

Heiße Bemessung - Ein Überblick

Dipl.-Ing.(FH) Stefan Maly MSc, Dr.-Ing. Casimir Katz, SOFiSTiK AG

Zusammenfassung: Die Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen mit Hilfe von Ingenieursoftware ist in der letzten Zeit sehr stark in den Fokus der Fachöffentlichkeit getreten. Zum einen da die Unzulänglichkeit bisher verwendeter Verfahren unter dem erhöhten Anspruch an die Sicherheit der Tragwerke erkennbar wurde, zum anderen da während der Übergangsphase in der nationalen Normung einige Unklarheiten sowie Unsicherheiten in der Anwendbarkeit auftraten. Dieser Beitrag soll einen allgemeinen Überblick über die normativen und auch physikalischen Grundlagen der Brandbemessung, sowie die Funktionsweise der allgemeinen SOFiSTiK Software und des Programmes COLUMN zur heißen Bemessung von Stützen nach DIN EN 1992-1-2 geben.

Summary: Structural fire design using analysis software is in the focus of strong interest as common simplified design methods proved unsatisfactory for providing structural safety to increased demands. Also as national code and application documents in the transition phase towards the Eurocodes were ambiguous and caused uncertainty in applicability. This paper shall give a general overview of design code and physical background for structural fire design, as well as an explanation of respective functionality within the SOFiSTiK software and the program COLUMN for fire design according to DIN EN 1992-1-2.

1 EINFÜHRUNG

Die außergewöhnlichen Bemessungszustände Feuer und Explosion sind in den letzten Jahren immer mehr in den Vordergrund getreten. Nicht zuletzt der Kollaps des WTC hat gezeigt, dass man bei solchen Belastungen etwas mehr Aufwand für den Nachweis treiben sollte, wenn man wirklich sichere Bauwerke haben möchte. Trotzdem wird der Brandschutz von veralteten deskriptiven Baubestimmungen beherrscht, die im Wesentlichen von Feuerbeständigkeiten ausgehen. Was für die Tragwerksplanung selbstverständlich ist, nämlich eine detaillierte Bemessung auf Bruch und Gebrauchszustände ist beim Brandschutz immer noch die Ausnahme in Deutschland. Dass die Schweizer [8] hier weiter sind verwundert nicht, aber auch andere Länder (z.B. Großbritannien) sind uns hier deutlich voraus.

Zitat der DIN 4102-2

6.1 Prüfeinrichtungen und Probekörper

- (1) ... Bei den Prüfungen sind mindestens zwei gleichartige Probekörper der Prüfung zu unterziehen.
- (2) Sie müssen in ihren Abmessungen, ihrer Konstruktion, ihrem Werkstoff, ihrer Ausführungs- und Einbauart der praktischen Anwendung entsprechen. Bauteile, die nicht in den Abmessungen wie bei der praktischen Anwendung geprüft werden können, müssen mindestens in folgenden Abmessungen dem Feuer ausgesetzt werden: ... (z.B. Stützen und Pfeiler: 3,0 m Höhe)
- (3) Können auf Biegung oder Biegung mit Längskraft beanspruchte Bauteile nicht unter der rechnerisch verlangten Gebrauchslast geprüft werden, so ist zur Prüfung ein noch prüfbarer Vergleichskörper herzustellen.

Entgegen dem § 3 Absatz 3 der Musterbauordnung, der besagt, dass von den Technischen Baubestimmungen abgewichen werden kann, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen des Absatzes 1 erfüllt werden, findet man in Veröffentlichungen zum Brandschutz Aussagen wie:

„Neben dem Mischungsverbot von DIN und Eurocode-Normen, dürfen auch keine DIN-Normen unterschiedlicher Normengenerationen zusammen angewendet werden. Das bedeutet für die brandschutztechnische Bemessung nach DIN 4102 Teil 4 (03.94), dass die für Gebrauchslastfälle geltenden neuen Konstruktionsnormen nur unter Zuhilfenahme der Neuen Norm DIN 4102 Teil 22 verwendet werden dürfen. Mit der Streichung des Eurocodes 2 in der Liste der Technischen Baubestimmungen ist auch keine Bemessung nach Eurocode Teil 1-2 mehr möglich.“

Im letzten Jahr wurde das Thema dann wirklich heiß, denn der praktische Ingenieur sah sich vor der Situation, dass die bisherige Praxis, den Brandschutz per Tabellenwerk zu erledigen nicht mehr funktionierte. Die kleine Fußnote, dass die Tabellen nicht unbeschränkt gültig sind, war jahrelang übersehen worden, jede Art von Berechnung war „verboten“.

Die Zustimmung im Einzelfall nach § 21 der Musterbauordnung gilt aber nur für Bauverfahren, nicht für Bemessungsalgorithmen! Es gab eine Reihe von Vorschriften, die anstatt ein bestimmtes Rechenverfahren ungeregelt zu lassen, dieses gleich verboten haben. Mit Erscheinen der neuen EN zum Brandschutz im Jahre 2006 stehen wir nun immer noch vor dem Problem, dass es offizielle Vorschriften gibt, die nationalen Anwendungsdokumente noch nicht vorliegen, aber Bestrebungen erkennbar sind, nur einen kleinen Teil der Methoden für die Praxis zu erlauben.

Die bayerische OBB wie auch andere haben diesem unerträglichem Sachverhalt denn auch bereits in einem Rundschreiben Rechnung getragen und den ENV 1992-1-2 inklusive des dazu gehörigen Nationalen Anwendungsdokuments aus dem Jahre 2000 nachträglich wieder eingeführt.

Kein ernsthafter Ingenieur käme auf die Idee, seine Statik nur nach Tabellenwerken zu erstellen, dies wäre die Bankrott-Erklärung unserer Ingenieurausbildung. Glücklicherweise gab es immer Ingenieure die sich getraut haben, auch mal neue genauere Verfahren anzuwenden, sonst würden wir heute noch in Höhlen wohnen.

Warum also nicht beim Brandschutz ?

Die neue Brandschutz-Philosophie ist geprägt von

- Schutzzielen
- Brandwirkungen
- Brandschutzkonzepten und Maßnahmen

Prof Schneider von der TU Wien [1] hat eine Übersicht der Verfahren angegeben:



Abbildung 1: Übersicht der Brandschutzkonzepte

Wobei der Typ A die Nachweise durch Einhaltung von Verordnungen, Typ B Brandsimulationen mit rechnerischen Nachweisen und der Typ C die Nachweise mit eingeführten Rechenverfahren beschreibt. Die Ingenieurmethoden (Fire Safety Engineering) umfassen dabei unter anderem:

- Berechnung der Brandentwicklung in Gebäuden
- Berechnung der Rauchgasstömungen
- Berechnung der Brandeinwirkung auf Personen und Bauteile
- Widerstand von Konstruktionen gegen Brandeinwirkung
- Nachweis der Wirksamkeit von Entrauchungen

- Berechnung der Evakuierungsströme
- Beurteilung der Brandbekämpfung

Angaben dazu sind z.B. in den Eurocodes aber auch im Anhang 1 der M IndBauRL zu finden man benötigt:

- Art und Menge der brennbaren Stoffe sowie Brandbelastung
- Physikalische Werte der brennbaren Stoffe (Heizwert, Abbrandgeschwindigkeit etc.)
- Physikalische Werte der Bauteile (Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitung etc.)
- Angaben zum Brandherd

Die Wirksamkeit des Brandschutzes ergibt sich aus

- Grenzwerte der Rauchgasschicht
- Einhaltung der Tragfähigkeit
- Einhaltung von Grenzwerten der Wärmestrahlung

Die Berechnung darf nur mit anerkannten Rechenverfahren erfolgen, die Verfahren müssen also veröffentlicht und validiert sein und den zeitlichen Verlauf des Brandgeschehens beschreiben können [2]. Die Nachweise an sich sind im Eurocode geregelt:

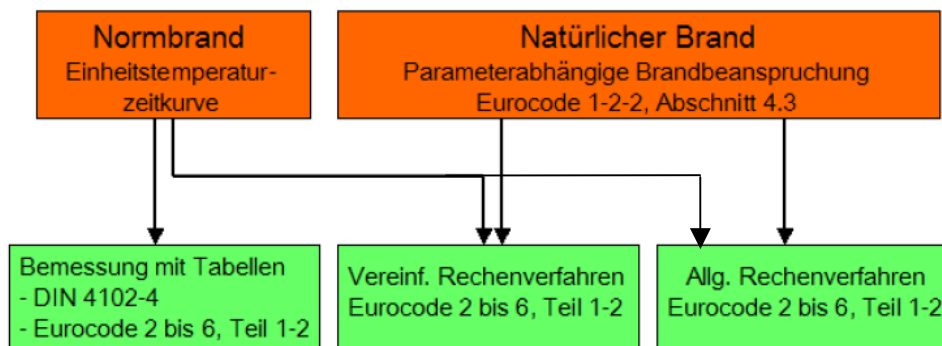


Abbildung 2: Art der Nachweise

Im letzten Jahr sind massive Neuentwicklungen bei den Rechenverfahren zu verzeichnen, die es jetzt erlauben, den statischen Nachweis geschlossen zu führen. Die vereinfachten Verfahren sind eigentlich unwichtig, da sie ohne Computer kaum anzuwenden sind und wenn man schon einen Computer hat, kann man eigentlich auch gleich genauer nach dem allgemeinen Rechenverfahren arbeiten. Für die Anwendung der ganz allgemeinen Methoden (z.B. Naturbrand) scheint die Zeit in Deutschland noch nicht reif zu sein.

2 EIN BEISPIEL

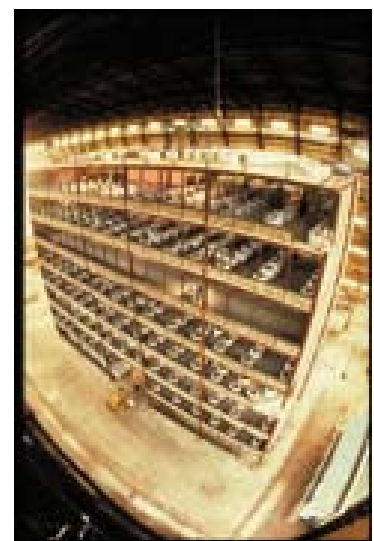
Die Planung eines Freizeitparks sah eine leichte, bewegliche Einhausung aus Aluminium vor, die in dieser Form als komplettes System am Markt im Rahmen des vorgesehenen Investitionsvolumens erhältlich war. Ein klassischer Brandschutznachweis für dieses System aus Aluminium war hier nicht möglich.



Abbildung 3: Beispielprojekt Freizeitpark

Da genügend Rettungsausgänge vorhanden waren, konnte man sich darauf verständigen, eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten als ausreichend anzusehen. Für den Nachweis der Aluminium-Struktur benötigt man dazu aber die realen Temperaturen des Naturbrands.

Im Verbundbau haben sich nach den umfangreichen Versuchen in England in den sogenannten Cardington-Tests durch British Steel [6] im Jahre 1998 die Erkenntnis durchgesetzt, dass man längst nicht alle Teile schützen muss und insbesondere die Resttragfähigkeit der deformierten Struktur sinnvoll auszunutzen ist. Daraus wurde die sogenannte Bailey-Methode entwickelt, die in der SCI-P 288 Eingang in die Rechenpraxis gefunden hat (www.bauen-mit-stahl.de/brandschutz.htm). Mensinger hat auf dem Stahlbauseminar 2006 der FH Biberach über Kosteneinsparungen von 13% bei realen Projekten berichtet.



Ansonsten sind verfeinerte Methoden z.B. im Tunnelbau immer öfter anzufinden [7].

3 NACHWEIS NACH DIN 4102 TEIL 22

Für Stützen musste bisher ein expliziter Brandschutznachweis unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades nur dann gemacht werden, wenn die Abmessungen kleiner als die Grenzabmessungen der Tab. 31 der DIN 4102-4 waren. Nach derzeitigem Stand ist ein rechnerischer Nachweis in allen Fällen erforderlich. Schäfer schrieb dazu in den VPI-Technews 02/05 [10]:

„Nach dem Einleitungstext der DIN 4102-22:2004-11 wird der Anwender zukünftig, zumindest während der Übergangsphase der neuen nationalen Bemessungsnormen, grundsätzlich drei Möglichkeiten des Nachweises haben: Bemessung bei Umgebungstemperatur mit Spannungsnachweis wie bisher und Benutzung von DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11 für die Bemessung im Brandfall. Diese Möglichkeit kommt für die Bemessung von Betonbauteilen nach DIN 1045-1 nicht mehr in Frage, die Übergangszeit ist abgelaufen. Bemessung bei Umgebungstemperatur mit überarbeiteter nationaler Bemessungsnorm auf der Basis von Teilsicherheitsbeiwerten (DIN 1045-1 mit DIN 1055-100) und einer Bemessung im Brandfall nach DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11, zusammen mit DIN 4102-22:2004-11. Bemessung nach den europäischen Bemessungsnormen (Eurocode) sowohl bei Umgebungstemperatur als auch für den Brandfall. Dieser Vorgehensweise entspricht für Betonbauteile die Nachweiskombination aus DIN 1045-1:2001-07 für die Kaltbemessung und DIN V ENV 1992-1-2 zusammen mit der DIBt-Richtlinie für die Brandbemessung.“

Zusätzlich zum Nachweis der Kaltbemessung nach DIN 1045-1 ist nach DIN 4102-22 der Nachweis zu erbringen, dass

$$E_{d,A} = E_{d,fi}(t) \leq R_{d,fi}(t)$$

Dabei sind mit $E_{d,A}$ die Einwirkungen nach DIN 1055-100 für die außergewöhnliche Bemessungssituation zu erfassen:

$$E_{d,A} = E \{ \sum \gamma_{GA,j} G_{k,j} | \gamma_{PA} P_k | A_d | \psi_{1,i} | Q_{k,i} | \sum \psi_{2,i} | Q_{k,i} \}$$

Der Bauteilwiderstand $R_{d,fi}(t)$ wird unter Berücksichtigung der DIN 4102-22 über die Klassifizierungstabellen der DIN 4102-4 definiert. Im Betonkalender 2005/II ist das Vorgehen erläutert und mit Beispielen verdeutlicht. In der 10. Fassung der Musterliste des dibt wurde im Februar 2006 eine überarbeitete Tabelle 31 veröffentlicht, die aber in vielen Fällen gar nicht angewendet werden darf.

4 NACHWEISE NACH DEN EUROCODES

Vereinfachte Rechenverfahren sind in den entsprechenden Passagen der Eurocodes angegeben, die in der Regel mit reduzierten Querschnittsflächen und Festigkeiten arbeiten. Eine genaue Abgrenzung zu den allgemeinen Verfahren ist aber nur schwer möglich.

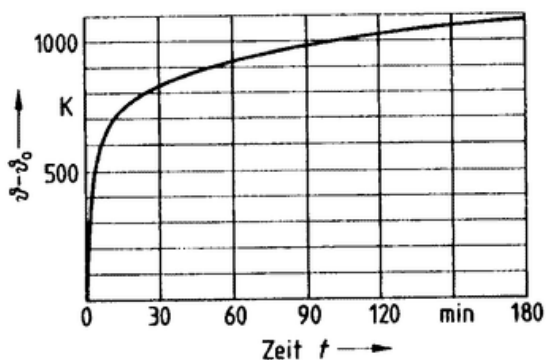
Allgemeine Verfahren werden getrennt in eine thermische und eine mechanische Analyse.

Bei der thermischen Analyse werden die Temperaturen im Bauteilquerschnitt berechnet. Dabei wird von den Gastemperaturen im Brandraum ausgegangen, die entweder nach Eurocode 1 Teil 2-2 Abs. 4.2 vorgegeben oder aus den realen Brandszenarien ermittelt werden. Die Verwendung von temperaturabhängigen Materialeigenschaften und der korrekten Modellierung aller Strahlungseffekte ist dabei selbstverständlich erforderlich.

Im Rahmen der mechanischen Analyse werden das Trag- und Verformungsverhalten der brandbeanspruchten Bauteile berechnet. Das Tragverhalten nach dem Abkühlen des Bauwerks braucht im allgemeinen nicht berücksichtigt werden, vor allem in der englischen Literatur findet man aber Hinweise auf maßgebende Beanspruchungen auch für diese Phase.

5 BRANDSIMULATION

Der Temperaturverlauf der Gase im Brandraum kann mit Einheits-Temperaturkurven oder Naturbrandkurven beschrieben werden. Normalerweise wird man sich mit solchen Kurven begnügen und für diesen angenommenen Temperaturverlauf die Temperaturen in den Bauteilen ermitteln und damit eine sogenannte heiße Bemessung durchführen.



$$T = 20 + 345 \cdot \log^{10} (8 \cdot t + 1.0)$$

Abbildung 4: Einheitstemperaturkurve

Außer der ETK sieht der Eurocode noch eine „Außenbrandkurve“ sowie eine „Hydrocarbon-Kurve“ vor. Im Anhang A des EN 1991-1-2 stehen dann auf zwei Seiten alle Formeln die man benötigt um die Entwicklung eines Naturbrandes zu beschreiben. In der Schweiz gibt es bereits Bemühungen, die Naturbrandkurven zu klassifizieren.

6 TEMPERATURVERTEILUNG

In einem nächsten Schritt ist die Temperaturverteilung im Bauteil unter dieser Umgebungstemperatur zu berechnen. Für die Berechnung der Temperaturen im Bauwerk muss man die Differentialgleichung der Temperaturleitung lösen.

Eine Wärmeleitung kann nur durch ein Temperaturgefälle zwischen zwei Punkten und ein sie verbindendes, die Wärme leitendes, Element entstehen. Die Energiebilanz besagt, dass für jedes Gebiet die Summe der ein- und austretenden Wärmemengen gleich der Summe der im Gebiet liegenden Wärmequellen, Senken sowie der Änderung des Wärmeinhalts in diesem Gebiet ist.

$$\operatorname{div} v = q - \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

wobei

v = Vektor der Wärmestromdichte [W/m²]

q = Leistungsdichte der Quellen und Senken [W/m³]

ρ = Dichte des betrachteten Stoffes [kg/m³]

c_p = spezifische Wärmekapazität [Wsec/K·kg]

Die Fouriergleichung verknüpft das Temperaturgefälle $\operatorname{grad} T$ mit den sich einstellenden Wärmestromdichten über den Wärmeleitfähigkeitstensor K . Es lautet nach Biot/Fourier

$$v = -K \cdot \operatorname{grad} T$$

Setzt man die Fouriergleichung in die Energiebilanz ein und fasst $\rho \cdot c_p$ zu einem Speicherkoeffizienten S zusammen, so erhält man die Wärmeleitungsgleichung des Problems.

$$\operatorname{div}[-K \cdot \operatorname{grad} s] = q - S \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

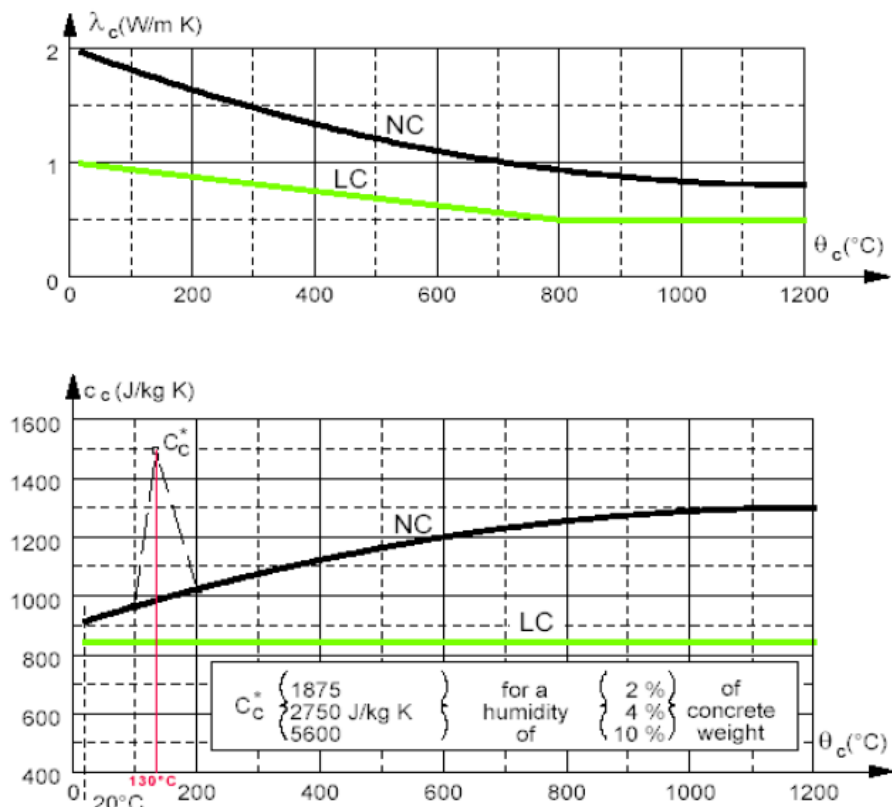
Zur Lösung benötigt man die thermischen Eigenschaften der Materialien, die wiederum von der Temperatur abhängen, sowie die Übergangswiderstände α . Beim Wärmeübergang wird der größte Teil durch einen zusätzlichen Term, die Boltzmann-Strahlungsbedingung beschrieben:

$$q = \alpha \cdot (T_a - T_e) + \varepsilon \cdot k \cdot (T_a^4 - T_e^4)$$

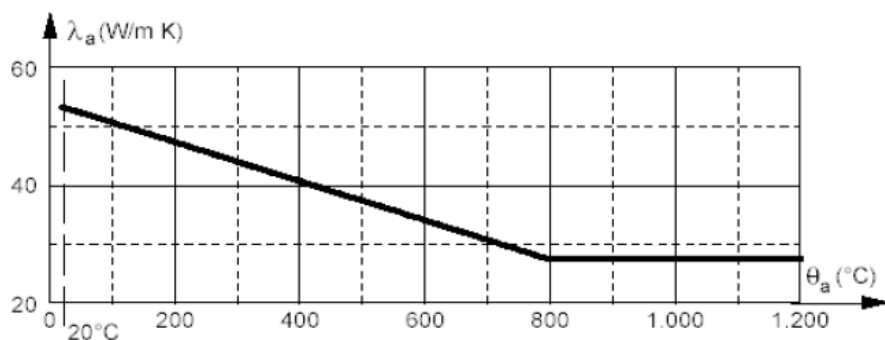
Bei den Materialeigenschaften des Betons sollte man auch das Verdampfen des Porenwassers berücksichtigen, dadurch ergibt sich eine gewisse Verzögerung des Temperaturanstiegs. Auch beim Stahl und natürlich beim Holz gibt es Temperaturen bei denen eine erhöhte Wärmeaufnahme auftritt.

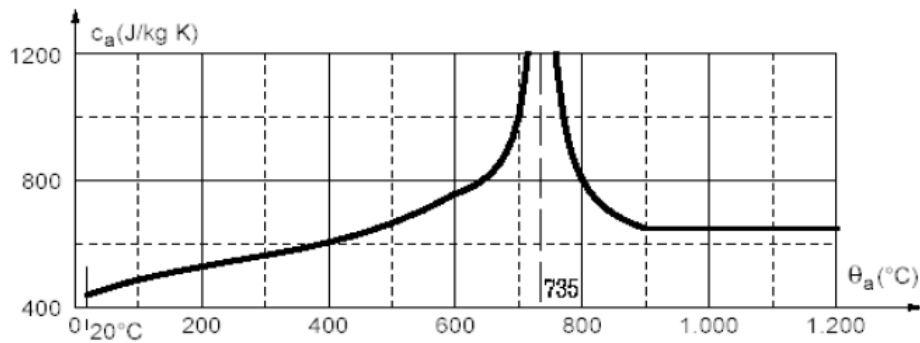
Alle diese Parameter findet man in den Eurocodes. In der aktuellen Version haben sich die Formen geringfügig verändert (z.B. Porenwasser-Verdampfung), die Werte für den Leichtbeton sind inzwischen nicht mehr angegeben.

Für Beton:

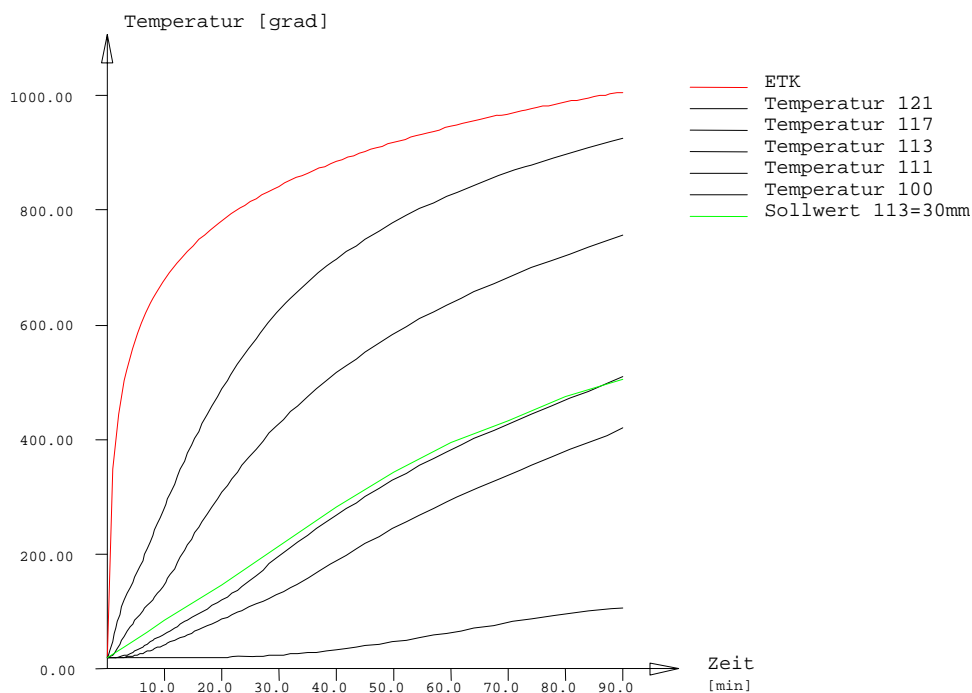


Für Stahl:





Eine Referenzlösung für einen quadratischen Stützenquerschnitt findet man z.B. im Betonkalender:



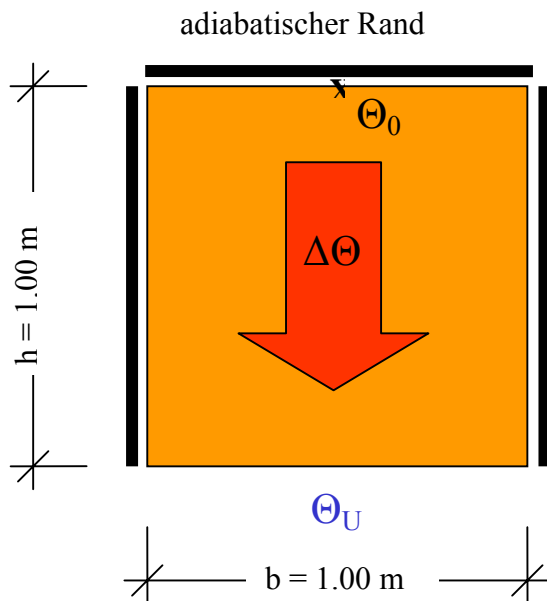
Aber auch in den Anhängen der Eurocodes und anderen Bemessungshilfen sind die Temperaturverteilungen für Muster-Querschnitte angegeben. Für andere Querschnitte muss man eine instationäre Berechnung durchführen, die insgesamt nicht allzu sensibel ist, bei der aber doch einige Punkte zu beachten sind:

Da man die Temperatur nach 30, 60 oder 90 Minuten benötigt, wird man versuchen, mit einem relativ großen Zeitschritt zu rechnen (z.B. eine Minute). Dann benötigt man aber ein stabiles implizites Integrationsverfahren (z.B. Crank-Nicholson), Explizite Verfahren benötigen sehr kleine Zeitschritte. Andererseits passiert in den ersten Minuten eines Brandes besonders viel, so dass ein adaptiver Zeitschritt empfohlen wird. Bei massiven Bauteilen kann es passieren, dass sich das

Bauteil kaum erwärmt, bzw. dass die Temperaturfront zu langsam ins Rechengbiet vorwärts schreitet.

7 VALIDIERUNG WÄRMETRANSPORT MIT HYDRA

Im diesem Validationsbeispiel wird die Wärmeübertragung bei der Abkühlung eines Festkörpers überprüft. Das Beispiel wurde veröffentlicht in einem Vortrag von Herrn Dr. Richter an der TU in Kaiserslautern [16].



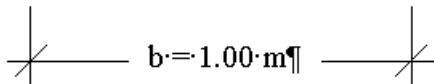
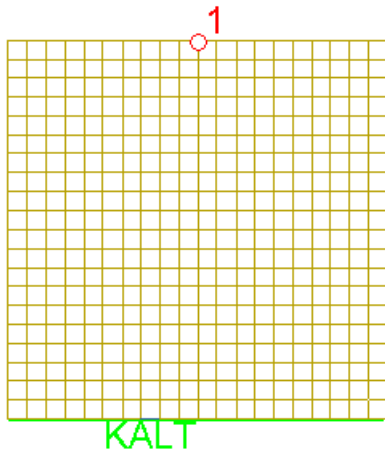
Aufgabenstellung

Die Genauigkeit der thermischen Analyse soll am Bezugspunkt X überprüft werden.

Die Starttemperatur des abgebildeten Querschnitts beträgt 1000°C . Zu festgelegten Zeitpunkten wird die berechnete Temperatur Θ_0 mit einer Referenztemperatur verglichen und die Abweichungen werden ermittelt. Ein Wärmeübergang zur Umgebung (Temperatur $\Theta_U = 0^\circ\text{C}$) wird nur am unteren Rand zugelassen.

Material		fiktiver Wert
Wärmeleitfähigkeit λ	W/(mK)	1
Spezifische Wärme c_p	J/(kgK)	1
Rohdichte ρ	Kg/m ³	1000
Randbedingungen		
Abmessungen h, b	m	1.00
Wärmeübergangskoeffizient α_c	W/(m ² K)	1.00
Emissionswert $\epsilon_{\text{res}} = \epsilon_m \cdot \epsilon_f$	-	0
Anfangsbedingungen		
Umgebungstemperatur Θ_U	$^\circ\text{C}$	0
Starttemperatur im Querschnitt Θ_0	$^\circ\text{C}$	1000

System und Dateneingabe:



Die Berechnung mit dem Programm HYDRA erfolgt mit einem regelmäßigen FE-Netz (mit 20 x 20 Elementen).
Der Referenzpunkt X erhält die Knotennummer 1.

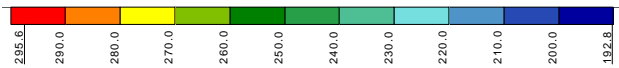
Die vollständige CADINP Eingabe für dieses Beispiel:

```
#DEFINE KOPF1=Val i di erungsbei spi el 1 : Umgebung 0 °- Querschni tt 1000 °
PROG AQUA urs: 1 $ Material
KOPF Thermi sche Materi al konstanten
NORM DIN 1045-1
ECHO MAT
MATE 1
HMAT 1 KXX 1 S 1*1000 $ Thermi sche Materi al werte
ENDE

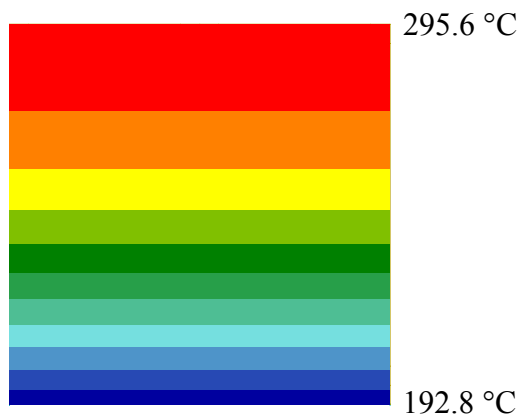
PROG SOFIMSHA urs: 2 $ System
KOPF Geometrie des FE-Netzes
SYST EDEH
KNOT NR X Y
      1 0.00 0.00
      2 -0.50 0.00 ; 5 0.50 0.00
      3 -0.50 1.00 ; 4 0.50 1.00
QUAD MESH 2 3 4 5 MNR 1 M 20 20
RAND 100 bez Kalt ; 3 4 FIT $ Defi ni ti on Rand
ENDE

PROG HYDRA URS: 3 $ Temperaturberechnung
KOPF Instationäre Rechnung
SYST EDEH DIMT SEC DIMQ W ; ECHO VELO NEIN
If 1
step 300 6 ; pl f hp 1000 ; echo step 10
RAND TYP VAL VON VP EPS del t=GLNS
      SPEZ 1.0 100 0 0.0 $ Wärmeübergang
HIST T 1 3 1
ENDE
```

Zusammenstellung der Ergebnisse:

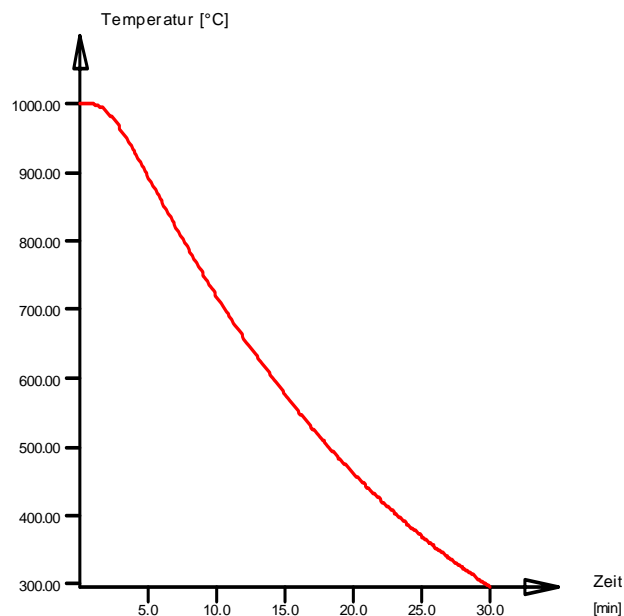


Temperaturverlauf nach 30 Minuten



Darstellung des Temperaturverlaufs im Querschnitt

Zur Kontrolle der Berechnungsergebnisse wird der durch HDYRA ermittelte Temperaturverlauf mit dem Programm WinGRAF visualisiert. Die Isothermen verlaufen wie erwartet parallel zum „kalten“ Rand.



Darstellung der Temperatur-Zeit-Kurve des Referenzpunktes

Mit dem Programm DYNR wird die Temperatur-Zeitkurve des Bezugspunktes X (Knoten Nr. 1) visualisiert. Die genauen Temperaturen zu jedem Berechnungszeitpunkt sind im Ergebnisausdruck von HYDRA festgehalten.

Validierungs-Protokoll:

In der folgenden Tabelle sind die Berechnungsergebnisse von HYDRA den Referenzgrößen gegenübergestellt. Eine Abweichung von +5% bzw. -5% wäre laut [16] noch tolerierbar. Die Ergebnisse von HYDRA stimmen jedoch nahezu exakt mit den Referenztemperaturen überein, sodass sich eine maximale Abweichung von nur 0,11% ergibt.

Zeit	Referenzgröße	berechnet mit	Abweichung	Proz. Abweichung
[s]	Temperatur Θ_0	HYDRA Θ_{H0}	$(\Theta_{H0} - \Theta_0)$	$[(\Theta_{H0} - \Theta_0) / \Theta_0] \cdot 100$
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0	1000	1000	0	0
60	999,3	999,0	-0,3	-0,03
300	891,8	891,8	0	0
600	717,7	718,0	0,3	0,04
900	574,9	575,2	0,3	0,05
1200	460,4	460,8	0,4	0,09
1500	368,7	369,1	0,4	0,11
1800	295,3	295,6	0,3	0,10

8 TRAGFÄHIGKEIT

Die Bemessung der Tragfähigkeit erfolgt grundsätzlich ohne Sicherheiten, bei den Lasten sind die veränderlichen Lasten mit ihrem ständigen Anteil anzusetzen, bzw. Einwirkungen sind so zu berücksichtigen wie bei der Bemessung unter normalen Temperaturen, wenn es wahrscheinlich ist, dass diese auch im Brandfall auftreten.

Der Nachweis an sich kann nach EN 1991-1-2 verschieden erfolgen.

Im Zeitbereich	$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$
Im Festigkeitsbereich	$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,t}$
Im Temperaturbereich	$\Theta_{fi,d} \leq \Theta_{cr,d}$

Die letztere Methode war die Standard-Methode früherer Brandschutznachweise, sie wird aber nur in einfachen Fällen sinnvoll sein, wenn das Bauglied oder Tragwerk insgesamt die gleiche Temperatur besitzt.

Die erste Methode eignet sich am besten bei Bauwerken die den Brandschutz nicht erfüllen für die Einschätzung ob man das so akzeptieren möchte. Sie kann aber nur dadurch berechnet werden indem man entweder die Ergebnisse der dritten Methode direkt oder die der zweiten Methode iterativ verwendet.

Nun besteht aber im Planungszustand der Wunsch ein Bauwerk zu errichten, dass die Nachweise des Brandschutzes erfüllt, dafür gibt es sehr viele Möglichkeiten, beginnend beim vorbeugenden Brandschutz und endet im Stahlbetonbau in der Ermittlung einer erforderlichen Bewehrung. Aus diesem Grunde werde ich mich im Folgenden nur mit dem Nachweis der Tragfähigkeit über die Festigkeit befassen.

Aufgebrachte und behinderte Ausdehnungen und Verformungen, die ihre Ursache in der durch die Brandeinwirkung bedingte Temperaturänderung haben, verursachen Beanspruchungen, z. B. Kräfte und Momente, die berücksichtigt werden müssen.

Tatsächlich können nichtlineare Effekte aus Überbeanspruchungen im Material wie auch lokales Ausweichen von Druckgliedern (Run-Away-Effekte) ebenso auftreten wie Fälle bei denen das Bauwerk erst in der Abkühlphase seine kritische Beanspruchung erfährt.

Die Abnahme von Lasten durch ihre Verbrennung sollte nicht berücksichtigt werden, ob Schneelasten wegen des Schmelzens des Schnees nicht berücksichtigt werden müssen, sollte für den Einzelfall festgelegt werden. Einwirkungen aus industriellem Betrieb, wie z. B. Bremskräfte von Kränen, brauchen nicht berücksichtigt zu werden.

Gleichzeitiges Auftreten mit anderen außergewöhnlichen Einwirkungen braucht nicht berücksichtigt zu werden (Der Brand beginnt erst nach dem Anprall des Tankfahrzeugs). Abhängig von der zu berücksichtigenden außergewöhnlichen Bemessungssituation kann es jedoch auch erforderlich sein, durch den Brand verursachte zusätzliche Einwirkungen, wie z. B. der Aufschlag von versagten Bauteilen oder schweren Maschinen, zu berücksichtigen.

Dann wird für einen gegebenen Zeitpunkt (z.B. nach 90 Minuten) ein Querschnitt bzw. das gesamte Tragwerk mit den zu diesem Zeitpunkt geltenden Festigkeiten statisch nachgewiesen. Die

Festigkeiten des Betons sind wieder im EC zu finden, wohingegen für den Stahl auch in der DIN 4102-4 entsprechende Angaben zu finden waren, die sich für den Bereich oberhalb von 600 Grad deutlich unterscheiden:

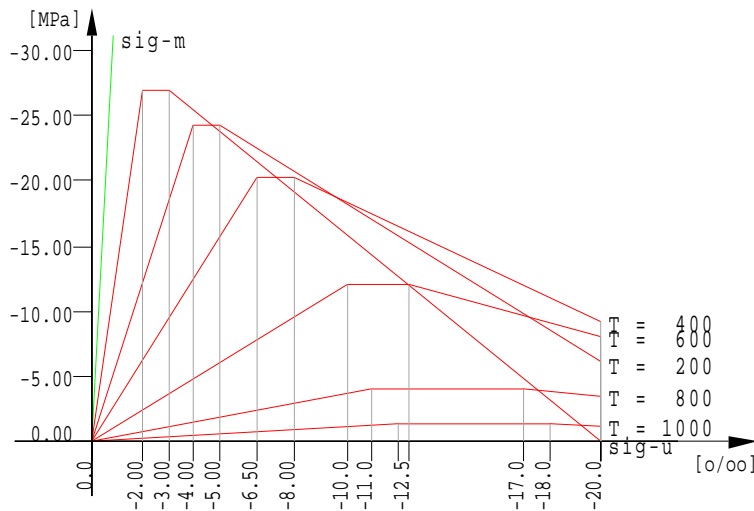


Abbildung 5: Beton n. EC

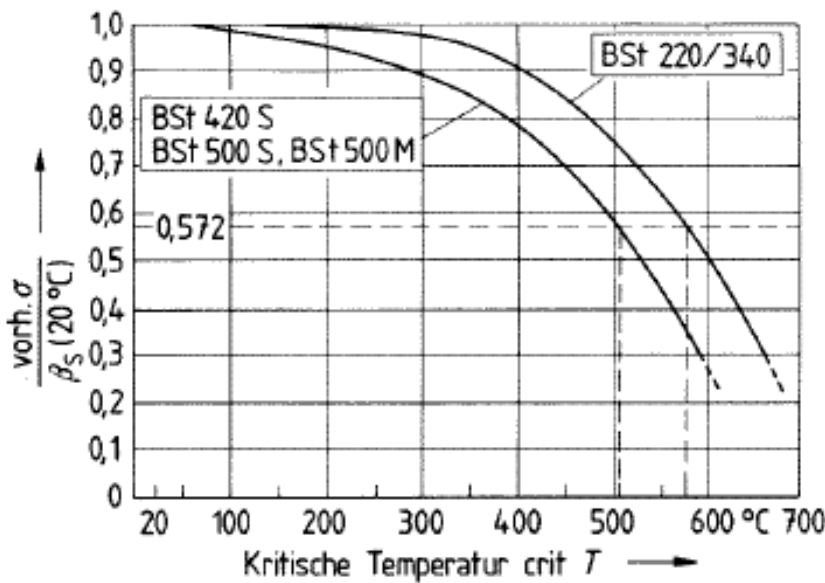
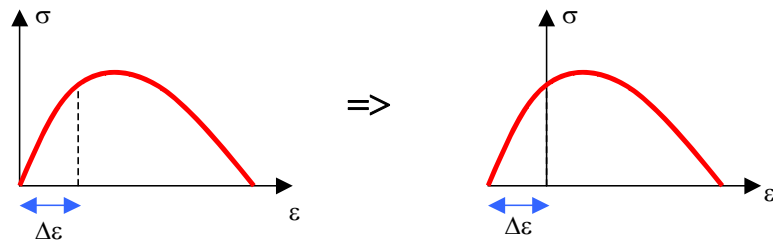


Abbildung 6: Betonstahl n. alter DIN

Für die Bemessung an sich müssen selbstverständlich noch die unterschiedlichen thermischen Dehnungen im Querschnitt als Eigenspannungen, bzw. Versatz der Arbeitslinien berücksichtigt werden. Unter der Hypothese vom eben bleiben der Querschnitte ergibt sich die Dehnung des Querschnitts aus der Dehnungsebene bezogen auf den Schwerpunkt und den eingepprägten Temperaturdehnungen, die natürlich nicht mehr eben sind.

$$\varepsilon = \varepsilon_s - y \cdot k_y + z \cdot k_z - \varepsilon_{fi}(\Theta)$$

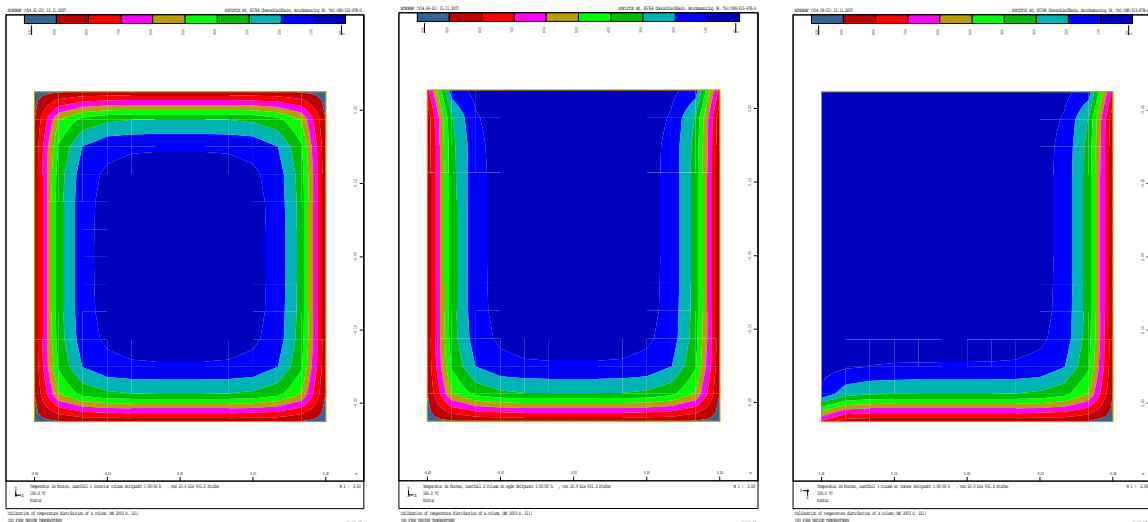
Die Spannungsdehnungsbeziehung ist wieder von der Temperatur abhängig und man sollte im allgemeinsten Fall den gesamten FE-Querschnitt als solchen für die Stabbemessung weiterverarbeiten, was nur wenige Programme unterstützen. Wenn man eine vereinfachte Lösung benötigt, muss man seinen Querschnitt in Zonen einteilen, die mit einer konstanten mittleren Temperatur versehen sind. Dann kann man obige Spannungsbeziehung durch eine Verschiebung der Arbeitslinie um den Wert ε_{fi} berücksichtigen, wenn das Programm Verbundquerschnitte mit unterschiedlichen frei definierbaren Arbeitslinien verarbeiten kann.



$$\sigma(\varepsilon) = \sigma(\varepsilon_s - y \cdot k_y + z \cdot k_z - \varepsilon_{fi}(\Theta))$$

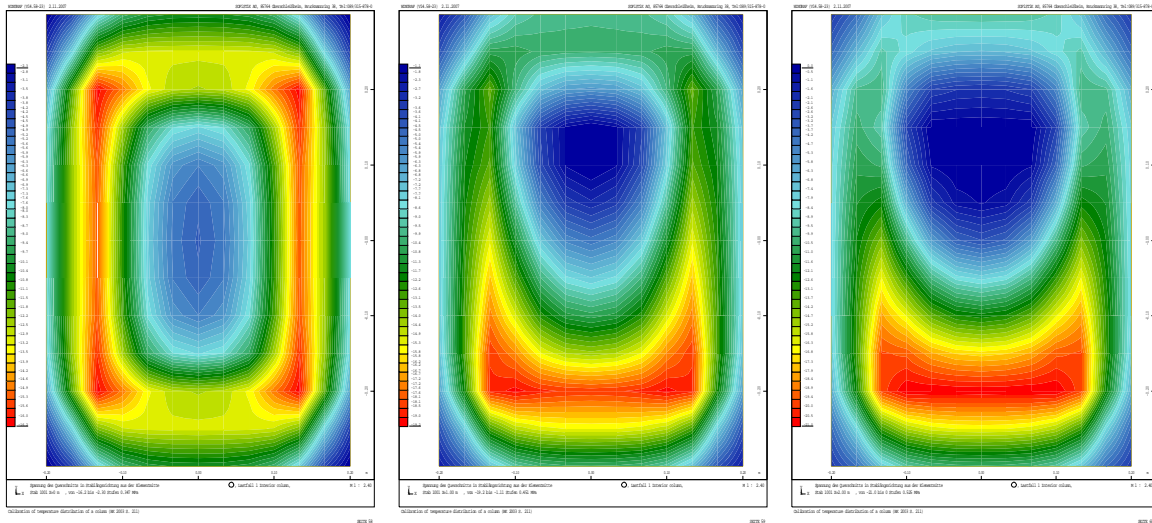
9 TRAGFÄHIGKEIT EINER STÜTZE

Zuerst soll eine rechteckige Stütze mit den Abmessungen $b/h = 40/45$ untersucht werden. Diese Stütze ist den Beispielen des DBV zur DIN 1045-1 entnommen. Statisches System ist eine Kragstütze mit 6.20 m Länge und eine exzentrische Normalkraft von 431 kN. Nach 60 Minuten sind die Temperaturverteilungen für eine Innenstütze, eine Rand und eine Eck-Stütze gegeben.

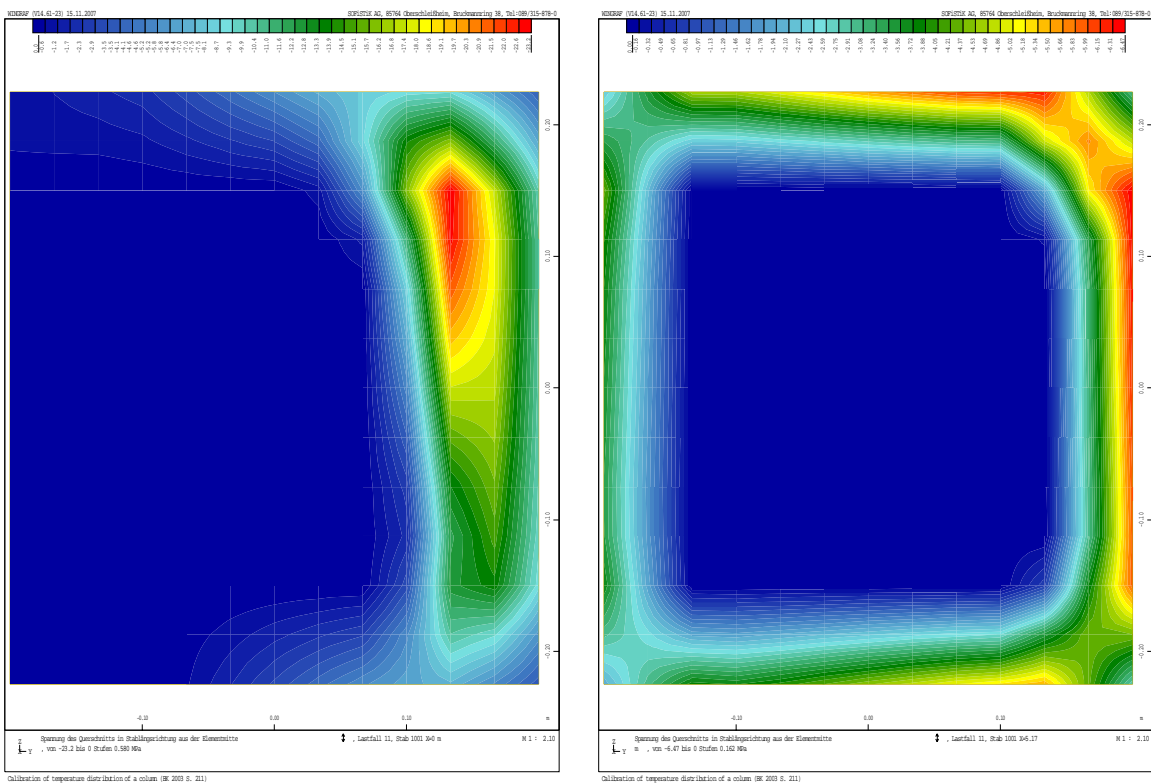


Interessant sind die Druckspannungen im Querschnitt, die je nach Temperaturniveau die maximale Druckspannung in das innere des Querschnitts wandern lässt. Unter Umständen entstehen sogar Zugspannungen im Inneren des Querschnitts. Die folgenden Bilder für einen etwas anderen

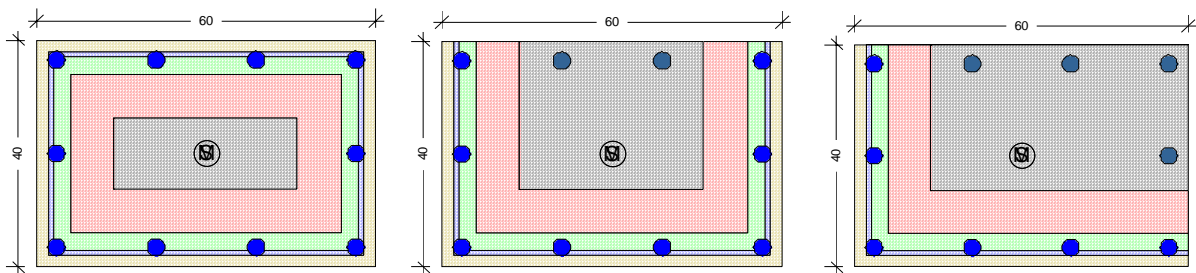
Querschnitt nach 90 Minuten unter verschiedenen Momenten-Beanspruchung sind im folgenden Bild zu sehen:



Während Fingerloos im Betonkalender 2005 behauptet, die vorliegende Stütze hätte F120 weist Richter darauf hin, dass sie F54 hätte. Nun wenn man die Stütze einachsrig beansprucht um die starke Achse rechnet, scheint das auch zu stimmen, man erhält zwar nach 60 Minuten Kopfauslenkungen von 20 cm, aber die Tragfähigkeit lässt sich ohne Probleme nachweisen. Nach 90 Minuten jedoch muss die Bewehrung von 25 cm^2 auf 52 cm^2 erhöht werden, damit ein Nachweis gelingt, bei abgestufter Bewehrung sogar noch höher, eine Einstufung nach Tabelle 31 in F 120 ist also ganz sicher nicht zulässig. Wenn man hingegen die Stütze auch um die schwache Achse ausweichen lässt, also eine zweiachsige Biegung erlaubt, so ist bereits nach 60 Minuten eine Erhöhung der Bewehrung auf 51 cm^2 erforderlich.



Sofern man nicht diese vollständige Abbildung über ein FE-Netz zur Verfügung hat, kann man den Nachweis auch dadurch führen, in dem man Querschnitte aus mehreren Materialien definiert, die jeweils Bereiche gleicher Temperatur zusammenfassen, überschlägig z.B.:



Mit solchen Querschnitten erhält man in einfacheren Fällen durchaus brauchbare Ergebnisse, bei Systemen wie dem vorliegenden muss man aber sich mehr Mühe bei der Zoneneinteilung machen.

Dieses Ergebnis wurde mit einem wirksamen Abstand der Bewehrung von 40 mm ermittelt. Wenn die Bewehrung um ein paar mm weiter innen läge, würde man wesentlich günstigere Werte erhalten.

10 HEISSE BEMESSUNG MIT SOFISTIK

Für die heiße Bemessung mit den Programmen der SOFiSTiK stehen die Programme HYDRA / AQB bzw. das darauf aufbauende COLUMN zur Verfügung.

Die Baubehörden haben sich kürzlich dazu entschlossen, die ENV 1992-1-2 inklusive des dazu gehörigen Nationalen Anwendungsdokuments aus dem Jahre 2000 wieder einzuführen, nachdem die Regeln des Eurocodes an sich ja wieder zurückgezogen worden waren und ein formales Mischungsverbot bestand. Die Einschränkung des NAD (Fachbericht 92) besagt, dass allgemeine Rechenverfahren nur nach Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde angewendet werden dürfen und von einem qualifizierten Prüfingenieur zu prüfen sind. Die Interpretation der Erlasse im Jahr 2007 werden nun eigentlich so verstanden, dass die Genehmigung der Anwendung des allgemeinen Verfahrens für alle Bauteile bereits in den Bereich der **unteren Baubehörden** verlagert wurde. Es ist dann ausreichend, wenn Aufsteller und Prüfer über entsprechende Sachkenntnis bzw. Erfahrung verfügen.

Die Programme beruhen auf dem Prinzip, die Temperatur genau zu berechnen und dann den Tragfähigkeitsnachweis unter Berücksichtigung der thermischen Dehnungen und temperaturabhängigen Materialeigenschaften zu führen. Dies ist in Absatz 4.3.1 (4) der ENV als Methode für das vereinfachte Verfahren beschrieben, ist aber auch die Grundlage des allgemeinen

Verfahrens 4.4.1 (3). Leider ist eine Form der genaueren Rechnung im Anhang D des ENV beschrieben und dessen Anwendung unterliegt schon wieder der Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde.

Die Übergänge zwischen vereinfachtem und genauem Verfahren sind ziemlich unscharf. Grundsätzlich bedeutet eine Regel „man darf“ ja kein Verbot für eine genauere Berücksichtigung des entsprechenden Effekts. Im folgenden sollen die Grenzen der beiden Verfahren daher etwas näher betrachtet werden.

Die beste Definition des allgemeinen Verfahrens steht wohl im Absatz 4.4.1 (2) der ENV: „Allgemeine Verfahren sollen eine wirklichkeitsnahe Berechnung brandbeanspruchter Tragwerke ermöglichen. Sie sollen zu einer zuverlässigen Abschätzung des erwarteten Brandverhaltens führen“. Die Verwendung der ETK als Temperaturkurve könnte man grundsätzlich als Bemessungsbrand verstehen, so dass damit noch keine wirklichkeitsnahe Berechnung im Sinne dieses Absatzes und der Einschränkung des NAD erfolgt. Im Beton Brandschutz-Handbuch von Kordina wird denn auch nicht von „allgemeinen“ sondern „exakten“ Verfahren gesprochen.

Die Berechnung der Temperatur erfolgt streng nach den Regeln der Physik mit den Materialparametern, die in der ENV bzw. der EN festgelegt sind. Die beiden Normen unterscheiden sich hier nicht. Eine Benutzung physikalischer Formeln bedarf auch ganz sicher keiner Zulassung. Hier gibt es keinerlei Unklarheiten, zumal ja auch das vereinfachte Verfahren die genauen Temperaturfelder im Anhang benutzen darf. Es sei jedoch der Hinweis erlaubt, dass bei der Auswahl der Materialparameter nicht immer die vorgeschlagenen oberen Grenzwerte der Leitfähigkeit ungünstig sind.

Für die Berechnung der Tragfähigkeit sind in Anhang A der ENV Arbeitslinien angegeben, die sowohl gemäß der Überschrift als auch nach dem Absatz (8) des Kapitels A.1 sowohl für das vereinfachte wie auch das allgemeine Rechenverfahren gültig sind. In diesem Anhang ist auch geregelt, dass Arbeitslinien für Druck und Zugbewehrung gleichermaßen gelten, wohingegen beim vereinfachten Verfahren teilweise zwischen Druck- und Zugbewehrung unterschieden und auch das Erreichen einer Stahldehnung von 2 Prozent (!) verlangt wird. Dies ist nur verständlich, wenn man davon ausgeht, dass beim vereinfachten Verfahren keine echten Dehnungen betrachtet werden, sondern mit vollplastischen Materialwerten gerechnet wird. An dieser Stelle ergeben sich folglich Unsicherheiten beim vereinfachten Verfahren, die beim allgemeinen Verfahren nicht vorhanden sind und deshalb mit Zusatzregeln abgefangen werden müssen.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit nach dem vereinfachten Verfahren enthält der Absatz 4.3.3. zahlreiche Regeln zur Abschätzung und Einteilung der Zonen. Diese sind überwiegend mit den Regeln „man darf“ oder als Abschätzung deklariert. Das Vorgehen von SOFiSTiK den Querschnitt statt in zwei Zonen in deutlich mehr Zonen einzuteilen ist der wesentliche Unterschied zwischen dem vereinfachten Verfahren gemäß der Norm und dem bei SOFiSTiK angewendeten Verfahren. Nach dem einfachsten Verfahren der Norm gibt es nur zwei Festigkeiten: 0 für den äußeren Bereich der geschädigten Zone und eine reduzierte aber eigentlich zu hohe Festigkeit des Restquerschnitts gemäß des Mittelpunkts. Allerdings ist daraus nicht erkennbar, dass beim vereinfachten Verfahren ein höherer Sicherheitsabstand eingehalten werden soll. Im Übrigen stellt die in Abschnitt (7) dargestellte Mittelwertbildung mit mehreren Zonen einen Schritt in die richtige Richtung dar.

Wir stehen hier also vor dem Problem, dass hier in der Norm das grundsätzliche Vorgehen der Rechnung wie auch die anzusetzenden Parameter beschrieben werden, die Einführerlass der Norm es aber verbieten soll, mit diesen Werten ohne Abstimmung mit den Baubehörden genau zu rechnen. Dies ist in Anbetracht der Empfindlichkeit des untersuchten Systems eigentlich unverantwortlich. Der Passus der bei den allgemeinen Verfahren steht und besagt, dass man sich über die Sensitivität der Parameter zu beschäftigen hat. Dies gilt selbstverständlich auch für das vereinfachte Verfahren.

SOFiSTiK rechnet nach den gemeinsamen Grundlagen des vereinfachten wie auch des allgemeinen Verfahrens, verzichtet aber wie auch im Anhang D beschrieben auf alle Vereinfachungen des physikalisch mechanischen Sachverhalts, die z.B. bei einer künstlichen Einteilung in Zonen konstanter Eigenschaften entstehen. Der wesentliche Einfluss auf die Tragfähigkeit stellt die Lage bzw. Temperatur der Bewehrung dar. Bei dieser gibt es überhaupt keinen Unterschied zwischen dem vereinfachten und dem allgemeinen Verfahren!

Dann noch einige Anmerkung zu Abweichungen zwischen EN und ENV:

- In der ENV wird die mit der Dauerstandsbeiwert abgeminderte Festigkeit $\alpha \cdot f_{ck}$ verwendet. Der Beiwert α kann aber nach Definition bei kurzzeitigen Belastungen zu 1.0 angenommen werden. Die EN verwendet direkt die charakteristische Festigkeit. Das Hochtemperaturkriechen ist vollständig in den Arbeitslinien mit etwas höheren Dehnungen in der EN berücksichtigt. Die Beschreibungen dürften gleichwertig sein.
- Im Abschnitt 3 der ENV sind Materialwerte angegeben worden, die „auch für das vereinfachte Verfahren angewendet werden dürfen“, gleichzeitig steht der Hinweis auf die genaueren Werte des Anhangs A und die Erlaubnis weitere Dokumente zu verwenden. Die

dort angegebenen Beiwerte entsprechen nicht denen im Anhang A, da hier zusätzliche Kriechdehnungen eingearbeitet wurden, die im Anhang A ja in der Arbeitslinie stecken.

- Es gibt eine minimale Abweichung bei der Festigkeitsreduktion derart, dass ein Beton bei 200 Grad nach Tabelle 3.1 der neuen EN einen Beiwert von 0.95 erhält, in der ENV in Tabelle 3.1 jedoch 0.933 und im Anhang A des ENV den Wert von 0.90.

Die neue EN 1992-1-2 ist ganz sicher ein „weiteres geeignetes Dokument“ im Sinne des Absatzes 3.1 (4). SOFiSTiK rechnet folglich konsistent mit den Werten des neuen EN, diese liegen innerhalb der Toleranzgrenzen, die in der eingeführten ENV angegeben sind. Bei den Eigenschaften der Bewehrung gibt es keine Unterschiede zwischen EN oder ENV.

§ 3 Absatz 3 der Musterbauordnung besagt, dass von den Technischen Baubestimmungen abgewichen werden kann, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen des Absatzes 1 erfüllt werden. So eine Abweichung ist hier jedoch eigentlich gar nicht gegeben.

Zu anerkannten Regel der Technik kann jede Regel erst nach einer entsprechend langen Zeit werden, in der sie von vielen angewendet wird. Dazu muss man sie aber erst mal anwenden dürfen. Die Verantwortung des Ingenieurs sollte sich daher nicht hinter juristischen Formalien verstecken! Somit ist festzustellen:

SOFiSTiK rechnet die heiße Bemessung genau, d.h. mit minimalen Vereinfachungen gemäß den im Eurocode festgelegten Grundlagen des vereinfachten und allgemeinen Verfahrens. Eine Zustimmung zu diesem Rechenverfahren kann durch die unteren Baubehörden erteilt werden, sofern Aufsteller und Prüfer über entsprechende Erfahrungen verfügen. Eine Untersuchung der Empfindlichkeit der Berechnung gegenüber den getroffenen Annahmen ist in der Regel zu empfehlen.

11 DAS PROGRAMM COLUMN

Das SOFiSTiK Programm COLUMN bietet, als Weiterentwicklung von STUE, die Bemessung von Stahlbetonstützen nach dem Modellstützenverfahren und die nichtlineare Bemessung nach Theorie II. Ordnung n. DIN 1045-1 Kap. 8.6.1 (7) ‚doppelte Buchführung‘. Entsprechende Verfahren der ÖNorm B4700 sind ebenfalls implementiert.

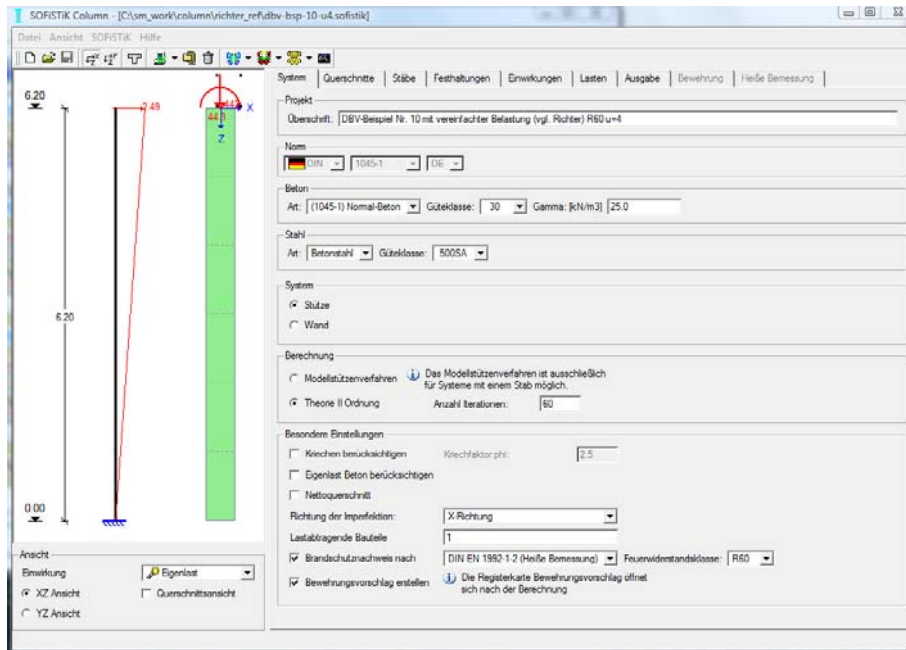


Abbildung 7: Benutzeroberfläche COLUMN

Die Brandschutznachweise der DIN 4102-22 (alpha*) die sog. ‚neue Tabelle 31‘ sowie die erweiterte Tabelle 31 nach DIN 4102-22-2007 (MLTB Anlage 3.1/10) sind für den Anwender auswählbar.

Die heiße Bemessung nach EN 1992-1-2 Anhang A kann in COLUMN wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben erfolgen. Dabei werden die Programme HYDRA und AQB aus der grafischen Oberfläche angesteuert. Zunächst werden die Temperaturprofile mit einer Beflammung nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) ermittelt, unter Berücksichtigung der Wärmeübergangsbedingungen und der thermischen Materialwerte. Im Anschluss erfolgt eine Berechnung nach Theorie II. Ordnung für die maßgebende Einwirkung $N_{fi,d,t}$ nach DIN 1055-100. Dabei werden die temperaturabhängigen Materialeigenschaften von Beton und Betonstahl nach EN1992-1-2 verwendet.

Abschliessend sollte noch als besondere Stärke des Programmes die Durchgängigkeit zur allgemeinen SOFiSTiK Software hervorgehoben werden, die aktuellste Version hält eine vollständige CADINP Eingabe der Berechnung bereit, sodass mit geringen Änderungen in der Texteingabe beispielsweise beliebige Branddauern (mit einer Lizenz zum Programm HYDRA) analysiert werden können. Einer Anpassung der Stützenquerschnitte auf komplexere Geometrien steht über die Texteingabe auch nichts im Wege.

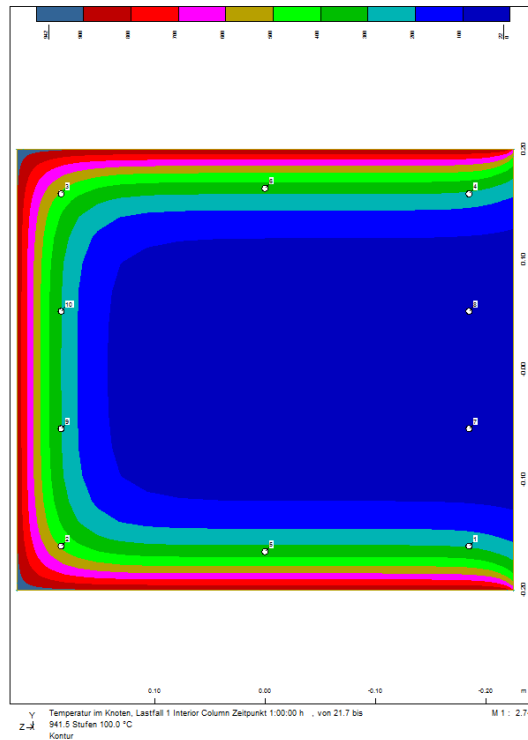


Abbildung 8: Temperaturverteilung bei dreiseitiger Beflammung mit Bewehrungsseisen

Die Programmbeschreibung [17] enthält weitere Erläuterungen zum Programm COLUM. Referenzbeispiele zur brandschutztechnischen Stützenbemessung und Erläuterungen zum Programm HYDRA sind in den Unterlagen zum sehr erfolgreichen (über 80 Teilnehmer) SOFiSTiK Workshop: Heiße Bemessung vom September 2007 [18] enthalten. Die Unterlagen und Beispiele finden sich auch zum Download auf dem SOFiSTiK ftp-Server [19].

12 AUSBLICK

Da in letzter Zeit immer mehr Veranstaltungen zum Thema stattfinden lässt sich in naher Zukunft eine stärkere Verbreitung von Fachkenntnis in der Breite auf dem Gebiet des baulichen Brandschutzes und der brandschutztechnischen Bemessung erwarten, dieser Trend ist sehr zu begrüßen. Ebenfalls bieten einige Software Hersteller mittlerweile meist geschlossene Lösungen zum Nachweis bestimmter Bauteile an, die zum Teil mit hohem Aufwand erstellt und mit entsprechenden Veranstaltungen vermarktet werden.

Es bleibt aber anzumerken dass einige Punkte der derzeit gültigen Normenlandschaft dazu geeignet sind - meist nur formale - Bedenken gegen Anwendbarkeit und Gültigkeit hervorzurufen. In dieser Diskussion tritt dann häufig das eigentliche Ziel, nämlich sichere(re) Tragwerke zuverlässiger und einfacher (?) zu entwerfen und nachweisen zu können in den Hintergrund. Daher sollte in Zukunft eher eine Phase der Ernüchterung dem allgemeinen Hype um die heiße Bemessung folgen, auch da

Bestrebungen für die Entwicklung von vereinfachten Verfahren von maßgeblicher Stelle erkennbar sind [14,15].

Die SOFiSTiK wird versuchen mit einer dem Ingenieursanspruch gerechten Lösung wie COLUMN die heiße Bemessung von Stützen nach derzeit gültigen und physikalisch sinnvollen Verfahren anzubieten. Durch die Offenheit der Software soll die Skalierbarkeit auf Sonderfälle erhalten, sowie der Eingriff in die Rechenabläufe gewährleistet werden. Die Einbindung der automatischen Querschnitts-Modifikation aus den Temperaturprofilen von HYDRA mit AQUA in allgemeine Berechnungen von z.B. Gesamtsystemen im Hochbau oder Tunnelbau wird sicher in Zukunft verbreitet Anwendung finden und durch entsprechende Software Weiterentwicklung unterstützt werden.

13 LITERATUR

- [1] *Schneider, U.*, Brandschutzingenieurwesen, Stand der Erkenntnisse und Anwendungen, Brandschutzseminar Innsbruck (2004)
- [2] *Hosser, D.*, Ingenieurmethoden des Brandschutzes, vfdB Technischer Bericht TB 04/01 (2006)
- [3] *Lamont, S, Lane, B. Jowsey, A., Torero, J, Usmani A., Flint, G. ,* Innovative Engineering for Tall Buildings in Fire, Structural Engineering International 2/2006, pp 142-147
- [4] *Kordina / Meyer-Ottens*, Beton Brandschutz Handbuch, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf (1999)
- [5] *Ulrich Schneider / Karl Kordina*, Brandschutz von Hochbauten, Betonkalender 2003, Verlag Ernst und Sohn, Berlin (2003)
- [6] *Kirby, B.R.*, British Steel Data on the Cardington Fire Tests. Technical Report British Steel (2000)
- [7] *Steinert, C.*, Rechnerische Brandsimulation – Möglichkeiten und Grenzen Bautechnik 76 pp 658-664 (1999)
- [8] *Fontana, M.*, Praktischer Brandschutz im Stahlbau, 29. Stahlbauseminar Bauakademie Biberach (2007)
- [9] *Hosser, D., Richter, E.*, Rechnerische Nachweis im Brandschutz – Zukunftsaufgaben für Prüfengeure, Der Prüfengeur 31, pp 24-37 (2007)
- [10] <http://www.vpi-bw.com/ingenieure/technews>
- [11] <http://www.dibt.de> ->Aktuelles->Technische Baubestimmungen
- [12] <http://www.bauen-mit-stahl.de/brandschutz.htm>
- [13] <http://fire.nist.gov/fire/fires>
- [14] *Fingerloos, F.*, Heißbemessung von Stahlbetonstützen nach DIN 4102, DBV Heft 14: Weiterbildung Tragwerksplaner Massivbau: Aktuelle Normung (2007)
- [15] *Quast, U., Richter, E.*, Vereinfachte Berechnung von Stahlbetonstützen unter Brandbeanspruchung, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008) Heft 2
- [16] *Richter, E.*, Brandschutztechnische Bemessung von Stahlbetonbauteilen, Seminarvortrag TU Kaiserslautern (2008)
- [17] *SOFiSTiK AG*, Programmbeschreibung zum Programm COLUMN V. 10.70-23 (2008)
- [18] *SOFiSTiK AG*, Workshop: Heiße Bemessung, Unterlagen zum Workshop (2007)
- [19] http://ftp.sofistik.de/pub/infoline/SOFiSTiK-Heisse_Bemessung/