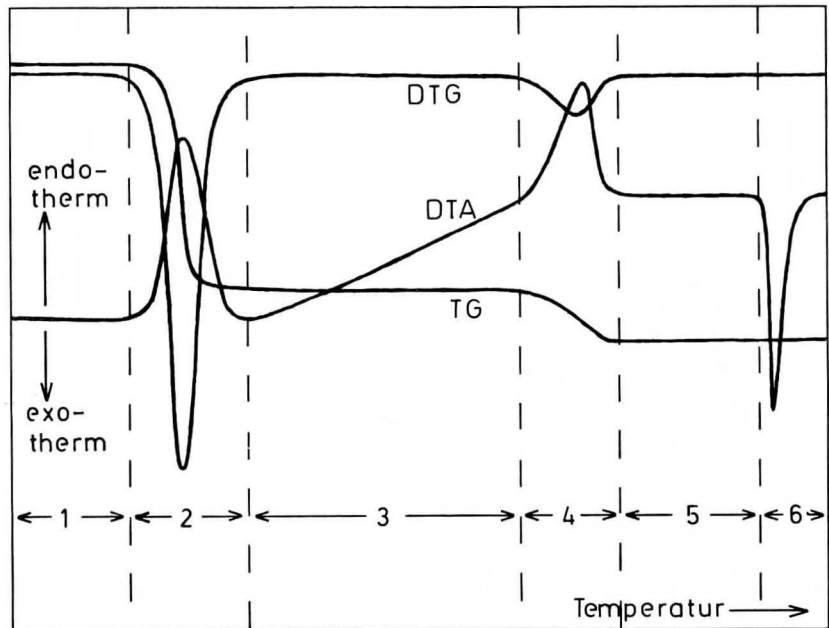


Bild 12. DTA-/TG-/DTG-Diagramme einer hypothetischen Probe.

folgendem hypothetischen Beispiel erläutert werden:

In das Diagramm sind die TG-Kurven, die DTG-Kurve und die DTA-Kurve eingetragen. Die Temperaturskala ist in 6 Bereiche unterteilt. Im Bereich 1

verlaufen alle Kurven horizontal. Hier findet keine Reaktion und keine Gewichtsabnahme statt. Darauf folgt im Bereich 2 eine stark endotherme Reaktion. Gleichzeitig ist aus der TG-Kurve ein starker Gewichtsverlust zu erkennen. Die DTG-Kurve, die die Ge-

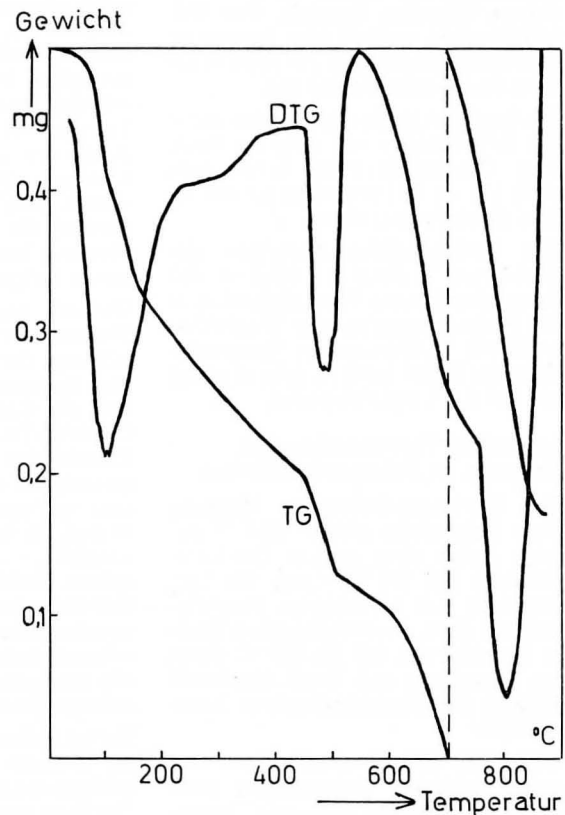


Bild 13. Dynamische TG-/DTG-Messung von Portlandzement-Beton.

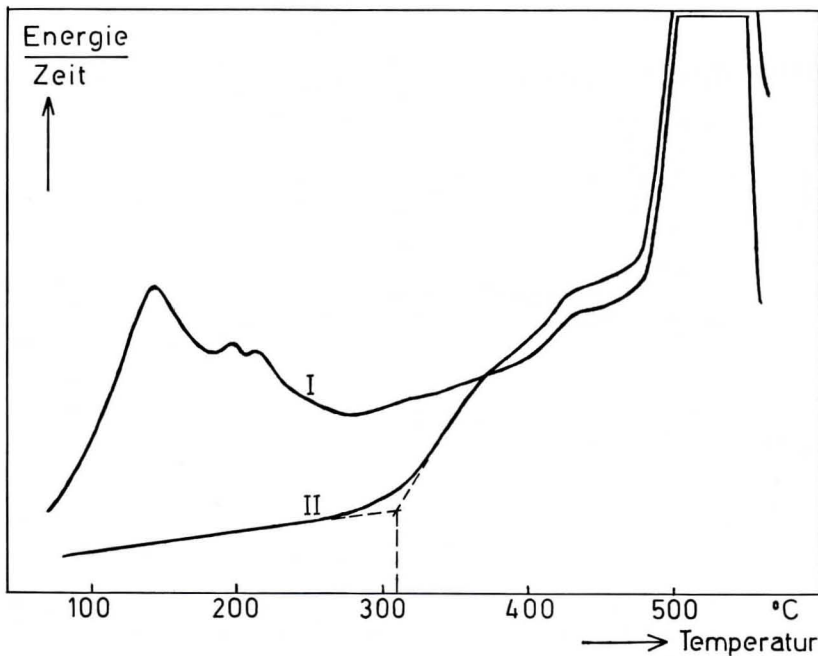


Bild 14. DSC-Messung von Portlandzement-Beton.
Diagramm II stammt von einer vorher auf 315° C erhitzten Probe.

wichtsänderung pro Zeiteinheit angibt, zeigt hier einen großen Peak, dessen Maximum an der Stelle liegt, wo die TG-Kurve die größte Steigung aufweist.

Auch im Bereich 4 ist eine Reaktion mit Gewichtsverlust zu erkennen. Aus dem Verlauf des DTA-Peaks läßt sich entnehmen, daß es sich um eine exotherme Reaktion handelt. Der Gewichtsverlust verläuft hier langsamer. Dementsprechend fällt der Peak in der DTG-Kurve auch kleiner aus.

Die Reaktion im Bereich 6 zeigt nur in der DTA-Kurve einen scharfen Peak. Eine Gewichtsabnahme findet nicht statt. Dieses Phänomen ist typisch für eine Kristallumwandlung.

Das kontinuierliche Ansteigen der DTA-Kurve im Bereich 3 zeigt an, daß durch eine höhere Wärmekapazität in der Probe gegenüber der Vergleichsprobe die Temperatur am Thermoelement der Probe nicht so schnell steigt wie bei der Vergleichsprobe.

Anwendung Thermoanalytischer Methoden für Betonuntersuchungen

Die Thermogravimetrische Messung einer Betonprobe wird in Bild 14 gezeigt. Außer einer starken Gewichtsabnahme bei 100 °C durch die Verdampfung von adsorbierter Feuchtigkeit und einer charakteristischen Stufe im Bereiche von 460 bis 550 °C durch die Zersetzung von Calciumhydroxid verläuft die Gewichtsabnahme kontinuierlich.

Analog zu den Einzelwägungen von vorher erhitzten Betonproben nach dem Aufheizen auf definierte Tempe-

raturen läßt sich durch thermoanalytische Methoden die vorher erreichte Temperatur bestimmen. In Bild 14 sind die DSC-Kurven einer nicht wärmebelasteten Betonprobe I und einer vorher auf 315 °C erhitzten Betonprobe II abgebildet. Die Kurve II verläuft zunächst linear und steigt dann an, um in den normalen Verlauf, wie ihn die Probe I zeigt, einzumünden. Legt man an den linearen Kurventeil zu Anfang und an den aufsteigenden Kurventeil, der schließlich in die normale Kurve einmündet, Tangenten an und lotet ihren Schnittpunkt auf die Temperatur-Achse, so wird ein Wert von 310 °C erhalten. Durch diese Messungen konnte gezeigt werden, daß die Temperatur, die eine Betonprobe vor der Messung bereits erlitten hat, auf 5 °C genau festgestellt werden kann.

Dadurch ergibt sich, daß auch die Thermogravimetrie eine genauere Ermittlung der Temperatur zuläßt, die eine Betonprobe vorher schon erlitten hat, als dies durch Aufstellen eines Gewichts-Temperatur-Diagrammes aus Einzelwerten und mit geringer Meßgenauigkeit möglich ist. Aufgrund der sehr geringen Probemengen (2 bis 10 mg), die für thermoanalytische Messungen nötig sind, lassen sich die einzelnen Fraktionen über die gesamte Bohrtiefe beliebig eng wählen. Das aus den Werten der einzelnen Proben rekonstruierte Temperaturprofil über die gesamte Bohrtiefe kann dadurch sehr genau werden.

Da im Beton aber meistens nicht wie im Versuch ein Größtkorn des Zuschlags von nur 2 mm vorliegt, und der Zuschlag meist eine andere Wärme-

leitfähigkeit aufweist als der Zementstein, ist das ideale Temperaturprofil in der Umgebung von großen Zuschlagskörnern gestört. Zur Beurteilung eines Bauteiles sollte daher nicht nur ein Temperaturprofil aus nur einer Bohrstelle herangezogen werden.

Zusammenfassung

Die hier beschriebenen Untersuchungen zeigen die Möglichkeit auf, die bei Brandschäden in bestimmten Tiefen von der beflammten Oberfläche eines Stahlbeton- oder Spannbeton-Bauteils aufgetretenen Temperaturen durch thermoanalytische Methoden nachträglich sehr genau festzustellen.

Aus den in der Literatur beschriebenen Beziehungen zwischen Temperatur und den mechanischen Eigenschaften von Beton und Bewehrungsstählen sowie deren Verbund läßt sich über diese Methode eine objektive Aussage über die Zuverlässigkeit von Stahlbeton- und Spannbeton-Bauteilen nach einem Schadenfeuer machen.

Bei mäßiger Wasserbeaufschlagung nach dem Brand zeigen nach zwei Tagen entnommene Bohrproben noch keine Veränderungen, die eine genaue Ermittlung der erreichten Temperatur beeinträchtigen.

Um die Grenzen der Anwendbarkeit dieses Verfahrens abzustecken, sind noch weitere Untersuchungen nötig. So muß noch festgestellt werden, ob sehr große Wassermengen, die beim Löschen eines Brandes an und in den Beton gelangen können, und sehr lange Verzugszeiten bis zur Probenentnahme eventuell genaue Messungen beeinträchtigen. Die zu erwartenden Störungen des idealen Temperaturprofils in der Umgebung von großen Zuschlagskörnern und Bewehrungsstählen müssen ebenfalls noch untersucht werden.

Literatur

- [1] L. Müller: Portlandzement; Chem. in uns. Zeit, 7 (1973), S. 19 bis 24.
- [2] D. Schwerm: Typenprogramm Skelettbau — Eine Standardisierung von Betonfertigteilquerschnitten; Fertigteilbauforum 1978, Nr. 6, S. 1–13.
- [3] L. Hagn: Beurteilung von Brandschäden in Stahlhochbauten — Einsatz zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden und Laborprüfungen; Der Maschinenschaden 46 (1973), S. 149–154.
- [4] U. Schneider, R. Weiß: Kinetische Betrachtungen über den thermischen Abbau zementgebundener Betone und dessen mechanische Auswirkungen; Cem. Concr. Res. 7 (1977), S. 259–268.
- [5] K. Kordina et al: Zur Berechnung von Stahlbetonquerschnitt-

- ten im Brandfall; Schriftenreihe des SFB 148, 1977, Nr. 1.
- [6] H. R $\ddot{o}$ thig: Zuverlässige Festigkeitsprüfung von Beton mit Ultraschall durch verbesserte Auswertung; Materialprüf. 20 (1978), Nr. 6, S. 225–229.
- [7] F. W. Locher: Einwirkung von salzsäurehaltigen Dämpfen auf Beton und andere Baustoffe; Allianz-Berichte, 1973, Nr. 19, S. 11 bis 17.
- [8] W. Jach, O. Wollrab: Einwirkung chlorwasserstoffhaltiger

- Brandgase auf Beton und Kalkmörtel; schadenprisma 3 (1974), Nr. 2, S. 25–36.
- [9] D. Brusemann, H. Greger: Zur Frage der Chloridwanderung in PVC-Schmelzgasen ausgesetztem Beton; Betonstein-Zeitung, 1970, Nr. 5, S. 314–321.
- [10] P. K. Mehta: Effect of Cement Composition on Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete; ASTM, STP 629 (1977), S. 12–19.
- [11] G. Blunk et al: Carbonatisierung des Betons – Einflüsse und

Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung; Betontechnische Berichte, 1972, S. 125–133.

- [12] D. Hofmann, H. Ro $\ddot{o}$ ß: Wechselwirkungen zwischen Schwefeldioxid und Kalkmörtel; Materialprüf. 19 (1977), Nr. 8, S. 300–304.
- [13] G. L. Kalousek, K. T. Greene: Differential Thermal Analysis Test of Cements and Individual Hydrates; Trans. Res. Circ., 1976, S. 30–41.

Schaden an einem Neubau durch ausflieendes Heizöl EL (Bauwesenschaden)

Bruno Siegel

Wie sehr gerade Schäden durch ausgelaufenes Öl die Volkswirtschaft belasten, kann man aus dem finanziell geförderten Programm des Bundesministeriums für Forschung und Technologie ableiten, das auf dem Gebiet Brand- und Umweltschutz durch einen „Sofort-Ausschuß“ Vorschläge zur Bekämpfung von lschden erarbeitet wissen möchte.

Der hier beschriebene Schaden stellt für die Betroffenen in gewisser Weise ein Novum dar; denn es handelt sich um einen lschaden an einem Neubau.

Nach dem ersten Augenschein wurde der Schaden zunächst einmal mit 3000,– DM eingeschätzt. Nach Beendigung der Sanierungsarbeiten ergibt sich jedoch, daß rd. 700 000 DM Schadenersatz über die Bauleistungsversicherung aufgebracht werden mußten.

Es ist festzustellen, daß nur durch die Hilfe und den Einsatz von Öl-Fachleuten und einer Sondergruppe von Ingenieuren die Sanierung in dem vom Schaden betroffenen Gebäude überhaupt möglich war. Die Erfahrungen dieses Schadenfalles geben wichtige Hinweise für Maßnahmen in ähnlich gelagerten künftigen Fällen.

Nach den örtlichen Ermittlungen muß sich der Schaden wie folgt abgespielt haben:

Wegen winterlicher Temperaturen sollten Bauteile durch ölbefeuerte Luft-

erhitzer enteist und erwärmt werden. Ein mit Heizöl EL gefllter Kunststofftank zur Energieversorgung der Geräte wurde in zwei Tragegurte des Baukrans gehängt und auf die Decke über dem 4. Obergeschoß gehievt.



Bild 1.
Das vom Schaden betroffene Gebäude.

Bauingenieur BDB Bruno Siegel, Mitarbeiter der Abteilung Technik und Schadenverhütung im Hause der BRANDKASSE/PROVINZIAL-Versicherungsgruppe in Kiel.