NUMMER 3

schaden prisma

Zeitschrift für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlich-rechtlichen Versicherer

AUGUST 1979 8. JAHRGANG

Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen bei Baustellenbränden

E. Klement

1. Einleitende Bemerkungen

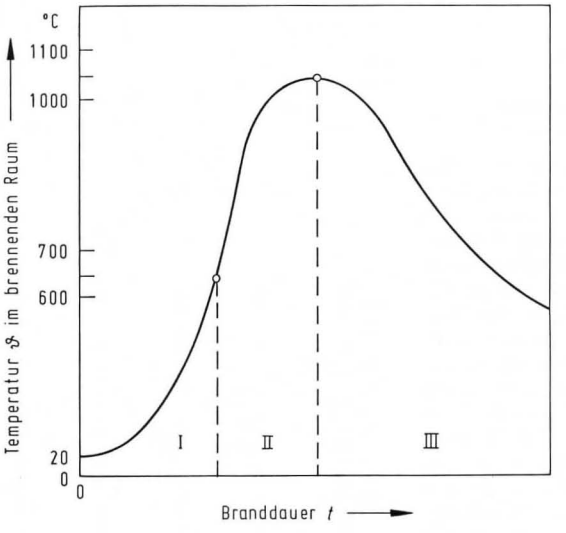
Nach einer weit verbreiteten Ansicht können Brände in Rohbauten mangels vorhandener Brandlast nicht entstehen oder sind ungefährlich. Die Folge ist die Nichtbeachtung der Sicherheitsregeln und Merkblätter für den Brandschutz [1]. Im folgenden soll die spezifische Rohbausituation dargestellt und das Verhalten der Baustoffe Stahl- und Spannbeton, Baustahl und Holz bei erhöhten Temperaturen sowie das Brandverhalten der entsprechenden Rohbaukonstruktionen diskutiert werden.

1.1. Spezifische Rohbausituation

In Rohbauten ist in den von einem Schadenfeuer betroffenen Brandabschnitten der Innenausbau entweder noch nicht begonnen oder erst teilweise fertiggestellt worden [2]. Es fehlt deshalb ein großer Teil der für die Nutzung vorgesehenen, teilweise brennbaren Verkehrslasten; somit ist die als Brandlast bezeichnete Masse der brennbaren Materialien kleiner als nach Fertigstellung des Bauwerkes. Da jedoch je nach der Rohbausituation ein Teil der baulichen Schutzmaßnahmen fehlt, sind die Bauteile einer Brandbeanspruchung ungeschützt ausgesetzt. So können z. B. die Verkleidungen oder Ummantelungen von Stahlkonstruktionen oder Unterdecken noch nicht montiert oder Stahlbetonbauteile noch nicht verputzt sein. Ferner fehlen häufig andere brandschutztechnische Maßnahmen zur Begrenzung der Brandausbreitung (z. B. Feuerschutzabschlüsse, raumabschließende Bauteile u. a.).

1.2. Brandlasten und Brandentstehungsursachen in Rohbauten

Drei Situationen können als typisch für die Entstehung von Bränden in Rohbauten angesehen werden:



I Entstehungsfeuer
II vollentwickelter Brand
III Ausbrand

Bild 1.
Schema der Brandentwicklung in geschlossenen Räumen.

Ing. (grad.) E. Klement, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin

a) Die Lagerung von brennbaren Materialien und das unumgängliche Arbeiten mit offener Flamme (z. B. Schneid- und Schweißarbeiten) bedeuten eine potentielle Zündgefahr für diese Materialien. Dabei sind die leichtentflammbaren Baustoffe [3] besonders gefährlich, obwohl deren Verwendung nach [4] nur unter der Voraussetzung zulässig ist, daß sie nach ihrem Einbau oder ihrer Verarbeitung nicht mehr leichtentflammen können. Vor ihrem Einbau werden sie jedoch zwangsläufig im Rohbau gelagert. So wird beispielsweise in [5] über die Zündung der in einem Rohbau-Geschoß lagernden, leichtentflammbaren Polystyrol-Schaumkunststoffplatten durch Schweißperlen berichtet. Hier wurde in einem im Maßstab 1 : 1 durchgeführten Modellversuch nachgewiesen, daß Schweißperlen nach einer Fallhöhe von etwa 9 m noch zünden können.

b) Durch die Baufirmen werden in einem fertigen Geschoß des Rohbaues oftmals Aufenthaltsräume (Baubuden) errichtet, deren Wände und Inventar in der Regel aus Holz bestehen. Vielfach werden in Holzregalen untergebrachte Materiallager eingebaut sowie Ölöfen aufgestellt und elektrische Betriebsmittel verwendet.

c) Von späteren Nutzern werden die Räume des Rohbaues provisorisch belegt.

In den unter b) und c) genannten Fällen werden die brennbaren Materialien häufig durch

unsachgemäße Bedienung von Feuerstellen oder elektrischen Betriebsmitteln,

unsachgemäße Lagerung brennbarer Flüssigkeiten und

Brandstiftung

gezündet (siehe auch [6]).

2. Brandentwicklung bei einem Schadenfeuer

Jedes Schadenfeuer hat mit den Stadien Zündphase/Entstehungsphase seinen Ausgangspunkt in einem räumlich eng begrenzten Bereich. Die von dem brennenden Bereich ausgehende Wärmestrahlung erwärmt zuerst die nächstliegenden Oberflächen der Bauteile (Decken, Wände, Unterzüge, Stützen). Die brennbaren Stoffe geben dabei als Folge pyrolytischer Zersetzung brennbare Gase ab. Wenn die Temperaturen im Raum ca. 600 °C überschreiten, kann sich das Feuer in Bruchteilen von Sekunden über den ganzen Raum ausbreiten. Dabei geraten die noch nicht entflammten brennbaren Materialien in Brand (vollentwickelter Brand). Der Brandverlauf ist in Diagrammform dargestellt (Bild 1). Die Höhe der in einem Raum erreichten Temperaturen und die Dauer des Brandes sind dabei von sehr vielen Faktoren abhängig, z. B. der Größe der Fensteröffnungen, dem Raumvolumen, den Wandflächen sowie Art und Brennbarkeitseigenschaften der Brandlast. Eine Vorstellung von der Vielzahl der in einem Raum gegebener Größe möglichen Brandabläufe vermittelt Bild 2. Dargestellt sind Meßergebnisse aus experimentellen Bränden, ausgeführt in der Fire Research Station in Boreham Wood, England [7].

Bei vielen Bränden in Rohbauten ist ein Raumbrand der beschriebenen Art nicht wahrscheinlich, weil die Brandlast örtlich konzentriert in einer im übrigen nicht weiter unterteilten Geschoßfläche vorliegt. Diese Brände führen meistens nur zu einer Temperaturbeanspruchung einzelner Bauteile. Die Brandeinwirkung durch heiße Brandgase oder Strahlungen auf die Bauteile oder Baukonstruktionen ist bei der Fülle möglicher Brandabläufe in Rohbauten nur sehr schwer theoretisch vorherzusagen. Experimentelle

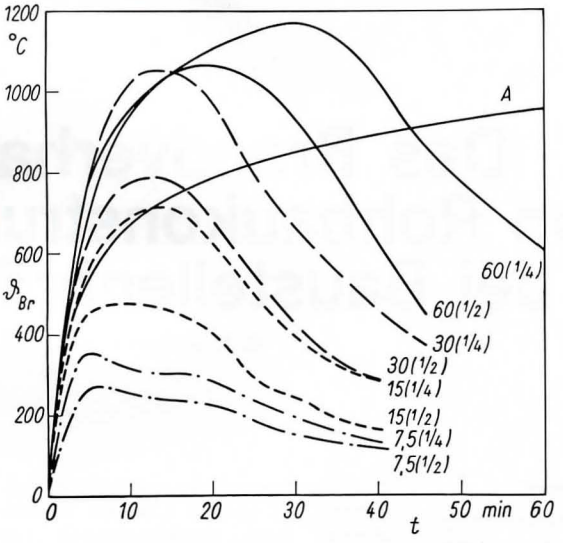


Bild 2.
Brandraumtemperaturkurven bei unter natürlichen Bedingungen ablaufenden Experimentalbränden [7]. Zum Vergleich Einheits-Temperaturzeitkurve A nach DIN 4102 Teil 2 [8]. Parameter ist die Brandbelastung (Holz) in kg/m² sowie die Größe der relativen Fensteröffnung.

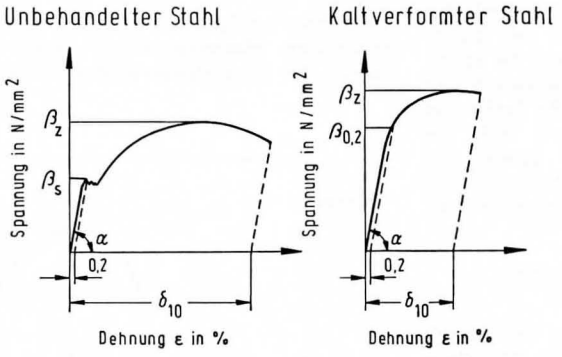


Bild 3.
Spannungs-Dehnungs-Diagramm von unbehandeltem und kaltverformtem Stahl bei Raumtemperatur.

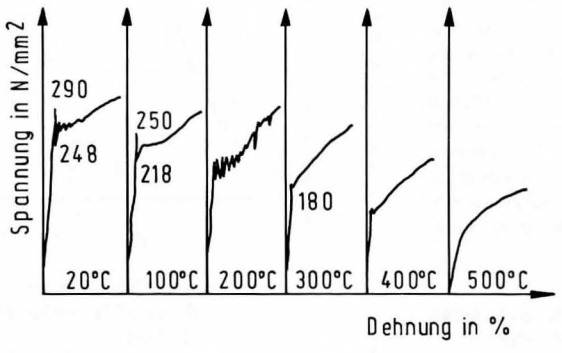


Bild 4.
Spannungs-Dehnungs-Diagramme von unbehandeltem Stahl bei Temperaturen bis 500° C [11],

Erfahrungen über das Brandverhalten von Bauteilen beziehen sich überwiegend auf Einzelbauteile, bei denen Brandschutzmaßnahmen schon durchgeführt sind und die in den Materialprüfungsämtern nach DIN 4102 Teil 2 [8] geprüft wurden (z. B. [9], [22] bis [25]). Hierbei wird die Brandraumtemperatur entsprechend der in der Norm festgelegten Einheits-Temperaturzeitkurve (vgl. auch Bild 2, Kurve A) gesteuert. Derartige Versuche haben jedoch zwangsläufig den Charakter von Modellversuchen.

Solche Versuchserfahrungen an Bauteilen, bei denen die Brandschutzmaßnahmen (Verkleidungen, Putze u. a.) bereits aufgebracht sind, reichen in der Regel zur Beurteilung des Brandverhaltens von ungeschützten Rohbaukonstruktionen nicht aus.

3. Das Verhalten der Baustoffe Stahl- und Spannbeton, Baustahl und Holz bei erhöhten Temperaturen

3.1. Das Verhalten des Baustoffs Stahlbeton bei erhöhten Temperaturen

Das Tragverhalten von brandbeanspruchten Stahlbetonbauteilen wird maßgeblich von der Art der Bewehrung (unbehandelte oder kaltverformte Betonstähle) bestimmt. Bei den unbehandelten Betonstählen schließt sich an den Walzprozeß kein weiterer Arbeitsgang an. Sie verdanken ihre Festigkeitseigenschaften ausschließlich ihrer chemischen Zusammensetzung und zeigen meist eine ausgeprägte Streckgrenze β_S (Bild 3). Dieses Bild zeigt außerdem das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der kaltverformten Betonstähle, die im Anschluß an den Walzprozeß bei Raumtemperatur plastisch verformt werden. Dadurch wird eine wesentliche Verfestigung und höhere Härte erzielt. Derartige Betonstähle haben keine ausgeprägte Streckgrenze, so daß nach [10] als Ersatzstreckgrenze eine Spannung bei einer bestimmten nichtproportionalen Dehnung (Dehngrenze) definiert wird. Üblicherweise wird die 0,2-%-Dehngrenze bestimmt, die dann als Ersatzstreckgrenze angegeben wird.

Jeder Stahl erleidet bei steigenden Temperaturen eine Festigkeitsminderung. Dies wird am folgenden Beispiel eines unbehandelten Stahles erläutert (Bild 4). Gegenübergestellt sind mehrere Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei verschiedenen Temperaturen [11]. Ab etwa 300 °C verschwindet der Fließbereich, ab etwa 500 °C die ausgeprägte Streckgrenze. Nach Abkühlung gehen die Streckgrenze und die Zugfestigkeit bei einer vorausgegangenen Erwärmung wieder auf den Ausgangswert zurück.

Im Gegensatz dazu wird bei den kaltverformten Betonstählen der durch die Kaltverformung entstandene Zwangszustand durch Erwärmung rückgängig gemacht (Rekristallisation). Nach dem Erkalten haben kaltverformte Stähle in der Regel nur noch Festigkeitseigenschaften, die denen des unbehandelten Stahls entsprechen. Kaltverformte Betonstähle sind also nach einer thermischen Beanspruchung wie unbehandelte Betonstähle zu beurteilen.

In Bild 5 ist nach DIN 4102 Teil 4 (E) [12] der prozentuale Festigkeitsabfall einiger Betonstähle in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Da die maximale Spannung σ unter voller Gebrauchslast infolge des Sicherheitsfaktors $\nu = 1{,}75$ nach DIN 1045 [18]

$$\max \sigma = \frac{1}{\nu}\beta_S$$

ist, ergibt sich z. B. für den Betonstabstahl BSt 420/500 (kaltverformt) $\sigma = 420/1{,}75 = 240$ N/mm². Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, wird für die angenommene Betonstahlsorte diese Spannung bei etwa 500 °C (kritische Temperatur) unterschritten; denn bei dieser Temperatur beträgt der Festigkeitsabfall bezogen auf die Ausgangsfestigkeit (420 N/mm²) etwa 57 %.

Aus diesem Bild ist außerdem ersichtlich,

- daß der Festigkeitsabfall der kaltverformten zu den unbehandelten (BSt 220/340) Betonstählen einen analogen Verlauf hat und
- die $\beta_{0,2}$-Grenze oberhalb von 200 °C stark abfällt.

In Bild 5 ist die auf die Ausgangsfestigkeit bezogene charakteristische Veränderung der Streckgrenze von Betonstahl bei hohen Temperaturen dargestellt. In ähnlich gravierender Weise werden auch die Verformungseigenschaften (Dehnbarkeit) und thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung) beeinflußt. Vereinfacht lassen sich bei steigender Temperatur zwei Feststellungen treffen,

- abnehmende Materialfestigkeit,
- zunehmendes Materialverformungsvermögen.

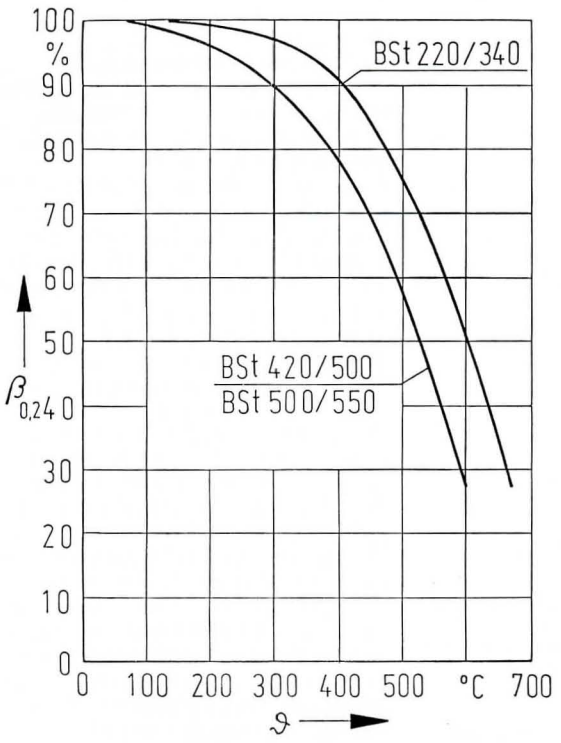


Bild 5.
Streckgrenze von Betonstählen in Abhängigkeit von der Temperatur [12].

3.2. Das Verhalten des Baustoffs Spannbeton bei erhöhten Temperaturen

Schließen sich an den Walzprozeß weitere Arbeitsgänge zur Erhöhung der Stahlfestigkeit an, unterscheidet man unbehandelte, kaltverformte, vergütete und angelassene Spannbetonstähle. Unbehandelte Spannbetonstähle werden, wie bei den Betonstählen schon erwähnt, nach dem Walzprozeß keinem weiteren Arbeitsgang unterzogen und verhalten sich daher ähnlich wie die unbehandelten Betonstähle. Alle kaltverformten, vergüteten und angelassenen Stähle verlieren jedoch ihre hohe Festigkeit schon bei geringen Temperaturerhöhungen. Sie gewinnen ihre Ausgangsfestigkeit nach Abkühlung nicht wieder zurück, weil durch die Erwärmung die Nachbehandlung rückgängig gemacht wird. In Bild 6 ist nach DIN 4102 Teil 4 (E) [12] der tempera-

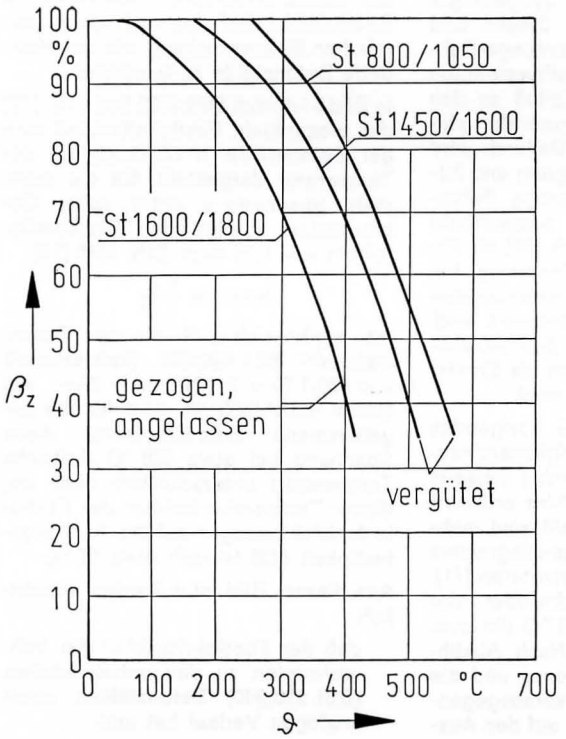


Bild 6.
Zugfestigkeit von Spannbetonstählen in Abhängigkeit von der Temperatur [12].

turbedingte prozentuale Festigkeitsabfall einiger nachbehandelter Spannbetonstähle dargestellt. Man erkennt den starken Festigkeitsabfall schon bei einer geringen thermischen Beanspruchung; bereits ab 100 °C ist eine nennenswerte Festigkeitsminderung zu beobachten. Da bei Spannbetonstählen die im Gebrauchszustand zulässigen Spannungen im allgemeinen auf die Zugfestigkeit β_Z bezogen werden, liegt den auf Bild 6 dargestellten Kurven die Zugfestigkeit bei Normaltemperatur zugrunde.

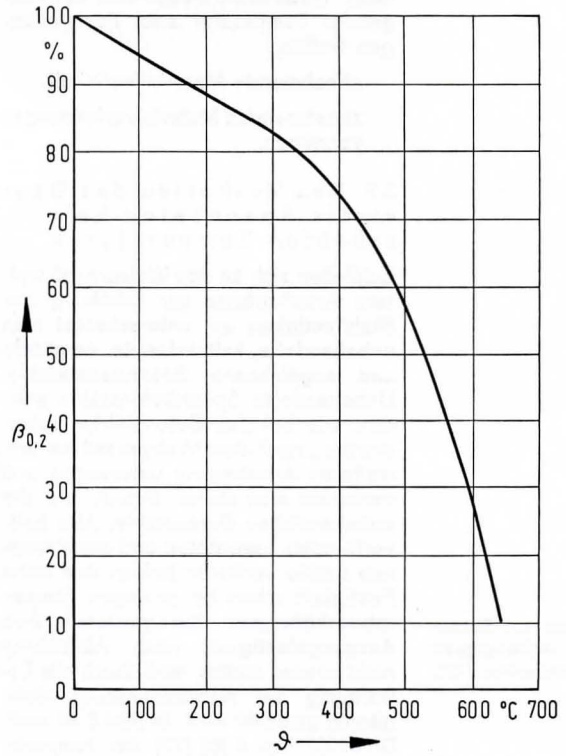


Bild 7.
Streckgrenze von Baustahl St 37 und St 52 in Abhängigkeit von der Temperatur [12].

3.3. Das Verhalten des Baustoffs Baustahl bei erhöhten Temperaturen

Das Tragverhalten von thermisch beanspruchten Stahlkonstruktionen wird bestimmt durch ihre im Brandverlauf erreichte maximale Temperatur. Liegt diese Temperatur oberhalb einer kritischen Grenze (z. B. nach [8], [12] bei I-Profilen i. a. 500 °C), so ist die Tragfähigkeit infolge Minderung der Festigkeits- und Elastizitätswerte nicht mehr gewährleistet. Nach [12] ist bei auf Biegung beanspruchten Baustählen die kritische Stahltemperatur die Temperatur, bei der die Fließgrenze des Stahls auf die im Bauteil vorhandene Stahlspannung absinkt. Wie schon im Abschnitt 3.1. ausgeführt, erleidet jeder Stahl eine Festigkeitsminderung, wenn er hohen Temperaturen ausgesetzt wird. In Bild 7 ist nach DIN 4102 Teil 4 (E) [12] der prozentuale Festigkeitsabfall der Baustähle St 37 und St 52 dargestellt.

Für die uneingeschränkte Wiederverwendung des beschädigten Bauwerkes ist es wichtig, daß nach dem Erkalten die Ausgangsfestigkeit der Stähle wieder vorhanden ist.

3.4. Das Verhalten des Baustoffs Holz bei erhöhten Temperaturen

Nach DIN 4102 Teil 1 [3] ist Holz in der Regel als normalentflammbarer Baustoff (Klasse B 2) einzureihen. Bei der Erwärmung von Holz setzt eine chemische Zersetzung der Holzsubstanz unter Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen ein. Eine genaue Temperaturgrenze, bei der die thermische Zersetzung beginnt, kann nicht festgelegt werden, d. h. eine Entzündungstemperatur von Holz als Materialkonstante im physikalischen Sinne gibt es nicht. Die Entzündung hängt wesentlich von der Erwärmungsdauer ab. Spontane Entzündung tritt ein, wenn das Holz eine Temperatur von 350 °C erreicht hat. Eine Entzündung des Holzes ist jedoch schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen möglich, vorausgesetzt, daß eine genügend lange Erwärmung erfolgt [13]. Versuche haben gezeigt, daß in der Praxis bei lang anhaltender Erwärmung eine Entzündung auch schon bei 120 °C möglich ist [14]. Nach der Zündung verläuft der Verbrennungsvorgang von Holz exotherm, d. h. unter Energieabgabe. Dadurch steigt die Reaktionsgeschwindigkeit zunächst auch ohne weitere äußere Energiezufuhr bis zu einem Grenzwert, der wesentlich von den äußeren Bedingungen abhängt. Mit zunehmender Brenndauer werden tiefere Holzschichten zersetzt, es bildet sich dabei eine langsam verbrennende Holzkohleschicht, die eine wärmedämmende Wirkung hat.

4. Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen aus Stahl- und Spannbeton, Baustahl und Holz bei Baustellenbränden sowie ihre Beurteilung

4.1. Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen aus Stahlbeton sowie ihre Beurteilung

Das Brandverhalten von Stahlbetonbauteilen läßt sich schwer unmittelbar aus den Stoffeigenschaften von Beton und Stahl ableiten [15], da es im wesentlichen von folgenden Umständen abhängt:

a) Querschnittsform und -größe

b) Art und Dauer der Brandbeanspruchung. In den Bauteilen entsteht ein Temperaturfeld, das zeitlich veränderlich ist; Bild 8 zeigt den unter entsprechender Diskretisierung nach der „finite difference method" und 90 Minuten Versuchsdauer numerisch ermittelten Temperaturverlauf im Querschnitt eines dreiseitig beflammten Stahlbetonbalkens nach der Einheits-Temperaturzeitkurve [16]. Da die thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) temperaturabhängig sind, ist aus Bild 8 abzuleiten, daß jedem Punkt des Querschnitts (x, y) zu jedem Zeitpunkt t andere Festigkeitswerte zuzuordnen sind.

c) Betoneigenschaften, Art der Zuschläge, Rohdichte, Festigkeit, Feuchtigkeitsgehalt.

d) Statisches System (wesentliche Beeinflussung der Schnittkraftverteilung).

e) Beton- bzw. Stahlspannungen, die zum Zeitpunkt der Brandeinwirkung vorhanden sind.

f) Betondeckung der Bewehrung, von der die Aufwärmgeschwindigkeit der Bewehrung abhängig ist.

g) Art und Güte der Betonstähle (unbehandelt oder kaltverformt).

Im Brandfall werden die Bauteile örtlich erwärmt, wobei es zu örtlichen oder großflächigen Betonabplatzungen bis zu etwa 6 cm Tiefe kommen kann. In diesen Bereichen wird die Bewehrung in der Regel freigelegt und der Feuerbeanspruchung ungeschützt ausgesetzt. Betonabplatzungen können durch den mineralogischen Aufbau der Zuschläge, durch Eigenspannungen, temperaturbedingte Zwängungsspannungen infolge Wasserdampfströmung verursacht werden [17]. Häufig treten aber auch Beschädigungen beim Löschen mit Wasser auf. Daher ist es bei der Begutachtung eines Brandschadens im allgemeinen schwer zu sagen, zu welchem Zeitpunkt Betonabplatzungen auftraten.

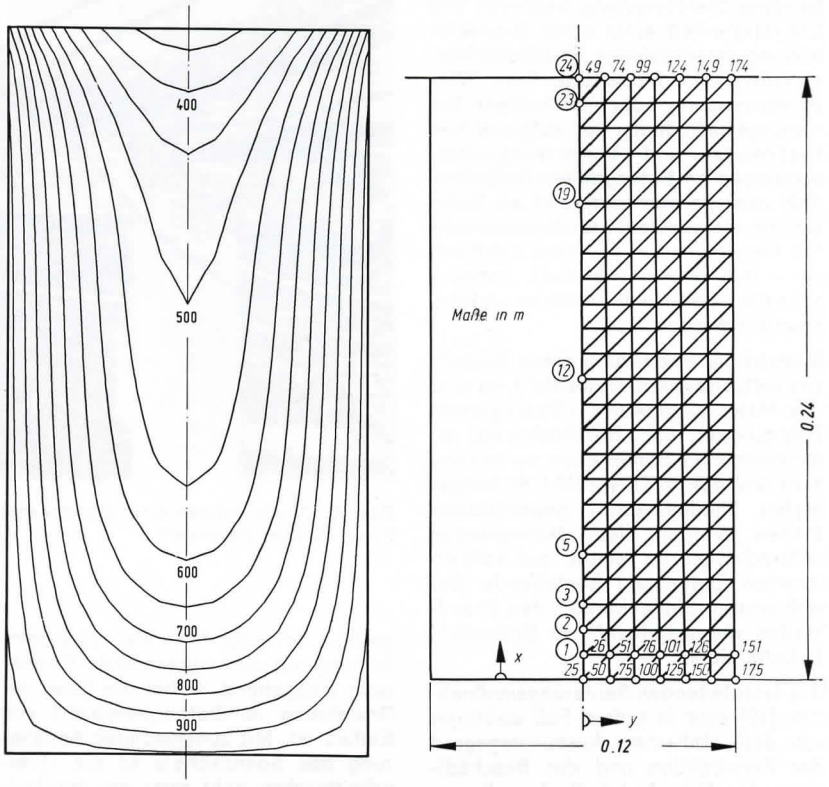


Bild 8. Temperaturverteilung in einem dreiseitig unter Normbrandbedingungen [8] beflammten 0,12 x 0,24 m großen Stahlbetonbalken nach 90 Minuten Versuchsdauer nach [16].

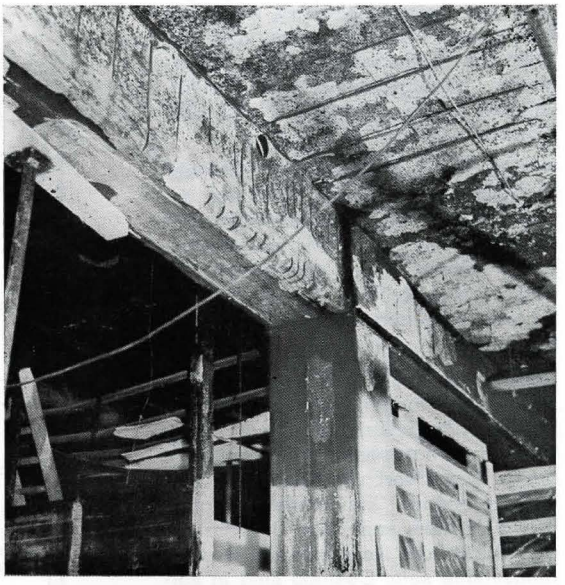


Bild 9.
Durch großflächige Betonabplatzungen bis zu 6 cm Tiefe nach Brandbeanspruchung beschädigte Stahlbetonkonstruktion.
Foto: Berliner Feuerwehr

Bild 9 zeigt beispielhaft eine durch Brandeinwirkung beschädigte Stahlbetonkonstruktion. Hier traten Abplatzungen sowohl an den Deckenplatten als auch an den Unterzügen auf.

Bild 10 zeigt das brandbeanspruchte Feld eines als Durchlaufträger ausgebildeten Unterzuges. Die sich bei Durchlaufsystemen ausbildende Schnittkraftumlagerung ist gut zu erkennen. Der Zeitpunkt des Versagens hängt sodann vom weiteren Plastifizierungsverhalten der oberen Bewehrung oder dem Versagen der unteren Druckzone ab.

Die Tragfähigkeit statisch bestimmt gelagerter, auf Biegung beanspruchter Bauteile wird im allgemeinen durch das Absinken der Streckgrenze der Bewehrung unter die tatsächlich vor-

handene Stahlspannung bestimmt. Die Standsicherheit einer durch Brandeinwirkung beschädigten Stahlbetonkonstruktion kann hinsichtlich ihrer Wiederverwendung oder notwendiger Sanierungsmaßnahmen nur aufgrund von Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen an Betonstählen (unbehandelt oder kaltverformt) und an Bohrkernen, die aus dem brandbeanspruchten Bereich und – als Vergleich hierzu – aus einem thermisch unbeanspruchten Bereich entnommen werden, beurteilt werden.

Besteht die Bewehrung eines Bauteils aus kaltverformtem Betonstahl, so sind die Materialkennwerte (Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung) an entnommenen Stahlproben zu bestimmen und den in DIN 1045 [18] festgelegten Mindestwerten gegenüberzustellen. Werden diese Normgrenzen unterschritten, so ist die aus kaltverformtem Betonstahl bestehende Bewehrung im Einflußbereich des Brandherdes wie unbehandelter Betonstahl zu behandeln.

Die einzuleitenden Sanierungsmaßnahmen [19] sind in jedem Fall abhängig von dem statischen Ausnutzungsgrad der Konstruktion und der Beschädigung des Betons. Ist die brandbeanspruchte Konstruktion mit unbehandeltem Stahl bewehrt, so sind die einzuleitenden Sanierungsmaßnahmen ausschließlich von dem Schädigungsgrad des Betons abhängig, da davon ausgegangen werden kann, daß der Stahl die Ausgangswerte der Streckgrenze und Zugfestigkeit nach der Abkühlung wieder erlangt hat (vgl. Abschnitt 3.1.).

Lediglich bei großflächigen Betonabplatzungen ist auch bei einer aus unbehandeltem Stahl bestehenden Bewehrung das Verformungsverhalten stichprobenartig zu überprüfen, da Stähle bei plötzlicher Abkühlung (Abschreckung) durch Löschwasser spröde werden.

Beim Verbrennen von Lagergütern oder Einrichtungen aus dem Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC) wird gasförmiger Chlorwasserstoff freigesetzt, der in Gegenwart von Feuchtigkeit zu Salzsäurenebel kondensieren kann. Die Salzsäure kann die Ursache für eine zusätzliche Korrosion der Bewehrungsstähle sein. Deshalb sind in solchen Fällen Untersuchungen der Stahloberflächen auf das Vorhandensein von Chlorionen empfehlenswert [20].

4.2. Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen aus Spannbeton sowie ihre Beurteilung

Die erhöhte Biegetragfähigkeit vorgespannter Bauteile bleibt prinzipiell auch bei Brandbeanspruchung erhalten. Wie schon im Abschnitt 4.1. ausgeführt, ist auch hier die Wärmeeinwirkung auf die vorgespannte Bewehrung maßgebend, wobei die Lage der Bewehrung im Betonquerschnitt von Einfluß ist. Mit zunehmender Annäherung des Spannkabels an die Querschnittsachse geht zwar das traglasterhöhende Vorspannmoment zurück, doch bleibt dafür im Brandfall infolge verzögerter Erwärmung die Vorspannkraft relativ lange voll erhalten [21].

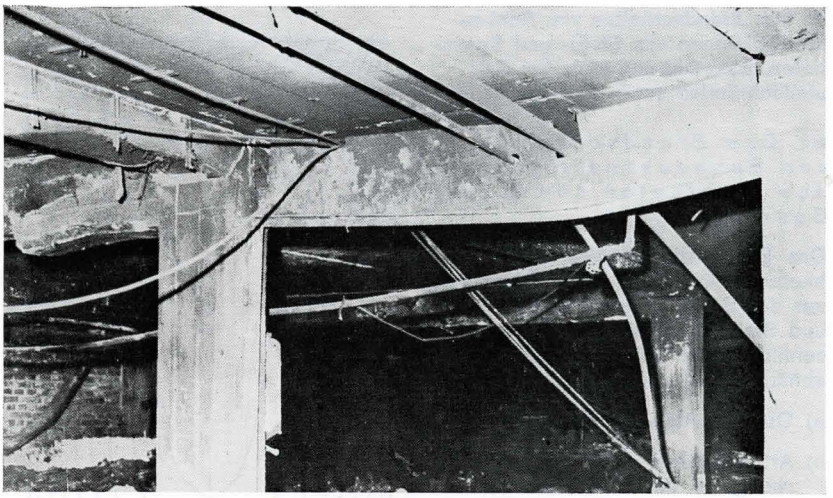


Bild 10. Verformungen einer brandbeanspruchten Stahlbetonkonstruktion.
Foto: Berliner Feuerwehr

Von Interesse für die vorliegende Betrachtung sind in der Regel nur Bauteile, die im Hochbau oder Industriebau für Dachausbildungen o. ä. in Frage kommen (Faltwerke, Schalen u. dergl.). Ihrem günstigen Tragverhalten entsprechend werden diese Bauteile mit geringen Querschnitten ausgeführt. Bei diesen dünnen Betonquerschnitten und den bei räumlichen Flächentragwerken in der Regel hohen

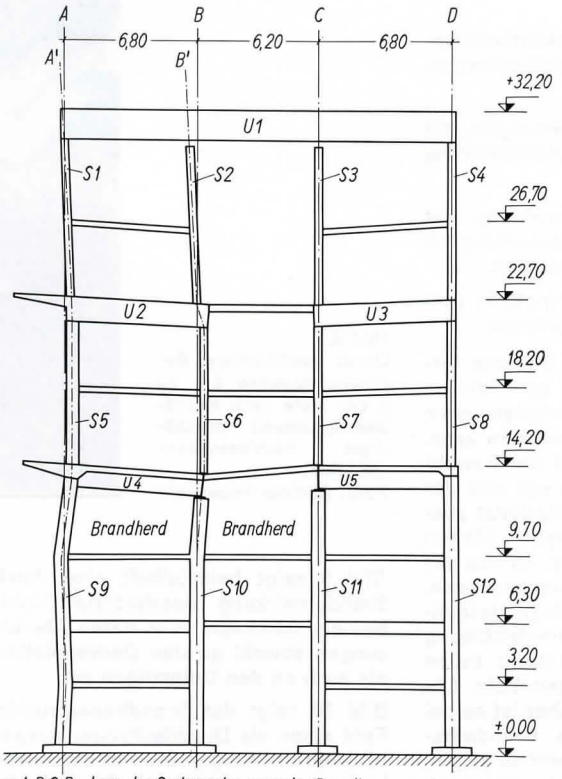


Bild 11.
Verformungen einer ungeschützten brandbeanspruchten Stahlskelettkonstruktion.

Betondruckspannungen besteht die Gefahr plötzlicher explosionsartiger Abplatzungen großer Betonflächen. Da hierbei die Bewehrung freigelegt wird, kann das Bauteilversagen unmittelbar danach eintreten. Ist an dem Brandgeschehen Polyvinylchlorid (PVC) beteiligt, gelten die vorgenannten Aussagen entsprechend.

4.3. Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen aus Baustahl sowie ihre Beurteilung

Eine ungeschützte Stahlkonstruktion besitzt nur eine geringe Feuerwiderstandsdauer. Unter Einwirkung von Bränden gemäß der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 [8] werden je nach Stahlprofil bei Stützen Feuerwiderstandsdauern zwischen 10 und 25 Minuten [22], bei Trägern Feuerwiderstandsdauern zwischen 8 und 17 Minuten [23] erreicht. Lediglich außerordentlich kompakte Stahlprofile können höhere Feuerwiderstandsdauern erreichen [16]. Beispielsweise haben Vierkantvollstützen von 20 cm Kantenlänge nach [22] eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 30 Minuten. Die im Brand eintretenden Beschädigungen werden damit weitgehend durch den Umfang der bereits eingebauten Bekleidungen und anderen baulichen Maßnahmen bestimmt.

Bild 11 zeigt die Verformung einer ungeschützten brandbeanspruchten Stahlkonstruktion. Durch die dabei auftretenden beträchtlichen Zusatzspannungen können die Verbindungsmittel (Schrauben, Niete und Schweißnähte) zerstört werden. Niete und Schrauben können abgeschert werden, Schweißverbindungen aufplatzen. Da der Stahl nach dem Erkalten seine Ausgangsfestigkeit wieder erhält, beschränkt sich die Begutachtung des Brandschadens in der Regel auf die sorgfältige Vermessung der Konstruktion. Das Ziel dabei ist, Verschiebungen der Systemachsen und Verformungen einzelner Konstruktionsglieder festzustellen. Die Sanierungsmaßnahmen beschränken sich bei geringen Verformungen auf das Auswechseln beschädigter Teile. Bilder 12 und 13 illustrieren anschaulich, welche Verformungen bei brandbeanspruchten Stahlkonstruktionen auftreten können.

4.4. Das Brandverhalten von Rohbaukonstruktionen aus Holz sowie ihre Beurteilung

Durch die sich bildende Holzkohleschicht (Abschnitt 3.4.) erleidet das Holzbauteil einen Substanzverlust, d. h., es verliert zunehmend seine Tragfähigkeit, bis es seine Aufgabe im Bauwerk nicht mehr erfüllen kann.

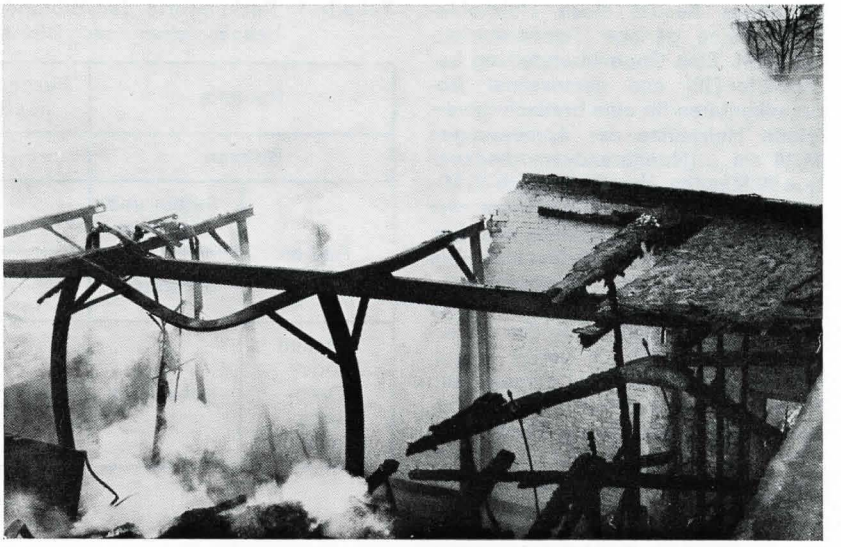


Bild 12. Verformungen einer ungeschützten brandbeanspruchten Stahlkonstruktion.
Foto: Berliner Feuerwehr

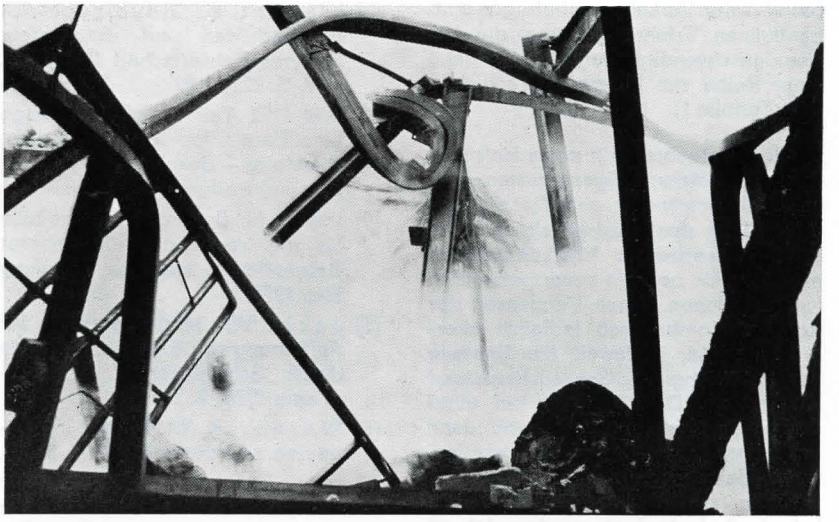


Bild 13. Stahlverformungen während einer Brandbeanspruchung.
Foto: Berliner Feuerwehr

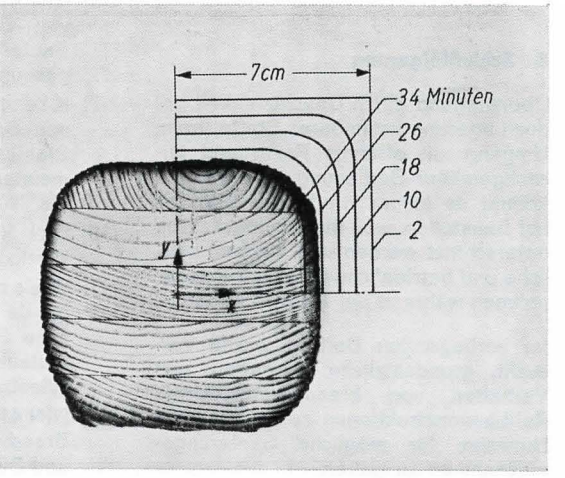


Bild 14.
Gegenüberstellung berechneter [16] und gemessener Abbrandkonturen einer brettschichtverleimten Holzstütze 14/14 cm.

Allerdings besitzt diese Holzkohleschicht eine geringe Temperaturleitfähigkeit. Eine Gegenüberstellung berechneter [16] und gemessener Abbrandkonturen für eine brettschichtverleimte Holzstütze der Abmessungen 14/14 cm (Normbrandversuchsdauer $t_K = 29$ Minuten, abgelöscht nach 35 Minuten) zeigt Bild 14. Man erkennt eine sehr scharfe Trennungslinie zwischen zerstörtem und unzerstörtem Holz. Die Grenze ist, wie alle Untersuchungen an Holz gezeigt haben, bis auf einige Millimeter zu lokalisieren. Der unzerstörte Restquerschnitt behält wegen der niedrigen auf ihn eingewirkten Temperaturen praktisch seine Eigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul). Außerdem erfolgt eine Wanderung der Feuchtigkeit in das Innere des Holzes, so daß die Austrocknung in den Randzonen des unzerstörten Holzes mit einem Feuchtigkeitsanstieg im Kern verbunden ist. Die eingetretenen Zerstörungen an Holzbauteilen lassen sich eindeutig mit Hilfe der abgebrannten Schichtdicken, kurz Abbrand- oder Verkohlungstiefe genannt, bestimmen. Erfahrungen über die Abbrandgeschwindigkeiten liegen aus einer Reihe von Normbrandversuchen vor (Tabelle 1).

Da der Restquerschnitt eines Holzbauteils seine Materialeigenschaften nicht wesentlich verändert, gestaltet sich die Beurteilung des Tragverhaltens einer brandbeanspruchten Holzkonstruktion einfacher als bei den zuvor genannten Konstruktionen. Durch Vermessen der Restquerschnitte muß lediglich überprüft werden, inwieweit die Bauteile der Belastung im Gebrauchszustand standhalten. Der Aufwand bei einer Sanierung des Schadens kann dann besonders klein gehalten werden, wenn Beschränkungen der späteren Nutzung (z. B. Verminderung der Verkehrslast) festgelegt werden. Ist an dem Brandgeschehen Polyvinylchlorid beteiligt, muß das Chlorid auf den beaufschlagten Flächen in der Regel durch entsprechende Maßnahmen neutralisiert werden.

5. Schlußfolgerung

Überwiegend durch Unachtsamkeit bei der Lagerung brennbarer Stoffe, beim Umgang mit offenem Feuer und unsachgemäßer Bedienung von Geräten kommt es immer wieder zu Bränden auf Baustellen, weil die Brandgefahren unterschätzt werden und vielfach bauliche und betriebliche Brandschutzmaßnahmen während der Bauzeit fehlen.

Im vorliegenden Beitrag wurde versucht, grundsätzliche Aussagen zum Verhalten von brandbeanspruchten Rohbaukonstruktionen zu machen und Hinweise für mögliche Sanierungsmaßnahmen zu geben.

Tabelle 1: Rechenwerte der Abbrandgeschwindigkeit für Nadelholz bei Brandbeanspruchung nach DIN 4102 Teil 2 [8]

Bauteile		Rechenwert für die Abbrandgeschwindigkeit mm/min	Angabe nach
Stützen		0,7	[16; 24]
Balken	Seiten und Oberseite	0,8	[25]
	Unterseite	1,1	
Decken oder Dachschalungen	Unterseite	1,1	

Literatur

[1] Bau-Berufsgenossenschaft: Merkblatt Brandschutz bei Bauarbeiten. Abruf-Nr. 511.

[2] Klement, E.; Knublauch, E.: Brandschäden auf Baustellen. Berliner Bauwirtschaft 23 (1972), H. 7, S. 222–228.

[3] DIN 4102 Teil 1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Baustoffe – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

[4] Institut für Bautechnik: Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau. Fassung Mai 1978.

[5] Jach, W.: Modellversuche zur Aufklärung von Brandauslösungen durch Schweißperlen. schadenprisma 2/78, S. 23 ff.

[6] Werner, K.-W.: Brände in Rohbauten. schadenprisma 4/74, S. 1 ff.

[7] Butcher, E. G.; Law, M.: Comparison between furnace tests and experimental fires. Paper 4 in Symposium No. 2, Behaviour of structural steel in fire; London 1968, Her Majesty's Stationary Office.

[8] DIN 4102 Teil 2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.

[9] Klement, E.: Brandverhalten von Bauteilen aus Baustahl und Stahlbeton. Der Deutsche Baumeister BDB 34 (1973), H. 5, S. 386 bis 390.

[10] DIN 50 145: Prüfung metallischer Werkstoffe. Zugversuch.

[11] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 3: Metallische Stoffe – Stahl, Aluminium, Metallkorrosion. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1973.

[12] DIN 4102 Teil 4 (Entwurf 3/1978): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.

[13] Knublauch, E.: Einführung in den baulichen Brandschutz. Werner – Ingenieur-Texte 59, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1978.

[14] Teichgräber, R.: Kritische Temperatur der Brennbarkeit von Holz und Holzwerkstoffen. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH), 1973, Heft 8.

[15] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Betonverlag Düsseldorf (erscheint voraussichtlich Oktober 1979).

[16] Rudolphi, R.: Zur rechnerischen Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen, Dissertation, TU Berlin, 1979.

[17] Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1972), Heft 23.

[18] DIN 1045. Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung.

[19] Ruffert, G.: Brandschäden an Betonbauten: Feststellung, Beurteilung, Sanierung. Beton 26 (1976), H. 7, S. 239–243.

[20] Reiter, C.: Umfang, Sanierung und Vorbeugung von PVC-Folgeschäden an Gebäuden. schadenprisma 1/74, S. 4 ff.

[21] Klingsch, W.: Das Brandverhalten von Stahlbeton-Flächentragwerken. DBZ 24 (1977), H. 4, S. 519–521.

[22] Knublauch, E.; Rudolphi, R.; Stanke, J.: Theoretische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlstützen. Der Stahlbau 43 (1974). 1. Teil: Berechnung der Stahltemperatur von Stahl-

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, Unterkommission 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. Elekt onenmikroskopische 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.

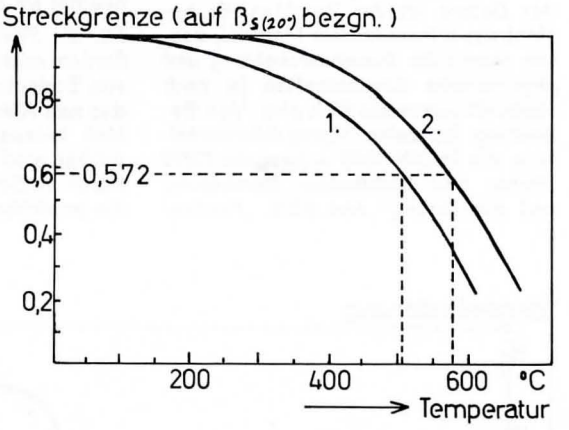


Bild 1.
Die Streckgrenze (bezogen auf den Wert bei 20° C) von Betonstählen in Abhängigkeit von der Temperatur.
1. BSt 420/450 und BSt 500/550. 2. BSt 220/340.

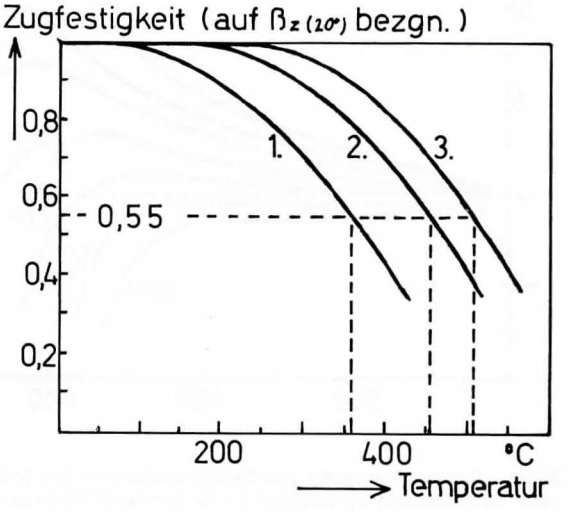


Bild 2.
Die Zugfestigkeit (bezogen auf den Wert bei 20° C) von Spannstählen in Abhängigkeit von der Temperatur.
1. St 1600/1800. 2. St 1400/1600. 3. St 800/1050.