



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Dipl.-Ing. Jörg Hamann
Dr.-Ing. Renate Müller
Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
Dr. rer. nat. Robert Schriever
Prof. Dr. Ulf Wickström

**Anwendung von Temperatur-
Berechnungsprogrammen
auf kritische Referenzbei-
spiele des Brandschutzes**

229

Forschungsbericht



Die Aufgaben
der Bundesanstalt
stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die Aufgaben

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungs-
erlaß die Zweckbestimmung,
die Entwicklung der deutschen
Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Auf-
gabenverbund „Material – Chemie –
Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- > Hoheitliche Funktionen zur öffentli-
chen technischen Sicherheit,
insbesondere im Gefahrstoff- und
Gefahrgutrechtsbereich;
- > Mitarbeit bei der Entwicklung ent-
sprechender gesetzlicher Rege-
lungen, z. B. bei der Festlegung von
Sicherheitsstandards und Grenz-
werten;
- > Beratung der Bundesregierung, der
Wirtschaft sowie der nationalen und
internationalen Organisationen im
Bereich der Materialtechnik und
Chemie;
- > Entwicklung und Bereitstellung von
Referenzmaterialien und -verfahren,
insbesondere der analytischen
Chemie und der Prüftechnik;
- > Unterstützung der Normung und
anderer technischer Regeln für die
Beurteilung von Stoffen, Materialien,
Konstruktionen und Verfahren im
Hinblick auf die Schadensfrüher-
kennung bzw. -vermeidung, den
Umweltschutz und den Erhalt volks-
wirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM um-
faßt die sich ergänzenden und aufein-
ander bezogenen Tätigkeiten:

- > Forschung und Entwicklung
- > Prüfung, Analyse und Zulassung
- > Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik,
Wissenschaft, Wirtschaft und Gesell-
schaft erfordern eine interdisziplinäre
Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die
Bundesanstalt mit Technologieinsti-
tutionen des In- und Auslandes,
insbesondere den nationalen
Schwesterinstituten, eng zusammen.
Sie berät Bundesministerien, Wirt-
schaftsverbände, Industrieunternehmen
sowie Verbraucherorganisationen und
unterstützt mit Fachgutachten Verwal-
tungsbehörden sowie Gerichte.
Daneben ist sie in die internationale
technische Zusammenarbeit eingebun-
den und im Bereich „Meßwesen –
Normung – Prüftechnik – Qualitätssi-
cherung“ (MNPQ) als nationale Institu-
tion für die Prüftechnik zuständig. Die
Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in
zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen
Körperschaften und normensetzenden
Institutionen an der Aufstellung von
technischen Regeln und Sicherheitsbe-
stimmungen mit und vertreten die
Bundesrepublik in nationalen und
supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissen-
schaftliche Bundesoberbehörde im
Geschäftsbereich des Bundes-
ministeriums für Wirtschaft und Tech-
nologie Nachfolgeinstitution des 1871
gegründeten Staatlichen Materialprü-
fungsamtes sowie der 1920 gebildeten
Chemisch-Technischen Reichsanstalt
(CTR). Sie hat dementsprechend die
Funktion einer materialtechnischen und
chemisch-technischen Bundesanstalt.
In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, dar-
unter mehr als 800 Wissenschaftler
und Ingenieure, auf dem Stammgelän-
de in Berlin-Lichterfelde sowie auf den
Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und
Berlin-Adlershof tätig.

Dipl.-Ing. Jörg Hamann
Dr.-Ing. Renate Müller
Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
Dr. rer. nat. Robert Schriever
Prof. Dr. Ulf Wickström

Anwendung von Temperatur- Berechnungsprogrammen auf kritische Referenzbeispiele des Brandschutzes

Forschungsbericht 229

Berlin 1999

Impressum

Forschungsbericht 229

Herausgegeben von
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Telefon (030) 81 04-0
Telefax (030) 8 11 20 29

Copyright © 1999 by Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76, 27511 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27611 Bremerhaven
Telefon (0471) 9 46 44-0
Telefax (0471) 9 45 44 77/88

Layout: Referat G.3

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-293-6

Zusammenfassung

Zur rechnerischen Simulation des thermischen Brandverhaltens von Baukonstruktionen existieren in den einzelnen europäischen Ländern unterschiedliche Computerprogramme. Um diese Rechenprogramme im Rahmen der europäischen Harmonisierung einem systematischen Vergleich unterziehen zu können, wurden vom National Testing and Research Institute (SP) in Schweden dem CIB (Conseil International du Bâtiment) und der Vereinigung europäischer Brandschutzlaboratorien (EGOLF) Referenzbeispiele mit definierten Materialeigenschaften und festgelegten Randbedingungen empfohlen. Diese Referenzbeispiele sind so konzipiert, daß sie ein breites Spektrum der bei Brandversuchen vorkommenden Problemstellungen abdecken.

Die Rechenergebnisse, die sich mit dem am National Testing and Research Institute in Schweden entwickelten Finite-Element-Programm TASEF-2D ergeben haben, liegen bereits vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden die mit dem Finite-Differenzen-Programm INST2D der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) berechneten Temperaturen dargestellt und mit den TASEF-2D-Werten verglichen.

Abstract

In several european countries different computer programmes for the calculation of the thermal behaviour of fire exposed structures are available. For a systematic comparison of these computer programmes the National Testing and Research Institute (SP) in Sweden has recommended to CIB (Conseil International du Bâtiment) and EGOLF (European Group of Official Laboratories for Fire testing) an evaluation scheme with defined material properties and specified boundary conditions. This scheme employs problems which are relevant for fire safety engineering including effects of conductivity varying with temperature, latent heat, radiant heat transfer boundary conditions, combinations of materials, concrete, steel and mineral wool, and radiative heat transfer in voids.

The finite-element-programme TASEF-2D developed by the National Testing and Research Institute in Sweden has been evaluated using the outlined scheme. The finite-difference-programme INST2D of the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM) in Germany has been applied to the same set of problems. In this report the results of INST2D are compared with the results obtained with TASEF-2D.

Inhalt	Seite
1 Einleitung	1
2 Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung	2
2.1 Wärmeleitung	2
2.2 Konvektion	2
2.3 Wärmestrahlung	3
3 Beschreibung des Programms INST2D und seiner Grundlagen	5
4 Beschreibung des Programms TASEF-2D und seiner Grundlagen	14
5 Referenzbeispiele im Überblick	16
6 Referenzbeispiel 1	22
7 Referenzbeispiel 2	28
8 Referenzbeispiel 3	35
9 Referenzbeispiel 4	43
10 Referenzbeispiel 5	51
11 Referenzbeispiel 6	60
12 Referenzbeispiel 7	66
13 Zusammenfassung und Ausblick	73
14 Vorschlag für zwei weitere Beispiele mit Phasenumwandlung	76
15 Literaturverzeichnis	82

Anhang 1:

U. Wickström: An evaluation scheme of computer codes for calculating temperature in fire exposed structures – two dimensional analysis, March 1997

Anhang 2:

U. Wickström: An evaluation scheme of computer codes for calculating temperature in fire exposed structures, second draft, October 1997, arrived at BAM in December 1998

Anhang 3:

Berechnung der Referenzbeispiele 4 und 5 nach Anhang 2

Benutzte Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Einheit</u>
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
c	spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)
C _S	Strahlungskonstante der schwarzen Oberfläche (= σ)	W/(m ² K ⁴)
ϵ_{OFF}	Emissionsgrad der Prüfkörperoberfläche	-
ϵ_{g}	Emissionskoeffizient des Gases	-
ϵ_{f}	Emissionskoeffizient des Festkörpers	-
ϵ_{r}	resultierender Emissionskoeffizient	-
φ	Einstrahlzahl bzw. Konfigurationsfaktor	-
γ	Verhältnis der bereits umgewandelten Masse höherer Energie zur Gesamtmasse (Phasenumwandlungsverhältnis)	-
h	Enthalpie	J/m ³
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
m	Masse	kg
\dot{Q}	Wärmestrom	W
q	Wärmestromdichte	W/m ²
ρ	Rohdichte	kg/m ³
r	spezifische Verdampfungswärme, $2257 \cdot 10^3$	J/kg
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante, $5,67 \cdot 10^{-8}$	W/(m ² K ⁴)
ϑ	Temperatur	°C
T _a	Temperatur der Umgebung des Prüfkörpers	°C
T ₀	Anfangstemperatur des Prüfkörpers	°C
T _g	Gastemperatur	°C
T _f	Temperatur des Festkörpers	°C
T _s	Temperatur der Prüfkörperoberfläche	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	K
t	Zeitdauer	s
u _m , χ	massebezogener Feuchtegehalt	%
V	Volumen	m ³
W _{lat}	latente Wärmemenge	J

1 Einleitung

Im Zuge der europäischen Harmonisierung im Bauwesen wird auch auf dem Gebiet der brandschutztechnischen Berechnung von Bauteilen an der Standardisierung von Berechnungsverfahren gearbeitet. Bei den bislang überwiegend in Brandschutzlaboratorien durchgeführten Untersuchungen werden Probekörper unter Vorgabe bestimmter Randbedingungen Brandversuchen unterzogen. Diese Brandversuche sind wegen der aufwendigen Versuchstechnik sehr zeit- und kostenintensiv.

Seit der Entwicklung von Programmen zur Berechnung von instationären Temperaturfeldern Mitte der siebziger Jahre besteht die Möglichkeit, das thermische Brandverhalten von Baukonstruktionen auch rechnerisch zu simulieren. Aufgrund unterschiedlicher physikalischer und mathematischer Methoden, die bei der Entwicklung der Programme verwendet werden, können die Rechenergebnisse voneinander abweichen. Um die Programme einem systematischen Vergleich unterziehen zu können, wurden vom CIB (Conseil International du Bâtiment) und von der Vereinigung europäischer Brandschutzlaboratorien (EGOLF) Referenzbeispiele mit definierten Materialeigenschaften und festgelegten Randbedingungen aufgestellt (Wickström, März 1997, vgl. **Anhang 1** dieser Arbeit). Eines der Programme, das auf die Referenzbeispiele angewendet wurde, ist das am National Testing and Research Institute in Schweden entwickelte Finite-Element-Programm TASEF-2D (Wickström, 1979).

Im Rahmen einer bei der BAM durchgeführten Diplomarbeit (Prof. Dr. E. Cziesielski, Dr.-Ing. N.A. Fouad, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Allgemeiner Ingenieurbau, TU Berlin) wurden die Referenzbeispiele mit dem Temperaturberechnungsprogramm INST2D (Rudolphi, 1979; Rudolphi, Müller, 1980; Müller, 1989; Müller, Rudolphi 1989; Rudolphi, 1998) der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung berechnet und mit den TASEF-2D-Ergebnissen aus **Anhang 1** verglichen. Die erst kurz vor Fertigstellung dieses Berichts im Dezember 1998 erhaltene zweite Version der Beschreibung der Referenzbeispiele (Wickström, Oktober 1997), die in **Anhang 2** dieser Arbeit abgedruckt ist, enthält für die Referenzbeispiele 4 und 5 geänderte Werte für die spezifische Wärmekapazität des Betons, die Ergebnisse der mit diesen geänderten Werten wiederholten INST2D-Berechnungen sind in **Anhang 3** aufgelistet.

2 Physikalische Grundlagen der Wärmeübertragung

Die Übertragung von Wärme ist ein Energietransport von einem wärmeren zu einem kälteren Medium. Der Wärmetransport kann auf drei Arten erfolgen:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

Diese drei Arten des Wärmetransportes können in Kombination oder einzeln auftreten.

2.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung findet überwiegend in festen Stoffen statt. Sie erfolgt über den Austausch von Bewegungsenergie benachbarter Atome in der atomaren Gitterstruktur des Stoffes. Die Atome schwingen dabei um ihre mittlere Lage und geben ihre Bewegungsenergie an die benachbarten Teilchen weiter. Damit ist die Wärmeleitung an ein Medium gebunden und kann nur in ihm erfolgen. Die Wärmeleitung wird durch eine von Fourier aufgestellte partielle Differentialgleichung beschrieben.

2.2 Konvektion

Von Konvektion spricht man, wenn die materiellen Teilchen von Fluiden ihren Wärmeinhalt in Form ihrer Bewegung mit sich fortführen. Berühren diese Teilchen den Rand eines Festkörpers, so erfolgt in dem Fall eine konvektive Wärmeübertragung, wenn zwischen dem Festkörper und dem Fluid eine Temperaturdifferenz besteht. Die Wärmeübertragung hängt in großem Maße von den Strömungsbedingungen und den Eigenschaften des Fluids ab.

2.3 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist, im Gegensatz zur Wärmeleitung und Konvektion, nicht an ein Medium zwischen zwei Körpern mit unterschiedlicher Temperatur gebunden. Sie erfolgt durch elektromagnetische Strahlung und kann daher Wärme auch durch ein Vakuum austauschen. Jeder Körper kann über seine Oberfläche sowohl Strahlung emittieren als auch absorbieren. Dabei ist der Absorptionsgrad α gleich dem Emissionsgrad ε (Kirchhoffsches Gesetz):

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.1)$$

Das Strahlungsverhalten eines Körpers hängt somit von seiner Temperatur und der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab. Die spezifische, flächenbezogene, maximale Abstrahlung für eine schwarze Fläche kann man nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnen:

$$E_s = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

Für den schwarzen Körper gilt: $\alpha = \varepsilon = 1$

Graue Flächen zeigen gegenüber dem schwarzen Körper verminderte Emissionen bzw. Absorptionen von Wärmestrahlung. Daher wird in Gleichung (2.2) der dimensionslose Emissionskoeffizient ε eingefügt, dann gilt:

$$q = \varepsilon E_s = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.3)$$

Die Werte von ε können zwischen 0 und 1 liegen.

Der Netto-Strahlungsaustausch zwischen zwei diffus-grauen Flächenelementen hängt von ihrer relativen Orientierung zueinander, ihren Emissionskoeffizienten ε_1 bzw. ε_2 und ihren Temperaturen T_1 bzw. T_2 , ab. Die Gleichung zur Berechnung der Wärmestromdichte für den Spezialfall zweier unendlich ausgedehnter, paralleler, ebener Platten lautet:

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.4)$$

Diese Gleichung genügt in den Fällen, in denen der Plattenabstand klein im Verhältnis zur Ausdehnung ist.

Gase sind in vielen Spektralbereichen für Wärmestrahlung durchlässig und senden in diesen Bereichen auch keine Strahlung aus. Obwohl Gase im eigentlichen Sinne keine grauen Strahler sind, können sie näherungsweise als solche betrachtet werden. Für die Wärmeübertragung zwischen einem Gas und einem Festkörper gilt folgende Gleichung:

$$q = \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma (T_g^4 - T_f^4) \quad (2.5)$$

3 Beschreibung des Programms INST2D und seiner Grundlagen

Ausgangspunkt für die Berechnung der Temperatur- und Wärmestromverteilung zweidimensionaler Geometrien ist die parabolische partielle Differentialgleichung der Wärmeleitung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \dot{w} = \rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (3.1)$$

die allgemein den Zusammenhang zwischen den räumlichen und zeitlichen Temperaturänderungen in Bauteilen beschreibt. Durch räumliche Diskretisierung, d.h. durch Unterteilung eines Körpers in Volumenelemente, und durch Aufstellung einer Energiebilanz an jedem einzelnen Volumenelement ergibt sich ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung (entsprechend Gleichung (3.2)), in denen nur noch die Zeit als unabhängige Variable vorkommt. Die an einem derartigen Volumenelement m aufgestellte Energiebilanz besagt, daß die Summe der dem Volumenelement zugeführten und im Volumenelement erzeugten Wärmeströme dazu dient, das Volumenelement m in der Zeitdifferenz Δt um $\vartheta_m^* - \vartheta_m$ zu erwärmen:

$$\dot{Q}_{m,zuf} + \dot{Q}_{m,gen} = V\rho c \frac{\vartheta_m^* - \vartheta_m}{\Delta t}$$

bzw.

(3.2)

$$\frac{\Delta \vartheta_m}{\Delta t} = \frac{1}{V\rho c} (\dot{Q}_{m,zuf} + \dot{Q}_{m,gen})$$

Für die zweidimensionale Diskretisierung werden Dreieckselemente verwendet, mit denen jede zweidimensionale Geometrie angenähert werden kann (Rudolphi, 1979; Rudolphi, Müller, 1980; Müller, 1989; Müller, Rudolphi, 1989). Alle Dreieckselemente haben die gleiche Tiefe $\Delta z = 1$. Als einzige Einschränkung, jedoch nur für Dreieckselemente mit Wärmeleitung, wird gefordert, daß kein Winkel größer als 90° sein darf (Dusinberre, 1961).

An den Knoten der Dreieckselemente werden die Temperaturen als zu bestimmende Größen eingeführt. Jedem Knoten wird ein Bereich zugeordnet, der sich aus den Mittelsenkrechten der Dreiecksseiten ergibt, Bild 3.1.

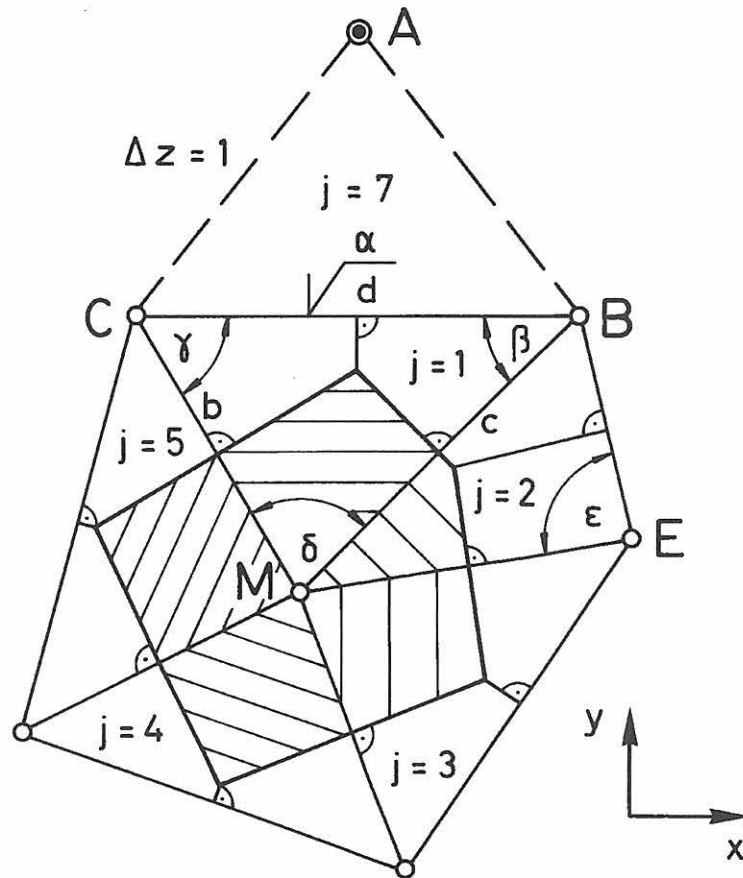


Bild 3.1: Einteilung des Integrationsgebietes in finite Dreieckselemente (Rudolphi, Müller; 1980)

Die Berechnung der den Knotenpunkten M, B, C zugeordneten Teilflächen im Dreieckselement $j = 1$ wird wie folgt vorgenommen:

$$A_M = \frac{b^2 \cot \beta + c^2 \cot \gamma}{8}$$

$$A_B = \frac{c^2 \cot \gamma + d^2 \cot \delta}{8} \quad (3.3)$$

$$A_C = \frac{d^2 \cot \delta + b^2 \cot \beta}{8}$$

Der gesamte dem Knotenpunkt M zugeordnete Bereich m erstreckt sich in der Regel auf Flächenanteile mehrerer Dreieckselemente unterschiedlicher Materialeigenschaften:

$$A_m = \sum_j A_j \quad (3.4)$$

Es wird angenommen, daß die Temperatur in diesem Bereich m gleich der Temperatur des zugehörigen Knotenpunktes M ist:

$$\vartheta_m = \vartheta_M \quad (3.5)$$

Die dem Bereich m bei j Dreieckselementen unterschiedlichen Materials zugeordnete Gesamtwärmekapazität ergibt sich damit zu:

$$V\rho c = (V\rho c)_m = \Delta z \sum_j A_j \rho_j c_j$$

mit: $\rho_j = f(\vartheta_m) \quad (3.6)$

$$c_j = f(\vartheta_m)$$

wobei sowohl die Rohdichte ρ als auch die spezifische Wärmekapazität c Funktionen der Temperatur sein können.

Dem Bereich m fließen von den i anliegenden Knotenpunkten infolge Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung sog. Teilwärmeströme \dot{Q}_i zu, die unter Beachtung des Vorzeichens aufzusummieren sind:

$$Q_{m, \text{zdf}} = \sum_i \dot{Q}_i \quad (3.7)$$

mit $\dot{Q}_i = \dot{Q}_L$ (Wärmeleitung) oder

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_K$$
 (Konvektion) oder

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{Str}$$
 (Strahlung)

Der dem Bereich m (bzw. Knoten M) infolge Wärmeleitung beispielsweise vom Knoten B her zufließende Teilwärmestrom errechnet sich wie folgt, vgl. Bild 3.1:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{BM} = kA(\vartheta_B - \vartheta_M) \quad (3.8)$$

mit
$$kA = \Delta z \lambda_1 S_1 + \Delta z \lambda_2 S_2 \quad (3.9)$$

Hierbei sind λ_1 bzw. λ_2 die Wärmeleitfähigkeiten, S_1 bzw. S_2 die Geometriefaktoren der Dreieckselemente 1 bzw. 2 beiderseits der Dreiecksseite BM. Im Fall der Temperaturabhängigkeit werden die zugrundezulegenden Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit des Mittelwertes der Temperaturen in den Knoten B und M durch Interpolation ermittelt:

$$\lambda_1 = f\left(\frac{\vartheta_B + \vartheta_M}{2}\right) \quad \text{bzw.} \quad \lambda_2 = f\left(\frac{\vartheta_B + \vartheta_M}{2}\right) \quad (3.10)$$

Die Geometriefaktoren S_1 bzw. S_2 errechnen sich nach (Dusinberre, 1961) aus dem Kotangens der in den Dreieckselementen 1 bzw. 2 der Dreiecksseite BM gegenüberliegenden Winkel γ bzw. ε :

$$S_1 = \frac{\cot \gamma}{2} \quad \text{bzw.} \quad S_2 = \frac{\cot \varepsilon}{2} \quad (3.11)$$

Damit ergibt sich der dem Bereich m infolge Wärmeleitung vom Knoten B her zufließende Teilwärmestrom zu:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{BM} = \Delta z \frac{1}{2} (\lambda_1 \cot \gamma + \lambda_2 \cot \varepsilon) (\vartheta_B - \vartheta_M) \quad (3.12)$$

Ist eine außenliegende Dreieckselementseite, z.B. die Dreieckselementseite BC, einer Wärmeübertragung durch Konvektion ausgesetzt, so fließen den Knotenpunkten B und C von Knoten A her zusätzlich folgende Teilwärmeströme zu:

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{AB} = \frac{d}{2} \Delta z \alpha_B (\vartheta_A - \vartheta_B)$$

und (3.13)

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{AC} = \frac{d}{2} \Delta z \alpha_C (\vartheta_A - \vartheta_C)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist entweder eine Konstante

$$\alpha = \alpha_B = \alpha_C, \quad (3.14)$$

oder eine Funktion der Temperaturdifferenz (Absolutbetrag) zwischen Umgebungslufttemperatur und Oberflächentemperatur

$$\alpha = f(|\Delta\vartheta|) \quad (3.15)$$

Ist eine außenliegende Dreieckselementseite, z.B. die Dreieckselementseite BC, einer Wärmeübertragung durch Strahlung ausgesetzt, so fließen den Knotenpunkten B und C von Knoten A her zusätzlich folgende Teilwärmeströme zu:

$$\dot{Q}_{Str} = \dot{Q}_{AB} = \frac{d}{2} \Delta z C_S \varphi \varepsilon_{ges} \varepsilon_{OFF} \left(\left(\frac{\vartheta_A + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_B + 273}{100} \right)^4 \right)$$

und

(3.16)

$$\dot{Q}_{Str} = \dot{Q}_{AC} = \frac{d}{2} \Delta z C_S \varphi \varepsilon_{ges} \varepsilon_{OFF} \left(\left(\frac{\vartheta_A + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_C + 273}{100} \right)^4 \right)$$

Der in Gleichung (3.16) benutzte Konfigurationsfaktor φ erfordert in der Regel die Berechnung komplizierter Gebietsintegrale über alle am Strahlungsaustausch beteiligten Flächen (Mathiak, 1985; Siegel, Howell, Lohrengel, 1991). In Hohlräumen, wo jede Fläche mit jeder anderen Fläche im Strahlungsaustausch steht, wird die Berechnung der Konfigurationsfaktoren vom Programm her vorgenommen.

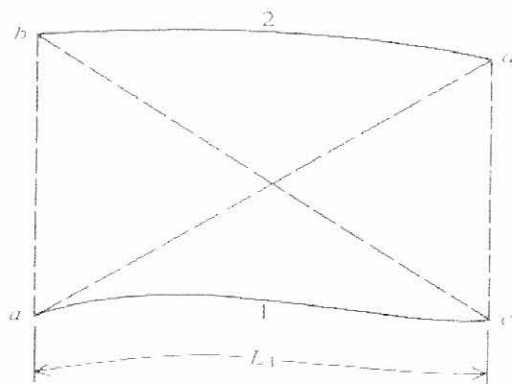


Bild 3.2: Skizze für die Berechnung des Konfigurationsfaktors zwischen Fläche 1 und 2 nach Hottel's Crossed-String-Methode (Kreith, Black, 1980)

Ausgehend von einer Konfiguration nach Bild 3.2 (Kreith, Black, 1980) erfolgt z.B. die Berechnung des Konfigurationsfaktors φ_{12} nach Hottel's Crossed-String-Methode (Hottel, 1954) wie folgt:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2L_1} (\overline{ad} + \overline{cb}) - (\overline{ab} + \overline{cd}) \quad (3.17)$$

(Eichberger, 1985) hat gezeigt, daß Gleichung (3.17) auch für kompliziertere, polygonal umrandete Hohlräume, in denen nicht jede Fläche jede andere vollständig "sehen" kann, anwendbar ist.

Weitere dem Bereich m zu- oder abfließende Wärmeströme können infolge chemischer Reaktion oder Phasenumwandlung entstehen. Die bei der Phasenumwandlung, z.B. bei der Verdampfung des in Baustoffen vorhandenen Wassergehalts oder beim Gefrieren oder Schmelzen, auftretenden Verhältnisse seien im folgenden anhand von Bild 3.3 etwas ausführlicher erläutert (Schwarzott, 1972). Danach wird bei Erreichen der Umwandlungstemperatur ϑ_U die Knotentemperatur solange konstant gehalten, bis die dem Knoten zugeordnete Elementmasse den Aggregatzustand geändert hat. Bei Unter- oder Überschreitung der Umwandlungstemperatur wird der entsprechende Knoten auf ϑ_U gesetzt und solange von der Integration ausgenommen, bis die Umwandlung vollzogen ist. Hierzu muß dem Knoten die gesamte Umwandlungswärmemenge (latente Wärmemenge)

$$W_{lat} = V\rho c \frac{u_m}{100} = mr \frac{u_m}{100} \quad (3.18)$$

bei Verdampfung zugeführt werden. Wird dem Knoten der Wärmestrom \dot{Q}_{ges} in der Zeitdifferenz Δt zugeführt, so gilt für das Phasenumwandlungsverhältnis

$$\gamma(t + \Delta t) = \gamma(t) + \frac{\dot{Q}_{ges} \Delta t}{W_{lat}} \quad (3.19)$$

\dot{Q}_{ges} ergibt sich entsprechend der Trapezregel aus dem Mittelwert der am Intervallanfang und -ende dem Knoten zufließenden Wärmeströme. γ ist das Verhältnis der (bereits umgewandelten) Masse höherer Energie zur Gesamtmasse. Bei Durchlaufen

der Zustände $\gamma = 0$ (z.B. Eis oder Wasser) und $\gamma = 1$ (z.B. Wasser oder Wasserdampf), die ja nur zufällig mit dem Ende einer Zeitschrittweite h zusammentreffen, muß eine entsprechende Korrektur vorgenommen werden. Eine Überschreitung von $\gamma = 0$ oder $\gamma = 1$ um $\Delta\gamma$ muß in eine Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ bzw. eine Überschreitung der Umwandlungstemperatur ϑ_U um $\Delta\vartheta$ in einen entsprechenden Zuwachs des Phasenumwandlungsverhältnisses $\Delta\gamma$ umgerechnet werden.

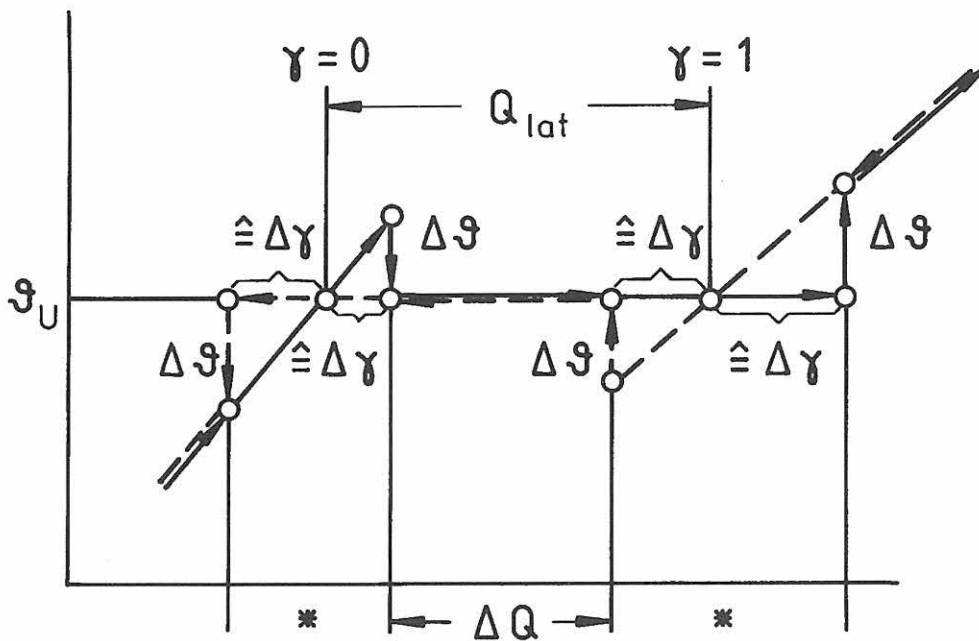


Bild 3.3: Qualitativer Verlauf einer Änderung des Aggregatzustandes in dem einem Knotenpunkt zugeordneten Bereich (Schwarzott, 1972)

Bei den in Bild 3.3 mit * gekennzeichneten Phasen gilt

$$|(\vartheta - \vartheta_U)mc| = |\Delta\gamma W_{lat}| \quad (3.20)$$

mit

$\Delta\gamma = \gamma$	für	$\gamma < 0$
$\Delta\gamma = \gamma - 1$	für	$\gamma > 1$

Bild 3.3 gibt eine Vorstellung vom Ablauf eines Verdampfungsvorganges (ausgezogene Linie von links unten nach rechts oben) oder eines Gefriervorganges (strichlierte Linie von rechts oben nach links unten) sowie vom Vorzeichen der vorzunehmenden Korrekturen. Zu beachten ist, daß bei einer Überführung von Aggregatzustand 0 in den Aggregatzustand 1 die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte sich ändern können. Während des Umwandlungsvorganges werden die dem Knoten durch Wärmeleitung zugeführten Wärmeströme in jedem Dreiecksteilbereich mit einer wie folgt errechneten Wärmeleitfähigkeit bestimmt:

$$\lambda = \gamma\lambda_1 + (1 - \gamma)\lambda_0 \quad (3.21)$$

Zur Errechnung des zwischen zwei Knotenpunkten i und j fließenden Wärmestromes nach Gleichung (3.8) wird unter Berücksichtigung von Gleichung (3.21) mit einem mittleren λ gerechnet:

$$\lambda = \frac{\lambda_i + \lambda_j}{2} \quad (3.22)$$

Damit ist für einen stetigen Übergang von Aggregatzustand 0 in Aggregatzustand 1 gesorgt.

Stellt man für jeden Knotenpunkt - bis auf die Knotenpunkte mit Temperatur- und Randbedingungen - entsprechend Gleichung (3.2) eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung auf, so erhält man für n Knotenpunkte ein System von n gewöhnlichen Differentialgleichungen der Art

$$\vec{\vartheta}' = f(\vec{\vartheta}, t), \quad (3.23)$$

dessen Lösung für die Anfangsbedingung

$$\vec{\vartheta}(t_0) = \vec{\vartheta}_0 \quad (3.24)$$

gesucht ist. Zur Lösung der vorliegenden, teilweise sehr steifen Anfangswertprobleme wird das auf den rückwärts genommenen Differentiationsformeln basierende Verfahren von Gear (Gear, 1971; Gear, 1971; Hindmarsh, 1974; Hindmarsh, 1975) benutzt, wobei für steife Systeme charakteristisch ist, daß in der Lösungsschar Lösungen mit stark unterschiedlichem Wachstumsverhalten enthalten sind (Grigorieff: Band 1 (1972),

Band 2 (1977); Stoer, Bulirsch: Band 1 (1972), Band 2(1978)). Solche schwach und stark abklingenden Lösungskomponenten treten z.B. bei Körpern auf, die aus Baustoffen mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten (z.B. Stahl/Polystyrol-Hartschaum) zusammengesetzt sind und bei sehr dünnen Baustoffschichtdicken.

Explizite Verfahren, aber auch viele implizite Verfahren versagen bei der Lösung derartig steifer Probleme, da bei ihnen aus Stabilitätsgründen die Integrations-schrittweite h sehr klein gewählt werden muß. Damit erhöht sich einerseits die Rechenzeit immens, zum anderen wird die näherungsweise Integration durch Akkumulierung der Rundungsfehler infolge der großen Zahl von Schritten mit diesen Verfahren in der Regel unmöglich. Da das Verfahren von Gear besonders günstige Stabilitätsbereiche aufweist und die steifen Lösungskomponenten besonders stark dämpft, kann nach deren Abklingen die Integrationsschrittweite sehr schnell hochgeschaltet werden. Das auf den rückwärts genommenen Differentiationsformeln basierende Verfahren von Gear ist ein lineares Mehrschrittverfahren, das nach dem Prädiktor/Korrektor-Schema arbeitet. Der mit dem Prädiktor berechnete Startwert wird solange iterativ mit Hilfe des Korrektors verbessert, bis Konvergenz gegen einen Fixpunkt erreicht ist.

4 Beschreibung des Programms TASEF-2D und seiner Grundlagen

Das Programm TASEF-2D wurde zuerst am Lund Institute of Technology und später am National Testing and Research Institute in Schweden für die speziellen Erfordernisse des Brandingenieurwesens entwickelt (Wickström, Report No. 79-2 und 79-3, 1979).

Der Quellcode wurde in FORTRAN und ALGOL geschrieben. Mit TASEF-2D können die Temperaturfelder in zweidimensionalen Festkörpern berechnet werden. Die Körper können aus verschiedenen Baustoffen zusammengesetzt sein, deren Eigenschaften mit der Temperatur variieren können. Die Wärmeübertragung in Hohlräumen wird berücksichtigt. Die Baustoffkennwerte für Stahl, Beton und Mineralfaser ($\rho = 50 \text{ kg/m}^3$) sind im Programmcode abgelegt. Die Kennwerte anderer Baustoffe sind in Tabellenform einzugeben:

- die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur, paarweise wie folgt (T, λ)
- die Wärmekapazität indirekt über die Enthalpie, auch als Funktion der Temperatur, paarweise wie folgt (T, h)
- die Rohdichte als Funktion der Temperatur, paarweise wie folgt (T, ρ)

Die Elementierung des zu untersuchenden Körpers erfolgt zumeist mit Rechteckelementen. Für runde Körperkanten stehen auch Dreieckselemente zur Verfügung.

Die Phasenumwandlung wird durch additive Terme l_i bei der Eingabe der Enthalpie h berücksichtigt:

$$h = \int_{T_0}^T c_p \rho dT + \sum l_i \quad (4.1)$$

Enthält ein Probekörper z.B. Wasser, dann errechnet sich für eine Bezugstemperatur von $T = 0 \text{ °C}$ die Enthalpie wie folgt:

$$\text{für } T < 100 \text{ °C} \quad h = \int_{T_0}^T c_p \rho dT + \int_0^T c_{H_2O} \chi \rho dT \quad (4.2)$$

für $T \geq 100 \text{ °C}$

$$\begin{aligned}
 h &= \int_{T_0}^T c_p \rho dT + \int_0^{100} c_{H_2O} \chi \rho dT + \sum l_i \\
 &= \int_{T_0}^T c_p \rho dT + \int_0^{100} c_{H_2O} \chi \rho dT + \rho \chi Q_{H_2O}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Auf den Rändern des zu betrachteten Körpers und in dessen eventuellen Hohlräumen können sowohl Temperaturen als auch Wärmestromdichten vorgegeben werden. Diese können konstant oder zeitabhängig gewählt werden. Haben mehrere Randknoten die gleichen Bedingungen, werden sie zu Knotengruppen zusammengefaßt. Die Wärmestromdichte auf dem Rand kann als Summe aus Strahlung und Konvektion vorgegeben werden.

$$q = \varepsilon_r \sigma (T_g^4(t) - T_f^4(t)) + \alpha (T_g(t) - T_f(t))^\gamma \tag{4.4}$$

Für die Brandraumtemperatur sind wahlweise die ISO 834 - Kurve oder die Hydro-Carbon-Kurve im Programmcode abgelegt:

ISO 834 Kurve

$$\vartheta(t) - \vartheta_0 = 345 \log (8t + 1) \tag{4.5}$$

Hydro-Carbon-Kurve

$$\vartheta(t) = 1080 [1 - 0.325 e^{-0.167t} - 0.675 e^{-2.5t}] + 20 \tag{4.6}$$

Es lassen sich aber auch beliebige Temperaturkurven vorgeben.

5 Referenzbeispiele im Überblick

Für einen systematischen Vergleich verschiedener Temperaturberechnungsprogramme sind vom CIB (Conseil International du Bâtiment) und von der Vereinigung europäischer Brandschutzlaboratorien (EGOLF) Referenzbeispiele aufgestellt worden (Wickström, Oktober 1997), deren Beschreibung in **Anhang 1** dieser Arbeit abgedruckt ist. Dabei handelt es sich um folgende Problemstellungen mit steigendem Schwierigkeitsgrad:

Referenzbeispiel 1: - Abkühlung eines Probekörpers bei konstanten Baustoffkennwerten, Vergleich mit analytisch errechneten Ergebnissen

Referenzbeispiel 2: - Erwärmung eines Betonkörpers bei Vorgabe konstanter Baustoffkennwerte und nichtlinearer Randbedingungen infolge Strahlung

Referenzbeispiel 3: - Erwärmung eines Betonkörpers bei Vorgabe einer bilinearen Baustoffkennlinie für die Wärmeleitfähigkeit und nichtlinearer Randbedingungen infolge Strahlung

Referenzbeispiel 4: - Erwärmung eines Betonkörpers bei Vorgabe einer bilinearen Baustoffkennlinie für die Wärmeleitfähigkeit, nichtlinearer Randbedingungen infolge Strahlung und Berücksichtigung von Phasenumwandlung durch Verdampfen des im Beton enthaltenen Wassers

Referenzbeispiel 5: - Erwärmung eines zusammengesetzten Körpers aus Stahl und Beton bei Vorgabe nichtlinearer Baustoffkennlinien und Randbedingungen sowie Berücksichtigung von Phasenumwandlung durch Verdampfen des im Beton enthaltenen Wassers

Referenzbeispiel 6: - Erwärmung eines zusammengesetzten Körpers aus Mineralfaser-Dämmstoff und einer sehr dünnen Stahlumfassung bei Vorgabe konstanter Baustoffkennwerte für den Mineralfaser-Dämmstoff, nichtlinearer Baustoffkennlinien für Stahl und nichtlinearer Randbedingungen infolge Strahlung

Referenzbeispiel 7: - Strahlungsübertragung in einem geschlossenen Hohlraum bei
eindimensionaler und bei zweidimensionaler Betrachtung

Die Referenzbeispiele 1 bis 6 sind so aufgebaut, daß in allen Fällen nur ein Viertel-
ausschnitt zu untersuchen ist. Dieser Ausschnitt ist dann mit vier verschiedenen
Elementierungen zu berechnen:

- 1.) mit $n = 4$ Rechteckelementen
- 2.) mit $n = 16$ Rechteckelementen
- 3.) mit $n = 64$ Rechteckelementen
- 4.) mit $n = 256$ Rechteckelementen

Da das Programm INST2D jedoch auf der Grundlage von Dreieckselementen arbeitet,
ergibt sich jeweils die doppelte Anzahl an Dreieckselementen. Bei der Berechnung mit
dem Programm TASEF-2D wurden bei den Referenzbeispielen 1 bis 6 jeweils $n = 4$,
16, 64 und 128 Rechteckelemente zugrundegelegt.

Der in den Referenzbeispielen 1 bis 4 betrachtete Probekörper geht aus Bild 5.1
hervor. Die zugehörigen Baustoffkennwerte und Randbedingungen sind Tab. 5.1 zu
entnehmen; die vorgeschriebenen Elementierungen zeigt Bild 5.2.

Der in den Referenzbeispielen 5 und 6 betrachtete Probekörper geht aus Bild 5.3
hervor. Die zugehörigen Baustoffkennwerte und Randbedingungen sind Tab. 5.2 zu
entnehmen; die vorgeschriebenen Elementierungen zeigt Bild 5.4.

Das Referenzbeispiel 7 beschäftigt sich mit der Behandlung von Hohlräumen. Um die
Strahlungsübertragung möglichst genau zu erfassen, werden die im Strahlungs-
austausch stehenden Flächen in 2, 4 bzw. 8 Teilflächen aufgeteilt. Eine genaue
Beschreibung erfolgt in Kap. 12.

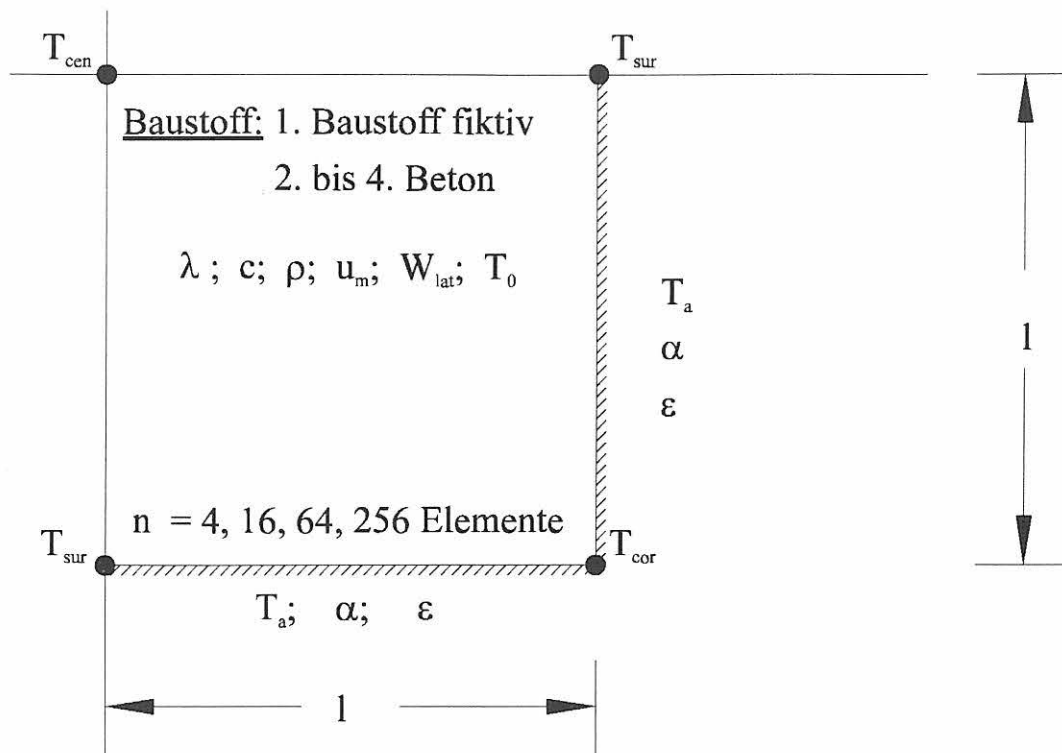


Bild 5.1: Skizze des in den Referenzbeispielen 1 bis 4 untersuchten Probekörpers

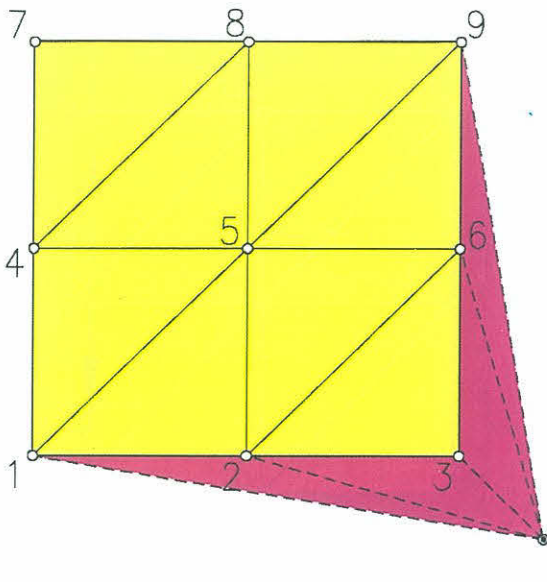
Materialeigenschaften		fiktives Material	Beton		
Symbol	Einheit	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
l	cm	100	10	10	10
λ (T)	W/(mK)	1	1	0 / 1.5 200 / 0.7 1000 / 0.5	0 / 1.5 200 / 0.7 1000 / 0.5
c	J/(kg K)	1	1000	1000	1000
ρ	kg / m ³	1	2400	2400	2400
u_m	%	-	-	-	5

Randbedingungen					
α	W/(m ² K)	1	10	10	10
ϵ	-	-	0.8	0.8	0.8
T_a	°C	0	a) 1000 °C b) ISO 834	a) 1000 °C b) ISO 834	a) 1000 °C b) ISO 834

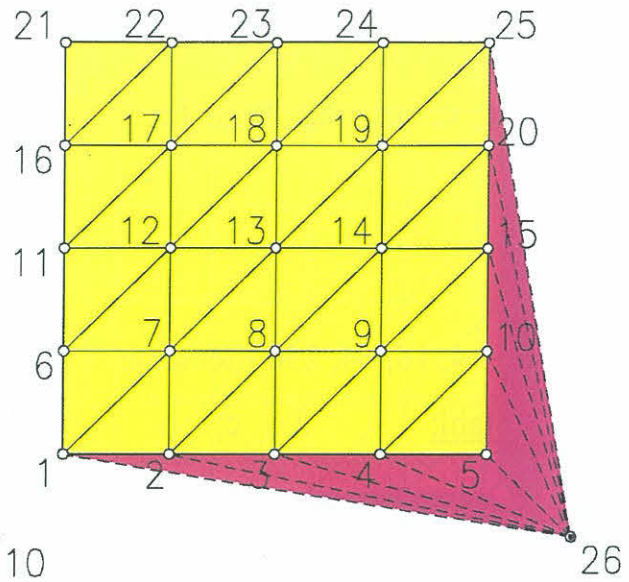
Anfangsbedingungen					
T_0	°C	1000	0	0	0

Tab. 5.1: Zusammenstellung der Abmessungen, Baustoffkennwerte und Randbedingungen für die Referenzbeispiele 1 bis 4

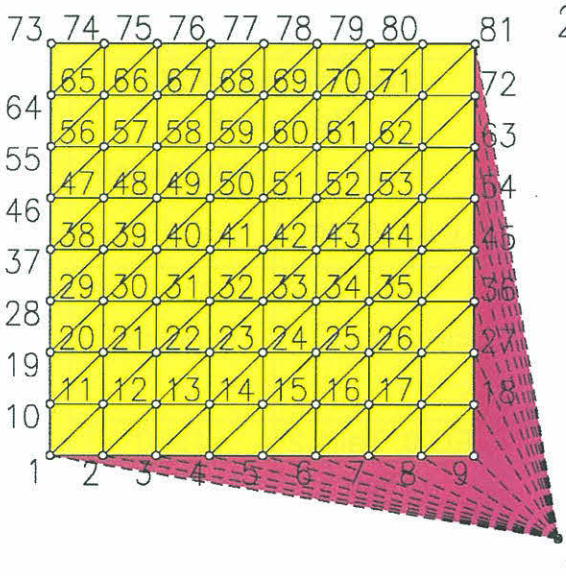
n = 4



n = 16



n = 64



n = 256

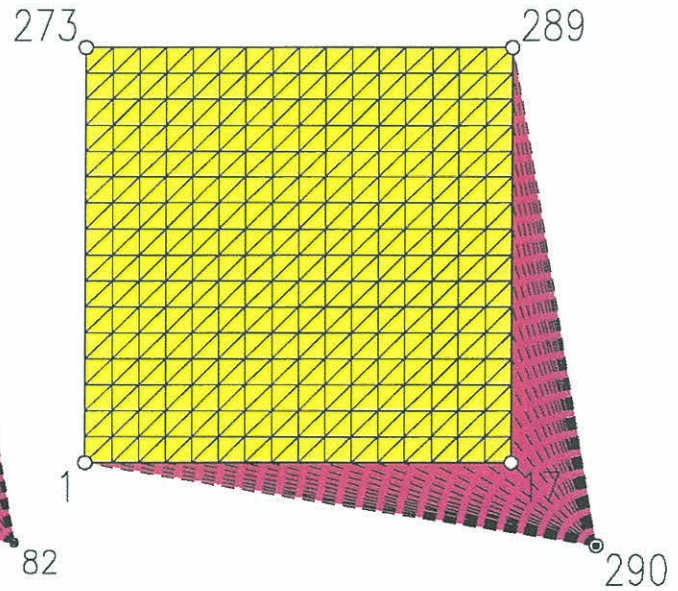


Bild 5.2: Vorgeschriebene Elementierungen der Referenzbeispiele 1 bis 4

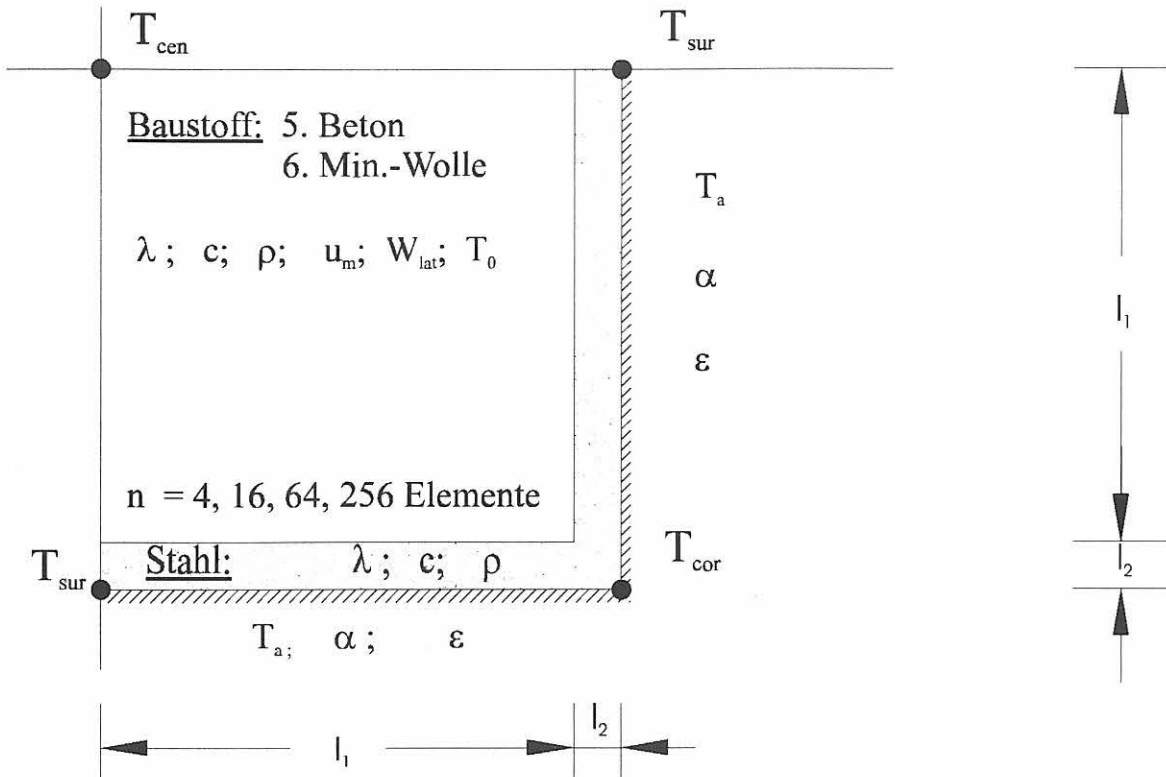


Bild 5.3: Skizze des in den Referenzbeispielen 5 und 6 untersuchten Probekörpers

Materialeigenschaften		Stahl/Beton		Stahl/Mineralwolle	
Symbol	Einheit	Beispiel 5		Beispiel 6	
		Stahl $l_2 = 1 \text{ cm}$	Beton $l_1 = 10 \text{ cm}$	Stahl $l_2 = 0,5 \text{ mm}$	Mineralwolle $l_1 = 10 \text{ cm}$
$\lambda (T)$	W/(mK)	EC 3; Teil1.2	0 / 1.5 200 / 0.7 1000 / 0.5	EC 3; Teil1.2	0.05
$c (T)$	J/(kg K)	EC 3; Teil1.2	1000	EC 3; Teil1.2	1000
ρ	kg / m ³	7850	2400	7850	50
u_m	%	-	5	-	-

Randbedingungen			
α	W/(m ² K)	10	10
ϵ	-	0.8	0.8
T_a	°C	a) 1000 °C b) ISO 834	a) 1000 °C b) ISO 834

Anfangsbedingungen			
T_0	°C	0	0

Tab. 5.2: Zusammenstellung der Abmessungen, Baustoffkennwerte und Randbedingungen für die Referenzbeispiele 5 und 6

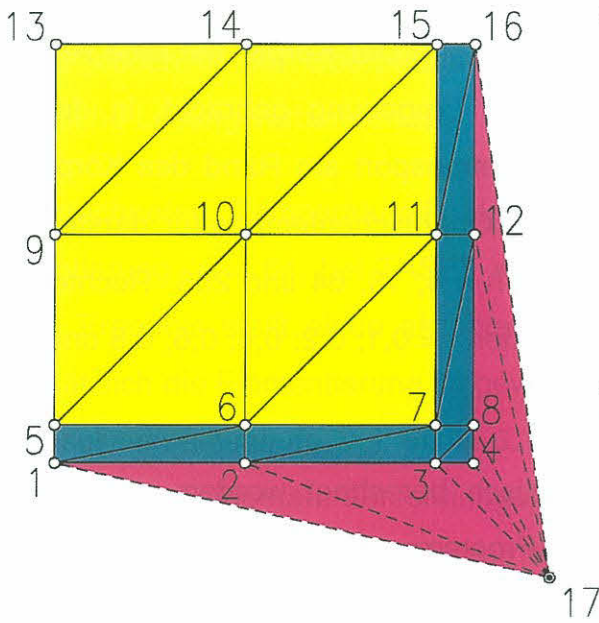
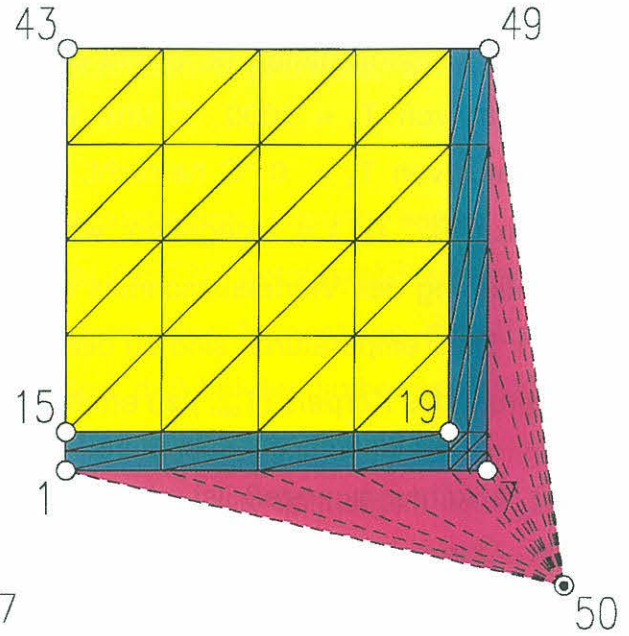
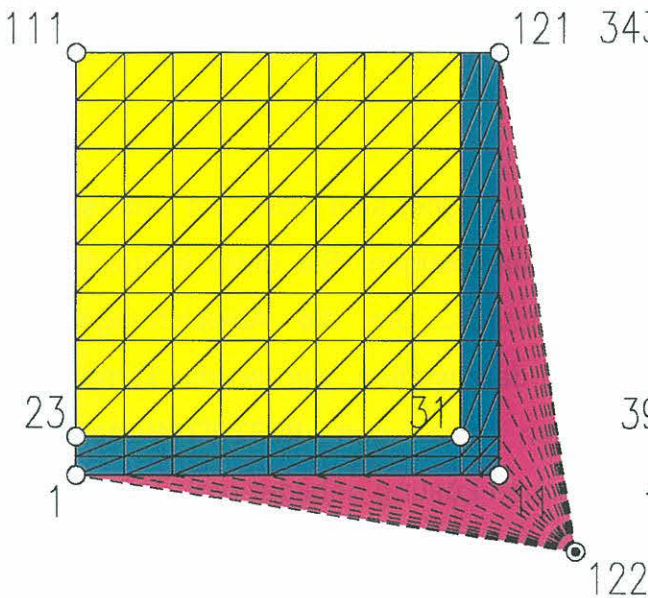
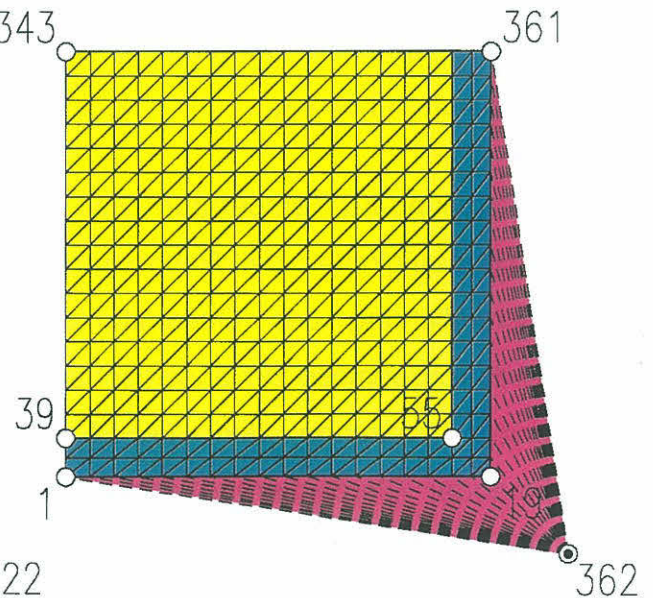
n = 4**n = 16****n = 64****n = 256**

Bild 5.4: Vorgeschriebene Elementierungen der Referenzbeispiele 5 und 6

6 Referenzbeispiel 1

Der zu betrachtende Ausschnitt ist ein Viertel eines Querschnitts durch einen quadratischen Körper mit der Seitenlänge $l = 1 \text{ m}$, der aus einem fiktiven Baustoff mit konstanten Eigenschaften (λ , c und ρ sind 1) besteht. Der Körper hat eine Anfangstemperatur von $T_0 = 1000 \text{ °C}$ und wird in eine Umgebung gebracht, in der eine Temperatur von $T_a = 0 \text{ °C}$ herrscht. Der Wärmetransport am Rand des Körpers ist durch $\alpha (T_a, T_s) = 1$ gegeben, wobei T_s die Oberflächentemperatur darstellt. Die Elementierung des Viertelausschnitts erfolgt mit $n = 4, 16, 64$ und 256 Rechteckelementen. Die Temperaturen sind zu den Zeitpunkten $t = 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ und $1,0 \text{ s}$ im Zentrum des Körpers (T_{cen}) zu ermitteln.

Dieser Abkühlungsprozeß ist ebenfalls analytisch berechnet worden, so daß eine exakte Überprüfung der Ergebnisse der Programme INST2D und TASEF-2D vorgenommen werden kann. In Tab. 6.1 sind die Ergebnisse von TASEF-2D, INST2D und der analytischen Lösung zusammengestellt. Diagr. 6.1 zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei einer Berechnung mit INST2D für $n = 256$ Rechteckelemente, bei einer Berechnung mit TASEF-2D für 128 Rechteckelemente und bei der analytischen Lösung.

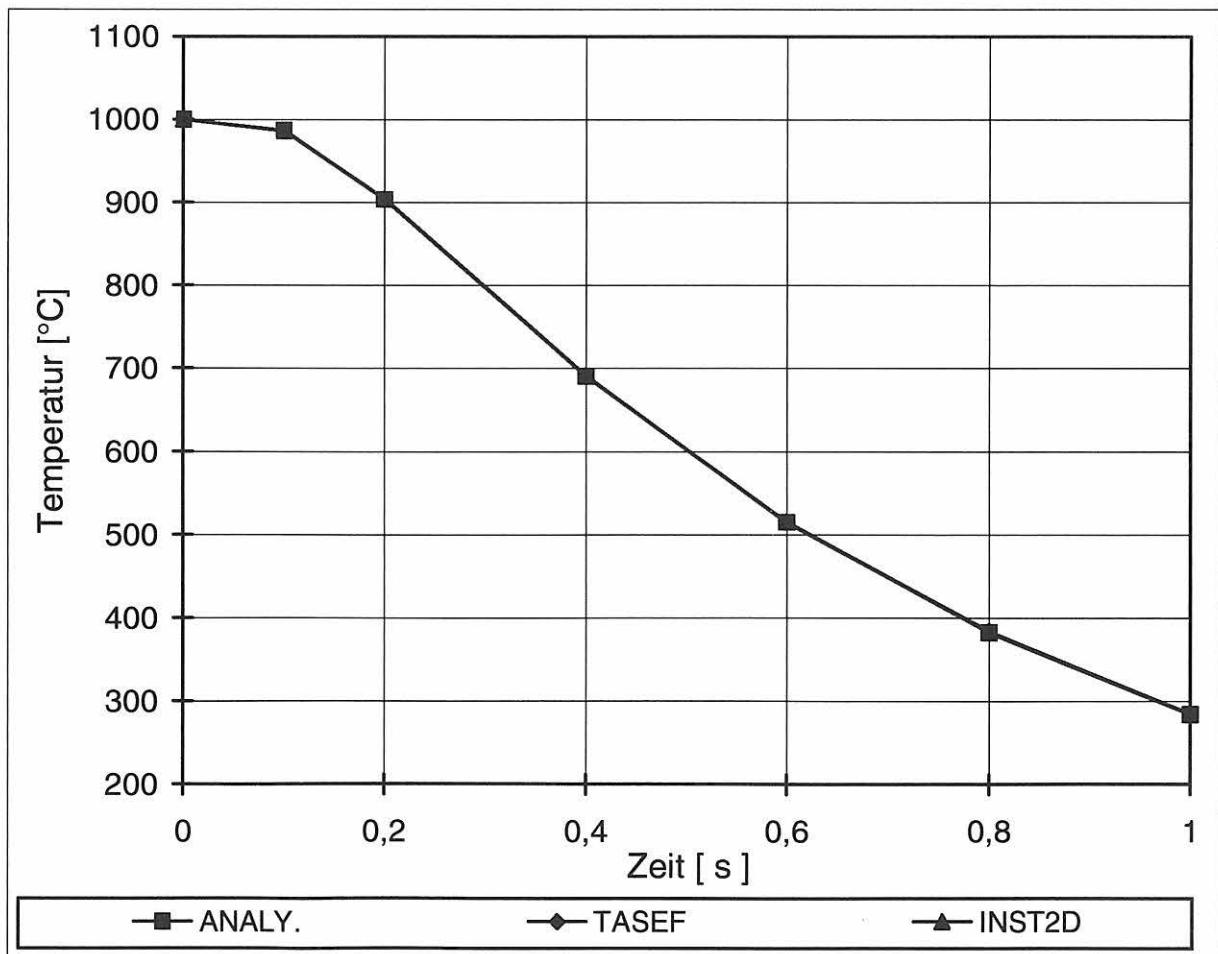
Die Darstellung als Temperatur - Zeit - Diagramm eignet sich nicht, um Unterschiede oder Ungenauigkeiten der Rechenprogramme aufzuzeigen. Sie dient lediglich einer Veranschaulichung des Gesamttemperaturverlaufes. Um die Abweichungen der Temperaturergebnisse zur analytischen Lösung darzustellen, wurden die Temperaturdifferenzen zwischen den TASEF-2D-Werten bzw. den INST2D-Werten (bei zunehmender Elementierung) und der analytischen Lösung gebildet (vgl. Tab. 6.2 und 6.3). Die zugehörigen Diagr. 6.2 und 6.3 zeigen deutlich, daß die Temperaturabweichungen zur analytischen Lösung mit steigender Elementierung des Probekörpers geringer werden. Wie der Temperaturverlauf im Probekörper von der Elementierung abhängt, veranschaulichen die Bilder 6.1 und 6.2 mit den Isothermen (Linien gleicher Temperatur) zum Endzeitpunkt $t = 1,0 \text{ s}$.

Das Beispiel eignet sich gut, um eine erste Überprüfung eines Programmes zur Berechnung von Temperaturverteilungen vorzunehmen. Es werden einfache Material- und Randbedingungen vorgegeben, die an das zu überprüfende Programm keine besonderen Anforderungen stellen. Der Vorteil gegenüber allen anderen Beispielen besteht jedoch in der Überprüfbarkeit der errechneten Ergebnisse, da eine exakte analytische Lösung vorhanden ist.

Die errechneten Temperaturdifferenzen zur analytischen Lösung liegen, ab der Elementierung $n = 64$, bei TASEF wie auch bei INST2D betragsmäßig unter 1,5 K. Dieses Ergebnis stellt einen akzeptablen Grenzwert der Abweichung dar. Es sollte grundsätzlich die Elementierung so gewählt werden, daß bei der Isothermendarstellung glatte Isolinien entstehen, vgl. Bilder 6.1 bis 6.4. Es hat sich als sinnvoll herausgestellt, neben einem Temperaturberechnungsprogramm auch ein leistungsfähiges Grafikprogramm zur Darstellung von Isothermenverläufen zu verwenden, um das errechnete Ergebnis im Hinblick auf seine Richtigkeit abschätzen zu können.

		Temperatur [°C]							
Elemente	n = 4		n = 16		n = 64		n = 128	n = 256	
Programm	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	ANALY.
Zeit [s] 0.0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0.1	978.0	977.9	984.0	983.5	986.0	985.5	986.0	986.1	986.4
0.2	903.0	900.9	904.0	903.3	904.0	903.7	904.0	903.7	903.8
0.4	703.0	697.4	694.0	692.4	691.0	691.0	691.0	690.6	690.2
0.6	528.0	521.3	518.0	516.6	516.0	515.5	515.0	515.2	514.7
0.8	393.0	387.3	386.0	384.2	384.0	383.6	384.0	383.3	382.7
1.0	293.0	287.5	287.0	285.6	285.0	285.2	285.0	285.0	284.5

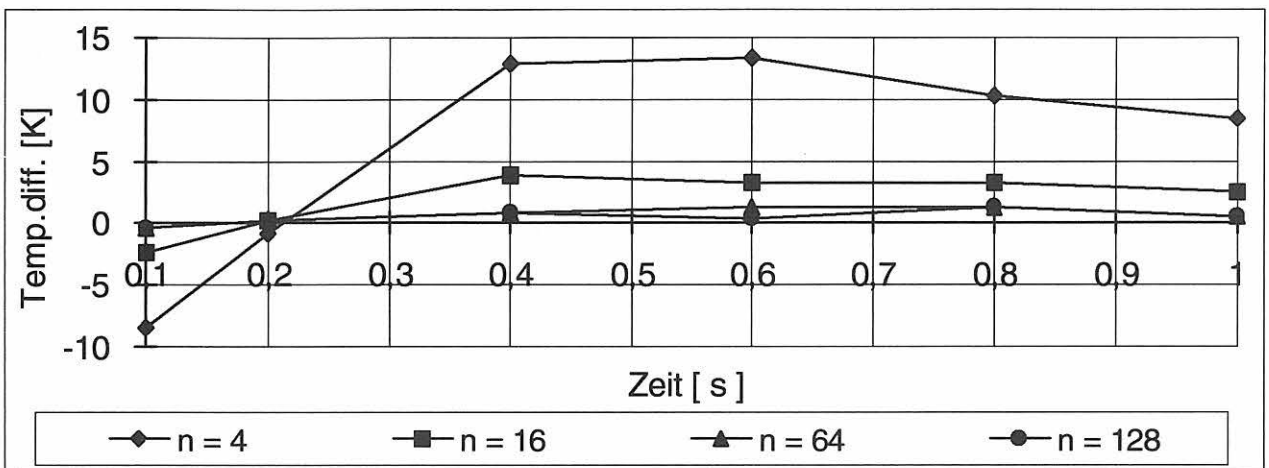
Tab. 6.1: Ergebnisse von TASEF-2D, INST2D und der analytischen Lösung



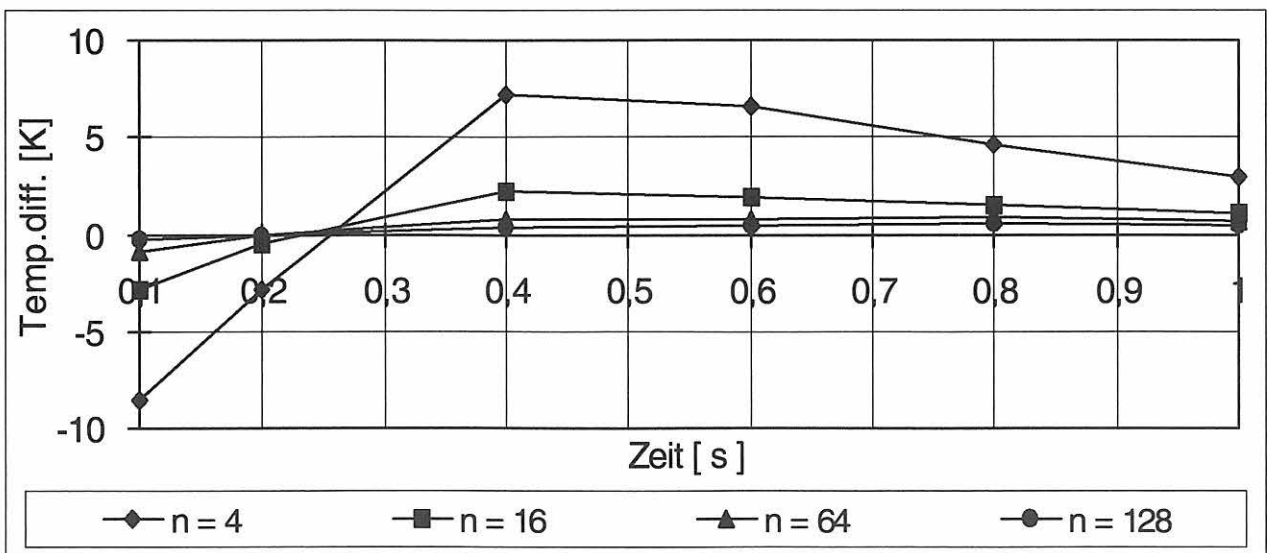
Diagr. 6.1: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrumspunkt bei n = 128 / 256 für Beispiel 1

Tab. 6.2; 6.3/Diagr. 6.1; 6.2 **Referenzbeispiel 1**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der analytischen Lösung

TASEF - analy. Lösung	Zeit [s]					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ΔT [K]; n = 4	-8,4	-0,8	12,8	13,3	10,3	8,5
ΔT [K]; n = 16	-2,4	0,2	3,8	3,3	3,3	2,5
ΔT [K]; n = 64	-0,4	0,2	0,8	1,3	1,3	0,5
ΔT [K]; n = 128	-0,4	0,2	0,8	0,3	1,3	0,5

Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der analytischen Lösung

INST2D- analy. Lös.	Zeit [s]					
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ΔT [K]; n = 4	-8,5	-2,9	7,2	6,6	4,6	3,0
ΔT [K]; n = 16	-2,9	-0,5	2,2	1,9	1,5	1,1
ΔT [K]; n = 64	-0,9	-0,1	0,8	0,8	0,9	0,7
ΔT [K]; n = 128	-0,3	-0,1	0,4	0,5	0,6	0,5



n = 4

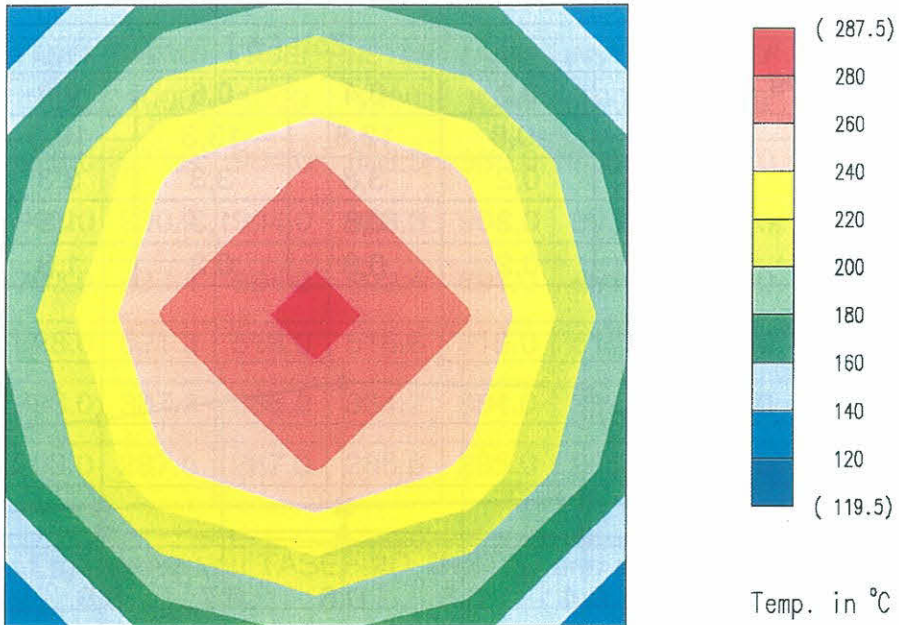


Bild 6.1: Isothermen für Referenzbeispiel 1 mit $n = 4$ Rechteckelementen zum Zeitpunkt $t = 1$ s

n = 16

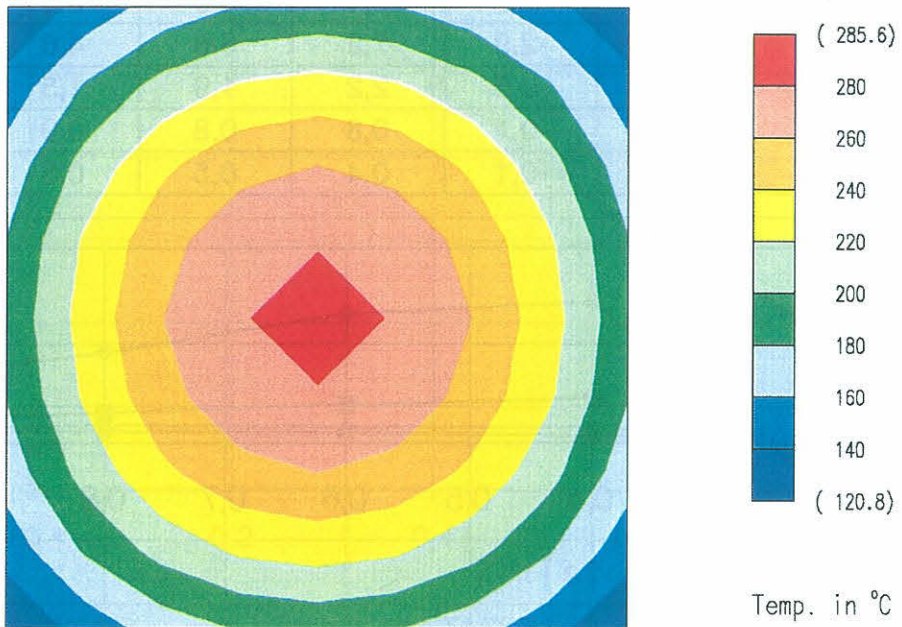
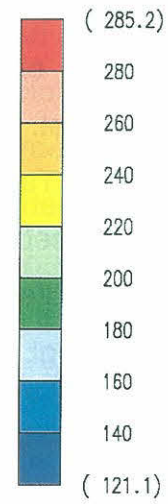
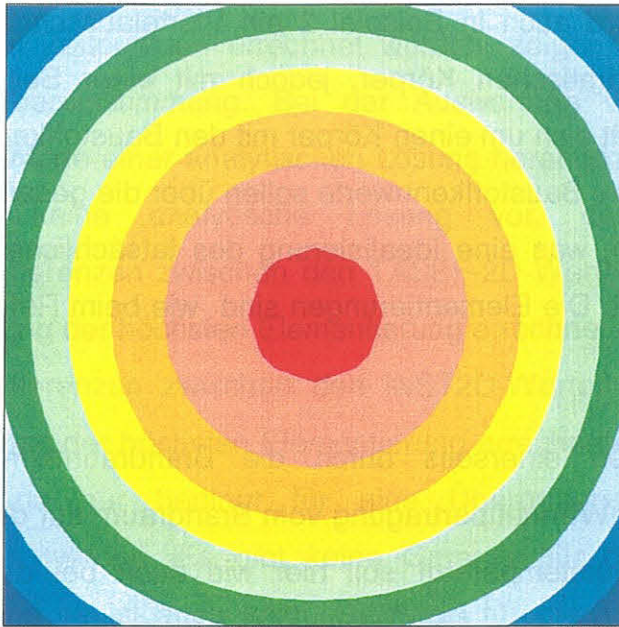


Bild 6.2: Isothermen für Referenzbeispiel 1 mit $n = 16$ Rechteckelementen zum Zeitpunkt $t = 1$ s

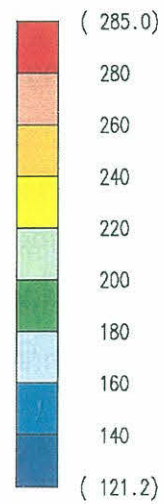
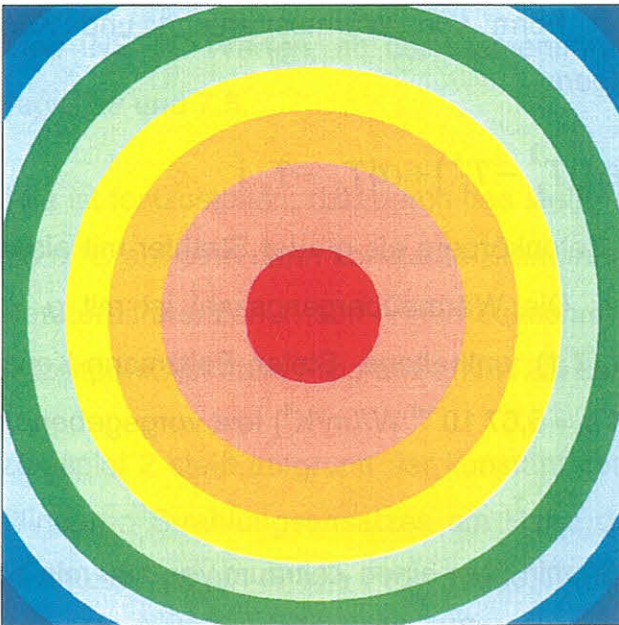
n = 64



Temp. in °C

Bild 6.3: Isothermen für Referenzbeispiel 1 mit $n = 64$ Rechteckelementen zum Zeitpunkt $t = 1$ s

n = 256



Temp. in °C

Bild 6.4: Isothermen für Referenzbeispiel 1 mit $n = 256$ Rechteckelementen zum Zeitpunkt $t = 1$ s

7 Referenzbeispiel 2

Wie schon beim Beispiel 1 wird auch in Beispiel 2 ein Viertelausschnitt aus einem Querschnitt durch einen quadratischen Körper, jedoch mit einer Seitenlänge von $l = 10 \text{ cm}$, betrachtet. Es handelt sich um einen Körper mit den Baustoffkennwerten von Leichtbeton (siehe Tab. 5.1). Die Baustoffkennwerte sollen über die gesamte Zeitdauer als konstant angesetzt werden, was eine Idealisierung des tatsächlichen Verhaltens von Beton im Brandfall darstellt. Die Elementierungen sind wie beim Referenzbeispiel 1 vorzunehmen, (vgl. Bild 5.1).

Die Randbedingungen werden einerseits durch die Brandraumtemperatur und andererseits durch die Art der Wärmeübertragung vom Brandraum auf den Versuchskörper bestimmt. Die Brandraumtemperatur soll hier wie auch bei den Referenzbeispielen 3 bis 6 auf zwei verschiedene Arten angesetzt werden:

- (a) - als eine über das gesamte Zeitintervall konstante Brandraumtemperatur von 1000 °C
- (b) - als eine nach Vorgabe von ISO 834 (ETK) sich ändernde Brandraumtemperatur

Die Wärmeübertragung im Brandraum soll in diesem Beispiel wie auch in den Referenzbeispielen 3 bis 6 in Form von Wärmestrahlung und Konvektion entsprechend Gleichung (7.1) erfolgen:

$$q = \varepsilon\sigma[T_a^4 - T_s^4] + \alpha[T_a - T_s] \quad (7.1)$$

Dabei wird die Oberfläche des Betonkörpers als grauer Strahler mit einer Emissionszahl von $\varepsilon = 0,8$ angenommen. Die Wärmeübergangszahl ist mit $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgelegt. Die in Gleichung (7.1) enthaltene Stefan-Boltzmann-Konstante ist im Programmcode von INST2D mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ fest vorgegeben und muß nicht eingegeben werden.

Die Temperaturen werden alle 30 min über einen Zeitraum von 180 min berechnet. Die von INST2D im Zentrum (cen), an der Oberfläche (sur) und an der Ecke (cor) des Betonkörpers errechneten Temperaturen sind in Tab. 7.1 und Tab. 7.2 den entsprechenden Werten von TASEF-2D gegenübergestellt. Die Darstellung der Rechener-

gebnisse von Beispiel 2a und 2b erfolgt in Diagr. 7.1. Die darin aufgetragenen Temperaturwerte, die von TASEF-2D und INST2D jeweils im Zentrum des Körpers zu vorgegebenen Zeitpunkten errechnet wurden, zeigen bei beiden Beflammungsarten eine gute Übereinstimmung. Bei der Auswertung von Beispiel 1 konnten die errechneten Werte einer analytischen Lösung herangezogen werden. Beim Beispiel 2 liegt leider keine analytische Lösung vor, daher werden einerseits die Temperaturdifferenzen zwischen den TASEF-2D-Werten und den von TASEF-2D bei Zugrundelegung der höchsten Elementierung errechneten Werten und andererseits die Temperaturdifferenzen zwischen den INST2D-Werten und den von TASEF-2D bei Zugrundelegung der höchsten Elementierung errechneten Werten ausgewertet. Dieser Vergleich kann nur bedingt für eine Überprüfung des Programmes INST2D herangezogen werden. Es gibt keine Garantie für die Richtigkeit der Werte von TASEF-2D und es ist auch kein Richtwert für die Toleranz der zu bestimmenden Werte angegeben.

Erwartungsgemäß nähern sich die von TASEF-2D errechneten Temperaturen mit feiner werdender Elementierung den TASEF-2D-Werten bei der höchsten Elementierung mit $n = 128$ Elementen an, vgl. Diagr. 7.2 und 7.4. Wenn man davon ausgeht, daß die Werte von TASEF-2D bei $n = 128$ Elementen eine genaue Lösung darstellen, ist die Differenz zu den INST2D-Werten, ab der Elementierung mit $n = 64$, ebenfalls sehr gering, vgl. Diagr. 7.3 und 7.5.

Beim Beispiel 2a ist festzustellen, daß durch das steife Anfangswertproblem (plötzliche Erwärmung von 0 °C auf eine dann konstante Brandraumtemperatur von 1000 °C) sich größere Temperaturdifferenzen in den ersten Zeitschritten ergeben. Das Annähern der Werte zum Endzeitpunkt ist beim Programm INST2D besser gewährleistet.

Das Referenzbeispiel 2 stellt aufgrund der konstant vorgegebenen Baustoffkennwerte und des nichtlinearen Strahlungsansatzes am Rand des untersuchten Körpers noch relativ geringe Anforderungen an die Programme TASEF-2D und INST2D. Wenn ein Vergleich mit einer analytischen Lösung ausfällt, wäre ein unter den angegebenen Randbedingungen durchgeführter Brandversuch als weiterer Anhaltspunkt für die Richtigkeit der berechneten Temperaturen als nützlich anzusehen.

Tab. 7.1

Ergebnisse für Beispiel 2a (1000°C)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	959,0	959,1	970,0	971,1	979,0	979,5
n = 16	T _{sur} / 1	947,0	946,7	966,0	966,0	977,0	977,0
n = 64	T _{sur} / 1	944,0	944,0	965,0	965,4	977,0	977,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	944,0	943,5	965,0	965,2	977,0	977,0
n = 4	T _{cor} / 3	996,0	998,3	997,0	998,9	998,0	999,2
n = 16	T _{cor} / 5	996,0	997,3	998,0	998,6	999,0	999,0
n = 64	T _{cor} / 9	997,0	997,3	999,0	998,6	999,0	999,0
n = 128/256	T _{cor} / 17	997,0	997,3	999,0	998,6	999,0	999,0
n = 4	T _{cen} / 7	74,0	86,7	247,0	279,0	420,0	463,1
n = 16	T _{cen} / 21	44,0	47,6	228,0	237,9	428,0	441,0
n = 64	T _{cen} / 73	33,0	34,9	224,0	227,6	434,0	437,3
n = 128/256	T _{cen} / 273	32,0	31,5	224,0	225,5	435,0	436,8
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	985,0	985,5	989,0	989,7	992,0	992,6
n = 16	T _{sur} / 1	984,0	984,0	989,0	989,0	992,0	992,0
n = 64	T _{sur} / 1	984,0	983,8	989,0	989,0	992,0	992,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	984,0	983,8	989,0	989,0	992,0	992,0
n = 4	T _{cor} / 3	999,0	999,5	999,0	999,6	999,0	999,7
n = 16	T _{cor} / 5	999,0	999,0	1000,0	999,6	1000,0	999,7
n = 64	T _{cor} / 9	999,0	999,0	1000,0	999,6	1000,0	999,7
n = 128/256	T _{cor} / 17	999,0	999,0	1000,0	999,6	1000,0	1000,0
n = 4	T _{cen} / 7	563,0	609,6	675,0	718,9	759,0	798,5
n = 16	T _{cen} / 21	588,0	600,8	705,0	717,1	790,0	800,0
n = 64	T _{cen} / 73	597,0	600,1	715,0	717,7	799,0	801,0
n = 128/256	T _{cen} / 273	599,0	600,3	716,0	718,1	800,0	801,4

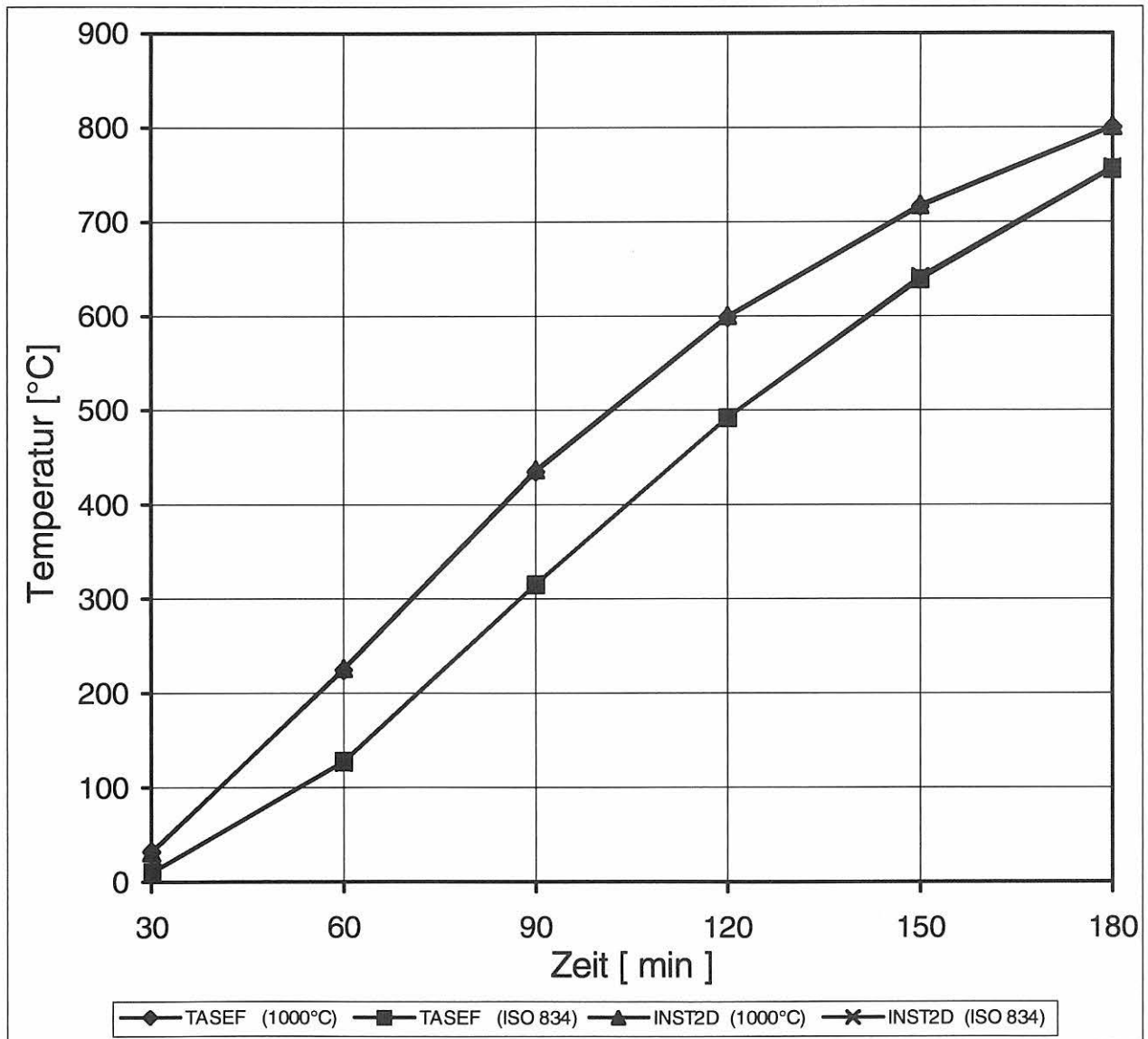
Tab. 7.2

Ergebnisse für Beispiel 2b (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	725,0	712,2	879,0	877,9	955,0	954,7
n = 16	T _{sur} / 1	725,0	723,0	874,0	874,0	953,0	953,0
n = 64	T _{sur} / 1	722,0	721,1	873,0	872,9	952,0	952,1
n = 128/256	T _{sur} / 1	723,0	721,1	873,0	873,0	952,0	952,0
n = 4	T _{cor} / 3	827,0	802,0	921,0	919,1	983,0	982,5
n = 16	T _{cor} / 5	811,0	807,0	921,0	920,0	984,0	983,0
n = 64	T _{cor} / 9	810,0	808,8	921,0	921,0	984,0	984,0
n = 128/256	T _{cor} / 17	811,0	809,0	922,0	921,0	984,0	984,0
n = 4	T _{cen} / 7	30,0	31,6	156,0	170,0	317,0	345,5
n = 16	T _{cen} / 21	15,0	15,8	135,0	138,0	313,0	320,9
n = 64	T _{cen} / 73	11,0	10,7	129,0	129,4	314,0	315,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	10,0	9,3	128,0	127,3	315,0	314,9
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	1007,0	1007,0	1045,0	1046,4	1078,0	1077,7
n = 16	T _{sur} / 1	1006,0	1006,0	1046,0	1046,0	1077,0	1077,0
n = 64	T _{sur} / 1	1006,0	1005,5	1045,0	1045,0	1077,0	1077,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	1006,0	1005,0	1046,0	1045,0	1077,0	1077,0
n = 4	T _{cor} / 3	1027,0	1026,7	1061,0	1060,8	1089,0	1088,5
n = 16	T _{cor} / 5	1028,0	1027,0	1062,0	1061,0	1089,0	1089,3
n = 64	T _{cor} / 9	1028,0	1028,0	1062,0	1060,8	1089,0	1089,3
n = 128/256	T _{cor} / 17	1028,0	1028,0	1062,0	1061,9	1089,0	1089,0
n = 4	T _{cen} / 7	473,0	509,5	608,0	648,0	720,0	760,5
n = 16	T _{cen} / 21	485,0	495,1	630,0	640,5	747,0	757,1
n = 64	T _{cen} / 73	490,0	492,8	637,0	639,7	755,0	756,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	492,0	492,4	639,0	639,6	756,0	756,9

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	30	60	90	120	150	180
TASEF (1000°C)	32,0	224,0	435,0	599,0	716,0	800,0
TASEF (ISO 834)	10,0	128,0	315,0	492,0	639,0	756,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	30	60	90	120	150	180
INST2D (1000°C)	31,5	225,5	436,8	600,3	718,1	801,4
INST2D (ISO 834)	9,3	127,3	314,9	492,4	639,6	756,9

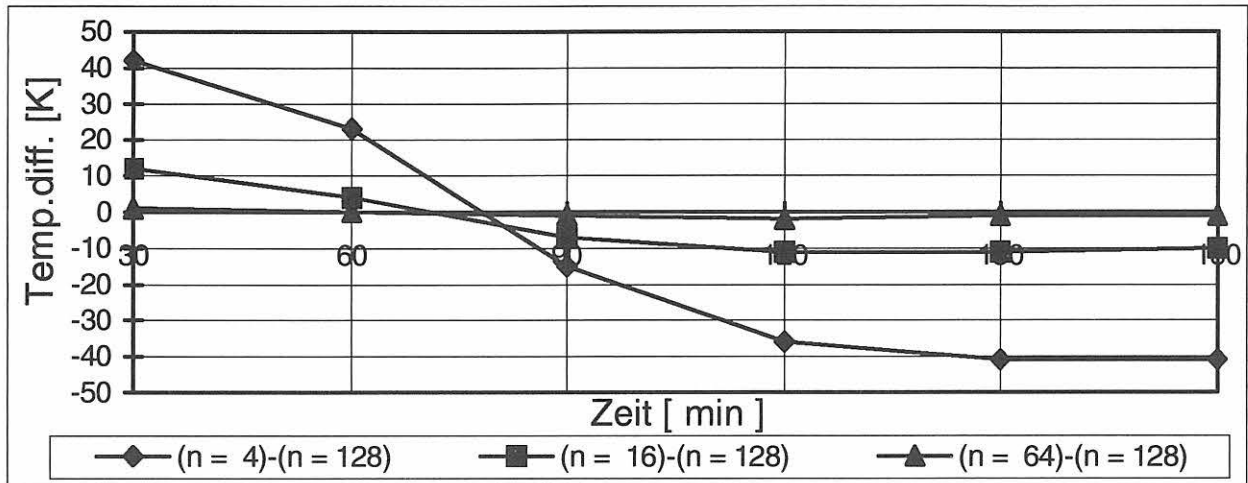


Diagr. 7.1: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für die Beispiele 2a und 2b

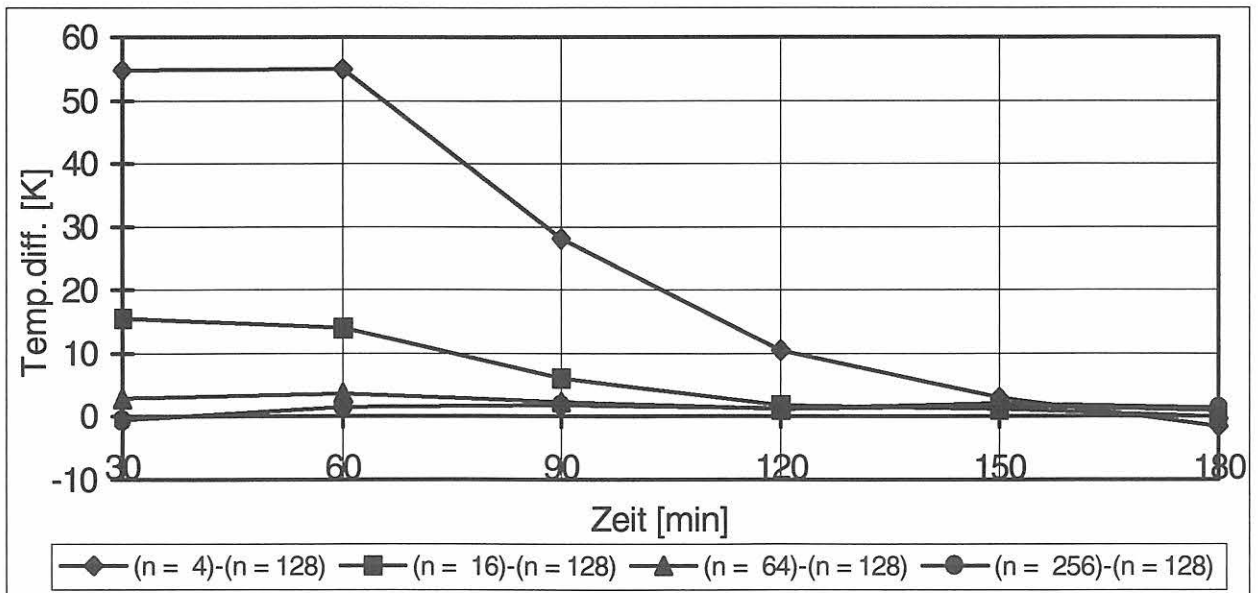
Tab. 7.4;7.5/ Diagr. 7.2;7.3

Beispiel 2a (1000 °C)Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	42,0	23,0	-15,0	-36,0	-41,0	-41,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	12,0	4,0	-7,0	-11,0	-11,0	-10,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	-1,0	-2,0	-1,0	-1,0

Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D - TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	54,7	55,0	28,1	10,6	2,9	-1,5
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	15,6	13,9	6,0	1,8	1,1	0,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	2,9	3,6	2,3	1,1	1,7	1,0
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-0,5	1,5	1,8	1,3	2,1	1,4

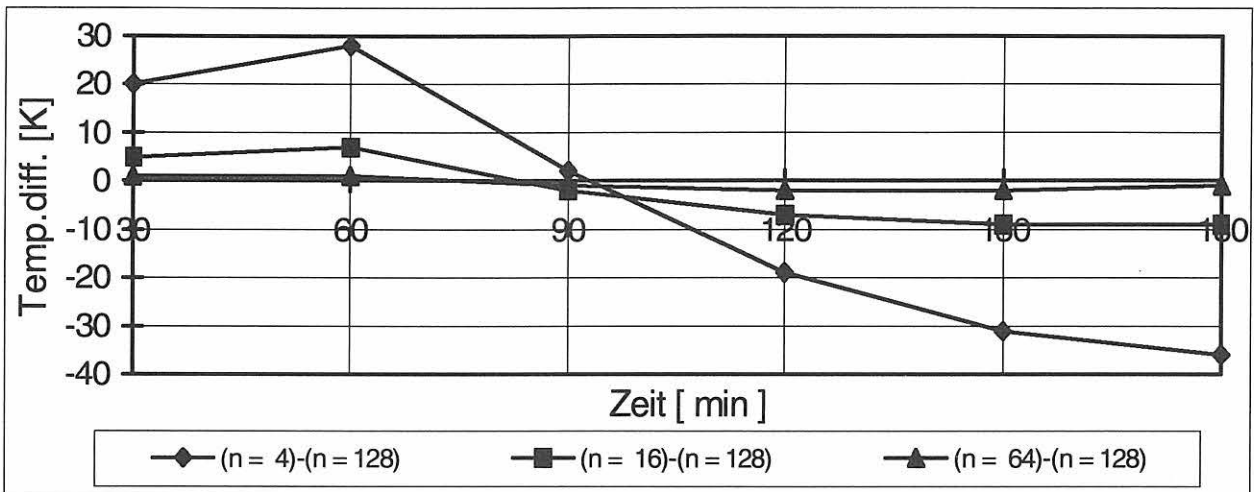


Tab. 7.6;7.7/ Diagr. 7.4;7.5

Beispiel 2b (ISO 834)

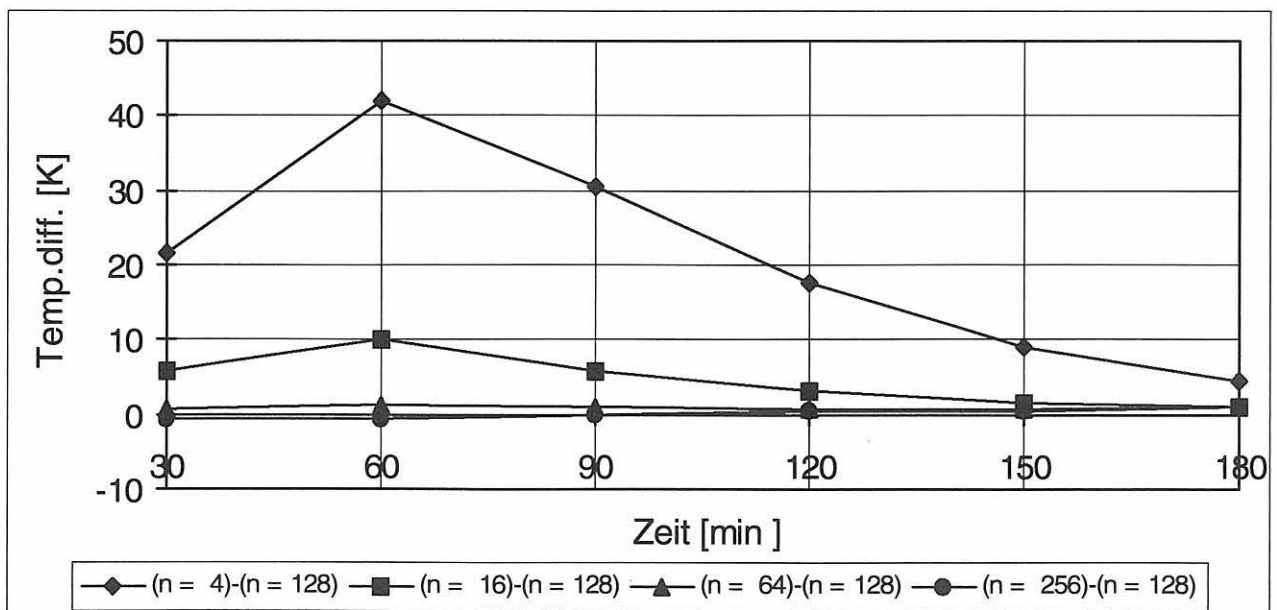
Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	20,0	28,0	2,0	-19,0	-31,0	-36,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,0	7,0	-2,0	-7,0	-9,0	-9,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	1,0	-1,0	-2,0	-2,0	-1,0



Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	21,6	42,0	30,5	17,5	9,0	4,5
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,8	10,0	5,9	3,1	1,5	1,1
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,7	1,4	0,9	0,8	0,7	0,9
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-0,8	-0,7	-0,1	0,4	0,6	0,9



8 Referenzbeispiel 3

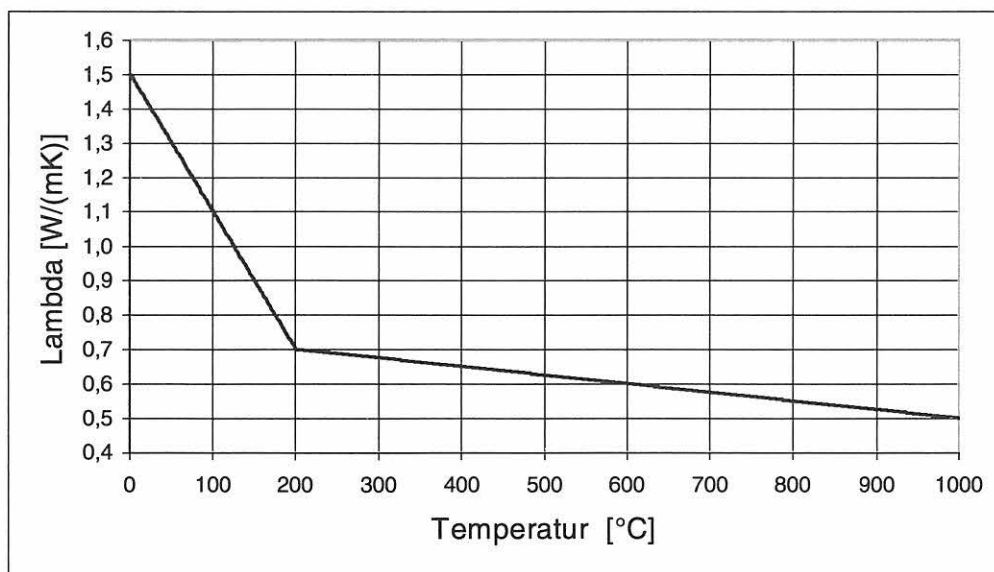
Das Beispiel 3 ist eine Fortführung der Problemstellung von Referenzbeispiel 2. Die Geometrie- und Randbedingungen sind identisch, vgl. Bild 5.1. Der Unterschied besteht in der Vorgabe einer bilinearen Baustoffkennlinie für die Wärmeleitfähigkeit. Die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität sind über die gesamte Zeitdauer konstant. Für die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur sind die folgenden drei Stützpunkte vorgegeben:

$$\lambda (T = 0^\circ\text{C}) = 1,5 \text{ W/(mK)}$$

$$\lambda (T = 200^\circ\text{C}) = 0,7 \text{ W/(mK)}$$

$$\lambda (T = 1000^\circ\text{C}) = 0,5 \text{ W/(mK)}$$

Zwischen den Stützpunkten soll ein geradliniger Verlauf der Wärmeleitfähigkeit angenommen werden. Damit ergeben sich zwei Geraden, die ihren Schnittpunkt bei 200°C haben, vgl. Diagr. 8.1.



Diagr. 8.1: Vorgeschriebener bilinearer Verlauf der Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons als Funktion der Temperatur

Im Programm INST2D ist für die Interpolation paarweise vorgegebener Stützpunkte eine Spline-Interpolation vorgesehen. Hierbei werden die Kennlinien in jedem Teilstück mit einem Polynom 3. Grades approximiert. Die Spline-Interpolation zeichnet sich bei Vorgabe ausreichend vieler Stützpunkte durch geringe Welligkeit, hohe Glätte und Wiedergabe von Symmetrien zwischen den Stützpunkten aus. Bei Vorgabe nur der drei

o.a. Stützpunkte für zwei lineare Teilstücke mit stark unterschiedlicher Steigung hätte die Anwendung der Spline-Interpolation ein Überschwingen der Kurve an der Knickstelle zur Folge. Um dies zu vermeiden, ist es erforderlich, in der Umgebung der Knickstelle die Stützpunkte dichter vorzugeben, zum Beispiel wie folgt:

von	0 °C	bis	150 °C	alle	10 °C	ein λ - Wert
von	150 °C	bis	250 °C	alle	5 °C	ein λ - Wert
von	250 °C	bis	300 °C	alle	10 °C	ein λ - Wert
von	300 °C	bis	1000 °C	alle	100 °C	ein λ - Wert.

Die im einzelnen vorgegebenen Stützpunkte sind Tab. 8.1 zu entnehmen.

Temperatur[°C]	λ [W/(mK)]	Temperatur[°C]	λ [W/(mK)]	Temperatur[°C]	λ [W/(mK)]
0	1,5000	155	0,8800	235	0,69125
10	1,4600	160	0,8600	240	0,6900
20	1,4200	165	0,8400	245	0,68875
30	1,3800	170	0,8200	250	0,6875
40	1,3400	175	0,8000	260	0,6850
50	1,3000	180	0,7800	270	0,6825
60	1,2600	185	0,7600	280	0,6800
70	1,2200	190	0,7400	290	0,6775
80	1,1800	195	0,7200	300	0,6750
90	1,1400	200	0,7000	400	0,6500
100	1,1000	205	0,69875	500	0,6250
110	1,0600	210	0,6975	600	0,6000
120	1,0200	215	0,69625	700	0,5750
130	0,9800	220	0,6950	800	0,5500
140	0,9400	225	0,69375	900	0,5250
150	0,9000	230	0,6925	1000	0,5000

Tab. 8.1: Vorgegebene Wertepaare für die in INST2D angewendete Spline-Interpolation der bilinearen Kennlinie für die Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons

Die weiteren Baustoffkennwerte als auch die Rand- und Anfangsbedingungen sind mit denen von Referenzbeispiel 2 identisch, vgl. Tab. 5.1.

Die Auswertung wird entsprechend der Vorgehensweise beim Beispiel 2 vorgenommen. In den Tab. 8.2 und 8.3 sind die Temperaturwerte, die mit den Programmen TASEF-2D und INST2D zu vorgegebenen Zeitpunkten errechnet wurden, gegenübergestellt. Diagr. 8.2 zeigt den Temperaturverlauf im Zentrum des untersuchten Körpers. Für die Darstellung der Unterschiede zwischen den Rechnungen von TASEF-2D und INST2D dienen die Tab. 8.4 bis 8.7 sowie die Diagr. 8.3 bis 8.6.

Die mit TASEF-2D und INST2D errechneten Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers, vgl. Diagr. 8.2, stimmen bei der jeweils höchsten Elementierung gut überein. Das zeigen auch die Darstellungen der Temperaturdifferenzen. Die Darstellung der TASEF-2D-Werte in Differenz zu den TASEF-2D-Werten bei $n = 128$ zeigt von der Form einen ähnlichen Verlauf wie bei den Beispielen 2a und 2b. Durch die Einführung des bilinearen Verlaufes der Wärmeleitfähigkeit verschiebt sich der Nulldurchgang der Differenzkurven bei den Elementierungen $n = 4, 16$ und 64 um ca. 20 min.

Die Differenzen der errechneten Temperaturen im Zentrum des Körpers bei den jeweils höchsten Elementierungen von TASEF-2D und INST2D betragen im gesamten betrachteten Zeitintervall nicht mehr als 3 K. Das zeigt, daß beide Programme bei der Vorgabe bilinearer Baustoffkennlinien gut funktionieren.

Tab. 8.2

Ergebnisse für Beispiel 3a (1000 °C)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	973,0	972,6	977,0	978,4	982,0	982,9
n = 16	T _{sur} / 1	961,0	960,8	973,0	972,9	980,0	979,6
n = 64	T _{sur} / 1	957,0	956,9	971,0	971,5	979,0	978,9
n = 128/256	T _{sur} / 1	957,0	956,1	971,0	971,2	979,0	978,7
n = 4	T _{cor} / 3	999,0	999,4	998,0	999,6	999,0	999,7
n = 16	T _{cor} / 5	998,0	998,8	999,0	999,3	999,0	999,6
n = 64	T _{cor} / 9	998,0	998,6	999,0	999,3	1000,0	999,5
n = 128/256	T _{cor} / 17	999,0	998,5	999,0	999,3	1000,0	999,5
n = 4	T _{cen} / 7	55,0	66,9	147,0	172,7	250,0	285,6
n = 16	T _{cen} / 21	41,0	43,8	137,0	143,1	243,0	251,8
n = 64	T _{cen} / 73	36,0	36,4	134,0	135,9	242,0	244,6
n = 128/256	T _{cen} / 273	35,0	34,7	134,0	134,7	243,0	243,7
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	985,0	986,3	988,0	988,9	990,0	990,9
n = 16	T _{sur} / 1	984,0	984,1	987,0	987,4	990,0	989,9
n = 64	T _{sur} / 1	984,0	983,7	987,0	987,1	990,0	989,7
n = 128/256	T _{sur} / 1	984,0	983,6	987,0	987,0	990,0	989,6
n = 4	T _{cor} / 3	999,0	999,7	999,0	999,8	999,0	999,8
n = 16	T _{cor} / 5	1000,0	999,7	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 64	T _{cor} / 9	1000,0	999,7	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 128/256	T _{cor} / 17	1000,0	999,7	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 4	T _{cen} / 7	350,0	393,9	442,0	489,4	522,0	571,0
n = 16	T _{cen} / 21	356,0	368,4	459,0	472,3	547,0	560,3
n = 64	T _{cen} / 73	361,0	364,3	467,0	470,4	557,0	559,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	362,0	364,1	468,0	470,6	558,0	560,4

Tab. 8.3

Ergebnisse für Beispiel 3b (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	745,0	730,7	891,0	889,2	961,0	961,1
n = 16	T _{sur} / 1	748,0	746,2	886,0	885,3	959,0	958,7
n = 64	T _{sur} / 1	745,0	743,8	884,0	884,1	958,0	958,2
n = 128/256	T _{sur} / 1	744,0	743,3	884,0	883,9	958,0	958,0

n = 4	T _{cor} / 3	836,0	806,0	924,0	920,4	985,0	983,2
n = 16	T _{cor} / 5	816,0	812,1	923,0	922,0	985,0	984,2
n = 64	T _{cor} / 9	815,0	813,9	923,0	922,7	985,0	984,6
n = 128/256	T _{cor} / 17	815,0	814,6	923,0	923,1	985,0	984,8

n = 4	T _{cen} / 7	28,0	32,4	108,0	124,1	199,0	222,7
n = 16	T _{cen} / 21	21,0	22,3	101,0	104,5	190,0	196,0
n = 64	T _{cen} / 73	19,0	19,0	99,0	100,1	189,0	190,7
n = 128/256	T _{cen} / 273	18,0	18,2	99,0	99,4	189,0	189,9

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180

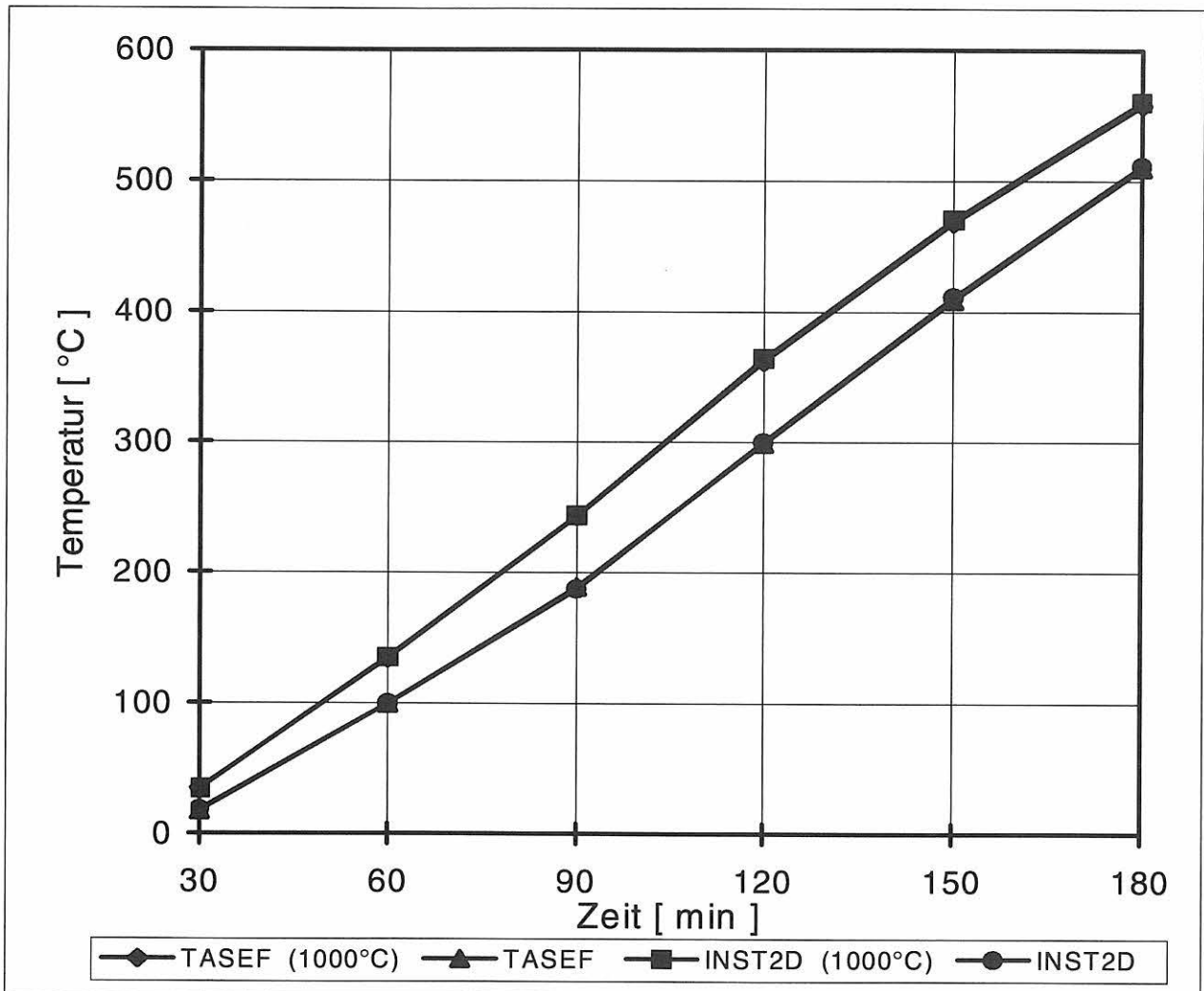
n = 4	T _{sur} / 1	1011,0	1010,4	1048,0	1047,9	1078,0	1078,0
n = 16	T _{sur} / 1	1009,0	1008,8	1047,0	1046,7	1077,0	1077,2
n = 64	T _{sur} / 1	1009,0	1008,5	1047,0	1046,5	1077,0	1077,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	1009,0	1008,4	1047,0	1046,4	1077,0	1076,9

n = 4	T _{cor} / 3	1028,0	1027,2	1062,0	1061,1	1089,0	1088,7
n = 16	T _{cor} / 5	1028,0	1027,8	1062,0	1061,6	1089,0	1089,1
n = 64	T _{cor} / 9	1028,0	1028,1	1062,0	1061,8	1089,0	1089,2
n = 128/256	T _{cor} / 17	1028,0	1028,3	1062,0	1061,9	1089,0	1089,3

n = 4	T _{cen} / 7	298,0	330,9	395,0	434,6	485,0	529,0
n = 16	T _{cen} / 21	296,0	305,2	403,0	414,3	502,0	513,6
n = 64	T _{cen} / 73	299,0	300,8	409,0	411,3	509,0	511,7
n = 128/256	T _{cen} / 273	299,0	300,2	409,0	411,0	510,0	511,6

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	30	60	90	120	150	180
TASEF (1000°C)	35,0	134,0	243,0	362,0	468,0	558,0
TASEF (ISO 834)	18,0	99,0	189,0	299,0	409,0	510,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	30	60	90	120	150	180
INST2D (1000°C)	34,7	134,7	243,7	364,1	470,6	560,4
INST2D (ISO 834)	18,2	99,4	189,9	300,2	411,0	511,6

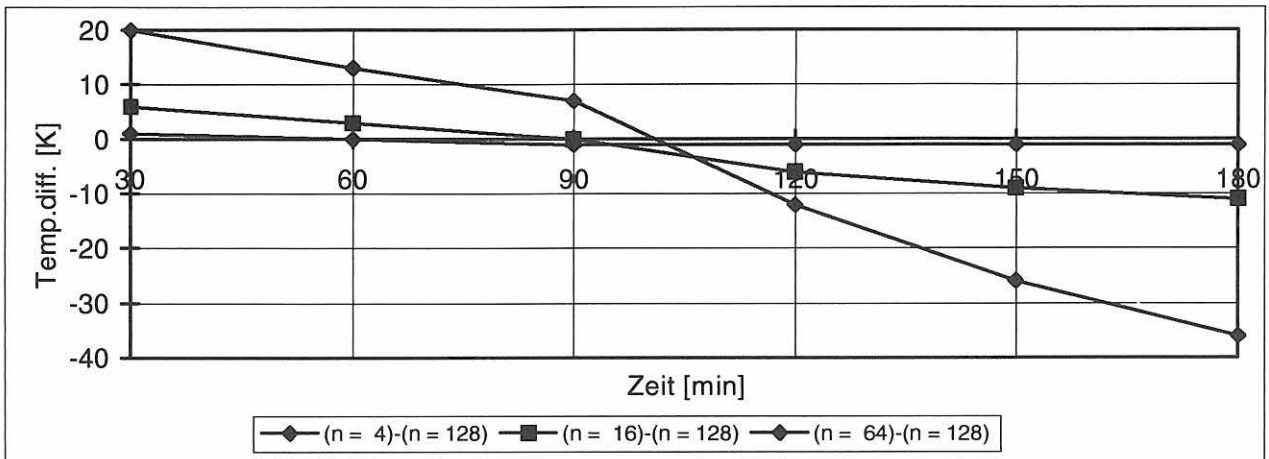


Diagr. 8.2: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für die Beispiele 3a und 3b

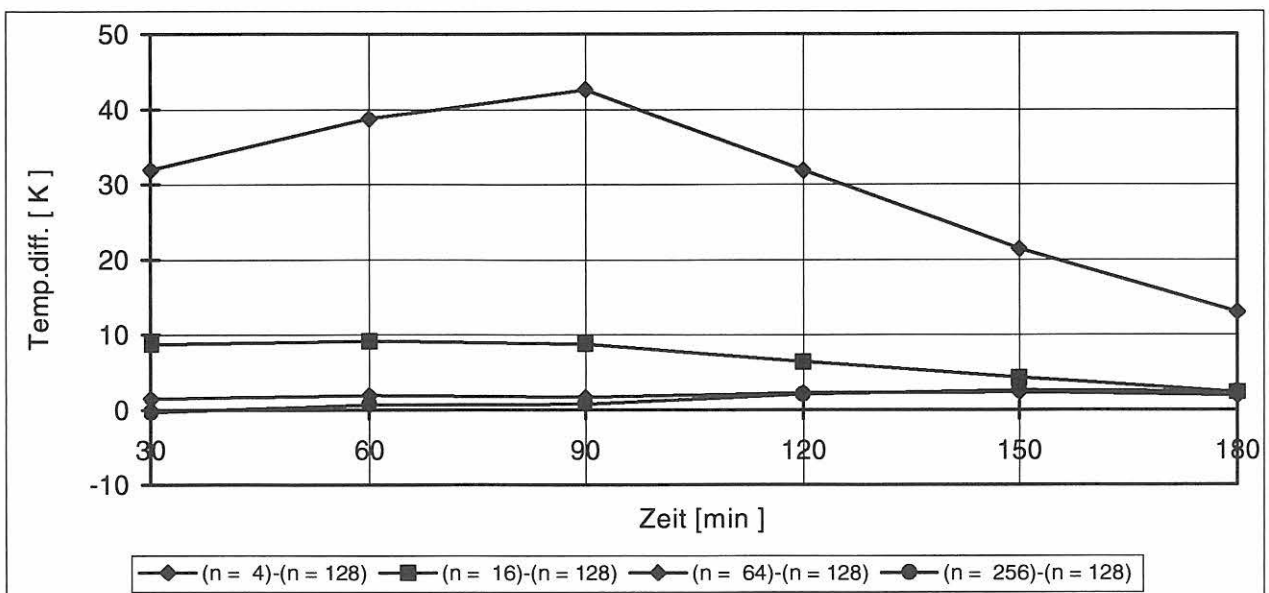
Tab. 8.4; 8.5 / Diagr. 8.3; 8.4

Beispiel 3a (1000°C)Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	20,0	13,0	7,0	-12,0	-26,0	-36,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	6,0	3,0	0,0	-6,0	-9,0	-11,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0

Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

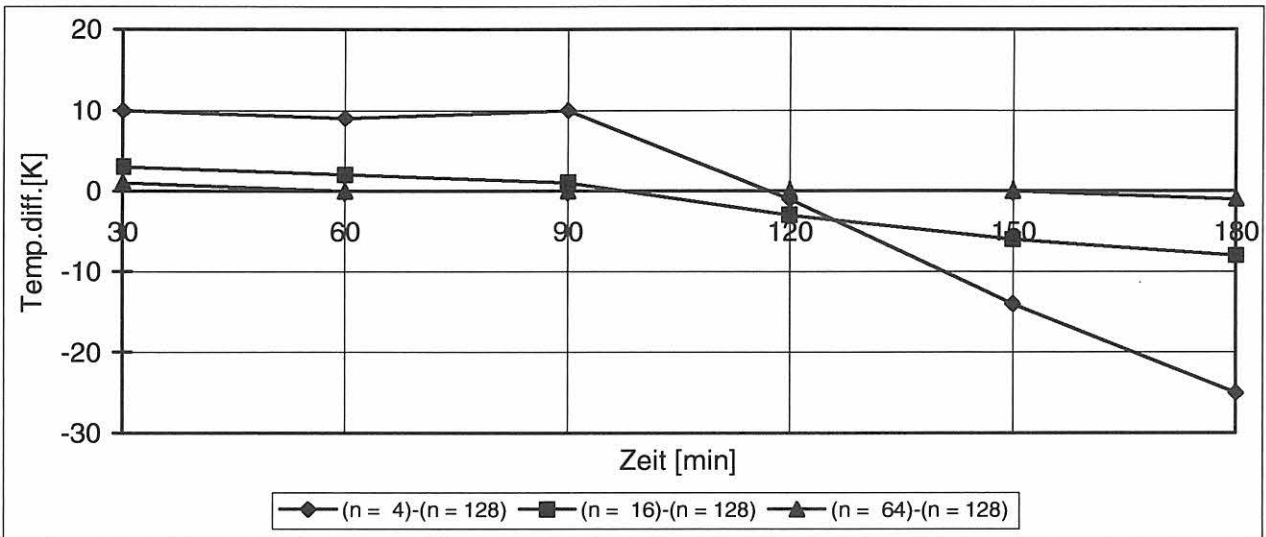
INST2D -TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	31,9	38,7	42,6	31,9	21,4	13,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	8,8	9,1	8,8	6,4	4,3	2,3
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,4	1,9	1,6	2,3	2,4	1,9
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-0,3	0,7	0,7	2,1	2,6	2,4



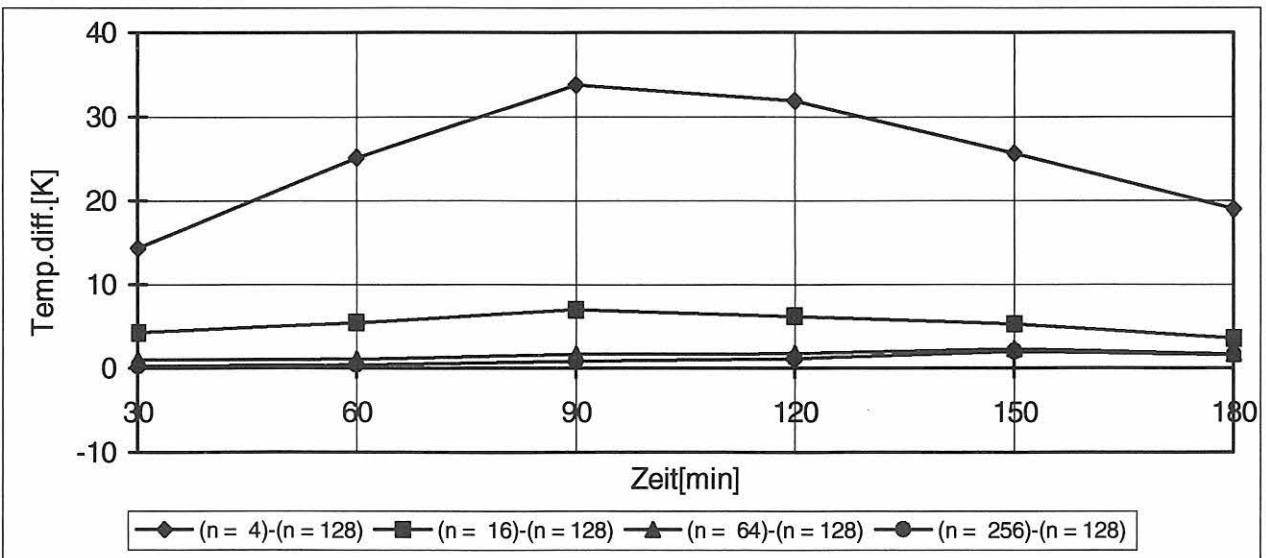
Tab. 8.6; 8.7 / Diagr. 8.5; 8.6

Beispiel 3b (ISO 834)**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	10,0	9,0	10,0	-1,0	-14,0	-25,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,0	2,0	1,0	-3,0	-6,0	-8,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0

**Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	14,4	25,1	33,7	31,9	25,6	19,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	4,3	5,5	7,0	6,2	5,3	3,6
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	1,1	1,7	1,8	2,3	1,7
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	0,2	0,4	0,9	1,2	2,0	1,6



9 Referenzbeispiel 4

Aufbauend auf Referenzbeispiel 3 soll die Erwärmung des Leichtbetonkörpers nach Bild 5.1 bei diesem Beispiel unter Zugrundelegung eines Feuchtegehaltes von 5% erfolgen. Die übrigen Baustoffkennlinien, Rand- und Anfangsbedingungen sind mit denen aus Beispiel 3 identisch, vgl. Tab. 5.1. Die Umwandlung der im Beton enthaltenen Feuchte in Wasserdampf soll im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 120 °C stattfinden. Beim Programm INST2D muß jedoch die Temperatur, bei deren Erreichen die Phasenumwandlung einsetzen soll, explizit vorgegeben werden. Bei den weiteren Berechnungen mit INST2D wird deshalb von einer Umwandlungstemperatur ϑ_u von 100 °C ausgegangen. Die Verdampfungswärme von Wasser wird mit $2,26 \cdot 10^6$ J/kg vorgegeben, so daß sich dann die für die Phasenumwandlung des Wassers in Dampf benötigte Umwandlungswärmemenge (latente Wärmemenge) pro m^3 Volumen wie folgt ergibt:

$$W_{\text{lat}} = 0,05 \cdot 2400 \cdot 2,26 \cdot 10^6 = 27,12 \cdot 10^9 \text{ J}$$

Wertet man die von TASEF-2D und INST2D im Zentrum des Körpers berechneten Temperaturen aus, so erkennt man, daß sie erhebliche Abweichungen aufweisen. Um den Beginn und das Ende der Phasenumwandlung genauer sehen zu können, wurden beim Referenzbeispiel 4b die Zeitschritte der Rechnung auf 5 min verkürzt. Um die Übersichtlichkeit nicht zu beeinträchtigen, werden die Temperatur-Zeit-Verläufe der Beispiele 4a und 4b separat in den Diagr. 9.1 und 9.2 dargestellt.

Die Abweichungen zwischen den mit TASEF-2D und INST2D errechneten Temperaturen sind den Tab. 9.3 bis 9.6 und den Diagr. 9.3 bis 9.6 zu entnehmen. Aus diesen Diagrammen ist ersichtlich, daß zum Zeitpunkt $t = 90$ min sowohl beim Beispiel 4a als auch beim Beispiel 4b die Temperaturabweichung nahezu 0 K beträgt. Das ist nicht anders zu erwarten, da sich beide Programme zu diesem Zeitpunkt in der Phasenumwandlung befinden. Aus Diagr. 9.2 ist zu ersehen, daß INST2D und TASEF-2D die Phasenumwandlung nicht zum gleichen Zeitpunkt beenden. Das könnte daran liegen, daß INST2D die Umwandlungstemperatur während der Phasenumwandlung konstant auf einen vorgegebenen Wert, hier z.B. 100 °C, hält.

Beim Programm TASEF2D findet dagegen die Phasenumwandlung in einem vorgegebenen Temperaturbereich, hier zwischen 100 °C und 120 °C, statt. Aus den Diagr. 9.1, 9.2, 9.4 und 9.6 ist ferner ersichtlich, daß nach Beendigung der Phasenumwandlung beim Programm INST2D ein sehr viel steilerer Temperaturanstieg stattfindet, so daß zum Endzeitpunkt große Abweichungen zwischen den mit TASEF-2D und INST2D errechneten Temperaturen auftreten. Es steht fest, daß beide Programme unterschiedliche Verfahren zur Berücksichtigung der Phasenumwandlung benutzen. TASEF-2D verwendet die sog. Enthalpie-Methode, während in INST2D die "Heat-Source-Methode" implementiert ist (siehe Kap. 3 und 4). Ob die Abweichungen durch die Verwendung unterschiedlicher Verfahren zur Berücksichtigung der Phasenumwandlung oder durch Fehler bei der Realisierung dieser Methoden bedingt sind, kann anhand des vorliegenden Referenzbeispiels nicht endgültig entschieden werden. Deshalb sollen zur Überprüfung des Programms INST2D weitere Beispiele mit Phasenumwandlung herangezogen werden, vgl. Kap. 14.

Tab. 9.1

Ergebnisse für Beispiel 4a (1000°C)

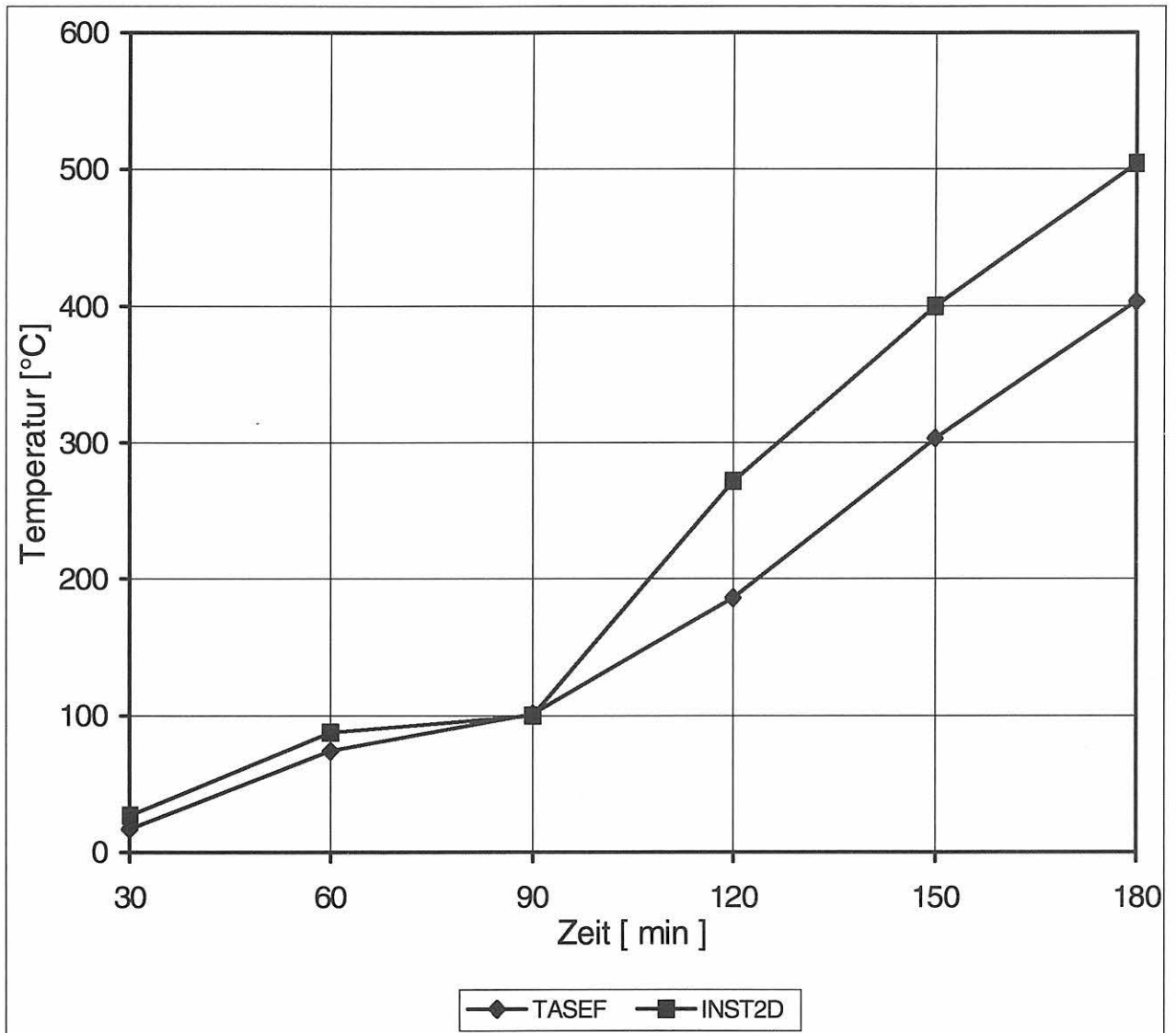
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	975,0	962,4	972,0	976,6	977,0	981,2
n = 16	T _{sur} / 1	953,0	958,0	967,0	970,1	974,0	976,3
n = 64	T _{sur} / 1	948,0	952,8	965,0	968,4	973,0	978,9
n = 128/256	T _{sur} / 1	948,0	951,9	965,0	967,9	973,0	976,0
n = 4	T _{cor} / 3	1004,0	999,3	998,0	999,5	998,0	999,6
n = 16	T _{cor} / 5	997,0	998,7	999,0	999,3	999,0	999,5
n = 64	T _{cor} / 9	998,0	998,4	999,0	999,2	999,0	999,5
n = 128/256	T _{cor} / 17	998,0	998,4	999,0	999,2	999,0	999,5
n = 4	T _{cen} / 7	35,0	61,5	92,0	100,0	112,0	208,2
n = 16	T _{cen} / 21	22,0	39,2	79,0	96,9	104,0	124,8
n = 64	T _{cen} / 73	18,0	29,5	75,0	89,4	102,0	100,0
n = 128/256	T _{cen} / 273	17,0	26,5	74,0	87,2	101,0	100,0
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	981,0	985,0	984,0	987,9	987,0	990,1
n = 16	T _{sur} / 1	979,0	982,2	983,0	985,9	986,0	988,7
n = 64	T _{sur} / 1	978,0	981,5	982,0	985,3	985,0	988,2
n = 128/256	T _{sur} / 1	978,0	981,3	982,0	985,2	985,0	988,1
n = 4	T _{cor} / 3	999,0	999,7	999,0	999,8	999,0	999,8
n = 16	T _{cor} / 5	999,0	999,6	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 64	T _{cor} / 9	1000,0	999,6	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 128/256	T _{cor} / 17	1000,0	999,6	1000,0	999,7	1000,0	999,8
n = 4	T _{cen} / 7	185,0	337,0	284,0	445,3	371,0	535,8
n = 16	T _{cen} / 21	175,0	290,1	295,0	412,5	392,0	512,7
n = 64	T _{cen} / 73	184,0	274,8	301,0	402,2	401,0	505,5
n = 128/256	T _{cen} / 273	186,0	271,6	303,0	400,0	403,0	504,1

Tab. 9.2

Ergebnisse für Beispiel 4b (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	703,0	705,2	884,0	885,3	955,0	958,9
n = 16	T _{sur} / 1	732,0	736,0	877,0	880,6	952,0	955,9
n = 64	T _{sur} / 1	728,0	734,0	875,0	879,9	951,0	955,1
n = 128/256	T _{sur} / 1	728,0	734,3	875,0	879,4	951,0	954,8
n = 4	T _{cor} / 3	850,0	804,6	924,0	920,3	984,0	983,2
n = 16	T _{cor} / 5	816,0	811,5	922,0	921,9	984,0	984,1
n = 64	T _{cor} / 9	813,0	813,2	923,0	922,6	985,0	984,5
n = 128/256	T _{cor} / 17	813,0	813,9	923,0	922,9	985,0	984,7
n = 4	T _{cen} / 7	17,0	33,4	66,0	93,2	105,0	117,3
n = 16	T _{cen} / 21	11,0	19,3	60,0	77,3	100,0	100,0
n = 64	T _{cen} / 73	9,0	15,6	56,0	72,0	98,0	99,6
n = 128/256	T _{cen} / 273	8,0	14,4	56,0	70,0	98,0	99,5
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	1005,0	1008,8	1043,0	1046,7	1074,0	1077,2
n = 16	T _{sur} / 1	1003,0	1006,7	1042,0	1045,2	1073,0	1076,0
n = 64	T _{sur} / 1	1003,0	1006,1	1042,0	1044,7	1073,0	1075,7
n = 128/256	T _{sur} / 1	1003,0	1006,0	1042,0	1044,6	1073,0	1075,6
n = 4	T _{cor} / 3	1027,0	1027,1	1061,0	1061,1	1089,0	1088,7
n = 16	T _{cor} / 5	1028,0	1027,8	1062,0	1061,5	1089,0	1089,0
n = 64	T _{cor} / 9	1028,0	1028,1	1062,0	1061,8	1089,0	1089,2
n = 128/256	T _{cor} / 17	1028,0	1028,2	1062,0	1061,9	1089,0	1089,3
n = 4	T _{cen} / 7	127,0	256,9	231,0	378,8	327,0	485,1
n = 16	T _{cen} / 21	115,0	206,7	231,0	342,8	340,0	457,7
n = 64	T _{cen} / 73	111,0	192,0	239,0	332,2	348,0	449,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	110,0	189,6	241,0	330,5	350,0	448,7

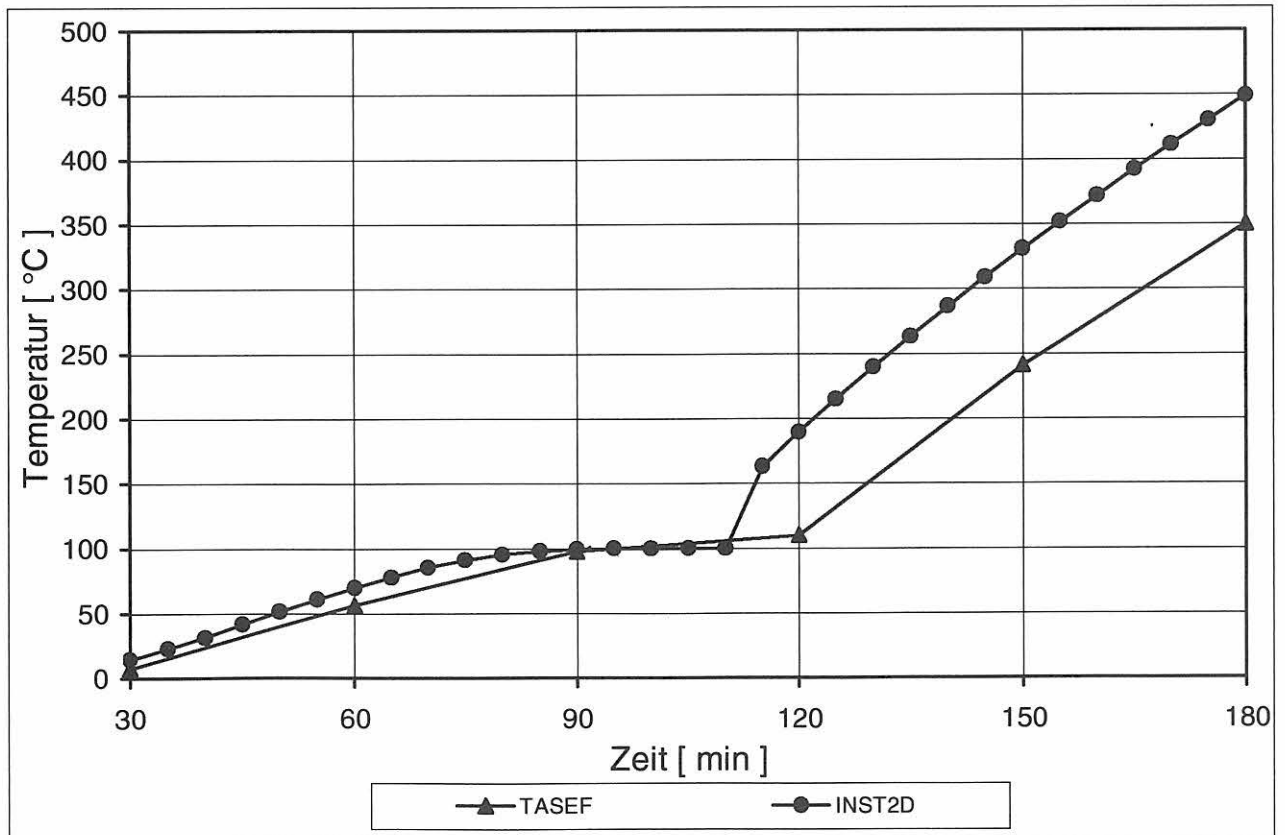
TASEF und INST2D	Zeit [min]					
TASEF (1000°C)	30	60	90	120	150	180
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	17,0	74,0	101,0	186,0	303,0	403,0
INST2D (1000°C)						
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	26,5	87,2	100,0	271,6	400,0	504,1



Diagr. 9.1: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für Beispiel 4a

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	30	60	90	120	150	180
TASEF (ISO 834)	8,0	56,0	98,0	110,0	241,0	350,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	5	10	15	20	25	30
	0	0,1	0,7	3	7,7	14,4
	35	40	45	50	55	60
	22,7	32	41,7	51,5	61	70,0
	65	70	75	80	85	90
	78,1	85,2	90,9	95,3	98,1	99,5
	95	100	105	110	115	120
	99,9	100	100	100	162,9	189,6
	125	130	135	140	145	150
	214,9	239,7	263,6	286,6	308,9	330,5
	155	160	165	170	175	180
	351,6	372	392	411,4	430,3	448,7

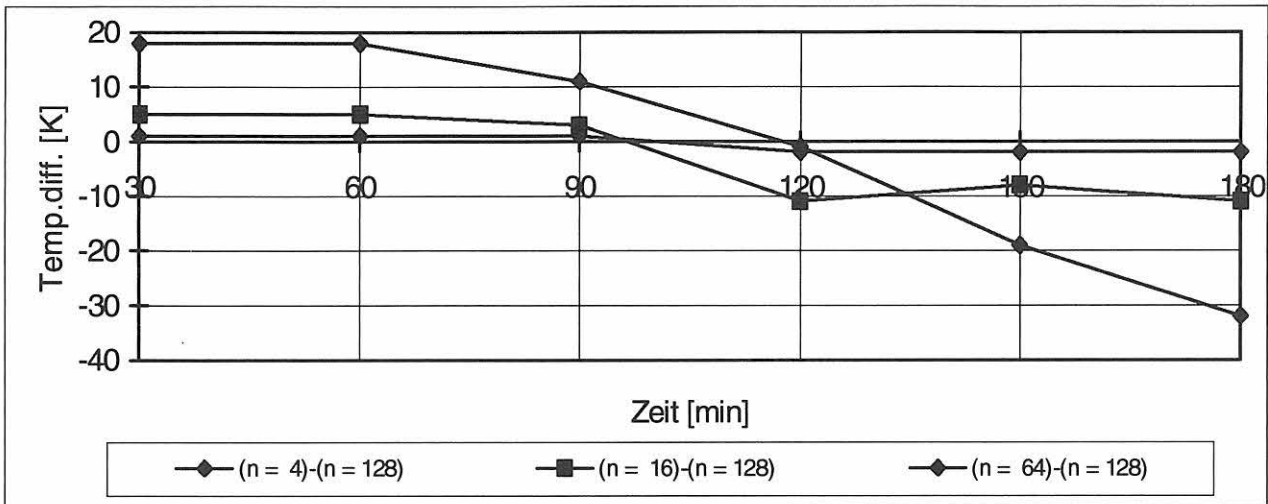


Diagr. 9.2: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für Beispiel 4b

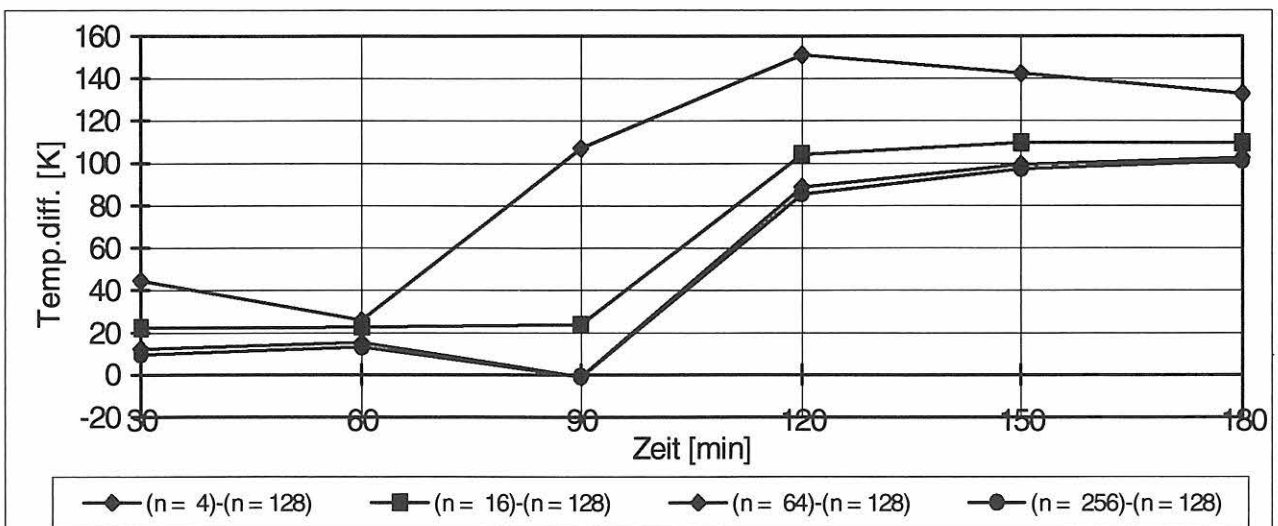
Tab. 9.3; 9,4/ Diagr. 9.3; 9,4

Beispiel 4a**(1000°C)****Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	18,0	18,0	11,0	-1,0	-19,0	-32,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,0	5,0	3,0	-11,0	-8,0	-11,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	1,0	1,0	-2,0	-2,0	-2,0

**Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

INST2D -TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	44,5	26,0	107,2	151,0	142,3	132,8
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	22,2	22,9	23,8	104,1	109,5	109,7
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	12,5	15,4	-1,0	88,8	99,2	102,5
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	9,5	13,2	-1,0	85,6	97,0	101,1



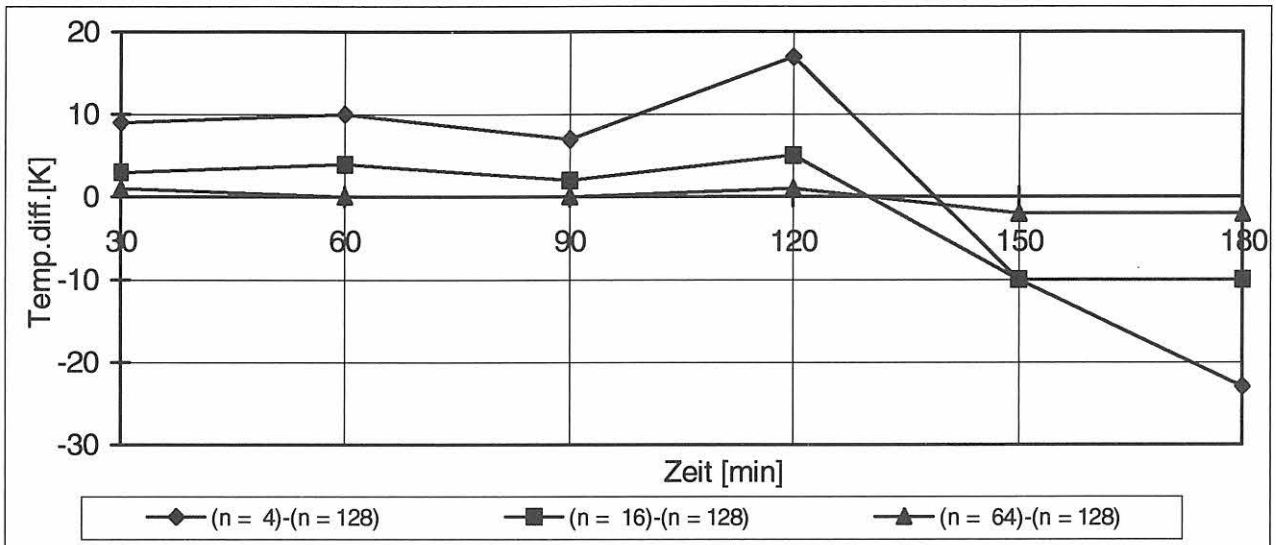
Tab. 9.5; 9.6 /Diagr. 9.5; 9.6

Beispiel 4b

(ISO 834)

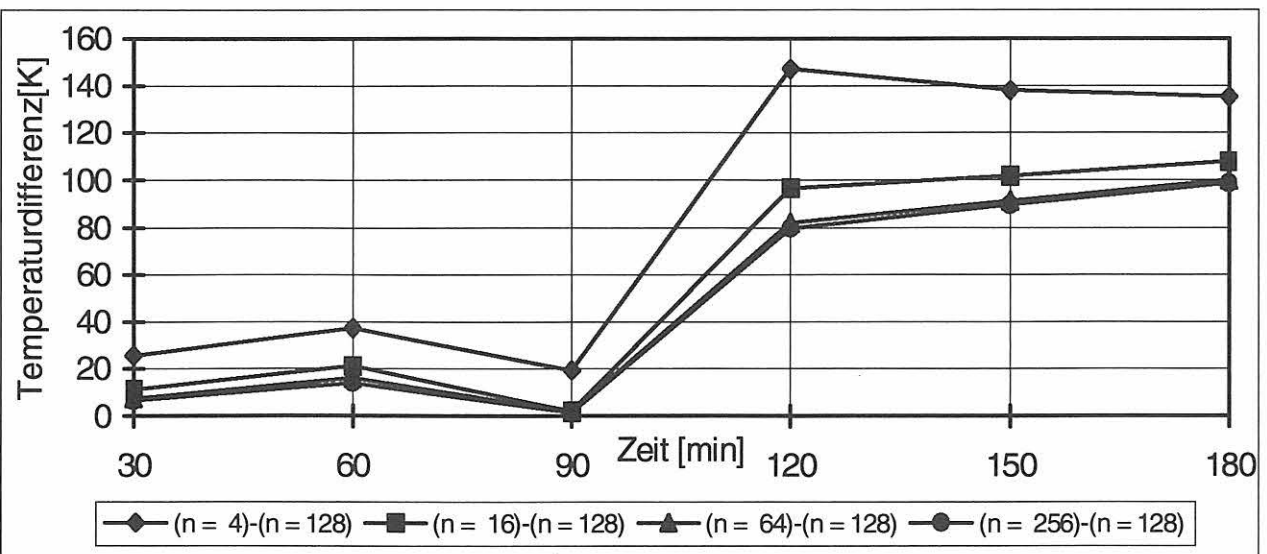
Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	9,0	10,0	7,0	17,0	-10,0	-23,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,0	4,0	2,0	5,0	-10,0	-10,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	0,0	1,0	-2,0	-2,0



Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	25,4	37,2	19,3	146,9	137,8	135,1
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	11,3	21,3	2,0	96,7	101,8	107,7
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	7,6	16,0	1,6	82,0	91,2	99,9
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	6,4	14,0	1,5	79,6	89,5	98,7



10 Referenzbeispiel 5

Das in Beispiel 5 betrachtete Modell ist wie in Beispiel 4 ein Viertelausschnitt eines Querschnitts durch einen quadratischen Körper aus Leichtbeton. Die Baustoffkennlinien sowie die Rand- und Anfangsbedingungen des Beispiels 5 (siehe Tab. 5.2) stimmen ebenfalls mit Beispiel 4 überein. Der quadratische Körper erhält in Beispiel 5 zusätzlich einen Mantel aus Stahl mit einer Dicke von 1 cm, vgl. Bild 5.3. Die Unterteilung des Stahls erfolgt für $n = 4$ in einer Schicht und für $n = 16, 64, 256$ in zwei Schichten mit jeweils einer Dicke von 0,5 cm, vgl. Bild 5.4.

Die Materialeigenschaften des Stahls sind wie folgt nach dem Eurocode 3, Teil 1.2, definiert:

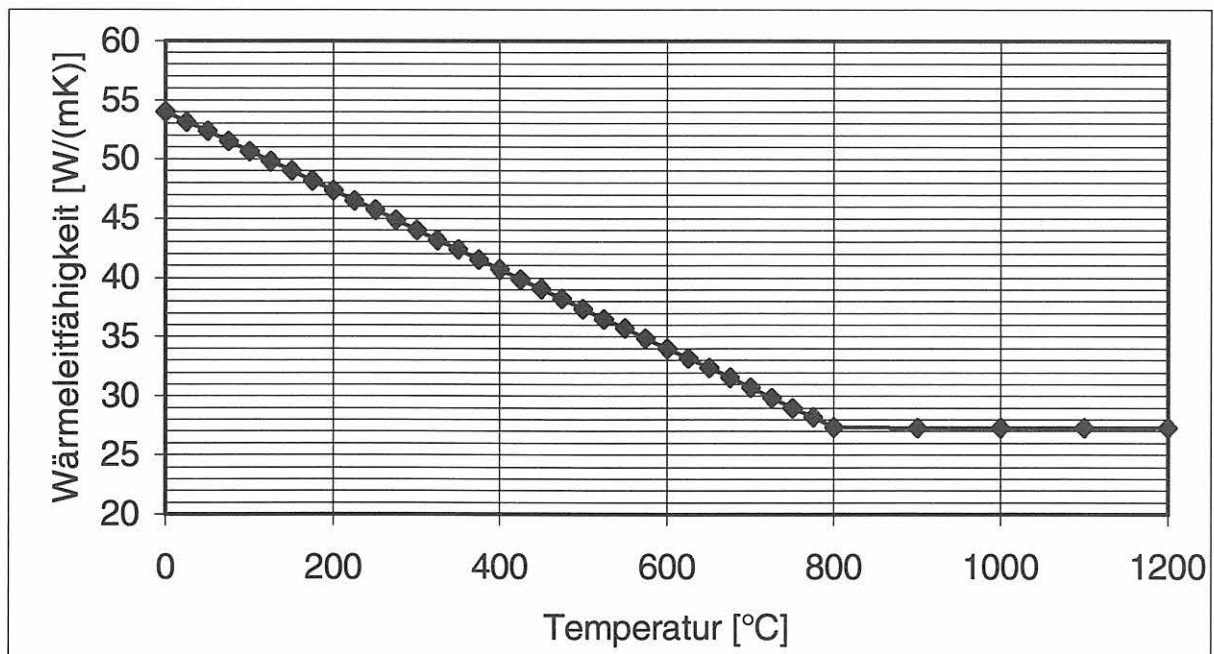
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)], vgl. Diagr. 10.1

- für $20\text{ °C} \leq \vartheta < 800\text{ °C}$

$$\lambda = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \vartheta$$

- für $800\text{ °C} \leq \vartheta \leq 1200\text{ °C}$

$$\lambda = 27,30$$



Diagr. 10.1: Wärmeleitfähigkeit von Stahl als Funktion der Temperatur nach EC 3, Teil 1.2.

Spezifische Wärmekapazität c_p [J/(kgK)], vgl. Diagr. 10.2

- für $20\text{ °C} \leq \vartheta < 600\text{ °C}$

$$c_p = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \vartheta - 1,69 \cdot 10^{-3} \vartheta^2 - 2,22 \cdot 10^{-6} \vartheta^3$$

- für $600\text{ °C} \leq \vartheta < 735\text{ °C}$

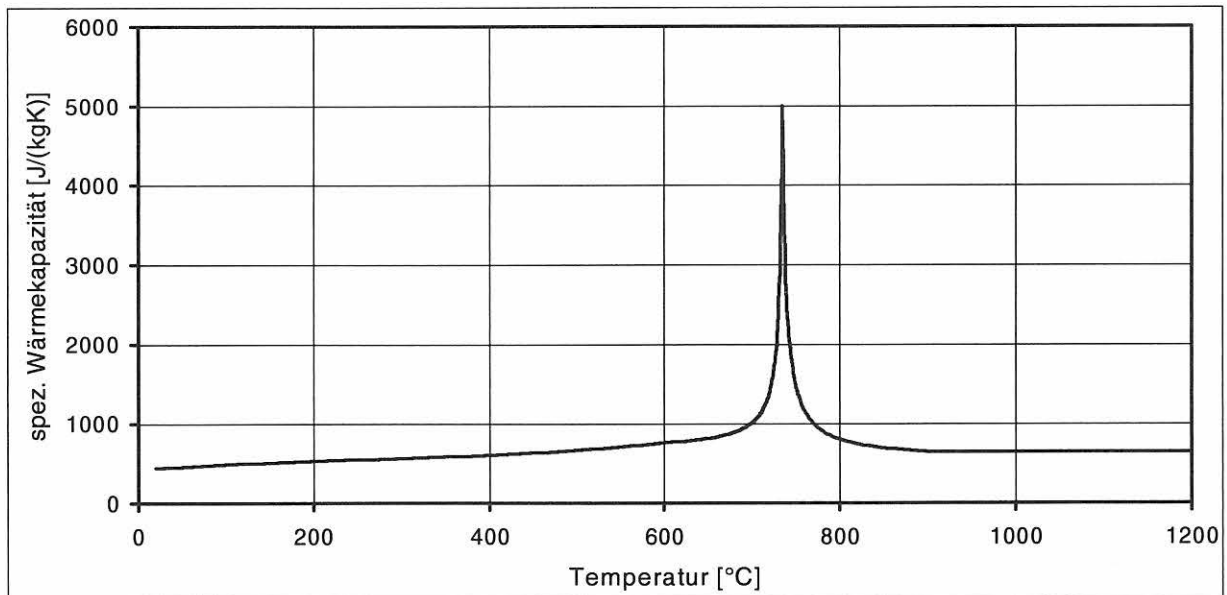
$$c_p = 666 + \frac{13002}{738 - \vartheta}$$

- für $735\text{ °C} \leq \vartheta < 900\text{ °C}$

$$c_p = 545 + \frac{17820}{\vartheta - 731}$$

- für $900\text{ °C} \leq \vartheta \leq 1200\text{ °C}$

$$c_p = 650$$



Diagr. 10.2 :

Spezifische Wärmekapazität von Stahl als Funktion der Temperatur nach EC 3, Teil 1.2

Rohdichte:

$$\rho = 7850\text{ kg/m}^3$$

Um ein Über- oder Unterschwingen der in EC 3, Teil 1.2, vorgeschriebenen Kennlinien zu vermeiden, müssen bei Verwendung einer Spline-Interpolation die in Tab. 10.1 und 10.2 angegebenen Stützpunkte bei der Berechnung mit INST2D zugrundegelegt werden.

Temperatur [°C]	λ [W/(mK)]	Temperatur [°C]	λ [W/(mK)]	Temperatur [°C]	λ [W/(mK)]
0	54,00	785	27,62	840	27,30
100	50,67	790	27,50	845	27,30
200	47,34	795	27,39	850	27,30
300	44,01	800	27,30	855	27,30
400	40,68	805	27,30	860	27,30
500	37,35	810	27,30	865	27,30
600	34,02	815	27,30	900	27,30
700	30,69	820	27,30	1000	27,30
770	28,04	825	27,30	1100	27,30
775	27,89	830	27,30	1200	27,30
780	27,75	835	27,30		

Tab. 10.1: Vorgegebene Wertepaare (n = 32) für die in INST2D angewandte Spline-Interpolation der in EC 3, Teil 1.2, angegebenen Kennlinie für die Wärmeleitfähigkeit des Stahls

Temp. [°C]	c [J/(kgK)]	Temp. [°C]	c [J/(kgK)]	Temp. [°C]	c [J/(kgK)]	Temp. [°C]	c [J/(kgK)]
20	439,80	660	832,69	736,25	3939,29	765	1069,12
50	459,70	670	857,21	737,50	3286,54	770	1001,92
100	487,62	680	890,17	738,75	2844,35	780	908,67
200	529,76	690	936,88	740	2525,00	790	847,03
300	564,74	700	1008,16	741,25	2283,54	800	803,26
400	605,88	705	1060,00	742,50	2094,57	820	745,22
500	666,50	710	1130,36	743,75	1942,65	840	708,49
540	699,19	715	1231,30	745	1817,86	860	683,14
560	717,76	720	1388,33	746,25	1713,52	880	664,60
580	737,97	725	1666,15	747,50	1625,00	900	650,44
600	759,92	727,50	1904,29	748,75	1548,94	910	650,00
610	767,58	730	2291,25	750	1482,89	920	650,00
620	776,19	731,25	2592,22	752,50	1373,84	950	650,00
630	786,39	732,50	3030,00	755	1287,50	1000	650,00
640	798,67	733,75	3725,29	757,50	1217,45	1100	650,00
650	813,75	735	5000,00	760	1159,48	1200	650,00

Tab. 10.2: Vorgegebene Wertepaare (n = 64) für die in INST2D angewandte Spline-Interpolation der in EC 3, Teil 1.2, angegebenen Kennlinie für die spez. Wärmekapazität des Stahls

In Tab. 10.3 und 10.4 sind die mit TASEF-2D und INST2D berechneten Temperaturen zusammengestellt. In Diagr. 10.3 sind die einzelnen Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung dargestellt. Aus Tab. 10.5 bis 10.8 sowie aus Diagr. 10.4 bis 10.7 sind die Abweichungen zwischen den mit TASEF-2D und den mit INST2D im Zentrum des Körpers errechneten Temperaturen ersichtlich. Wie nicht anders zu erwarten, treten hier ebenso wie bereits beim Referenzbeispiel 4 große Temperaturdifferenzen auf, da in beiden Beispielen eine Phasenumwandlung des im Beton enthaltenen Wassers zu berücksichtigen ist. Eine endgültige Klärung der Ursachen kann auch hier nicht vorgenommen werden, da weder ein Vergleich mit einer analytischen Lösung noch ein Vergleich mit Versuchsergebnissen möglich ist, vgl. deshalb die an anderen Körpern mit INST2D durchgeführten Berechnungen mit Phasenumwandlung in Kap. 14.

Tab. 10.3

Ergebnisse für Beispiel 5a (1000°C)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	953,0	947,0	976,0	974,9	981,0	980,3
n = 16	T _{sur} / 1	950,0	948,5	969,0	967,4	976,0	976,1
n = 64	T _{sur} / 1	944,0	942,2	966,0	965,4	975,0	975,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	944,0	940,3	966,0	964,9	975,0	974,6
n = 4	T _{cor} / 3	986,0	983,6	993,0	993,7	995,0	995,2
n = 16	T _{cor} / 5	980,0	979,9	989,0	989,3	992,0	992,6
n = 64	T _{cor} / 9	975,0	975,3	988,0	987,7	992,0	991,7
n = 128/256	T _{cor} / 17	975,0	973,8	987,0	987,2	991,0	991,4
n = 4	T _{cen} / 7	32,0	57,1	88,0	100,0	111,0	192,9
n = 16	T _{cen} / 21	19,0	32,2	75,0	94,2	103,0	100,0
n = 64	T _{cen} / 73	14,0	24,2	70,0	85,2	101,0	100,0
n = 128/256	T _{cen} / 273	14,0	21,4	69,0	82,2	101,0	100,0
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	984,0	984,3	987,0	987,4	989,0	989,8
n = 16	T _{sur} / 1	981,0	981,5	985,0	985,3	987,0	988,3
n = 64	T _{sur} / 1	981,0	980,7	984,0	984,8	987,0	987,8
n = 128/256	T _{sur} / 1	980,0	980,5	984,0	984,6	987,0	987,7
n = 4	T _{cor} / 3	995,0	996,3	996,0	997,0	997,0	997,6
n = 16	T _{cor} / 5	994,0	994,5	995,0	995,7	996,0	996,6
n = 64	T _{cor} / 9	994,0	993,8	995,0	995,2	996,0	996,2
n = 128/256	T _{cor} / 17	994,0	993,6	995,0	995,0	996,0	996,1
n = 4	T _{cen} / 7	179,0	323,2	280,0	433,4	369,0	525,8
n = 16	T _{cen} / 21	163,0	272,8	286,0	398,2	387,0	500,9
n = 64	T _{cen} / 73	172,0	256,1	293,0	387,0	395,0	493,0
n = 128/256	T _{cen} / 273	174,0	252,4	295,0	384,5	397,0	491,3

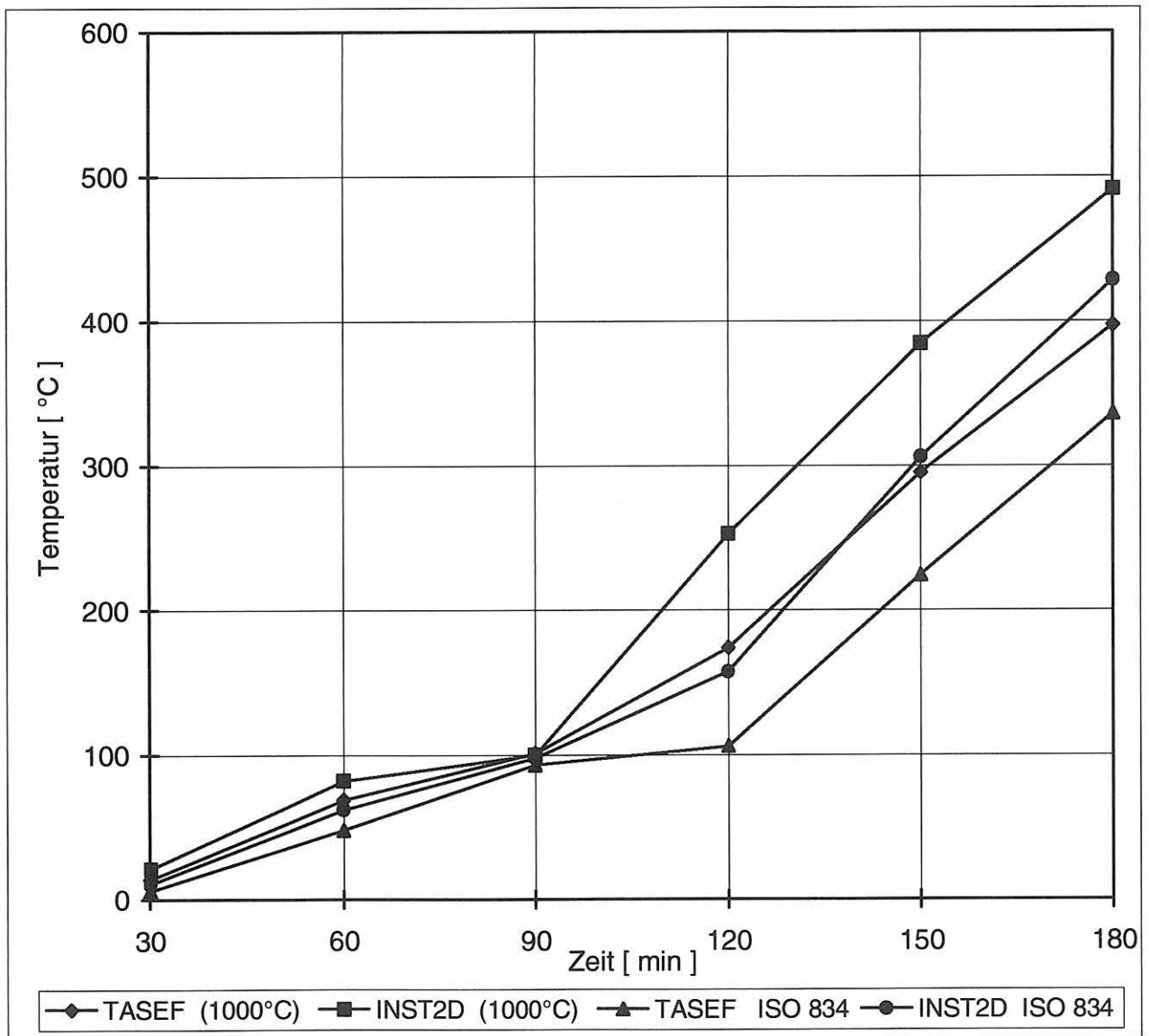
Tab. 10.4

Ergebnisse für Beispiel 5b (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	581,0	586,1	865,0	862,9	954,0	952,4
n = 16	T _{sur} / 1	640,0	631,8	862,0	864,9	950,0	948,8
n = 64	T _{sur} / 1	644,0	651,0	860,0	863,2	948,0	947,8
n = 128/256	T _{sur} / 1	645,0	652,9	860,0	862,6	948,0	947,5
n = 4	T _{cor} / 3	646,0	655,6	973,0	897,3	999,0	972,8
n = 16	T _{cor} / 5	724,0	686,8	921,0	895,6	992,0	970,3
n = 64	T _{cor} / 9	688,0	694,8	890,0	893,6	969,0	969,2
n = 128/256	T _{cor} / 17	688,0	695,5	890,0	892,9	969,0	968,9
n = 4	T _{cen} / 7	14,0	27,1	61,0	84,2	103,0	100,0
n = 16	T _{cen} / 21	9,0	15,5	53,0	71,8	96,0	99,6
n = 64	T _{cen} / 73	6,0	11,6	49,0	64,5	94,0	98,7
n = 128/256	T _{cen} / 273	6,0	10,5	48,0	61,9	93,0	97,9
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	1004,0	1004,2	1043,0	1043,1	1074,0	1074,2
n = 16	T _{sur} / 1	1002,0	1001,9	1041,0	1041,4	1073,0	1072,9
n = 64	T _{sur} / 1	1001,0	1001,2	1041,0	1040,9	1072,0	1072,6
n = 128/256	T _{sur} / 1	1001,0	1001,1	1041,0	1040,8	1072,0	1072,4
n = 4	T _{cor} / 3	1020,0	1020,1	1056,0	1055,9	1084,0	1084,7
n = 16	T _{cor} / 5	1040,0	1018,5	1076,0	1054,7	1084,0	1083,8
n = 64	T _{cor} / 9	1018,0	1017,8	1054,0	1054,2	1083,0	1083,4
n = 128/256	T _{cor} / 17	1018,0	1017,6	1054,0	1054,0	1083,0	1083,2
n = 4	T _{cen} / 7	119,0	236,2	219,0	360,8	318,0	469,6
n = 16	T _{cen} / 21	111,0	179,1	215,0	320,7	328,0	439,0
n = 64	T _{cen} / 73	106,0	160,5	222,0	308,1	335,0	429,7
n = 128/256	T _{cen} / 273	106,0	157,5	224,0	305,8	336,0	428,1

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	30	60	90	120	150	180
TASEF (1000°C)	14,0	69,0	101,0	174,0	295,0	397,0
TASEF (ISO 834)	6,0	48,0	93,0	106,0	224,0	336,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	30	60	90	120	150	180
INST2D (1000°C)	21,4	82,2	100,0	252,4	384,5	491,3
INST2D (ISO 834)	10,5	61,9	97,9	157,5	305,8	428,1



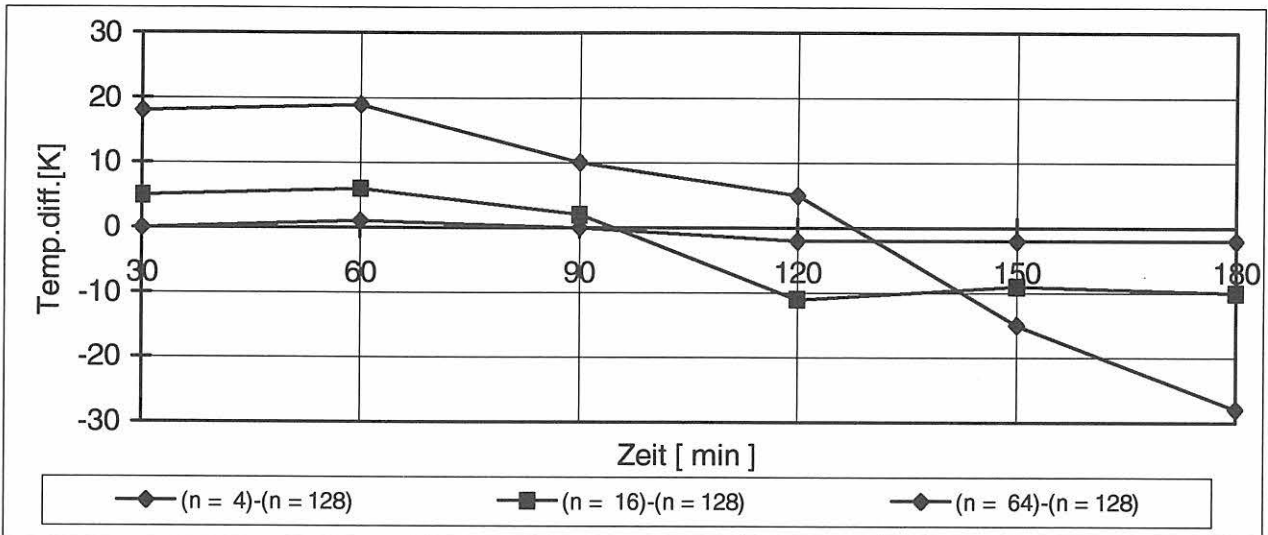
Diagr. 10.3: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für die Beispiele 5a und 5b

Tab. 10.5; 10.6 /Diagr. 10.4; 10.5

Beispiel 5a (1000°C)

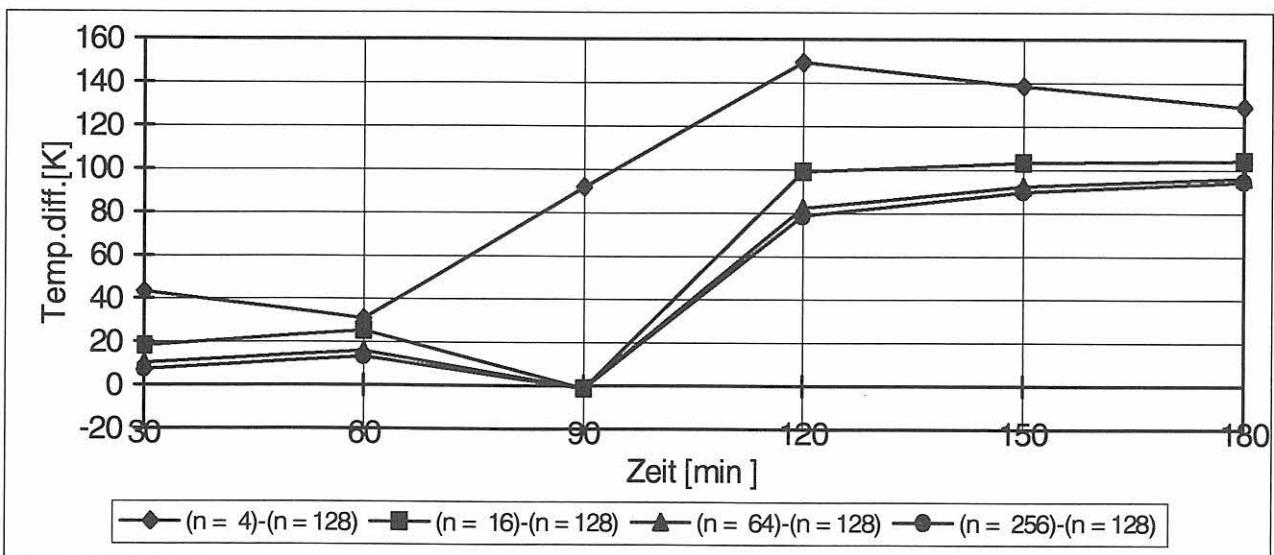
Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	18,0	19,0	10,0	5,0	-15,0	-28,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,0	6,0	2,0	-11,0	-9,0	-10,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,0	1,0	0,0	-2,0	-2,0	-2,0



Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

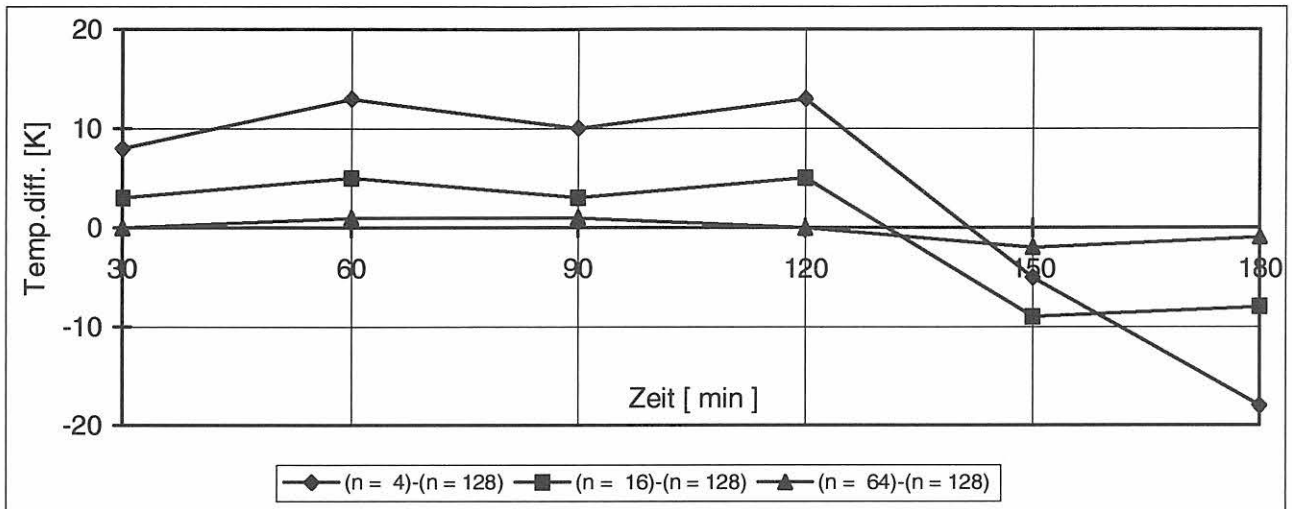
INST2D -TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	43,1	31,0	91,9	149,2	138,4	128,8
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	18,2	25,2	-1,0	98,8	103,2	103,9
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	10,2	16,2	-1,0	82,1	92,0	96,0
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	7,4	13,2	-1,0	78,4	89,5	94,3



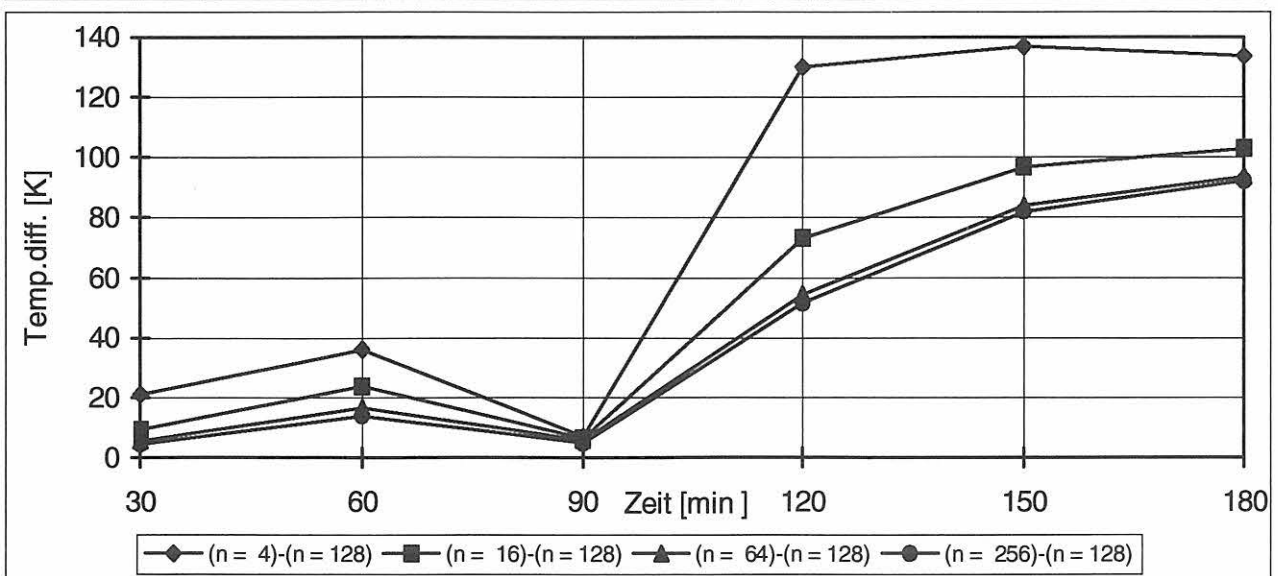
Tab. 10.7; 10.8 /Diagr. 10.6; 10.7

Beispiel 5b (ISO 834)**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	8,0	13,0	10,0	13,0	-5,0	-18,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,0	5,0	3,0	5,0	-9,0	-8,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,0	1,0	1,0	0,0	-2,0	-1,0

**Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	21,1	36,2	7,0	130,2	136,8	133,6
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	9,5	23,8	6,6	73,1	96,7	103,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	5,6	16,5	5,7	54,5	84,1	93,7
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	4,5	13,9	4,9	51,5	81,8	92,1



11 Referenzbeispiel 6

Bei diesem Beispiel wird der bisherige Grundkörper aus Leichtbeton gegen einen aus Mineralfaser-Dämmstoff ausgetauscht. Die Geometrie und Elementierung bleiben unverändert. Der Körper aus Mineralfaser-Dämmstoff wird mit einer sehr dünnen Schicht aus Stahl ($d = 0,5 \text{ mm}$) ummantelt, vgl. Bild 5.3. Für den Mineralfaser-Dämmstoff sind konstante Baustoffkennwerte vorgegeben ($\lambda = 0,05 \text{ W/(mK)}$; $c = 1000 \text{ J/(kgK)}$; $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$). Die Baustoffkennwerte des Stahls sind, wie beim Beispiel 5 beschrieben, aus EC 3, Teil 1.2, zu übernehmen, siehe Tab. 5.2. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahls ist eine Unterteilung des Stahls in der Hauptwärmestromrichtung eigentlich nicht erforderlich. Um die gleichen Elementierungen wie beim Beispiel 5 benutzen zu können, wurde auch in diesem Beispiel für $n = 16, 64$ und 256 Elemente der Stahl in zwei Schichten geteilt, vgl. Bild 5.4. Aufgrund der Baustoffkennwerte und Geometrie des Körpers erfolgt in den ersten Minuten eine sehr starke Erwärmung im Zentrum des Körpers. Daher wurde für die Auswertung der Temperaturen ein zusätzlicher Zeitpunkt bei 15 min festgelegt.

Die für die jeweils höchste Elementierung in Diagr. 11.1 dargestellten Temperatur-Zeit-Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung der von TASEF-2D und INST2D im Zentrum des Körpers berechneten Temperaturen. Die in den Diagr. 11.3 und 11.5 aufgetragenen Temperaturdifferenzen zwischen INST2D und TASEF-2D bestätigen dies.

In den Diagr. 11.3 bis 11.5 fällt auf, daß bei grober Elementierung relativ hohe Abweichungen der betrachteten Temperaturen im Anfangsintervall auftreten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß es sich bei Referenzbeispiel 6 im mathematischen Sinne um ein sehr steifes Problem handelt, das bei Auftreten sehr dünner Schichtdicken und/oder bei Kombination von Baustoffen sehr unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten entsteht. Wie das Referenzbeispiel 6 zeigt, ist in solchen Fällen die Feinheit der Elementierung von entscheidender Bedeutung für die Richtigkeit der Ergebnisse.

Tab. 11.1 Ergebnisse für Beispiel 6a (1000°C)

Elementier.	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]							
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		15	15	30	30	60	60	90	90

n = 4	T _{sur} / 5	998,0	998,2	999,0	998,8	999,0	999,5	1000,0	999,8
n = 16	T _{sur} / 15	998,0	997,8	999,0	998,7	999,0	999,5	1000,0	999,8
n = 64	T _{sur} / 23	998,0	997,6	999,0	998,6	999,0	999,4	1000,0	999,8
n = 128/256	T _{sur} / 39	998,0	997,6	999,0	998,6	999,0	999,4	1000,0	999,8

n = 4	T _{cor} / 7	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 16	T _{cor} / 19	1000,0	999,9	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 64	T _{cor} / 31	1000,0	999,8	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 128/256	T _{cor} / 55	1000,0	999,8	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0

n = 4	T _{cen} / 13	135,0	153,8	354,0	395,6	682,0	728,8	850,0	882,5
n = 16	T _{cen} / 43	91,0	95,0	343,0	354,5	712,0	723,8	877,0	884,7
n = 64	T _{cen} / 111	75,0	75,7	341,0	343,9	720,0	723,0	883,0	885,4
n = 128/256	T _{cen} / 343	74,0	70,4	343,0	341,4	722,0	722,8	885,0	885,6

Elementier.	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180

n = 4	T _{sur} / 5	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 16	T _{sur} / 15	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 64	T _{sur} / 23	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 128/256	T _{sur} / 39	1000,0	999,9	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0

n = 4	T _{cor} / 7	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 16	T _{cor} / 19	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 64	T _{cor} / 31	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
n = 128/256	T _{cor} / 55	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0

n = 4	T _{cen} / 13	930,0	949,3	967,0	978,2	985,0	990,6
n = 16	T _{cen} / 43	948,0	951,9	978,0	980,0	990,0	991,7
n = 64	T _{cen} / 111	952,0	952,6	980,0	980,4	992,0	991,9
n = 128/256	T _{cen} / 343	952,0	952,8	980,0	980,5	992,0	992,0

Tab. 11.2

Ergebnisse für Beispiel 6b (ISO 834)

Elementier.	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]							
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		15	15	30	30	60	60	90	90

n = 4	T _{sur} / 5	711,0	710,5	818,0	818,6	924,0	924,0	985,0	985,3
n = 16	T _{sur} / 15	710,0	710,0	818,0	818,4	924,0	924,0	985,0	985,3
n = 64	T _{sur} / 23	710,0	709,9	818,0	818,3	924,0	924,0	985,0	985,3
n = 128/256	T _{sur} / 39	710,0	709,8	818,0	818,3	924,0	924,0	985,0	985,3

n = 4	T _{cor} / 7	714,0	713,7	820,0	820,5	925,0	924,9	986,0	985,7
n = 16	T _{cor} / 19	714,0	713,7	820,0	820,5	925,0	924,9	985,0	985,8
n = 64	T _{cor} / 31	714,0	713,6	820,0	820,5	925,0	924,9	986,0	985,8
n = 128/256	T _{cor} / 55	714,0	713,5	820,0	820,4	925,0	924,9	986,0	985,7

n = 4	T _{cen} / 13	64,0	72,9	222,0	248,4	533,0	573,5	743,0	778,2
n = 16	T _{cen} / 43	38,0	39,5	204,0	211,5	550,0	561,1	766,0	775,0
n = 64	T _{cen} / 111	28,0	28,9	199,0	201,4	555,0	558,2	772,0	774,3
n = 128/256	T _{cen} / 343	27,0	26,0	199,0	198,8	556,0	557,5	773,0	774,2

Elementier.	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180

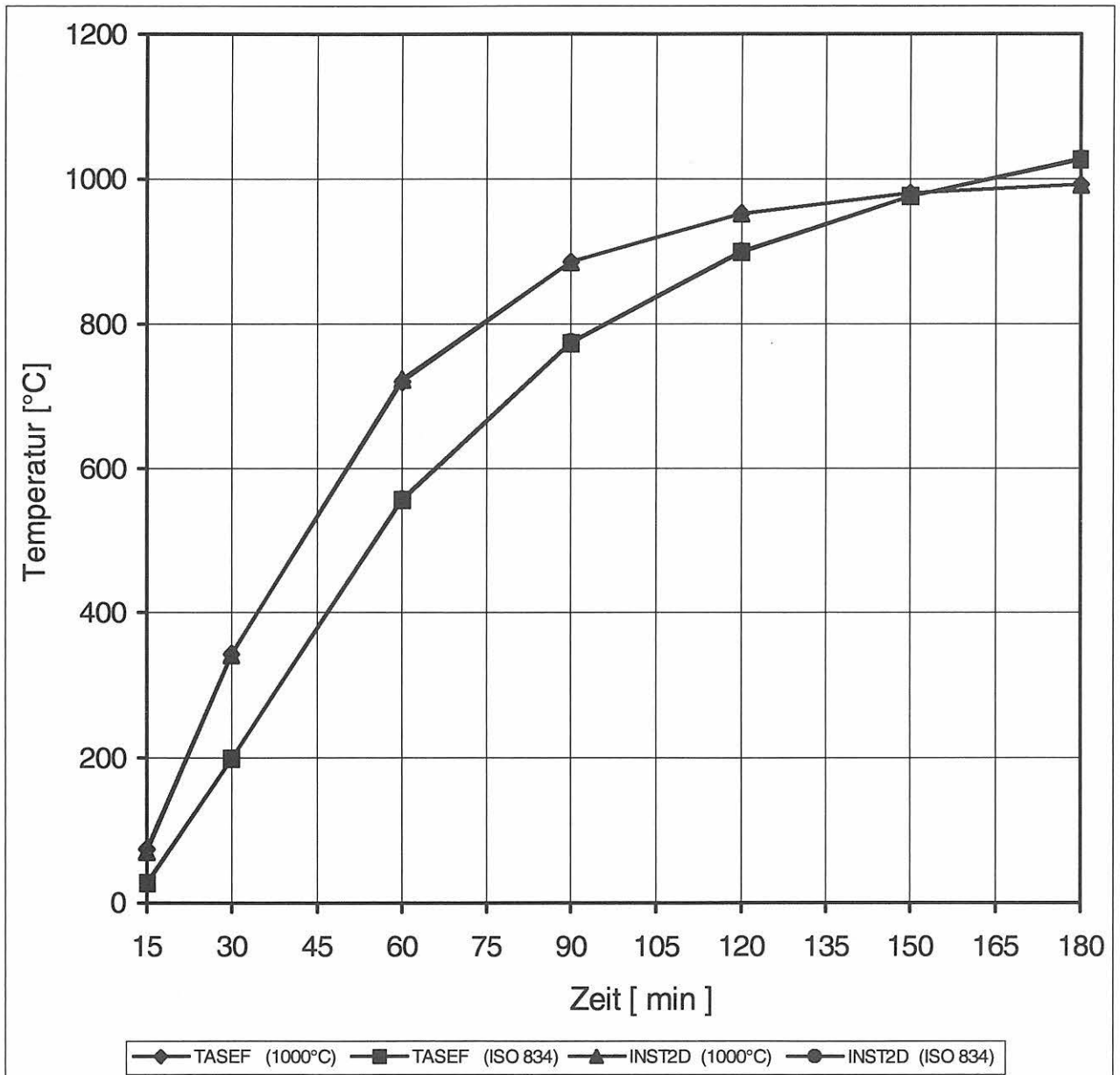
n = 4	T _{sur} / 5	1029,0	1028,6	1062,0	1062,2	1090,0	1089,5
n = 16	T _{sur} / 15	1029,0	1028,6	1062,0	1062,2	1090,0	1089,5
n = 64	T _{sur} / 23	1029,0	1028,6	1062,0	1062,2	1090,0	1089,5
n = 128/256	T _{sur} / 39	1029,0	1028,6	1062,0	1062,2	1090,0	1089,5

n = 4	T _{cor} / 7	1029,0	1028,9	1062,0	1062,3	1090,0	1089,6
n = 16	T _{cor} / 19	1029,0	1028,9	1062,0	1062,3	1090,0	1089,7
n = 64	T _{cor} / 31	1029,0	1028,9	1062,0	1062,3	1090,0	1089,7
n = 128/256	T _{cor} / 55	1029,0	1028,9	1062,0	1062,3	1090,0	1089,7

n = 4	T _{cen} / 13	875,0	900,5	959,0	977,0	1016,0	1028,4
n = 16	T _{cen} / 43	894,0	899,7	973,0	976,6	1025,0	1027,9
n = 64	T _{cen} / 111	898,0	899,6	976,0	976,5	1027,0	1027,8
n = 128/256	T _{cen} / 343	899,0	899,5	976,0	976,5	1027,0	1027,8

TASEF	Zeit [min]						
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	15	30	60	90	120	150	180
TASEF (1000°C)	74,0	343,0	722,0	885,0	952,0	980,0	992,0
TASEF (ISO 834)	27,0	199,0	556,0	773,0	899,0	976,0	1027,0

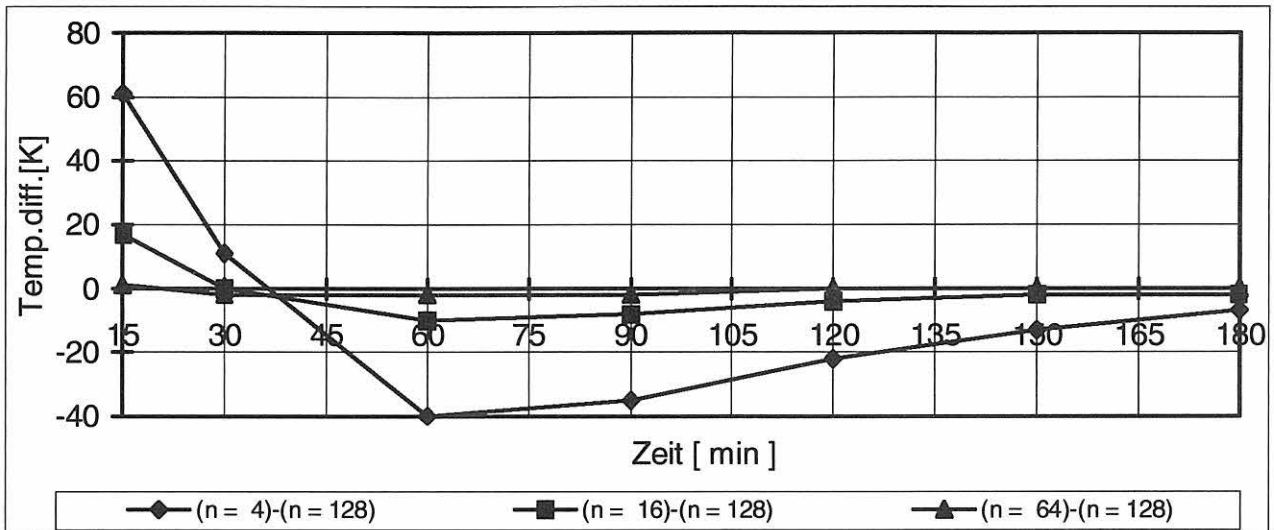
INST2D	Zeit [min]						
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	15	30	60	90	120	150	180
INST2D (1000°C)	70,4	341,4	722,8	885,6	952,8	980,5	992,0
INST2D (ISO 834)	26,0	198,8	557,5	774,2	899,5	976,5	1027,8



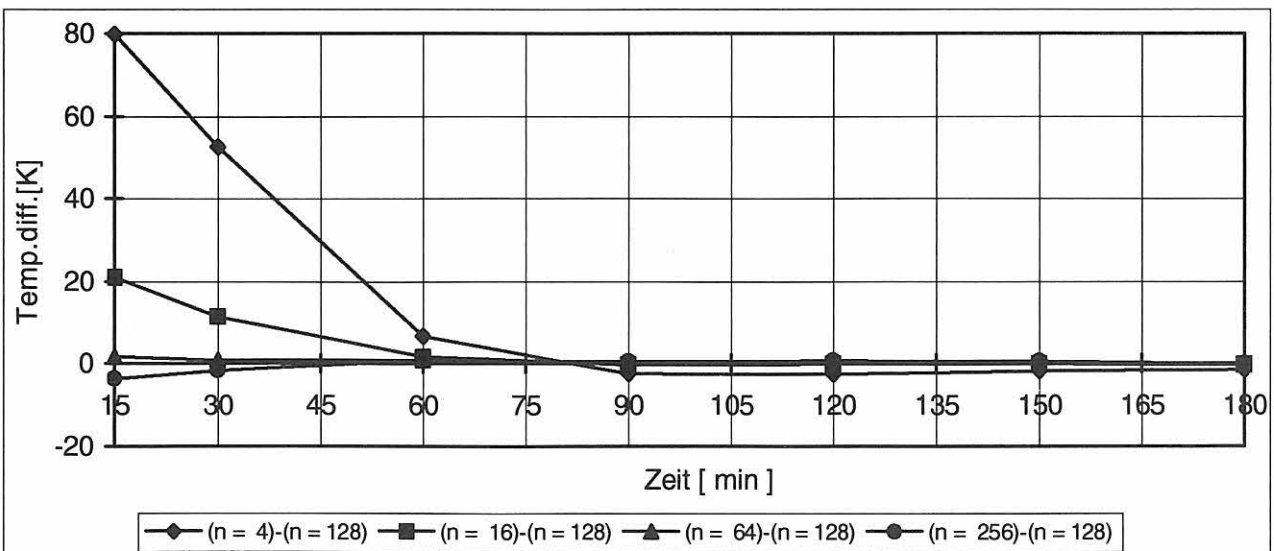
Diagr. 11.1: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für die Beispiele 6a und 6b

Tab. 11.3; 11.4 / Diagr. 11.2, 11.3 **Beispiel 6a** (1000°C)Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]						
	15	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	61,0	11,0	-40,0	-35,0	-22,0	-13,0	-7,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	17,0	0,0	-10,0	-8,0	-4,0	-2,0	-2,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	-2,0	-2,0	-2,0	0,0	0,0	0,0

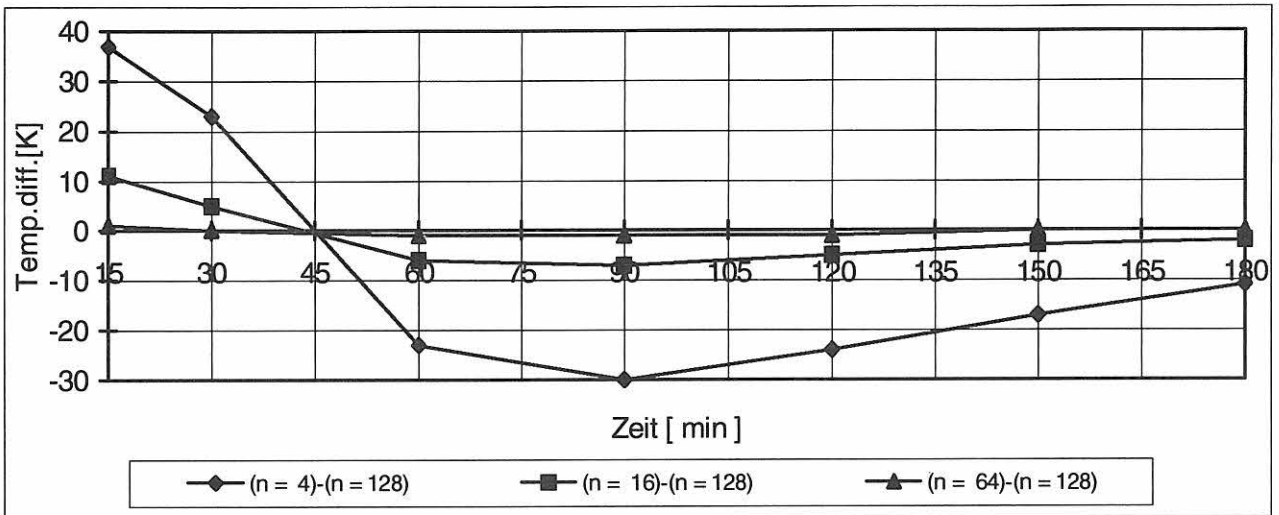
Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D- TASEF(128)	Zeit [min]						
	15	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	79,8	52,6	6,8	-2,5	-2,7	-1,8	-1,4
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	21,0	11,5	1,8	-0,3	-0,1	0,0	-0,3
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,7	0,9	1,0	0,4	0,6	0,4	-0,1
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-3,7	-1,6	0,8	0,6	0,8	0,5	0,0

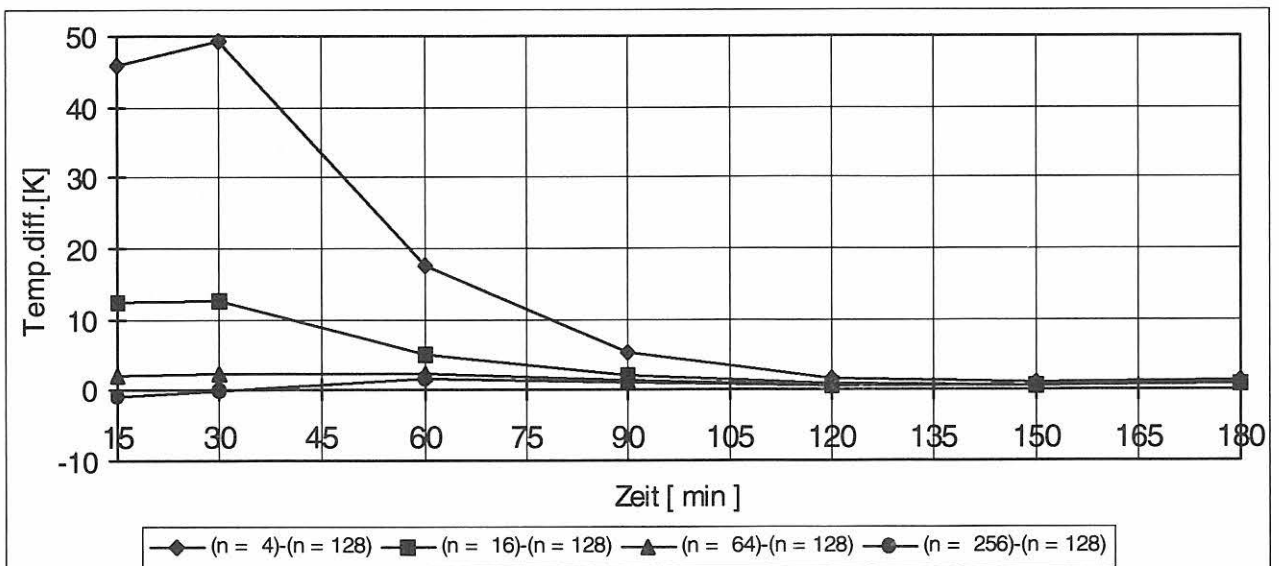


Tab. 11.5; 11.6 / Diagr. 11.4, 11.5 **Beispiel 6b (ISO 834)**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]						
	15	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	37,0	23,0	-23,0	-30,0	-24,0	-17,0	-11,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	11,0	5,0	-6,0	-7,0	-5,0	-3,0	-2,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,0	0,0

Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D- TASEF(128)	Zeit [min]						
	15	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	45,9	49,4	17,5	5,2	1,5	1,0	1,4
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	12,5	12,5	5,1	2,0	0,7	0,6	0,9
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,9	2,4	2,2	1,3	0,6	0,5	0,8
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-1,0	-0,2	1,5	1,1	0,5	0,5	0,8



12 Referenzbeispiel 7

Referenzbeispiel 7 beschäftigt sich mit dem Strahlungsaustausch in einem geschlossenen Hohlraum. Es sind zwei Varianten zu untersuchen:

- 7a) eindimensionaler Strahlungsaustausch in einem Hohlraum (1D - Fall)
- 7b) zweidimensionaler Strahlungsaustausch in einem Hohlraum (2D - Fall)

Das Referenzbeispiel 7a besteht aus einem Rechteckkörper, in dessen Mitte sich ein rechteckiger Hohlraum befindet, vgl. Bild 12.1.

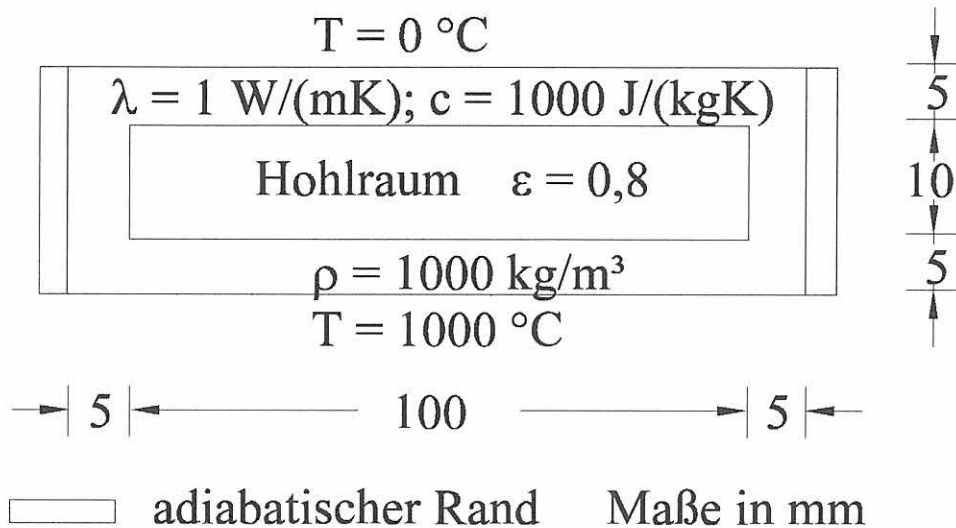


Bild 12.1: Skizze des in Referenzbeispiel 7a untersuchten Körpers

Der Körper hat eine Wanddicke von 5 mm; bei dem Wandmaterial handelt es sich um einen fiktiven Baustoff mit folgenden Kennwerten:

- $\lambda = 1,0 \text{ W/(mK)}$
- $c = 1000 \text{ J/(kgK)}$ und
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Die Ränder an der linken und rechten Seite des Körpers sollen adiabatisch sein, d.h. es sollen an den Rändern keine Wärmeströme fließen. Die Temperatur an der unteren Kante soll $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ und die an der oberen Kante $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ betragen. Die Anfangstemperatur ist in allen Punkten auf $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ zu setzen. Im Hohlraum ist nur der Wärmetransport infolge

Strahlung zu betrachten. Der Emissionskoeffizient der am Strahlungsaustausch beteiligten Oberflächen des Hohlraums ist mit $\varepsilon = 0,8$ vorgegeben. Da beim Beispiel 7a in erster Linie der Strahlungsaustausch zwischen der oberen langen und unteren langen Hohlraumkante betrachtet werden soll (1D-Fall), ist der resultierende Emissionskoeffizient für den Spezialfall zweier unendlich ausgedehnter, paralleler ebener Platten nach Gleichung (2.4) wie folgt zu berechnen:

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = 0,6667 \quad (12.1)$$

Um den Einfluß der Unterteilung der im wesentlichen am Strahlungsaustausch beteiligten Oberflächen untersuchen zu können, sind die langen Hohlraumseiten in $n = 2$, 4 und 8 Abschnitte zu unterteilen, vgl. die zugehörigen Elementierungen in Bild 12.2.

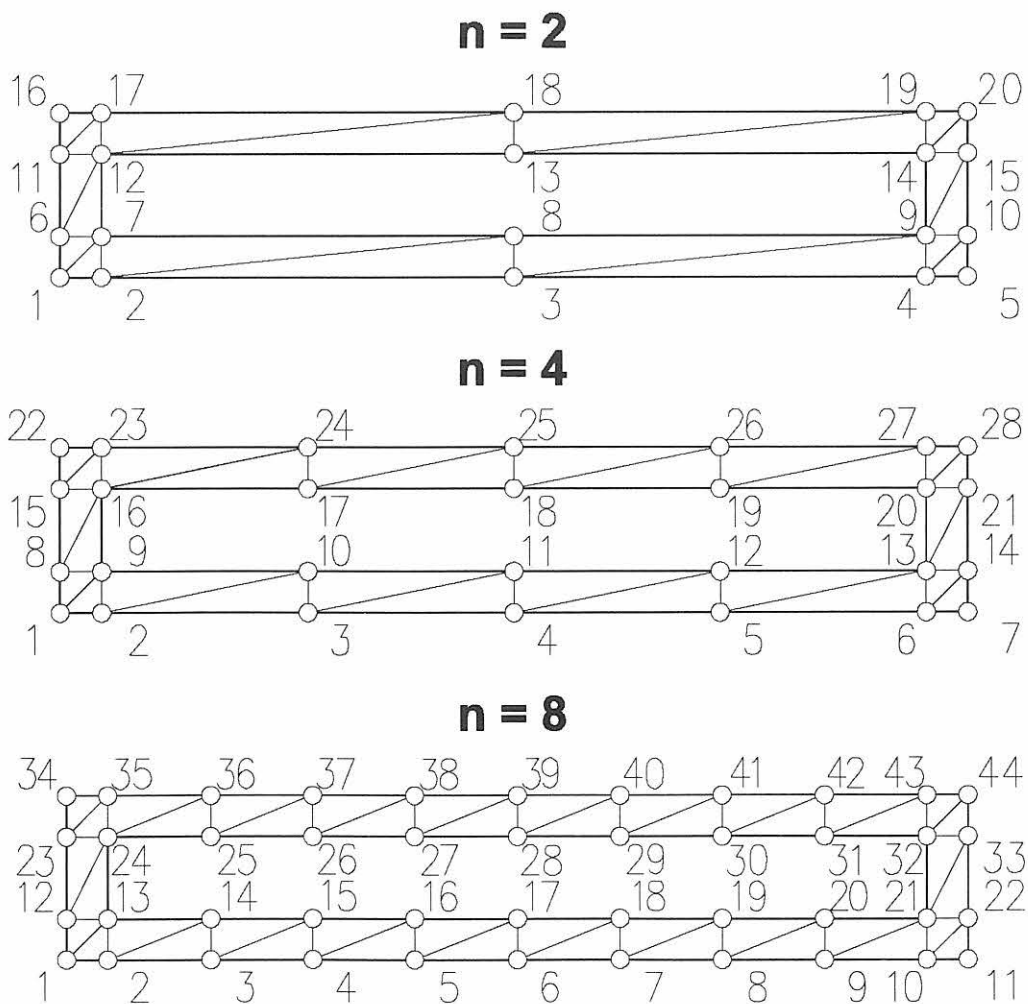


Bild 12.2: Vorgeschriebene Elementierungen für die Referenzbeispiele 7a und 7b

Die Umsetzung des 1D-Falls wird hier in dem Sinne interpretiert, daß nur eine Strahlungsübertragung von der 0,1 m langen Warmseite auf die gegenüberliegende Kaltseite unter Vernachlässigung der Hohlraum-Seitenflächen in Ansatz gebracht werden soll, vgl. Bild 12.3. Die zugehörigen Konfigurationsfaktoren werden nach Gleichung (3.17) errechnet und sind für $n = 2$ Unterteilungen Tab. 12.1 zu entnehmen.

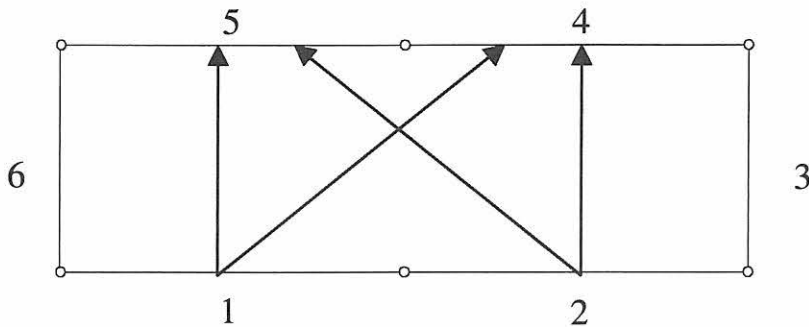


Bild 12.3: Realisierung der Strahlungsübertragung in einem Hohlraum für den 1D-Fall bei $n = 2$ Unterteilungen

Fläche	1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	0,085184	0,819804	-
2	-	-	-	0,819804	0,085184	-

Tab 12.1: Für die Realisierung der Strahlungsübertragung in einem Hohlraum (1D-Fall, $n = 2$) benötigte Konfigurationsfaktoren, errechnet nach Gleichung (3.17)

In Tab. 12.2 sind die nach der oben beschriebenen Vorgehensweise mit INST2D in der Mitte der Hohlrauminnenseiten errechneten Temperaturen angegeben und den entsprechenden Werten von TASEF-2D sowie der analytischen Lösung gegenübergestellt. Da die Quellenangabe zu der analytischen Lösung in (Wickström, 1997) fehlt, kann deren Richtigkeit nicht überprüft werden. Während TASEF-2D die beste Übereinstimmung mit der analytischen Lösung bei $n = 8$ aufweist, ergibt sich für INST2D die beste Übereinstimmung bei $n = 4$ Unterteilungen.

		T [°C]		$\Delta T = \text{TASEF-2D/INST2D} - \text{analy. Lösung [K]}$	
		Warmseite	Kaltseite	Warmseite	Kaltseite
analytische Lösung		779,4	220,6		
TASEF-2D	n = 2	789,0	198,0	9,6	-22,6
	n = 4	774,0	229,0	-5,4	8,4
	n = 8	779,0	220,0	-0,4	-0,6
INST2D	n = 2	790,6	207,4	11,2	-13,2
	n = 4	782,2	220,9	2,8	0,3
	n = 8	781,8	219,4	2,4	-1,2

Tab 12.2: Mit TASEF-2D und INST2D errechnete Temperaturen in der Mitte der Hohlrauminnenseiten (oben und unten) und deren Abweichungen zu der analytischen Lösung

Das Referenzbeispiel 7b geht wie Beispiel 7a von einem Rechteckkörper mit einem rechteckigen Hohlraum in der Mitte aus, vgl. Bild 12.4.

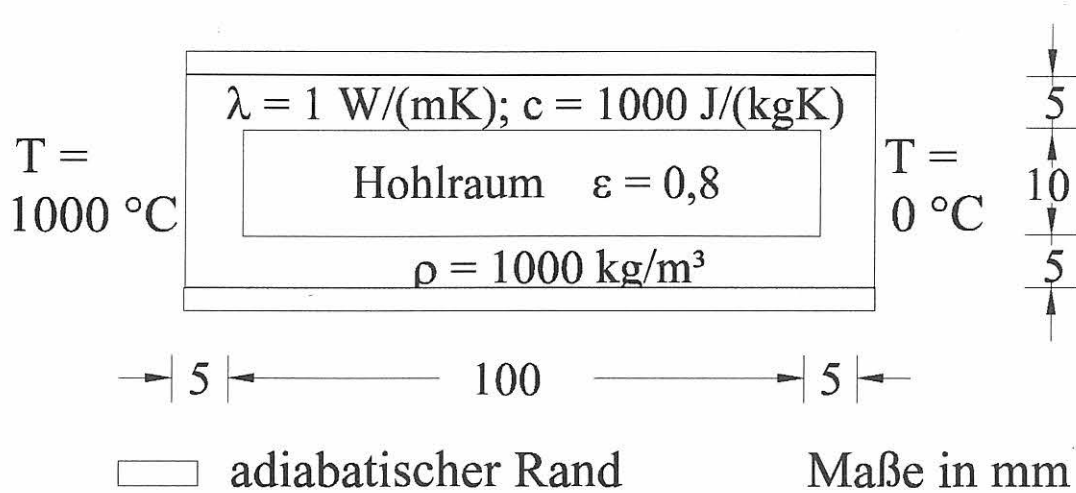


Bild 12.4: Skizze des in Referenzbeispiel 7b untersuchten Körpers

Für das Referenzbeispiel 7b sind jedoch der obere und der untere Rand adiabatisch. Die Temperatur an der linken Seite soll $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ und an der rechten Seite $0 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des fiktiven Baustoffs wird die Wärmeübertragung von der warmen zur kalten Seite hauptsächlich durch Strahlungsaustausch zwischen den langen Seiten des Hohlraums stattfinden. Es soll auch in diesem Beispiel der Einfluß der Unterteilung untersucht werden. Die drei Elementierungen für $n = 2, 4$ und 8 entsprechen denen, die für Beispiel 7a in Bild 12.2 angegeben sind.

Da laut Vorgabe als 2D-Fall in diesem Referenzbeispiel der Strahlungsaustausch von jeder Teilfläche auf jede andere betrachtet werden soll, ergibt sich nach (VDI-Wärmeatlas, 1984) bei Vernachlässigung der reflektierten Anteile der Wärmestrom beispielsweise zwischen den Flächen i und j entsprechend Gleichung (3.16) wie folgt:

$$\dot{Q}_{ij} = C_s \varphi_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j A_i \left(\left(\frac{\vartheta_i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_j + 273}{100} \right)^4 \right) \quad (12.2)$$

Da die Emissionskoeffizienten der einzelnen Hohlraumoberflächen mit $\varepsilon = 0,8$ vorgegeben sind, ergeben sich entsprechend der vorstehenden Gleichung die jeweiligen resultierenden Emissionskoeffizienten zu:

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j = 0,64$$

Die Konfigurationsfaktoren ϕ_{ij} werden vom Programm nach Gleichung (3.17) berechnet und sind exemplarisch für $n = 2$ Unterteilungen nach Bild 12.5 in Tab. 12.3 angegeben.



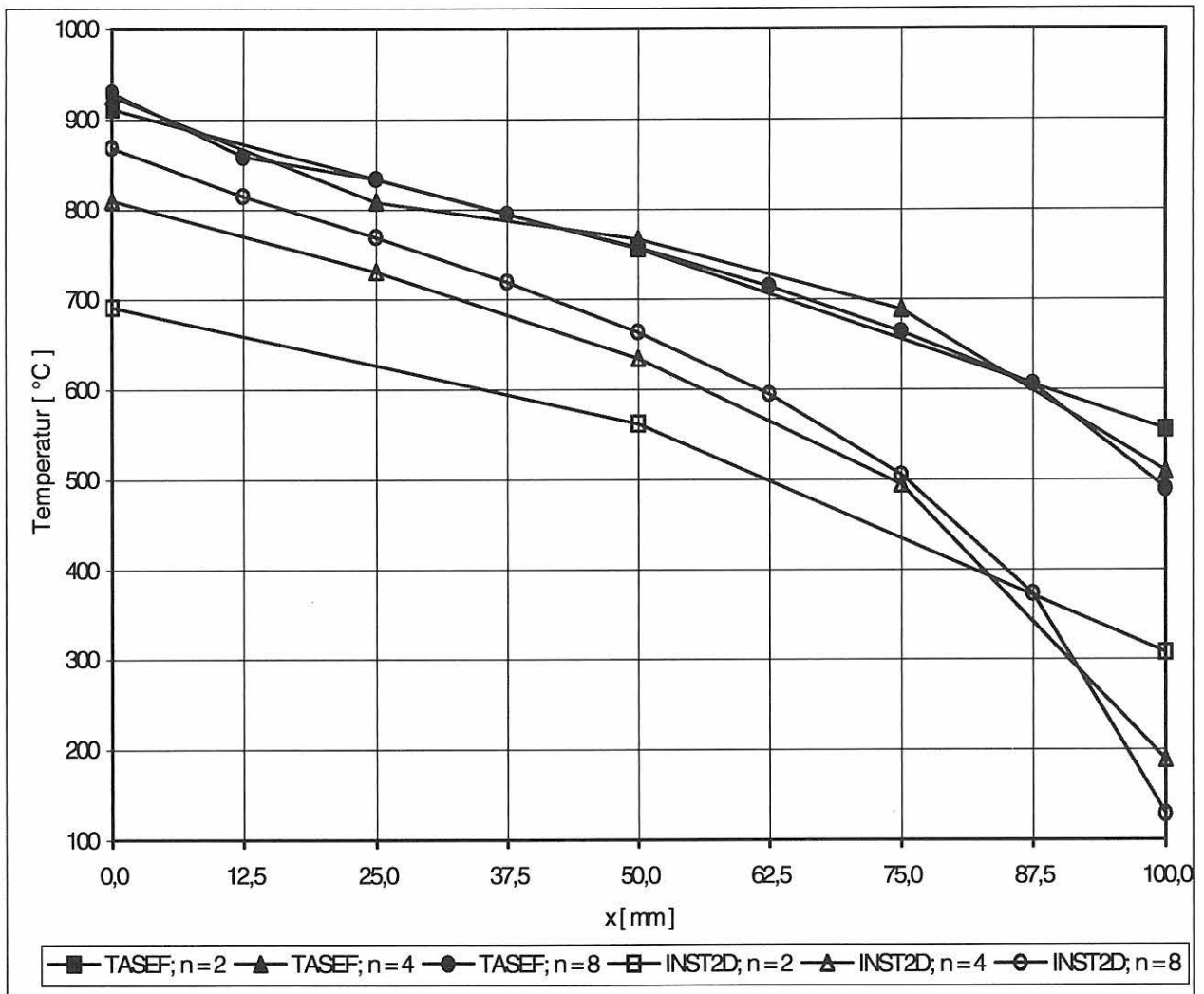
Bild 12.5: Realisierung der Strahlungsübertragung in einem Hohlraum für den 2D-Fall bei $n = 2$ Unterteilungen

Fläche	1	2	3	4	5	6
1	-	0	0,004914	0,085184	0,819804	0,090098
2	0	-	0,090098	0,819804	0,085184	0,004914
3	0,024572	0,45049	-	0,45049	0,024572	0,049876
4	0,085184	0,819804	0,090098	-	0	0,004914
5	0,819804	0,085184	0,004914	0	-	0,090098
6	0,45049	0,024572	0,049876	0,024572	0,45049	-

Tab. 12.3: Für die Realisierung der Strahlungsübertragung in einem Hohlraum (2D-Fall, $n = 2$) nach Gleichung (3.17) errechnete Konfigurationsfaktoren

Ausgewertet werden die nach $t = 60$ min mit INST2D und TASEF-2D errechneten Temperaturen, die als Funktion des Ortes entlang der 100 mm langen Hohlraumseite in Diagr. 12.1 aufgetragen sind. Da die in (Wickström, 1997) angegebenen TASEF-2D-Werte fehlerhaft sind, ist der Vergleich mit Vorsicht zu betrachten.

x [mm]		0,0	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5	100,0
TASEF T [°C]	n = 2	911,0				756,0				555,0
	n = 4	925,0		808,0		766,0		689,0		509,0
	n = 8	929,0	858,0	833,0	794,0	757,0	714,0	664,0	606,0	489,0
INST2D T [°C]	n = 2	691,7				561,6				308,0
	n = 4	809,7		730,2		634,2		494,5		188,7
	n = 8	867,7	814,2	768,9	719,1	662,4	594,0	505,2	372,9	128,3

**Diagr. 12.1:**

Mit TASEF-2D und INST2D berechnete Temperaturen ($t = 60 \text{ min}$) entlang der 100 mm langen Hohlräume für verschiedene Unterteilungen dieser Seite

13 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die in (Wickström, März 1997) für den Brandschutz zusammengestellten Referenzbeispiele mit dem Programm INST2D zu berechnen und mit den bereits vorliegenden Ergebnissen des Programms TASEF-2D aus **Anhang 1** zu vergleichen.

Die Programme INST2D und TASEF-2D dienen zur Berechnung der Temperaturverteilung in Bauteilen unter Lösung der nichtlinearen, instationären Wärmeleitungsgleichung für den zweidimensionalen Fall. Das in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) entwickelte Programm INST2D basiert auf der Methode der finiten Differenzen und verwendet Dreieckselemente mit linearem Ansatz sowie als Lösungsverfahren eine Prädiktor-Korrektor-Methode mit automatischer Zeitschrittweiten- und Genauigkeitssteuerung. Dem am Swedish National Testing and Research Institute entwickelten Programm TASEF-2D liegt die Methode der finiten Elemente zugrunde, und es benutzt Dreiecks- und Viereckselemente mit linearem Ansatz und eine explizite Vorwärts-Differenzen-Zeit Integration.

Die zu berechnenden Referenzbeispiele sind von Wickström im Hinblick auf ihre Relevanz für den Brandschutz ausgesucht worden. Die Komplexität der Referenzbeispiele nimmt in aufsteigender Reihenfolge zu, so daß die Anforderungen an die verwendeten Rechenprogramme kontinuierlich steigen. Rand- und Anfangsbedingungen orientieren sich an der Praxis und sind bei den Beispielen 2 bis 6 gleich. Im folgenden soll noch einmal eine Bewertung der Referenzbeispiele im Hinblick auf ihre Zweckdienlichkeit erfolgen:

Referenzbeispiel 1: - sehr theoretisches Beispiel im Hinblick auf die Baustoffkennwerte und die Randbedingungen, ohne Praxisbezug
- sehr gut für die Überprüfung von Rechenprogrammen geeignet, da analytische Lösung vorhanden

Referenzbeispiel 2: - orientiert sich an einem realen Baustoff, berücksichtigt aber nicht die im Laufe der Temperaturerhöhung stattfindenden Veränderungen der Materialeigenschaften, sondern nur konstante Baustoffkennwerte

Referenzbeispiel 3: - berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, jedoch nur in Form einer bilinearen Kennlinie

Referenzbeispiel 4: - berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, jedoch nur in Form einer bilinearen Kennlinie mit Ansatz einer Phasenumwandlung (Verdampfen des in einem Baustoff enthaltenen Wassers)

Referenzbeispiel 5: - Kombination von zwei Baustoffen mit temperaturabhängigen Kennlinien, davon ein Baustoff mit Phasenumwandlung

Referenzbeispiel 6: - Kombination von zwei Baustoffen mit sehr unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (Stahl / Mineralfaser-Dämmstoff)

Referenzbeisp. 7a: - Simulation der Strahlungsübertragung in Hohlräumen (1D-Fall)
- sehr gut für die Überprüfung von Rechenprogrammen geeignet, da analytische Lösung vorliegt

Referenzbeisp. 7b: - Simulation der Strahlungsübertragung in Hohlräumen (2D-Fall)

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Referenzbeispiele ein breites Spektrum der bei Brandversuchen auftretenden Problemstellungen abdecken und damit ein sehr großer Teil der in Temperaturberechnungsprogrammen simulierten Wärmetransportvorgänge überprüft werden kann.

Die Auswertung der Berechnungen mit dem Programm INST2D hat für die einzelnen Referenzbeispiele nach **Anhang 1** zu folgenden Ergebnissen geführt:

Referenzbeispiel	Vergleich mit	Übereinstimmung von INST2D mit den Vergleichswerten
1	analytischer Lösung	gut
2	TASEF-2D	gut
3	TASEF-2D	gut
4	TASEF-2D	nicht gut ^{*)}
5	TASEF-2D	nicht gut ^{*)}
6	TASEF-2D	gut
7a	analytischer Lösung	gut
7b	TASEF-2D	keine

^{*)} Bei Modifizierung dieses Beispiels nach **Anhang 2** ergab sich auch hier eine gute Übereinstimmung.

Mit Ausnahme der Referenzbeispiele 4, 5 und 7 kann in allen Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von TASEF-2D und INST2D festgestellt werden. Da als Ursache der Abweichungen bei den Referenzbeispielen 4 und 5 die bei beiden Programmen unterschiedliche Behandlung der Phasenumwandlungsvorgänge angesehen wurde, wurde das Programm INST2D zusätzlich noch anhand der folgenden zwei Beispiele mit Phasenumwandlung überprüft:

- ein Erstarrungsvorgang, für den eine analytische Lösung vorliegt und
- ein Brandversuch an einem Stahlbetonbalken, für den Versuchsergebnisse angegeben sind.

Diese Beispiele sind in Kap. 14 dokumentiert. In beiden Fällen ergab sich eine gute Übereinstimmung der von INST2D errechneten Ergebnisse mit den vorliegenden Lösungen.

Für die Zukunft bleibt festzuhalten, daß die Überprüfung eines Rechenprogramms am aussagekräftigsten ist, wenn der Vergleich mit einer analytischen Lösung gewährleistet ist. Eine Absicherung der Rechenergebnisse durch Versuchsergebnisse ist dann möglich, wenn alle für die Berechnung wichtigen Eingangsparameter vor dem Versuch genau erfaßt worden sind. Am fragwürdigsten ist ein Vergleich mit den Ergebnissen eines anderen Rechenprogramms, vor allem dann, wenn Differenzen zwischen den berechneten Ergebnissen auftreten. Es wird deshalb vorgeschlagen, für die Referenzbeispiele, für die keine analytischen Lösungen vorliegen, sich möglichst einfache und für das jeweilige Ziel der Überprüfung geeignete Versuchsanordnungen mit definierten Eingangsparametern zu überlegen, um dann über die Versuchsergebnisse eine weitere Absicherung der Rechenergebnisse vornehmen zu können.

Die erst kurz vor Fertigstellung dieses Berichts im Dezember 1998 erhaltene zweite Version der Beschreibung der Referenzbeispiele (Wickström, Oktober 1997), die in **Anhang 2** dieser Arbeit abgedruckt ist, enthält für die Referenzbeispiele 4 und 5 geänderte Werte für die spezifische Wärmekapazität des Betons. Nach Wiederholung der INST2D-Berechnungen mit diesen geänderten Werten (vgl. Ergebnisse in **Anhang 3**) ergibt sich auch für die Referenzbeispiele 4 und 5 eine gute Übereinstimmung mit den TASEF-2D-Werten.

14 Vorschlag für zwei weitere Beispiele mit Phasenumwandlung

In diesem Kapitel werden zwei weitere, der Literatur entnommene Beispiele mit Phasenumwandlung vorgestellt, die zur Überprüfung des Programms INST2D dienen sollen.

1. Beispiel: Simulation des Erstarrens einer fiktiven Flüssigkeit (Vergleich mit analytischer Lösung)

Bei diesem in (Huang, Usmani, 1993) angegebenen Beispiel handelt es sich um einen Erstarrungsprozeß einer fiktiven Flüssigkeit, die eine Anfangstemperatur von 0 °C haben soll. Die Flüssigkeit wird zum Zeitpunkt $t = 0\text{ s}$ am linken Rand schlagartig auf eine Temperatur von -45 °C abgekühlt und somit bei einer Umwandlungstemperatur von $-0,15\text{ °C}$ zum Erstarren gebracht.

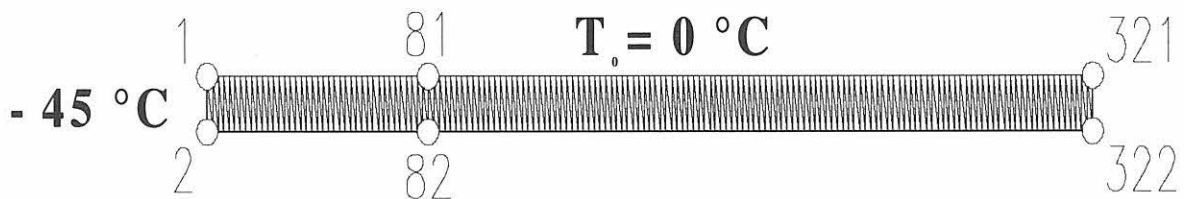


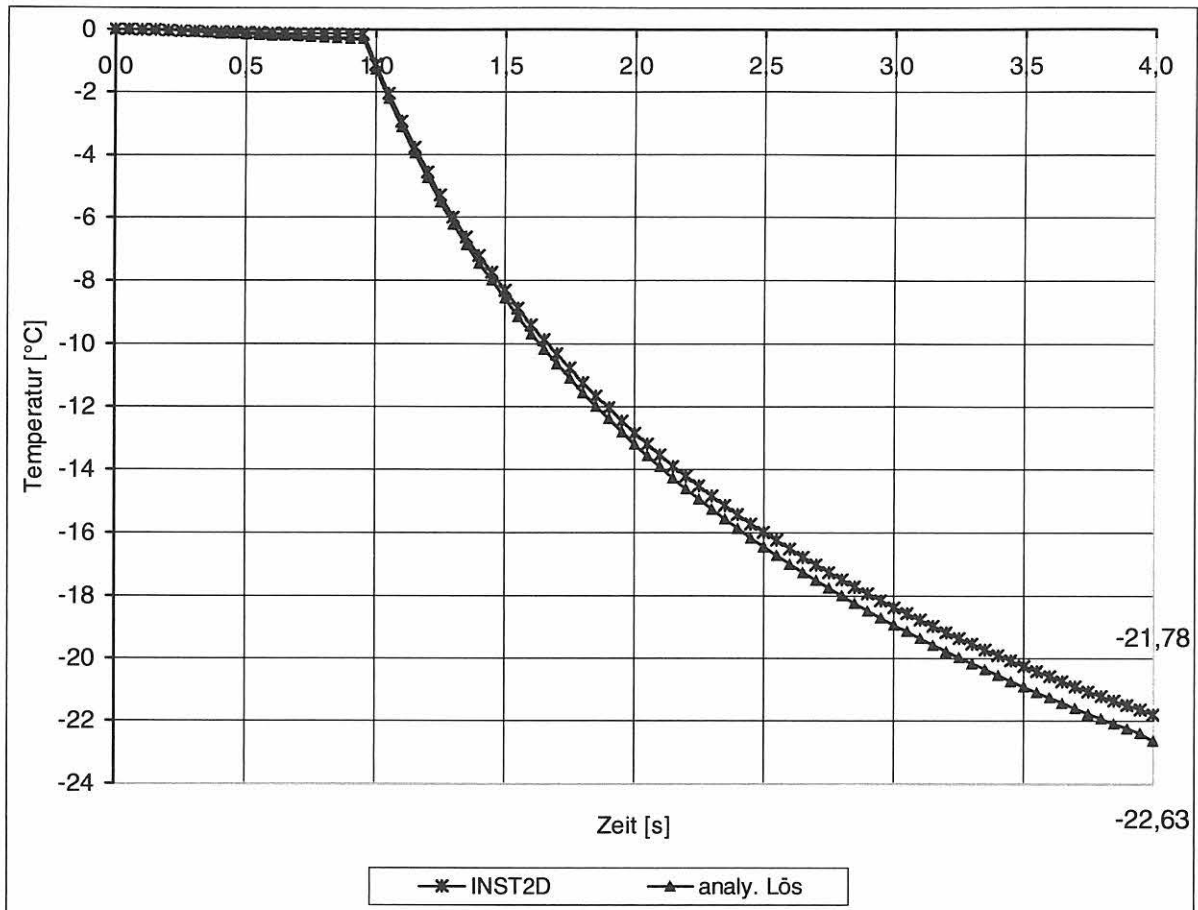
Bild 14.1: Elementierung eines fiktiven Flüssigkeitskörpers für die Simulation eines Erstarrungsprozesses

Der Flüssigkeitskörper mit einer Ausdehnung von insgesamt 4 cm in horizontaler Richtung wurde in 160 Schichten mit einer Breite von jeweils $0,25\text{ mm}$ unterteilt, vgl. Bild 14.1. Nach Umrechnung der Einheiten sind bei der Berechnung mit INST2D folgende Kennwerte anzusetzen:

- für die Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit ein Wert von $418,68\text{ W/(mK)}$
- für die spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit ein Wert von $4186,8\text{ J/(kgK)}$
- für die Rohdichte der Flüssigkeit ein Wert von 1000 kg/m^3
- für die Umwandlungswärmemenge ein Wert von $294,2 \cdot 10^3\text{ J}$.

Die Auswertung erfolgt in den Knoten 81 und 82, die sich in 1 cm Entfernung von den Randtemperaturknoten 1 und 2 befinden. Die Versuchsdauer beträgt 4 s . Die Phasen-

umwandlung ist nach ca. 1 s abgeschlossen und die bei der analytischen Lösung nach 4 s sich ergebende Temperatur ist in (Huang, Usmani, 1993) mit $-22,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ angegeben.



Diagr. 14.1: Gegenüberstellung der bei analytischer Lösung und bei Berechnung mit INST2D in 1 cm Entfernung vom Rand sich ergebenden Temperaturen als Funktion der Zeit

Die Werte der analytischen Lösung wurden für die Gegenüberstellung der Temperatur-Zeit-Verläufe aus (Huang, Usmani, 1993, Kap. 5, Fig. 5.5) abgelesen. Zu erkennen ist, daß die größte Temperaturabweichung nach 4 s mit einem Betrag von 0,85 K auftritt. Das Ergebnis zeigt, daß die Methode, mit der Phasenumwandlungsvorgänge im Programm INST2D simuliert werden, für das vorliegende Beispiel einen Temperatur-Zeit-Verlauf errechnet, der dem Verlauf der analytischen Lösung sehr nahe kommt.

2. Beispiel: Simulation des Verdampfungsvorgangs bei der Brandbeanspruchung eines Stahlbetonbalkens (Vergleich mit Meßdaten)

Bei dem zweiten Beispiel handelt es sich um die Simulation eines Verdampfungsvorganges bei einem dreiseitig beflammt 12 cm x 24 cm - Stahlbetonbalken unter Normbrandbedingungen (Ehm, 1966; Kordina, Ehm, von Postel, 1975; Rudolphi, Müller, 1980). Unter Ausnutzung der Symmetrieverhältnisse wird eine Elementaufteilung nach Bild 14.2 gewählt. Diese Teilung in 1 cm x 1 cm große Elemente ist gut geeignet, um einen Vergleich mit den 12 cm bzw. 19 cm von der Unterkante des Balkens entfernt gelegenen Meßstellen in Balkenmitte zu ermöglichen, vgl. Bild 14.3.

Die Unter- und Seitenflächen des Balkens werden entsprechend der ISO 834-Kurve mit einer Anfangstemperatur ϑ_0 von 10 °C beflammt. Gleichzeitig wird an diesen Flächen Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung angenommen. An der Kaltseite (Knoten 169 bis 175) wird nur ein konvektiver Wärmeübergang angesetzt. Bei der Rechnung wird davon ausgegangen, daß in dem Beton (Rheinkies) ein mittlerer Feuchtegehalt von 3,4 % enthalten ist, obwohl der Feuchtegehalt bei der Messung zwischen ca. 2,0 und 4,0 %, jeweils zur Balkenmitte ansteigend, schwankte. Die sonstigen Kennwerte sind der o.a. Literatur zu entnehmen. Danach werden für den Beton in Phase 0 ($\vartheta < \vartheta_{\text{krit}}$) und in Phase 1 ($\vartheta > \vartheta_{\text{krit}} = 100$ °C) unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten angesetzt:

- Phase 0: $\lambda = 3,37 \text{ W/(mK)}$,
- Phase 1: $\lambda = f(\vartheta)$, mit λ -Werten, die ein Drittel bis ein Viertel der Werte von Phase 0 betragen

In Tab. 14.1 sind die beim Brandversuch an Meßstelle 12 und 19 gemessenen Temperaturen den in den Knoten 85 und 134 von INST2D berechneten Werten gegenübergestellt. Diagr. 14.2 zeigt die zugehörigen Temperatur-Zeit-Verläufe.

Die Übereinstimmung der an Meßstelle 12 gemessenen und in Knoten 85 errechneten Temperaturen ist gut, die kleinste Abweichung tritt hier zum Endzeitpunkt auf. Beim Vergleich der an Meßstelle 19 gemessenen und in Knoten 134 errechneten Temperaturen ist eine gute Übereinstimmung bis zu einer Zeitdauer von 3900 s gegeben, danach treten etwas größere Abweichungen von bis zu 30 K auf.

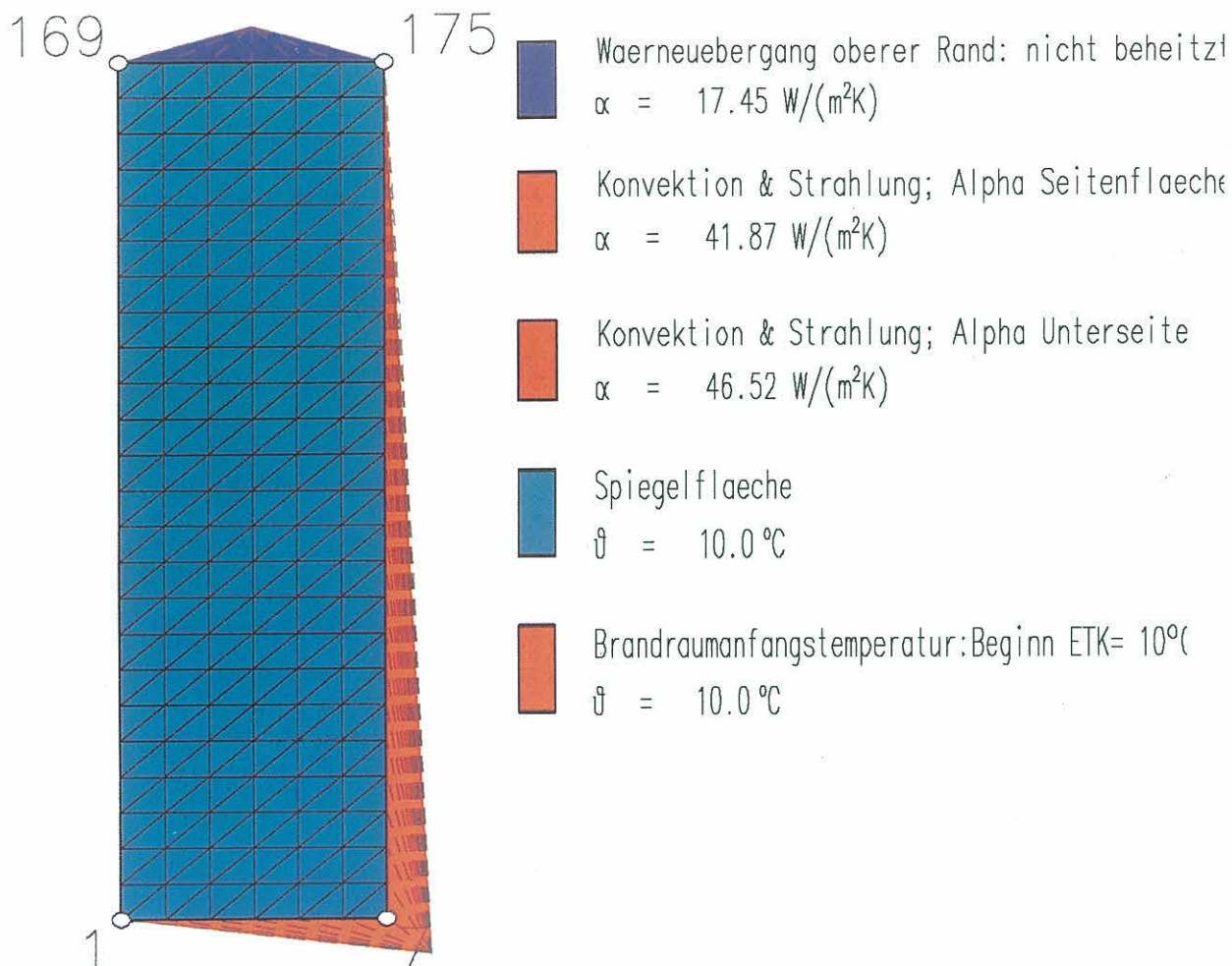


Bild 14.2: Baustoffkennwerte, Randbedingungen und Elementierung für die Berechnung eines Stahlbetonbalkens mit INST2D

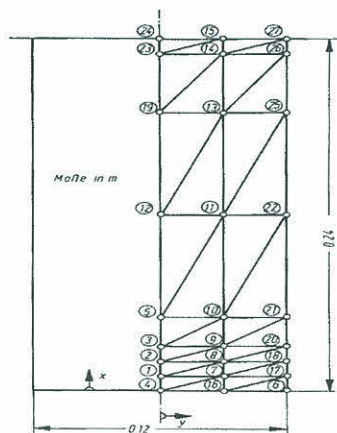
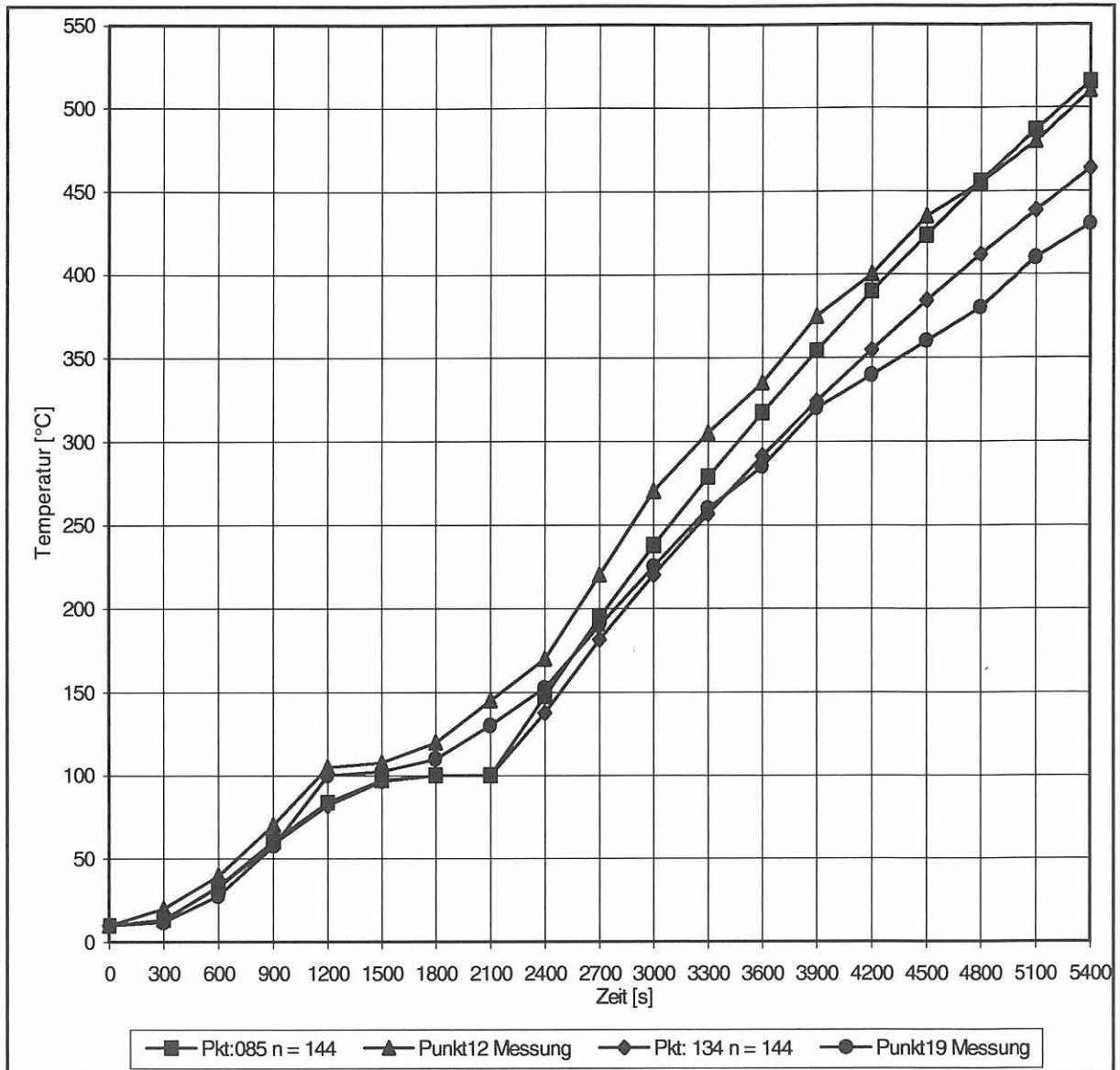


Bild 14.3: Schema für die Anordnung der Meßstellen in Balkenmitte bei dem Brandversuch nach ISO 834

ZEIT [s]	Temperatur [°C]			
	Knoten 85 INST2D	Meßpunkt 12 Messung	Knoten 134 INST2D	Meßpunkt 19 Messung
0	10,00	10,00	10,00	10,00
300	13,24	20,00	13,24	12,00
600	33,32	40,00	33,00	27,50
900	60,23	70,00	58,98	57,50
1200	83,99	105,00	82,10	100,00
1500	97,54	107,50	96,47	102,50
1800	99,99	120,00	99,96	110,00
2100	100,00	145,00	100,00	130,00
2400	147,31	170,00	137,43	152,50
2700	194,63	220,00	181,18	190,00
3000	237,78	270,00	220,09	225,00
3300	278,57	305,00	256,64	260,00
3600	317,42	335,00	291,21	285,00
3900	354,48	375,00	323,94	320,00
4200	389,85	400,00	354,94	340,00
4500	423,60	435,00	384,30	360,00
4800	455,80	455,00	412,11	380,00
5100	486,54	480,00	438,47	410,00
5400	515,88	510,00	463,47	430,00

Tab. 14.1: Gegenüberstellung der beim Brandversuch gemessenen Temperaturen mit den entsprechenden von INST2D errechneten Werten für den Stahlbetonbalken



Diagr. 14.2: An den Meßstellen 12 und 19 gemessene Temperatur-Zeit-Verläufe sowie an den entsprechenden Knotenpunkten mit INST2D errechnete Temperatur-Zeit-Verläufe für den Stahlbetonbalken

15 Literaturverzeichnis

Dusinberre, G.M.:

Heat-Transfer Calculations by Finite Differences
Internat. Textbook Company, Scranton (Pennsylvania), 1961

Ehm, H.:

Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von
brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen.
Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1966

Eichberger, J.-I.:

Calculation of geometric configuration factors
in an enclosure whose boundary
is given by an arbitrary polygon in the plane.
Wärme- und Stoffübertragung 19 (1985), H. 4, S. 269 – 271

Eurocode 1

Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkung auf Tragwerke
Teil 2.2.: Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen im
Brandfall

Ref.No ENV 1991-2-2 : 1995 D

Eurocode 3

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1.2.: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den
Brandfall

Ref.No ENV 1993-1-2 : 1995 D

Gear, C.W.:

Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations
Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey), 1971

Gear, C.W.:

The Automatic Integration of Ordinary Differential Equations
Communications of the ACM 14 (1971), Nr. 3, S. 176-179

Grigorieff, R.D.:

Numerik gewöhnlicher Differentialgleichungen
Band 1: Einschrittverfahren
B.G. Teubner, Stuttgart, 1972
Band 2: Mehrschrittverfahren
B.G. Teubner, Stuttgart, 1977

Grigull, U.; Sandner, H.:

Wärmeleitung (2. Auflage)
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990

Hindmarsh, A.C.:

GEAR: Ordinary Differential Equation System Solver
Report UCID-30001, Rev. 3
Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, 1974

Hindmarsh, A.C.:

GEARB: Solution of Ordinary Differential Equations Having Banded Jacobian
Report UCID-30059, Rev. 1
Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, 1975

Hottel, H.C. :

Radiant Heat Transmission
In : McAdams, W.H. (Hrsg.):
Heat Transmission. 3. Auflage, Kap. 4.
McGraw-Hill, New York, 1954

Huang H.-Ch.; Usmani A.S.:

Finite Element Analysis for Heat Transfer
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994

Kordina, K.; Ehm, H.; von Postel, R.:

Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter
Brandbeanspruchung.
Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 230
Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1975

Kreith, F.; Black, W.Z.:

Basic Heat Transfer
Harper & Row, Publishers, New York, 1980

Mathiak, F.U.:

Berechnungen von Konfigurationsfaktoren
polygonal berandeter ebener Gebiete.
Wärme- und Stoffübertragung 19 (1985), H. 4, S. 273 - 278

Müller, R.:

Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer
Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen. Anwendung auf das Heißdraht-
Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen.
Dissertation, TU Clausthal, 1989 bzw.
Forschungsbericht 185
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 1992

Müller, R.; Rudolphi, R.:

Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im
Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6 mit abgedruckten
FORTRAN-Sourcelistings sowie unter MS-DOS lauffähigen Programmen und
kompletten Anwendungsbeispielen auf Diskette
Forschungsbericht 159
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 1989

Rudolphi, R.:

Zur rechnerischen Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen

Dissertation, Technische Universität Berlin, 1979 bzw.

Forschungsbericht 72,

Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, 1980

Rudolphi, R.; Müller, R.:

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz

Forschungsbericht 74

Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, 1980

Rudolphi, R.:

Anspruchsvolle dreidimensionale Temperaturberechnungen bei instationären Randbedingungen.

wksb 43 (1998), H. 41, S. 40 – 46

Erscheint 1999 auch im Internet

Schwarzott, W.:

Ein Elementverfahren zum Berechnen von Temperaturfeldern

Forsch. Ing. Wesen 38 (1972), Nr. 6, S.165-171

Siegel, R.; Howell, J.R.; Lohrengel, J.:

Wärmeübertragung durch Strahlung

Teil 1 : Grundlagen und Materialeigenschaften

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1988

Siegel, R.; Howell, J.R.; Lohrengel, J.:

Wärmeübertragung durch Strahlung

Teil 2 : Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und in Umhüllungen.

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991

Stoer, J.:

Einführung in die Numerische Mathematik I

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972

Stoer, J.; Bulirsch, R.:

Einführung in die Numerische Mathematik II

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978

Wickström, U.:

TASEF2 - A Computer Program for Temperature

Analysis of Structures Exposed to Fire

Report No. 79-2

Lund Institute of Technology, Lund, 1979

Wickström, U.:

A Numerical Procedure for Calculating Temperature
in Hollow Structures Exposed to Fire.

Report No. 79-3

Lund Institute of Technology, Lund, 1979

Wickström, U.:

An Evaluation Scheme of Computer Codes for Calculating Temperature
in Fire Exposed Structures – Two Dimensional Analysis

EGOLF/PLENARY/N213

EGOLF/TC2/N198

Swedish National Testing and Research Institute, Borås, March 1997

Wickström, U.:

An Evaluation Scheme of Computer Codes for Calculating Temperature
in Fire Exposed Structures

Swedish National Testing and Research Institute, Borås, October 1997

VDI – Wärmeatlas:

Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 4. Auflage

VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984

Anhang 1:**An evaluation scheme of computer codes for calculating temperature in fire exposed structures - two dimensional analysis, March 1997**

Ulf Wickström, SP, Borås

Introduction

Theoretical analysis is gradually more often used to assess fire resistance of structures. A very important step in such an analysis is to evaluate the temperature rise in the structure. Several computer codes are available but their validity and accuracy are sometimes questioned by authorities and certifiers etc.

But how could the quality of an analysis be verified? At least three steps must be considered

- 1) validity of calculation model
- 2) accuracy of material properties
- 3) accuracy and reliability of computer code.

The first point is of course important. Effects of spalling or water migration can for instance not be considered with a code just based on heat transfer according to the Fourier heat transfer equation.

The second point is crucial. Errors in material property input will certainly be transmitted into output errors. But accurate material properties are often not available even for common materials, and methods for measuring material properties at high temperature are not readily available. This problem will, however, not be dealt with here.

Finally the computer code itself. If correctly used most codes yield results with acceptable accuracy. But how could that be proven. A scheme to follow including 8 levels of complexity is suggested in this paper. It is mainly developed for finite element codes but it may also be used for codes based on finite difference principals. The first level is a linear problem which can be solved analytically. When increasing the number of elements the results should converge to the correct value. Similar type of so called patch tests are then suggested for a number of non-linear problems. The principal of this type studies is that codes yielding results that converge smoothly when increasing the number of elements are generally reliable for the type of problems considered. At least it can be seen as a good indication.

The scheme suggested here employs problems which are relevant for fire safety engineering including effects of conductivity varying with temperature, latent heat, radiant heat transfer boundary conditions and combinations of materials, concrete, steel and mineral wool. The last level suggested so far is for the evaluation of a special feature available only in some codes, radiative heat transfer in voids. A large number of other special features could of course be added, e.g. axisymmetric cases, heat transfer between flowing media and pipe walls and so on.

As an example the computer code TASEF[1] has been evaluated using the outlined scheme. The results are reported in an Appendix. Other similar computer codes could be evaluated employing the same set of problems. The convergence properties could be studied and comparisons could be done with the results obtained with TASEF.

Problems of various levels of complexities

Below follows some problems at various levels of complexities. They should be solved with an increasing number of elements. The specifications for the various problems outlined are given so that the input efforts are minimised. In all cases meshes with 4, 16, 64 and 128 elements were used.

The problem of the first level is linear and has an exact analytical solution in terms of non-dimensional variables. All the other problems are non-linear and exact solutions are not available.

Level 1 - Comparison against analytic results, constant material properties

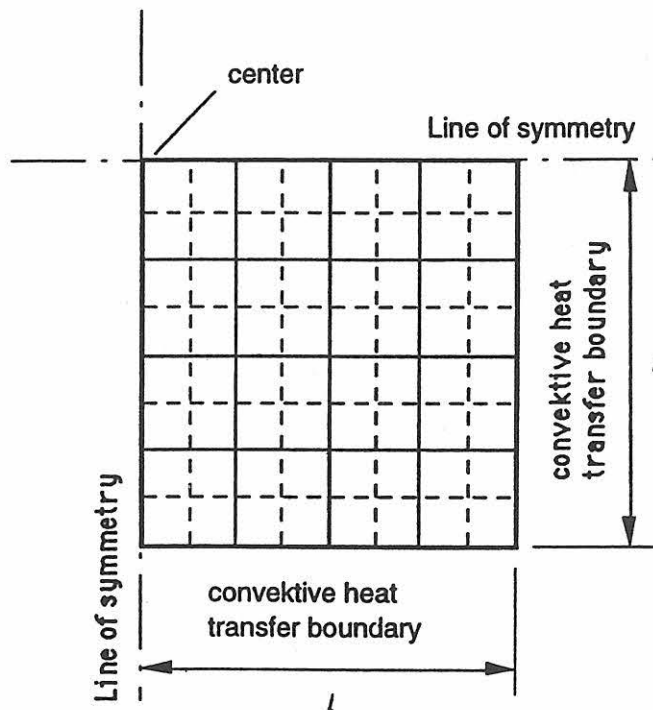


Figure 1 Quarter of square. Initially at a temperature $T_i = 1$. Surrounding ambient gas temperature $T_\infty = 0$. Thermal diffusivity $a = \kappa/\rho c_p = 1$ and Biot number $Bi = hl/\kappa = 1$. Number of elements $n = 4, 16, 64$ and 128 .

Model one quadrant of a square, $2l$ by $2l$. The heat transfer at the boundary is given as $h(T_\infty - T_s)$ where T_s is the current surface temperature. Check convergence of centre temperature T_c for increasing number of elements, $n = 4, 16, 64$ and 128 .

Compare with exact analytical solutions the calculated centre temperature at dimensionless time $Fo = a/\rho = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ and 1.0 . The exact solution are $T_c = 0.9864, 0.9038, 0.6902, 0.5147, 0.3827$ and 0.2845 , respectively.

(The parameters l, h, κ and a can be chosen arbitrary as long as the non-dimensional parameter groups yields the values as specified.)

Level 2 - Simple non-linear boundary problem - concrete structure with constant material properties

A square (2 l by 2 l) of concrete like material with assumed constant properties. The same grids as for level 1 with

half side length,	$l = 0.1 \text{ m}$
conductivity,	$\kappa = 1.0 \text{ W/mK}$
specific heat capacity,	$c = 1\,000 \text{ Ws/kg}$
density,	$\rho = 2\,400 \text{ kg/m}^3$

Assume the heat transfer q by radiation and convection to the boundaries to be

$$q = \varepsilon\sigma[T_f^4 - T_s^4] + \alpha(T_f - T_s)$$

with the emissivity $\varepsilon = 0.8$ and the convection coefficient $\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$. The Stefan Boltzmann constant $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Surrounding fire temperature at constant $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ and alternatively according to ISO 834. Initial temperature $T_i = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Table the centre temperature at $t = 30, 60, 90, 105$ and 120 min for the number of elements $n = 4, 16, 64$ and 128 . Model one quarter of symmetry only.

Report centre temperature and surface temperatures at the corners of the model as a function of time for various numbers of elements, n .

Level 3 - Simple non-linear boundary and material properties

The same as above except with the heat conductivity, κ varying bi-linearly with temperature, T :

$$\kappa(T=0)=1.5, \quad \kappa(T=200)=0.7, \quad \kappa(T=1000)=0.5 \text{ (W/mK)}$$

Level 4 - Latent heat due to water content

The same as level 3 but add latent heat due to water evaporation in the range of $100 \text{ }^\circ\text{C}$ to $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Assuming a water content of 5% by weight the latent heat is $0.05 \cdot 2\,400 \cdot 2.26 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$. Influences of water migration is neglected.

Report centre temperature and temperatures at corners as a function of time for various n .

Level 5 - Composites, steel and concrete

A concrete core according to level 4 inside a 10 mm thick steel square tube, see figure 2. Assume square corners. Material properties as above for concrete. For steel in accordance with Eurocode 3, Part 1.2.

Report centre temperature and surface temperatures at corners and at line of symmetry as a function of time for various n .

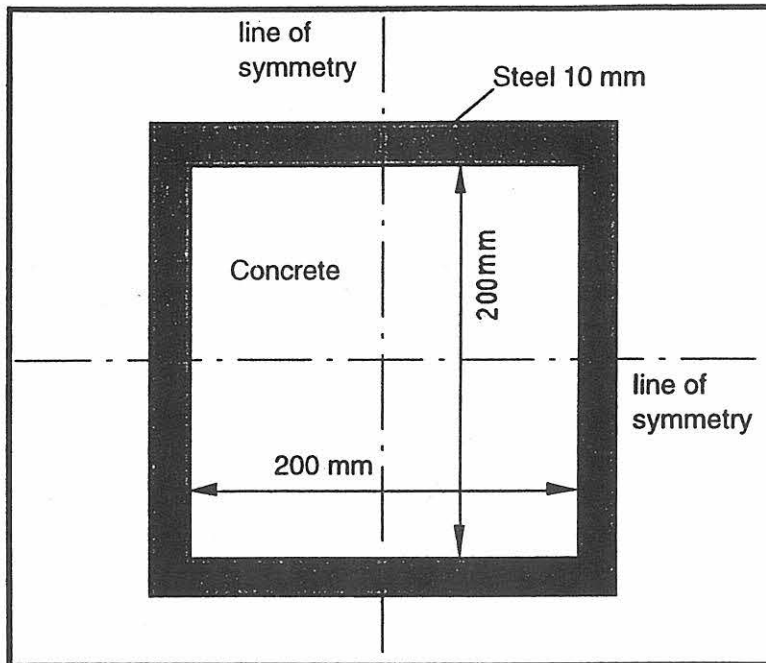


Figure 2 Concrete inside square steel tube.

Level 6 - Thin steel covering mineral wool

The same as level 5 but with mineral wool ($\kappa = 0.05 \text{ W/mK}$, $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ and $c = 1000 \text{ kg/m}^3$) in the core and the steel thickness 0.5 mm. $T_1 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ and according to ISO 834. Report steel temperature at centre and corner positions as a function of time, and the temperature distribution in the steel at $t = 15$ and 30 min.

Level 7 - Special features - radiative heat transfer in voids

To model radiative heat transfer in voids, configuration factors need to be considered. Evaluation examples could be a one dimensional case possible to check analytically and a two-dimensional case where the considerations of configuration factors show up clearly.

1-D case

A rectangle 110 mm by 20 mm with 5 mm thick walls of a material with thermal properties: $\kappa = 1.0 \text{ W/m K}$, $c = 1000 \text{ J/kgK}$ and $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Two sides are perfectly insulated (adiabatic boundaries) and the lower long side have a temperature of $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ and the upper surface is kept at $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Initial temperature $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

In this case heat is transferred by conduction through the lower and upper wall and by radiation in the void. Heat transfer by conduction through the left and right side is being negligible.

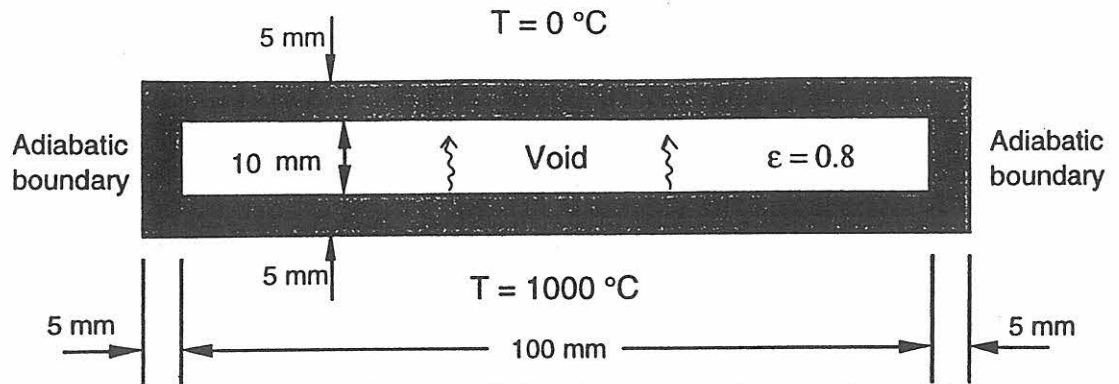


Figure 3 Structure containing a void. Heat is transferred across the void by radiation only. Inside surface emissivity equal 0.8 and long side external surface temperature equal $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively.

Schematic element configurations of the void boundaries to be used in the calculations is outlined in figure 4. The black points indicates the surface nodes. Configuration factors (view factors) shall be calculated between these nodes for the calculation of the radiative heat exchange between the void surface nodes.

Tabulate the temperature along the inside of the void and compare with the analytical solution.

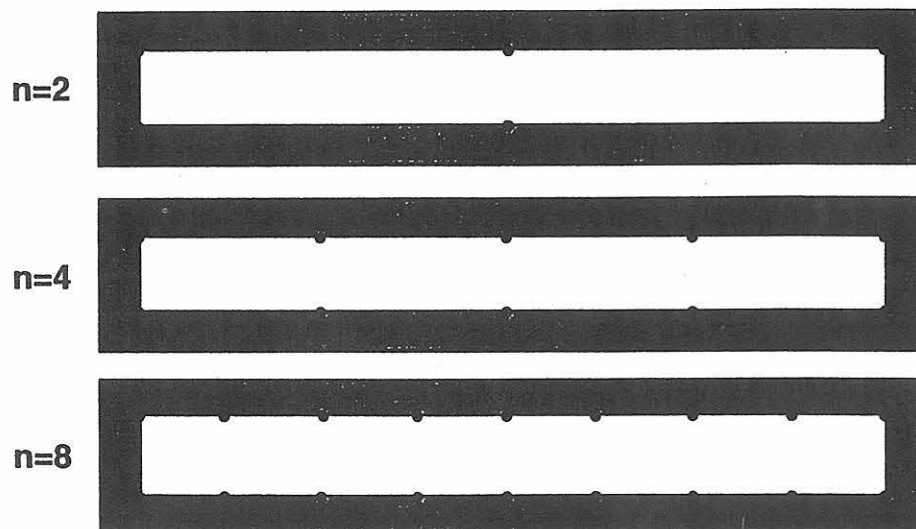


Figure 4 Structure with void. The boundaries of the void are each divided into 2, 4 and 8 side elements, respectively.

2-D case

The same as the 1-D case but with the long side as adiabatic boundaries, the short sides as the upper and lower boundaries, respectively. Due to the low thermal conductivity in the material, the thermal energy is transferred from the warm to the cool boundary by radiation q_{rad} between the long sides of the structure according to figure 5. Heat transfer by conduction through the long sides of the structure is being negligible.

Plot and tabulate the surface temperature history of the inner long side centre and corner points for one hour.

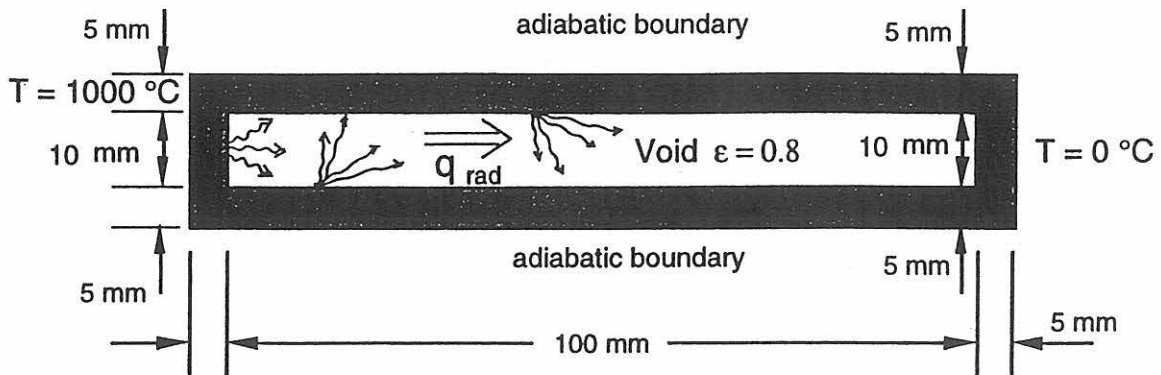


Figure 5 Structure containing a void - 2 - D case. The thermal energy is mainly transferred by radiation Q_{rad} between the long sides, schematically explained by the arrows from the boundaries of the void.

Acknowledgement

The calculations have been carried out by E. Hadziselimovic, a researcher from Sarajevo, Bosnia, visiting SP.

References

- [1] Sterner, E. and Wickström, U., TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire, SP Report 1990:05, Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1990.

Appendix- Evaluating the code TASEF

TASEF [1] calculations are conducted for all levels as prescribed above and the results are presented in tables and diagrams.

TASEF is a finite element program but uses forward difference method in the time domain. Therefore it converges only if the time increment Δt is less than a critical value t_{cr} . The value of the critical time increment depends on element size, material properties, and boundary conditions. At each time step the length of the critical time increment is computed (see the TASEF manual [1] Appendix B, page 26), and a new time increment is obtained by multiplying the critical time increment by a time increment factor (or shorter time factor) specified by the user, usually in the range 0.75 - 1. Shorter time increment factors are used here to reach more accurate results.

LEVEL 1 - Comparison against analytic results, constant material properties

A square section initially at 0°C , is subjected to ambient gas temperature $T = 1000^{\circ}\text{C}$ (figure 1).

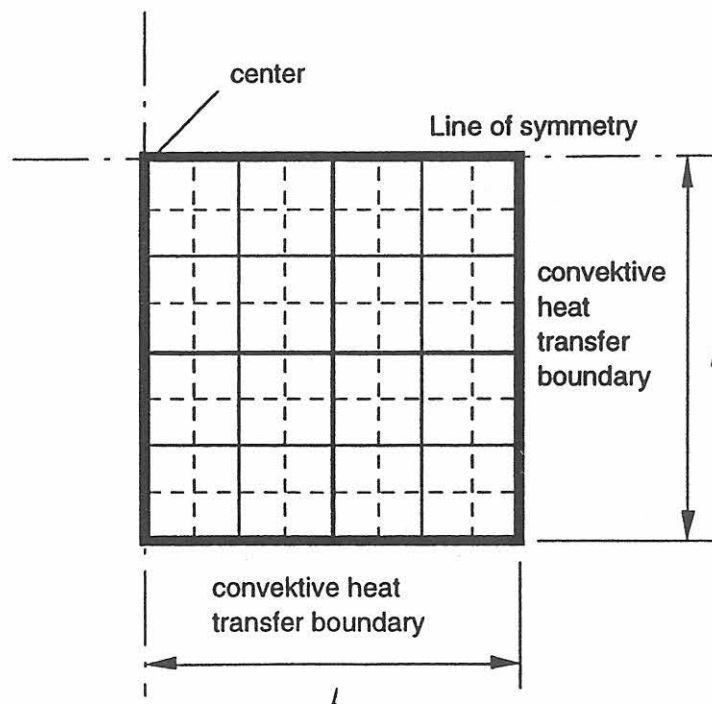


Figure 1 Quarter of square. The results of TASEF calculations for $n = 4, 16, 64, 128$ numbers of elements in the mesh are presented in table 1 together with the exact solutions.

Table 1 Constant material properties: Comparison between TASEF calculations and exact solutions.

dimensionless time Fo	n=4 time factor 0.01	n=16 time factor 0.1	n=64 time factor 0.1	n=128 time factor 0.1	analytical solutions
	T_{cen}	T_{cen}	T_{cen}	T_{cen}	
0.1	978	984	986	986	986.4
0.2	903	904	904	904	903.8
0.4	703	694	691	691	690.2
0.6	528	518	516	515	514.7
0.8	393	386	384	384	382.7
1	293	287	285	285	284.5

LEVEL 2 - Simple non - linear boundary problem Concrete structure with constant material properties

A square of concrete like material with constant properties used in the calculations is shown in figure 2.

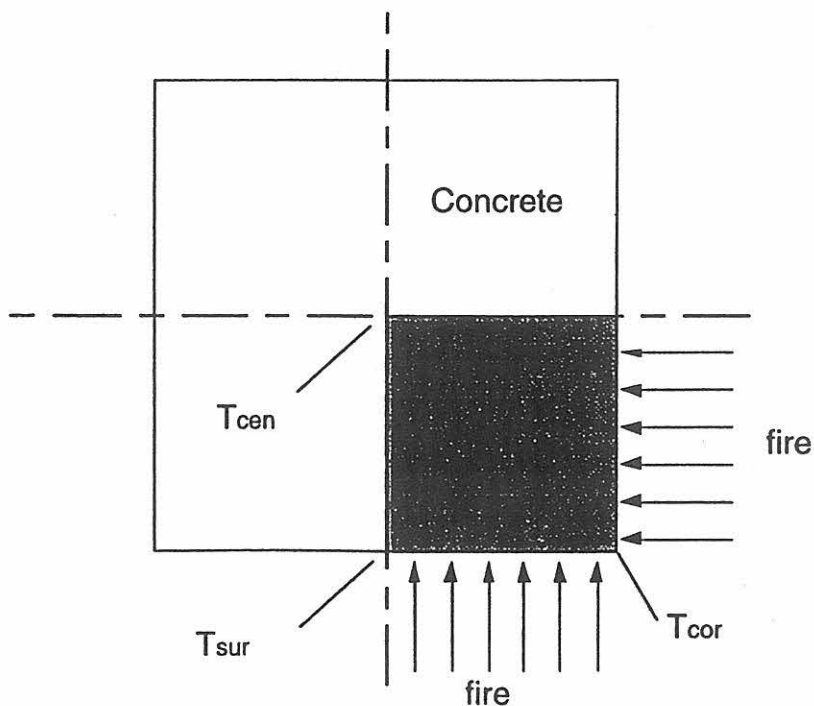


Figure 2 A concrete square exposed to the fire.

The meshes for calculations were the same as in the previous example and consisted of 4, 16, 64 and 128 elements.

In these calculations the time factors were reduced until the results converge to a definite value. In this case the accepted accuracy was achieved when the difference in the temperatures, obtained with different values of the time factor, is less than or equal to 2 °C.

As an example, in the table 2 are shown the results of the calculations for the mesh with $n = 16$ elements after 3 hours of exposure to the ISO834 fire. T_{cen} , T_{sur} and T_{cor} are center, surface and corner temperatures, respectively.

Table 2 Influence of the number of time increments on the nodes temperature.

number of elements, $n = 16$					
time increments (s)	T_{cen} °C	T_{sur} °C	T_{cor} °C	number of time increments	time factor
61	752	1078	1090	177	0.8
38	750	1078	1089	283	0.5
23	749	1077	1089	469	0.3
8	747	1077	1089	1403	0.1
1	746	1077	1089	13985	0.01
0.1	746	1077	1089	138046	0.001

The influence of the number of time increments on the nodes temperature can be seen from the graph in figure 3.

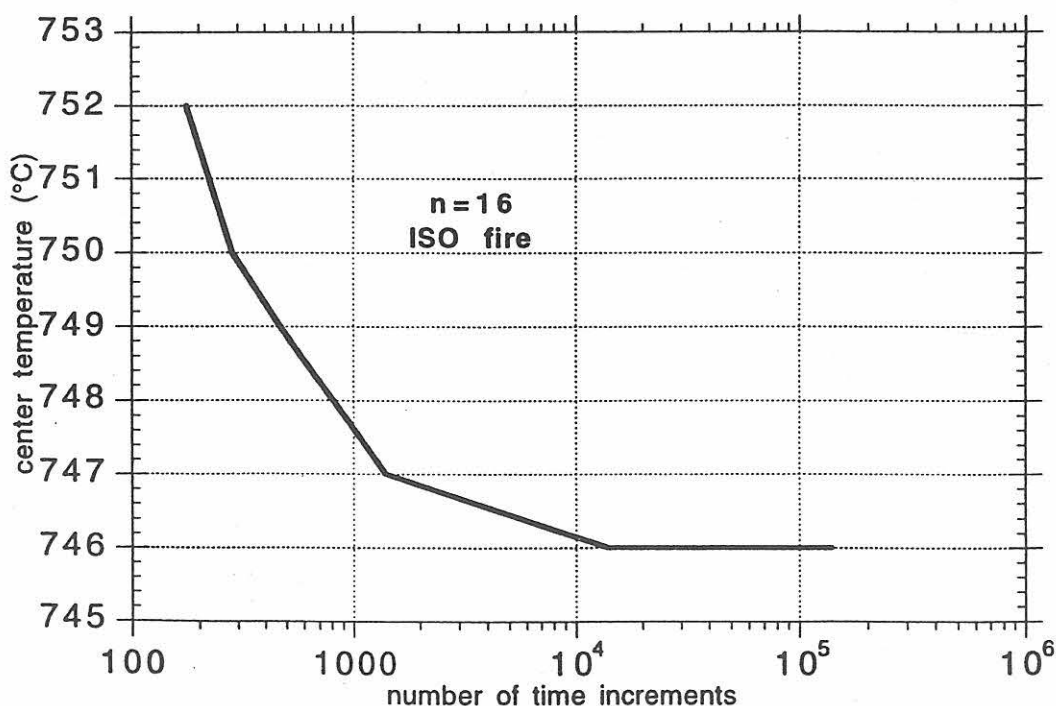


Figure 3 Center temperature as a function of the number of time increments after 3 hours of exposure to the ISO fire.

In the following tables (table 3a, 3b) the results of TASEF calculations are shown for various mesh elements for two types of fire exposure; constant fire temperature $T_f = 1000$ °C and ISO834 fire .

Table 3a Constant material properties. Constant fire gas temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	959	970	979	985	989	992	0.1
16		947	966	977	984	989	992	0.2
64		944	965	977	984	989	992	0.4
128		944	965	977	984	989	992	0.7
4	T _{cor}	996	997	998	999	999	999	0.1
16		996	998	999	999	1000	1000	0.2
64		997	999	999	999	1000	1000	0.4
128		997	999	999	999	1000	1000	0.7
4	T _{cen}	74	247	420	563	675	759	0.1
16		44	228	428	588	705	790	0.2
64		33	224	434	597	715	799	0.4
128		32	224	435	599	716	800	0.7

Table 3b Constant material properties. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	725	879	955	1007	1045	1078	0.1
16		725	874	953	1006	1046	1077	0.1
64		722	873	952	1006	1045	1077	0.1
128		723	873	952	1006	1046	1077	0.4
4	T _{cor}	827	921	983	1027	1061	1089	0.1
16		811	921	984	1028	1062	1089	0.1
64		810	921	984	1028	1062	1089	0.1
128		811	922	984	1028	1062	1089	0.4
4	T _{cen}	30	156	317	473	608	720	0.1
16		15	135	313	485	630	747	0.1
64		11	129	314	490	637	755	0.1
128		10	128	315	492	639	756	0.4

The corner and surface temperature does not change significantly with number of time increments. The time intervals in these calculations were less than 8 and 13 seconds for the ISO fire and the $T_f = 1000$ °C fire, respectively.

LEVEL 3 - Simple non - linear boundary and material properties Concrete with varying heat conductivity

In this case the material's heat conductivity varies with temperature. Everything else is as in LEVEL 2. The results are presented in the tables 4a and 4b.

Table 4a Heat conductivity varies with temperature. Constant Fire gas temperature equal 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	973	977	982	985	988	990	0.1
16		961	973	980	984	987	990	0.1
64		957	971	979	984	987	990	0.1
128		957	971	979	984	987	990	0.1
4	T _{cor}	999	998	999	999	999	999	0.1
16		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
64		998	999	1000	1000	1000	1000	0.1
128		999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	55	147	250	350	442	522	0.1
16		41	137	243	356	459	547	0.1
64		36	134	242	361	467	557	0.1
128		35	134	243	362	468	558	0.1

Table 4b Heat conductivity varies with temperature. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	745	891	961	1011	1048	1078	0.1
16		748	886	959	1009	1047	1077	0.1
64		745	884	958	1009	1047	1077	0.1
128		744	884	958	1009	1047	1077	0.1
4	T _{cor}	836	924	985	1028	1062	1089	0.1
16		816	923	985	1028	1062	1089	0.1
64		815	923	985	1028	1062	1089	0.1
128		815	923	985	1028	1062	1089	0.1
4	T _{cen}	28	108	199	298	395	485	0.1
16		21	101	190	296	403	502	0.1
64		19	99	189	299	409	509	0.1
128		18	99	189	299	409	510	0.1

LEVEL 4 - Latent heat due to water content - a concrete block with moisture

A block of concrete like material with 5 % content of water is exposed to fire. The disposition of the block is the same as in the previous cases.

The results of the calculations showing the center, corner and surface temperatures are shown in the tables 5a and 5b.

Table 5a Concrete with 5 % content of water. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	975	972	977	981	984	987	0.1
16		953	967	974	979	983	986	0.1
64		948	965	973	978	982	985	0.1
128		948	965	973	978	982	985	0.1
4	T _{cor}	1004	998	998	999	999	999	0.1
16		997	999	999	999	1000	1000	0.1
64		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
128		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	35	92	112	185	284	371	0.1
16		22	79	104	175	295	392	0.1
64		18	75	102	184	301	401	0.1
128		17	74	101	186	303	403	0.1

Table 5b Concrete with 5 % content of water. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	703	884	955	1005	1043	1074	0.1
16		732	877	952	1003	1042	1073	0.1
64		728	875	951	1003	1042	1073	0.1
128		728	875	951	1003	1042	1073	0.1
4	T _{cor}	850	924	984	1027	1061	1089	0.1
16		816	922	984	1028	1062	1089	0.1
64		813	923	985	1028	1062	1089	0.1
128		813	923	985	1028	1062	1089	0.1
4	T _{cen}	17	66	105	127	231	327	0.1
16		11	60	100	115	231	340	0.1
64		9	56	98	111	239	348	0.1
128		8	56	98	110	241	350	0.1

LEVEL 5 - Composites, steel and concrete

A concrete core inside a 10 mm thick steel square tube (figure 4). The meshes in these cases consist of a number of steel elements but in the concrete area there are again 4, 16, 64 and 128 elements, respectively.

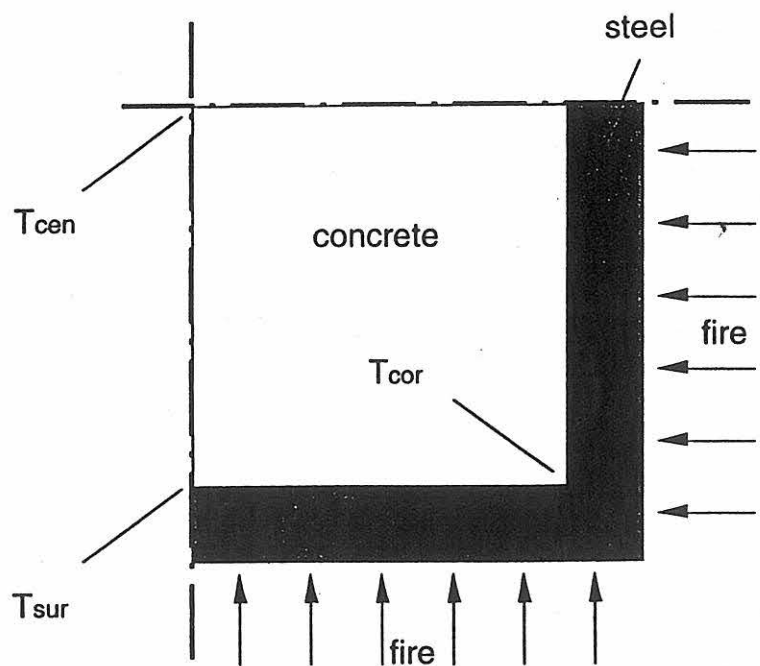


Figure 4 A concrete core in the square steel tube.

The results for this case are presented in the tables 6a and 6b.

Table 6a Concrete core inside a 10 mm steel square tube. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	953	976	981	984	987	989	0.1
16		950	969	976	981	985	987	0.1
64		944	966	975	981	984	987	0.1
128		944	966	975	980	984	987	0.1
4	T _{cor}	986	993	995	995	996	997	0.1
16		980	989	992	994	995	996	0.1
64		975	988	992	994	995	996	0.1
128		975	987	991	994	995	996	0.1
4	T _{cen}	32	88	111	179	280	369	0.1
16		19	75	103	163	286	387	0.1
64		14	70	101	172	293	395	0.1
128		14	69	101	174	295	397	0.1

Table 6b Concrete core inside a 10 mm steel square tube. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T_{sur}	581	865	954	1004	1043	1074	0.1
16		640	862	950	1002	1041	1073	0.1
64		644	860	948	1001	1041	1072	0.1
128		645	860	948	1001	1041	1072	0.1
4	T_{cor}	646	973	999	1020	1056	1084	0.1
16		724	921	992	1040	1076	1084	0.1
64		688	890	969	1018	1054	1083	0.1
128		688	890	969	1018	1054	1083	0.1
4	T_{cen}	14	61	103	119	219	318	0.1
16		9	53	96	111	215	328	0.1
64		6	49	94	106	222	335	0.1
128		6	48	93	106	224	336	0.1

LEVEL 6 - Thin steel covering mineral wool

A mineral wool core inside a 0.5 mm thick steel square steel tube (figure 5). The same element meshes as used in level 5.

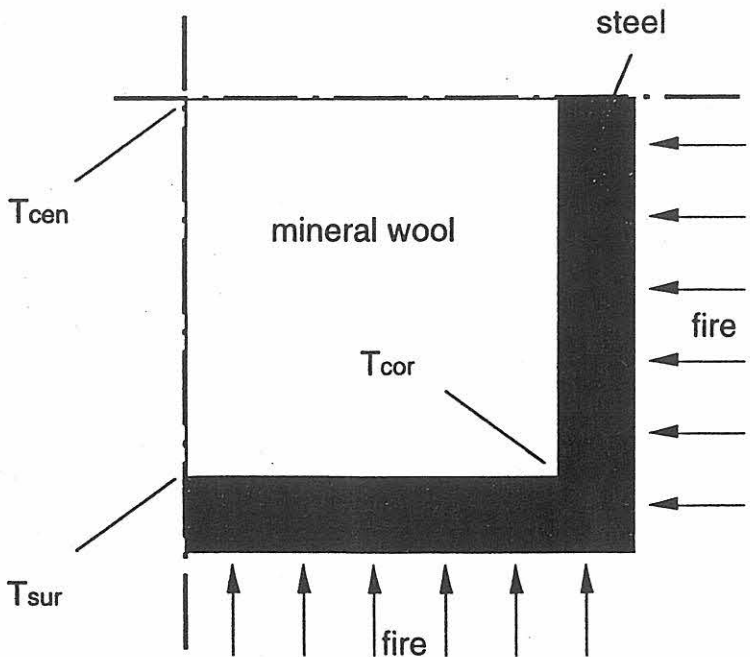


Figure 5 A mineral wool core in the square steel tube.

The results are shown in the Tables 7a and 7b.

Table 7a Mineral wool core in a square steel tube. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)							time factor
		15	30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
16		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
64		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
128		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cor}	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
16		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
64		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
128		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	135	354	682	850	930	967	985	0.1
16		91	343	712	877	948	978	990	0.1
64		75	341	720	883	952	980	992	0.1
128		74	343	722	885	952	980	992	0.1

Table 7b Mineral wool core in a square steel tube. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)							time factor
		15	30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	711	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
16		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
64		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
128		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
4	T _{cor}	714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
16		714	820	925	985	1029	1062	1090	0.1
64		714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
128		714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
4	T _{cen}	64	222	533	743	875	959	1016	0.1
16		38	204	550	766	894	973	1025	0.1
64		28	199	555	772	898	976	1027	0.1
128		27	199	556	773	899	976	1027	0.1

LEVEL 7 - Special features

A Heat transfer in voids

1 - D case

In table 8 the temperatures, after the thermal equilibrium is reached, of the inside surfaces (upper and lower) are given. The results of the TASEF calculations can in this case be compared with the analytical solution.

Table 8 Comparison between TASEF calculated void surface temperature with various numbers of nodes and the exact solution for a 1-D problem.

	number of side elements, N in the void	Lower surface (in the void)	Upper surface (in the void)
TASEF calculation	2	789	198
	4	774	229
	8	779	220
Analytical solution		779.4	220.6

2 - D case

The meshes are the same as in the previous case. The left external side is kept at 1000 °C. The results of the TASEF calculations are shown in table 9 and figure 6a.

Table 9 Radiative heat transfer: 2 - D case. The temperatures of the nodes of the left and right inside surfaces.

	N = 2				N = 4				N = 8			
	left nodes		right nodes		left nodes		right nodes		left nodes		right nodes	
time min	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	872	835	302	261	868	850	147	154	872	859	114	123
20	892	859	460	443	899	882	363	367	902	889	317	321
30	903	880	518	512	915	900	465	470	918	906	433	436
40	908	891	542	542	922	908	497	503	926	914	473	476
50	910	896	551	554	924	910	506	513	928	917	485	488
60	911	897	555	558	925	911	509	516	1000			

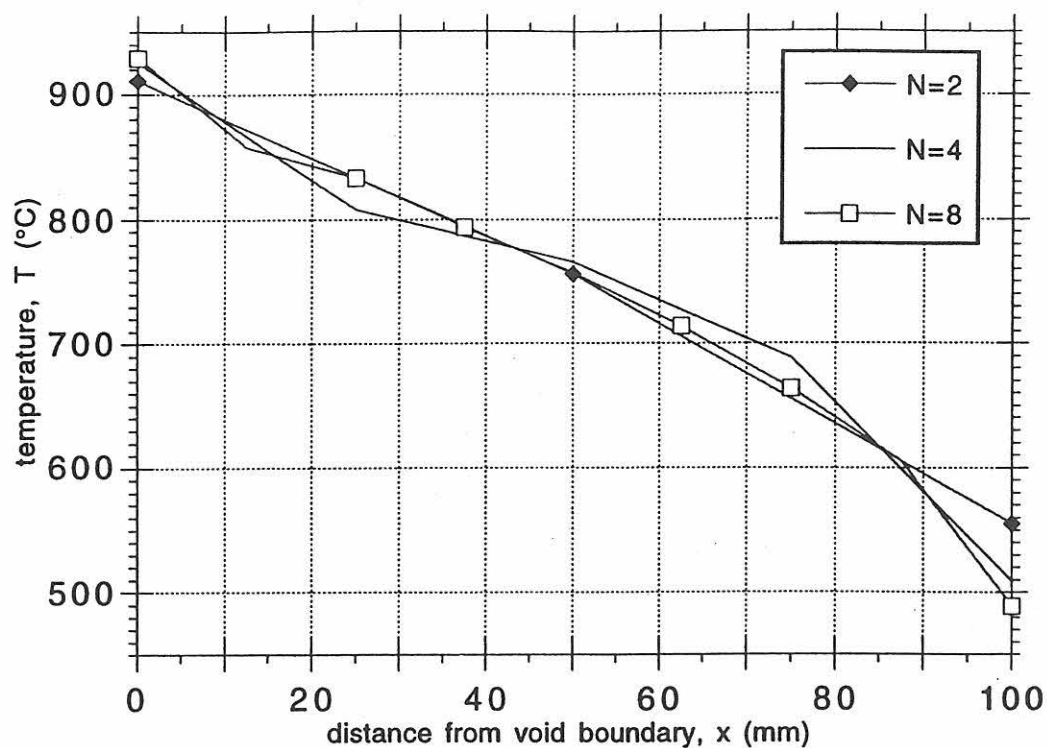


Figure 6a Temperature of the center points (left and right surface) as function of time.

The temperatures along the longer inner surface for various number of side elements after one hour are shown in table 10 and in figure 6b.

Table 10 Temperature along inner surface for various numbers of side elements at various locations x (distance from void boundary).

x (mm)	0	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
N=2	911				756				555
N=4	925		808		766		689		509
N=8	929	858	833	794	757	714	664	606	489

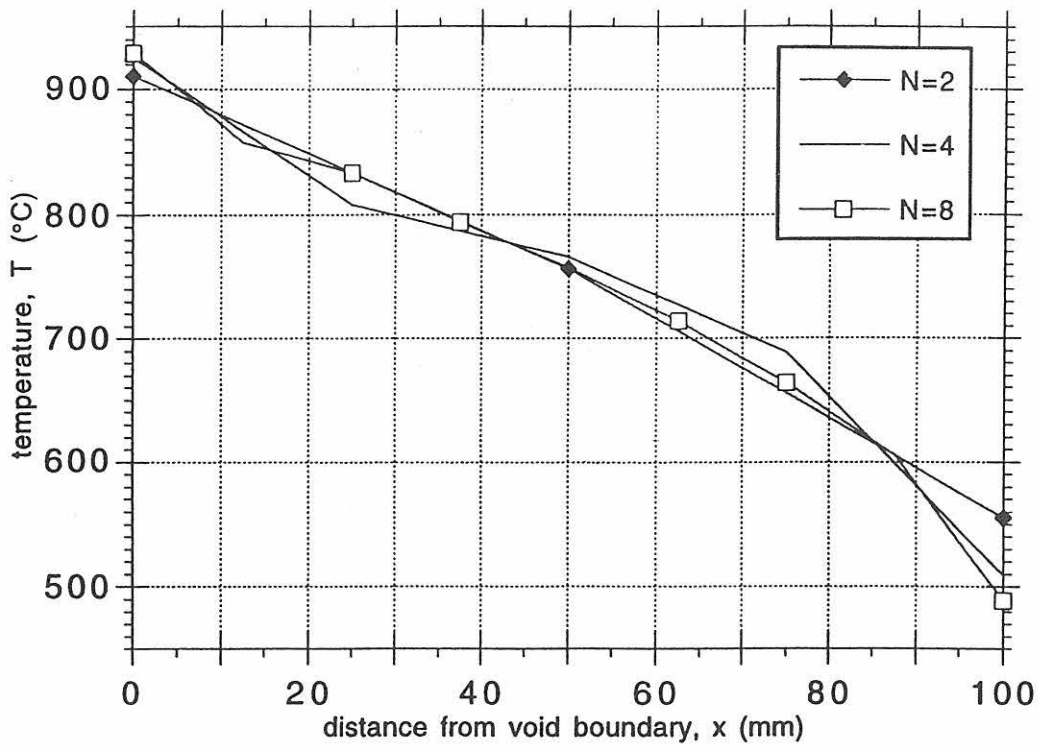


Figure 6b The temperature distribution along the inner longer surface after one hour.

References

1. E. Sterner, U. Wickström, TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire- User 's Manual, Borås, SP Report 1990:05.

**

Anhang 2:

An evaluation scheme of computer codes for calculating temperature in fire exposed structures

Second DRAFT 1997-10-14, arrived at BAM in December 1998

Ulf Wickström, SP, Borås

Abstract

A number of benchmark examples have been suggested for evaluating two dimensional temperature calculation computer codes based on the finite element or finite difference methods. First a simple example is suggested where an analytical solution is available then more complex cases are introduced assuming non linear boundary conditions and material properties varying with temperature. Finally cases dominated by radiative heat transfer in internal voids codes are defined.

Solutions of all the suggested examples are given in an appendix where various numbers of elements have been used for the numerical modelling. The intention is that specialist offering similar computer codes, particularly for fire safety engineers, should carry out similar calculations. Such comparative calculations could then form a basis for discussions on accuracy etc of various codes.

The intention of this scheme is to evaluate computer codes with given input data. Therefore no comparisons are made with test results.

Introduction

Theoretical analysis is gradually more often used to assess fire resistance of structures. A very important step in such an analysis is to evaluate the temperature rise in the structure. Several computer codes are available but their validity and accuracy are sometimes questioned by authorities and certifiers etc.

But how could the quality of an analysis be verified? At least three steps must be considered

- 1) validity of calculation model
- 2) accuracy of material properties
- 3) accuracy and reliability of computer code.

The first point is of course important. Effects of spalling or water migration can for instance not be considered with a code just based on heat transfer according to the Fourier heat transfer equation.

The second point is crucial. Errors in material property input will certainly be transmitted into output errors. But accurate material properties are often not available even for common materials, and methods for measuring material properties at high temperature are not readily available. This problem will, however, not be dealt with here.

Finally the computer code itself. If correctly used most codes yield results with acceptable accuracy. But how could that be proven. A scheme to follow including 8 levels of complexity is suggested in this paper. It is mainly developed for finite element codes but it may also be used for codes based on finite difference principals. The first level is a linear problem which can be solved analytically. When increasing the number of elements the results should converge to the correct value. Similar type of so called patch tests are then suggested for a number of non-linear problems. The principal of this type studies is that codes yielding results that converge smoothly when increasing the number of elements are generally reliable for the type of problems considered. At least it can be seen as a good indication.

The scheme suggested here employs problems which are relevant for fire safety engineering including effects of conductivity varying with temperature, latent heat, radiant heat transfer boundary conditions and combinations of materials, concrete, steel and mineral wool. The last level suggested so far is for the evaluation of a special feature available only in some codes, radiative heat transfer in voids. A large number of other special features could of course be added, e.g. axisymmetric cases, heat transfer between flowing media and pipe walls and so on.

As an example the computer code TASEF[1] has been evaluated using the outlined scheme. The results are reported in an Appendix. Other similar computer codes could be evaluated employing the same set of problems. The convergence properties could be studied and comparisons could be done with the results obtained with TASEF.

Problems of various levels of complexities

Below follows some problems at various levels of complexities. They should be solved with an increasing number of elements. The specifications for the various problems outlined are given so that the input efforts are minimised. In all cases meshes with 4, 16, 64 and 128 elements were used.

The problem of the first level is linear and has an exact analytical solution in terms of non-dimensional variables. All the other problems are non-linear and exact solutions are not available.

Level 1 - Comparison against analytic results, constant material properties

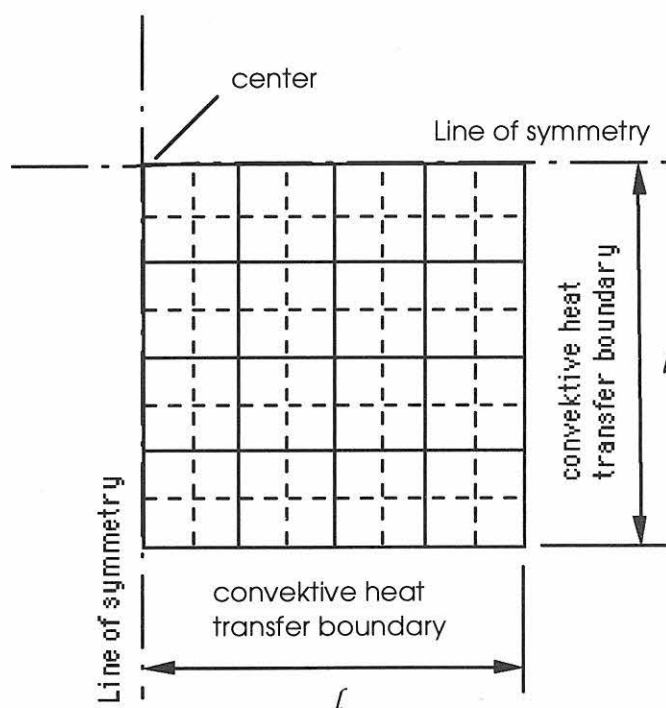


Figure 1 Quarter of square. Initially at a temperature $T_i = 1$. Surrounding ambient gas temperature $T_\infty = 0$. Thermal diffusivity $a = \kappa/c\rho = 1$ and Biot number $Bi = h l/\kappa = 1$. Number of elements $n = 4, 16, 64$ and 128 .

Model one quadrant of a square, $2l$ by $2l$. The heat transfer at the boundary is given as $h(T_\infty - T_s)$ where T_s is the current surface temperature. Check convergence of centre temperature T_c for increasing number of elements, $n = 4, 16, 64$ and 128 .

Compare with exact analytical solutions the calculated centre temperature at dimensionless time $Fo = at/l^2 = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ and 1.0 . The exact solution are $T_c = 0.9864, 0.9038, 0.6902, 0.5147, 0.3827$ and 0.2845 , respectively.

(The parameters l, h, κ and a can be chosen arbitrary as long as the non-dimensional parameter groups yields the values as specified.)

Level 2 - Non-linear boundary conditions and constant material properties

A square of concrete like material with assumed constant properties. The same grids as for level 1 with

half side length,	$l = 0.1 \text{ m}$
conductivity,	$\kappa = 1.0 \text{ W/mK}$
specific heat capacity,	$c = 1\,000 \text{ Ws/kg}$
density,	$\rho = 2\,400 \text{ kg/m}^3$

Assume the heat transfer q by radiation and convection to the boundaries to be

$$q = \varepsilon\sigma[T_f^4 - T_s^4] + \alpha(T_f - T_s)$$

with the emissivity $\varepsilon = 0.8$ and the convection coefficient $\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$. The Stefan Boltzmann constant $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Surrounding fire temperature at constant $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ and alternatively according to ISO 834. Initial temperature $T_i = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Table the centre temperature at $t = 30, 60, 90, 105$ and 120 min for the number of elements $n = 4, 16, 64$ and 128 . Model one quarter of symmetry only.

Report centre temperature and surface temperatures at the corners of the model as a function of time for various numbers of elements, n .

Level 3 - Non-linear boundary conditions and material temperature dependent thermal properties

The same as above except with the heat conductivity, κ varying bi-linearly with temperature, T :

$$\kappa(T=0)=1.5, \quad \kappa(T=200)=0.7, \quad \kappa(T=1000)=0.5 \text{ (W/mK)}$$

Level 4 - Latent heat due to water content

The same boundary conditions and heat conductivity as level 3 but add latent heat due to evaporation of 5% water in the range of $100 \text{ }^\circ\text{C}$ to $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Influences of water migration is neglected.

Use the following values of the specific heat capacity:

$$c(T=0 \text{ to } 100^\circ\text{C}) = 1\,208 \text{ J/kg K}, \quad c(100 \text{ to } 120) = 1\,208 \text{ J/kg K}, \quad c(120 \text{ to } 1\,100^\circ\text{C}) = 1\,222 \text{ J/kg K. (These input values must be used for comparison with the results given in the Appendix)}$$

Boundary conditions as specified in level 2.

Report temperatures at the centre and at the corners as a function of time for various numbers of elements n .

Level 5 - Composite, steel and concrete

A concrete core according to level 4 inside a 10 mm thick steel square tube, see figure 2. Assume square corners. Material properties as above for concrete. For steel in accordance with Eurocode 3, Part 1.2, i.e.:

$$k(T=20^{\circ}\text{C}) = 53 \text{ W/m K}, k(400) = 40.7, k(800) = 2.7, k(1\ 200) = 27.3$$

The values of the heat capacity c are as in level 4 except that $c(120 \text{ to } 1\ 100)$ is chosen to be $1\ 211 \text{ J/kg K}$. (By accident.)

Boundary conditions as specified in level 2.

Report centre temperature and surface temperatures at corners and at line of symmetry as a function of time for various numbers of elements n .

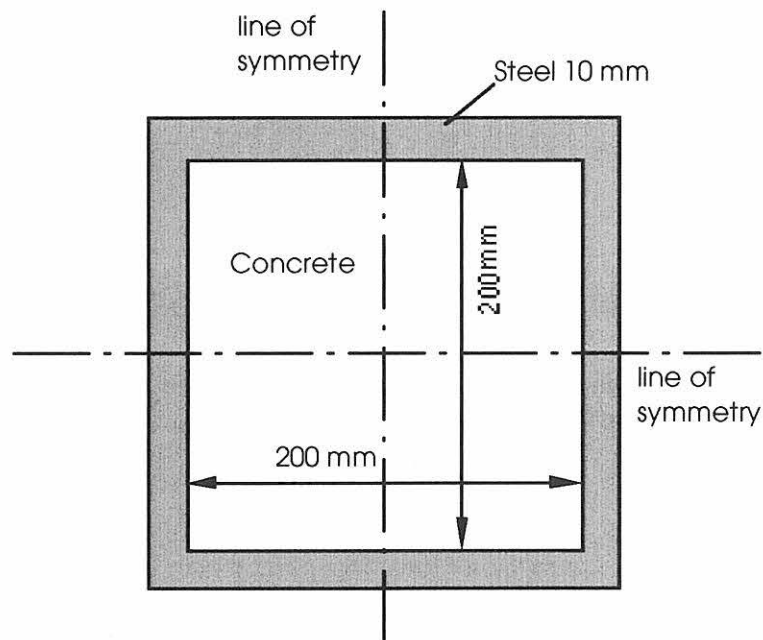


Figure 2 Concrete inside square steel tube - level 5.

Level 6 - Composite, steel and mineral wool

The same as level 5 but with mineral wool in the core and the steel thickness equal 0.5 mm. The thermal properties of the mineral wool are assumed to be constant, $\kappa = 0.05 \text{ W/mK}$, $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ and $c = 1\ 000 \text{ kg/m}^3$.

Boundary conditions as specified in level 2.

Report steel temperature at centre and corner positions as a function of time, and the temperature distribution in the steel at $t = 15$ and 30 min.

Level 7 - Special features - radiative heat transfer in voids

To model radiative heat transfer in voids, internal emissivities and configuration factors need to be considered. Below two evaluation examples are specified, a one dimensional case possible to check analytically and a two-dimensional case where the way of considering the configuration factors will influence the results.

1-D case

A rectangle, 110 mm by 20 mm with 5 mm thick walls, of a material with thermal properties: $\kappa = 1.0 \text{ W/m K}$, $c = 1000 \text{ J/kgK}$ and $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Two sides are perfectly insulated (adiabatic boundaries) and the lower long side have a temperature of $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ and the upper surface is kept at $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Initial temperature $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

In this case heat is transferred by conduction through the lower and upper wall and by radiation in the void. The influence of heat conducted through short sides can be neglected.

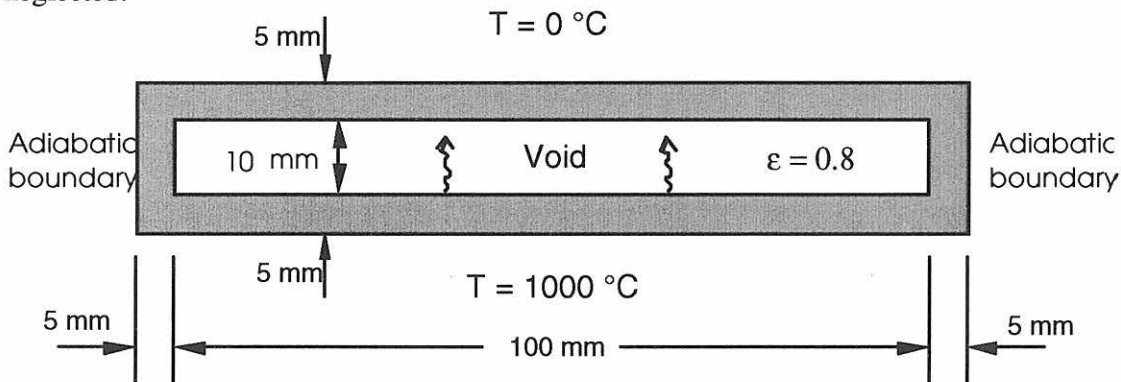


Figure 3 Structure containing a void. Heat is transferred across the void by radiation only. Inside surface emissivity equal 0.8 and long side external surface temperature equal $0 \text{ }^\circ\text{C}$ and $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively.

Schematic element configurations of the void boundaries to be used in the calculations is outlined in figure 4. The black points indicates the surface nodes. Configuration factors (view factors) shall be calculated between these nodes for the calculation of the radiative heat exchange between the void surface nodes.

Tabulate the temperature along the inside of the void and compare with the analytical solution.

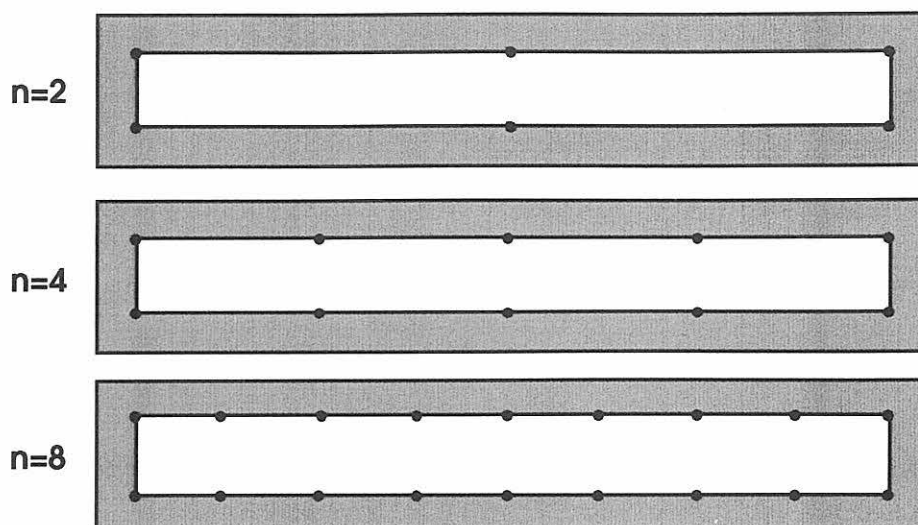


Figure 4 Structure with void. The boundaries of the void are each divided into 2, 4 and 8 side elements, respectively.

2-D case

The same as the 1-D case but with the long side as being adiabatic boundaries and the short sides as the upper and lower boundaries of the 1-D case. Due to the assumed low thermal conductivity in the material, the thermal energy is transferred from the warm to the cool boundary by radiation q_{rad} between the long sides of the structure as indicated in figure 5. Heat transfer by conduction through the long sides of the structure can be neglected.

Plot and tabulate the surface temperature history of the inner long side centre and corner points for one hour.

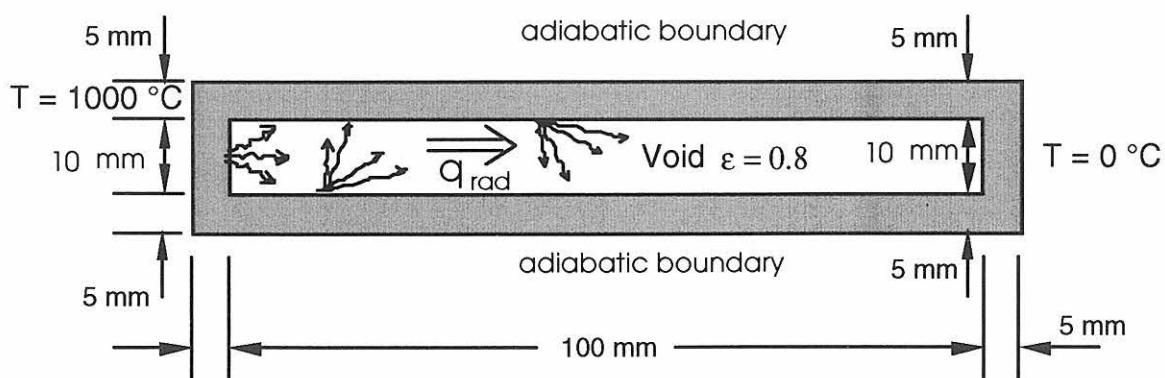


Figure 5 Structure containing a void - 2 - D case. The thermal energy is mainly transferred by radiation q_{rad} between the long sides as indicated by the arrows from the boundaries of the void.

Acknowledgement

The calculations have been carried out by E. Hadziselimovic, a researcher from Sarajevo, Bosnia, visiting SP.

References

- [1] Sterner, E. and Wickström, U., TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire, SP Report 1990:05, Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1990.

Appendix- Evaluating the code TASEF

TASEF [1] calculations are conducted for all levels as prescribed above and the results are presented in tables and diagrams.

TASEF is a finite element program but uses forward difference method in the time domain. Therefore it converges only if the time increment Δt is less than a critical value t_{cr} . The value of the critical time increment depends on element size, material properties, and boundary conditions. At each time step the length of the critical time increment is computed (see the TASEF manual [1] Appendix B, page 26), and a new time increment is obtained by multiplying the critical time increment by a time increment factor (or shorter time factor) specified by the user, usually in the range 0.75 - 1. Shorter time increment factors are used here to reach more accurate results.

LEVEL 1 - Comparison against analytic results, constant material properties

A square section initially at 0°C , is subjected to ambient gas temperature $T = 1000^\circ\text{C}$ (figure 1).

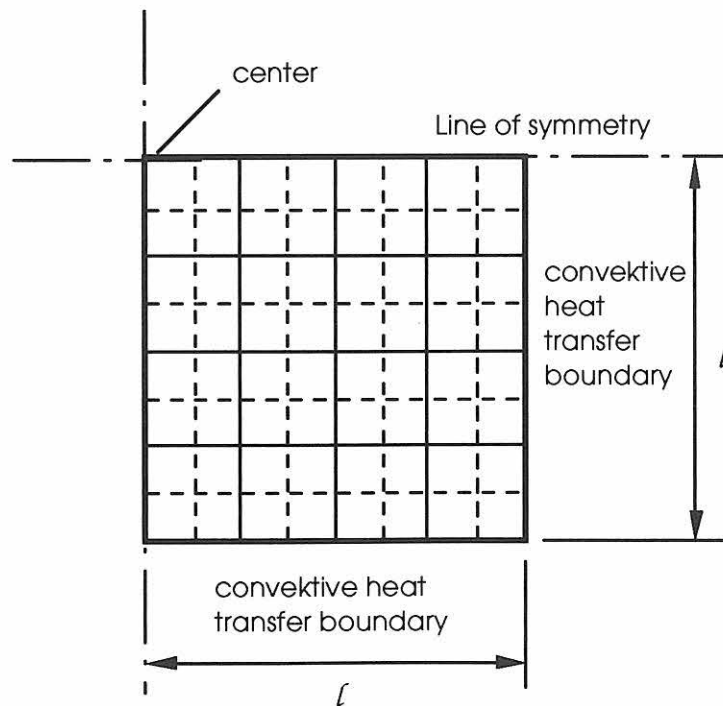


Figure 1 Quarter of square. The results of TASEF calculations for $n = 4, 16, 64, 128$ numbers of elements in the mesh are presented in table 1 together with the exact solutions.

Table 1 Constant material properties: Comparison between TASEF calculations and exact solutions.

dimensionless time Fo	n=4 time factor 0.01	n=16 time factor 0.1	n=64 time factor 0.1	n=128 time factor 0.1	analytical solutions
	T_{cen}	T_{cen}	T_{cen}	T_{cen}	
0.1	978	984	986	986	986.4
0.2	903	904	904	904	903.8
0.4	703	694	691	691	690.2
0.6	528	518	516	515	514.7
0.8	393	386	384	384	382.7
1	293	287	285	285	284.5

LEVEL 2 - Simple non - linear boundary problem Concrete structure with constant material properties

A square of concrete like material with constant properties used in the calculations is shown in figure 2.

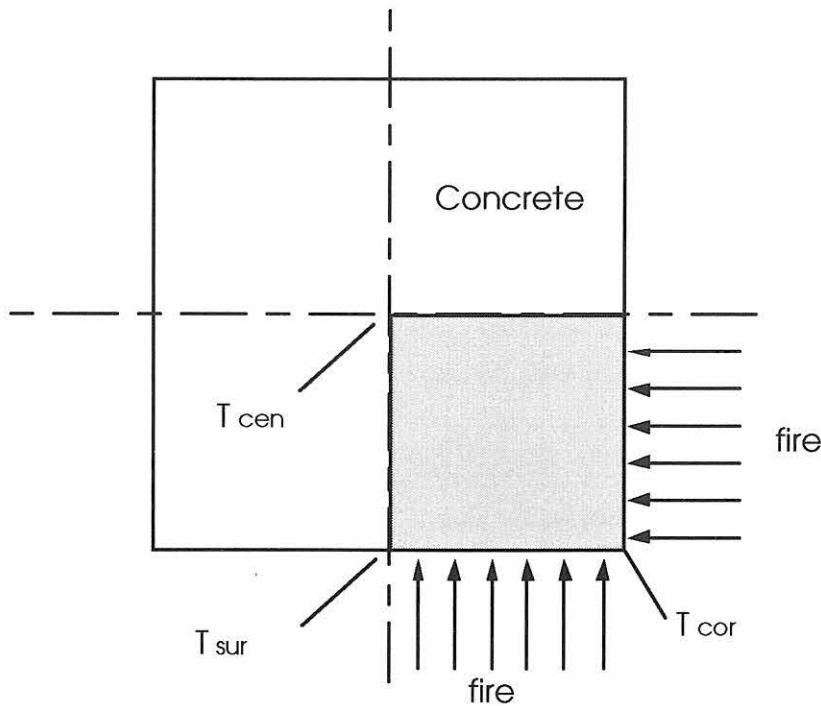


Figure 2 A concrete square exposed to the fire.

The meshes for calculations were the same as in the previous example and consisted of 4, 16, 64 and 128 elements.

In these calculations the time factors were reduced until the results converge to a definite value. In this case the accepted accuracy was achieved when the difference in the temperatures, obtained with different values of the time factor, is less than or equal to 2 °C.

As an example, in the table 2 are shown the results of the calculations for the mesh with $n = 16$ elements after 3 hours of exposure to the ISO834 fire. T_{cen} , T_{sur} and T_{cor} are center, surface and corner temperatures, respectively.

Table 2 Influence of the number of time increments on the nodes temperature.

number of elements, $n = 16$					
time increments (s)	T_{cen} °C	T_{sur} °C	T_{cor} °C	number of time increments	time factor
61	752	1078	1090	177	0.8
38	750	1078	1089	283	0.5
23	749	1077	1089	469	0.3
8	747	1077	1089	1403	0.1
1	746	1077	1089	13985	0.01
0.1	746	1077	1089	138046	0.001

The influence of the number of time increments on the nodes temperature can be seen from the graph in figure 3.

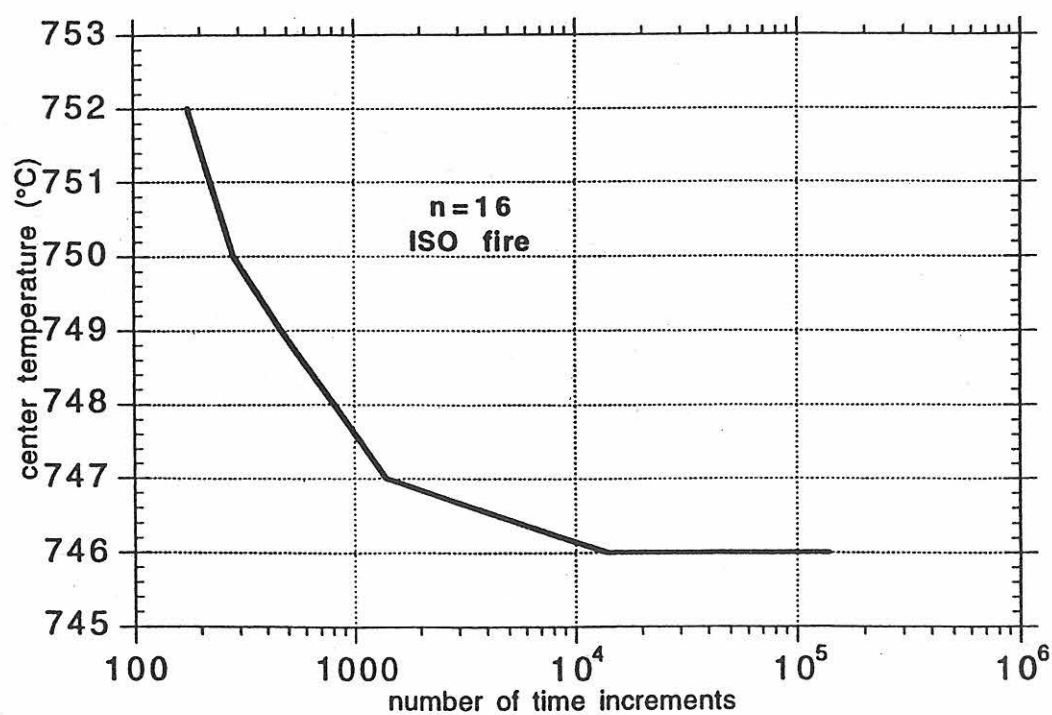


Figure 3 Center temperature as a function of the number of time increments after 3 hours of exposure to the ISO fire.

In the following tables (table 3a, 3b) the results of TASEF calculations are shown for various mesh elements for two types of fire exposure; constant fire temperature $T_f = 1000^\circ\text{C}$ and ISO834 fire .

Table 3a Constant material properties. Constant fire gas temperature equal to 1000°C .

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T_{sur}	959	970	979	985	989	992	0.1
16		947	966	977	984	989	992	0.2
64		944	965	977	984	989	992	0.4
128		944	965	977	984	989	992	0.7
4	T_{cor}	996	997	998	999	999	999	0.1
16		996	998	999	999	1000	1000	0.2
64		997	999	999	999	1000	1000	0.4
128		997	999	999	999	1000	1000	0.7
4	T_{cen}	74	247	420	563	675	759	0.1
16		44	228	428	588	705	790	0.2
64		33	224	434	597	715	799	0.4
128		32	224	435	599	716	800	0.7

Table 3b Constant material properties. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T_{sur}	725	879	955	1007	1045	1078	0.1
16		725	874	953	1006	1046	1077	0.1
64		722	873	952	1006	1045	1077	0.1
128		723	873	952	1006	1046	1077	0.4
4	T_{cor}	827	921	983	1027	1061	1089	0.1
16		811	921	984	1028	1062	1089	0.1
64		810	921	984	1028	1062	1089	0.1
128		811	922	984	1028	1062	1089	0.4
4	T_{cen}	30	156	317	473	608	720	0.1
16		15	135	313	485	630	747	0.1
64		11	129	314	490	637	755	0.1
128		10	128	315	492	639	756	0.4

The corner and surface temperature does not change significantly with number of time increments. The time intervals in these calculations were less than 8 and 13 seconds for the ISO fire and the $T_f = 1000^\circ\text{C}$ fire, respectively.

LEVEL 3 - Simple non - linear boundary and material properties

Concrete with varying heat conductivity

In this case the material's heat conductivity varies with temperature. Everything else is as in LEVEL 2. The results are presented in the tables 4a and 4b.

Table 4a Heat conductivity varies with temperature. Constant Fire gas temperature equal 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	973	977	982	985	988	990	0.1
16		961	973	980	984	987	990	0.1
64		957	971	979	984	987	990	0.1
128		957	971	979	984	987	990	0.1
4	T _{cor}	999	998	999	999	999	999	0.1
16		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
64		998	999	1000	1000	1000	1000	0.1
128		999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	55	147	250	350	442	522	0.1
16		41	137	243	356	459	547	0.1
64		36	134	242	361	467	557	0.1
128		35	134	243	362	468	558	0.1

Table 4b Heat conductivity varies with temperature. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	745	891	961	1011	1048	1078	0.1
16		748	886	959	1009	1047	1077	0.1
64		745	884	958	1009	1047	1077	0.1
128		744	884	958	1009	1047	1077	0.1
4	T _{cor}	836	924	985	1028	1062	1089	0.1
16		816	923	985	1028	1062	1089	0.1
64		815	923	985	1028	1062	1089	0.1
128		815	923	985	1028	1062	1089	0.1
4	T _{cen}	28	108	199	298	395	485	0.1
16		21	101	190	296	403	502	0.1
64		19	99	189	299	409	509	0.1
128		18	99	189	299	409	510	0.1

LEVEL 4 - Latent heat due to water content – a concrete block with moisture

A block of concrete like material with 5 % content of water is exposed to fire. The disposition of the block is the same as in the previous cases.

The results of the calculations showing the center, corner and surface temperatures are shown in the tables 5a and 5b.

Table 5a Concrete with 5 % content of water. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	975	972	977	981	984	987	0.1
16		953	967	974	979	983	986	0.1
64		948	965	973	978	982	985	0.1
128		948	965	973	978	982	985	0.1
4	T _{cor}	1004	998	998	999	999	999	0.1
16		997	999	999	999	1000	1000	0.1
64		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
128		998	999	999	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	35	92	112	185	284	371	0.1
16		22	79	104	175	295	392	0.1
64		18	75	102	184	301	401	0.1
128		17	74	101	186	303	403	0.1

Table 5b Concrete with 5 % content of water. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	703	884	955	1005	1043	1074	0.1
16		732	877	952	1003	1042	1073	0.1
64		728	875	951	1003	1042	1073	0.1
128		728	875	951	1003	1042	1073	0.1
4	T _{cor}	850	924	984	1027	1061	1089	0.1
16		816	922	984	1028	1062	1089	0.1
64		813	923	985	1028	1062	1089	0.1
128		813	923	985	1028	1062	1089	0.1
4	T _{cen}	17	66	105	127	231	327	0.1
16		11	60	100	115	231	340	0.1
64		9	56	98	111	239	348	0.1
128		8	56	98	110	241	350	0.1

LEVEL 5 - Composites, steel and concrete

A concrete core inside a 10 mm thick steel square tube (figure 4). The meshes in these cases consist of a number of steel elements but in the concrete area there are again 4, 16, 64 and 128 elements, respectively.

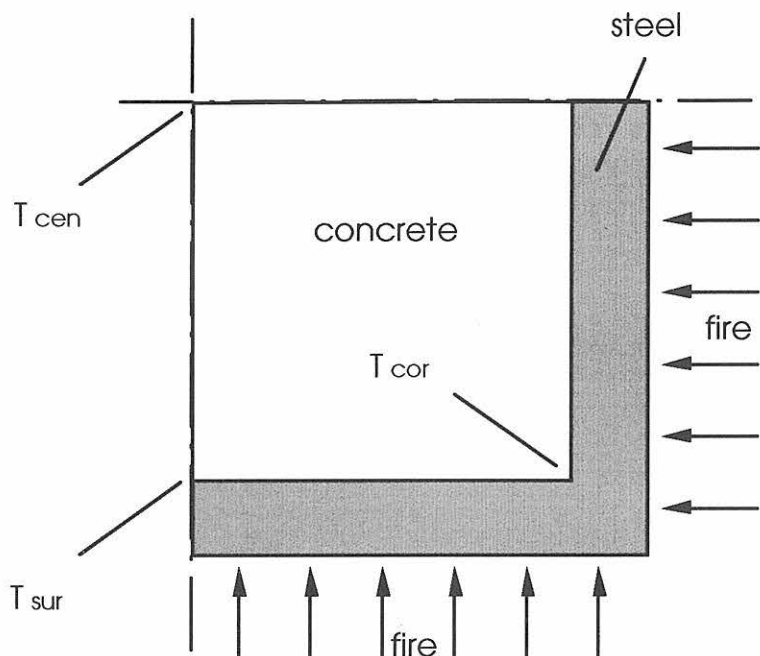


Figure 4 A concrete core in the square steel tube.

The results for this case are presented in the tables 6a and 6b.

Table 6a Concrete core inside a 10 mm steel square tube. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	953	976	981	984	987	989	0.1
16		950	969	976	981	985	987	0.1
64		944	966	975	981	984	987	0.1
128		944	966	975	980	984	987	0.1
4	T _{cor}	986	993	995	995	996	997	0.1
16		980	989	992	994	995	996	0.1
64		975	988	992	994	995	996	0.1
128		975	987	991	994	995	996	0.1
4	T _{cen}	32	88	111	179	280	369	0.1
16		19	75	103	163	286	387	0.1
64		14	70	101	172	293	395	0.1
128		14	69	101	174	295	397	0.1

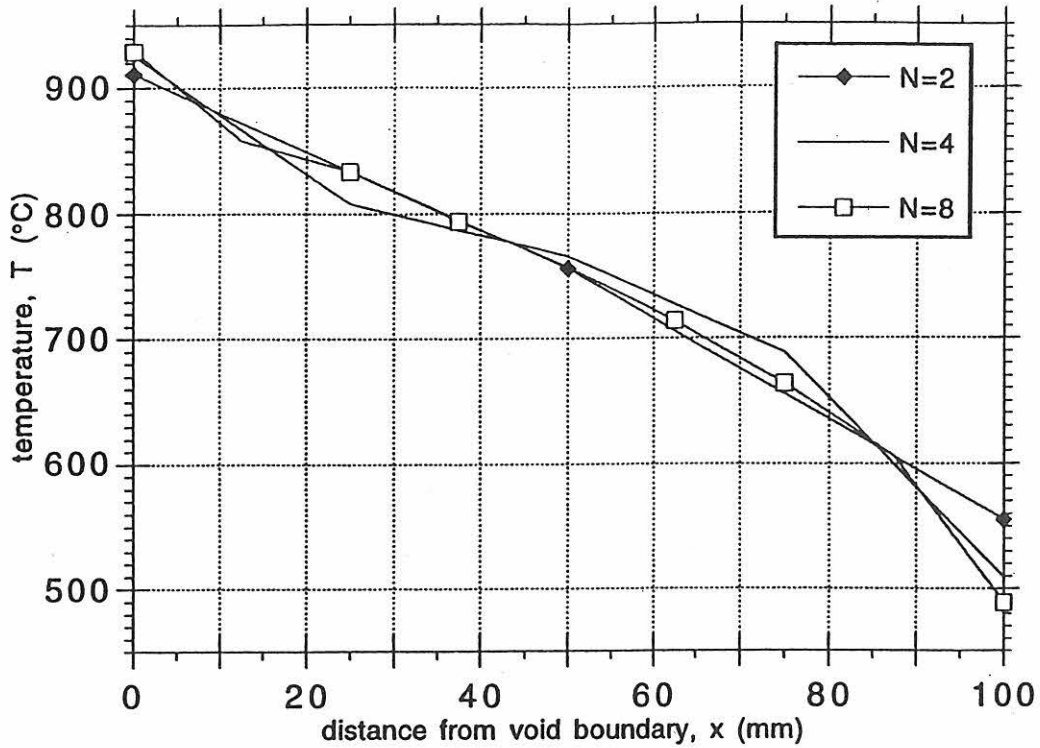


Figure 6a Temperature of the center points (left and right surface) as function of time.

The temperatures along the longer inner surface for various number of side elements after one hour are shown in table 10 and in figure 6b.

Table 10 Temperature along inner surface for various numbers of side elements at various locations x (distance from void boundary).

x (mm)	0	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
N=2	911				756				555
N=4	925		808		766		689		509
N=8	929	858	833	794	757	714	664	606	489

Table 6b Concrete core inside a 10 mm steel square tube. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)						time factor
		30	60	90	120	150	180	
4	T_{sur}	581	865	954	1004	1043	1074	0.1
16		640	862	950	1002	1041	1073	0.1
64		644	860	948	1001	1041	1072	0.1
128		645	860	948	1001	1041	1072	0.1
4	T_{cor}	646	973	999	1020	1056	1084	0.1
16		724	921	992	1040	1076	1084	0.1
64		688	890	969	1018	1054	1083	0.1
128		688	890	969	1018	1054	1083	0.1
4	T_{cen}	14	61	103	119	219	318	0.1
16		9	53	96	111	215	328	0.1
64		6	49	94	106	222	335	0.1
128		6	48	93	106	224	336	0.1

LEVEL 6 - Thin steel covering mineral wool

A mineral wool core inside a 0.5 mm thick steel square steel tube (figure 5). The same element meshes as used in level 5.

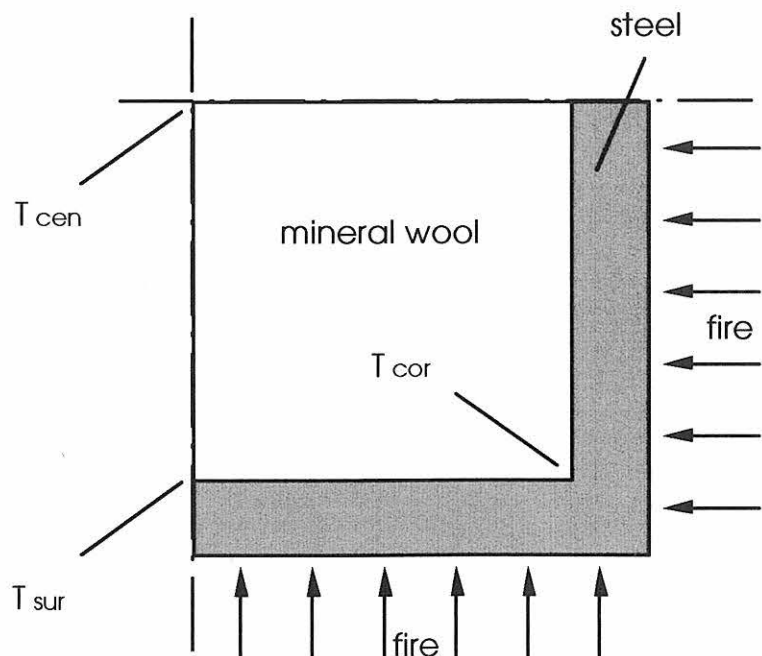


Figure 5 A mineral wool core in the square steel tube.

The results are shown in the Tables 7a and 7b.

Table 7a Mineral wool core in a square steel tube. Constant fire temperature equal to 1000 °C.

Number of elements n		time (min)							time factor
		15	30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
16		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
64		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
128		998	999	999	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cor}	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
16		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
64		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
128		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0.1
4	T _{cen}	135	354	682	850	930	967	985	0.1
16		91	343	712	877	948	978	990	0.1
64		75	341	720	883	952	980	992	0.1
128		74	343	722	885	952	980	992	0.1

Table 7b Mineral wool core in a square steel tube. Fire gas temperature according to ISO 834.

Number of elements n		time (min)							time factor
		15	30	60	90	120	150	180	
4	T _{sur}	711	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
16		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
64		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
128		710	818	924	985	1029	1062	1090	0.1
4	T _{cor}	714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
16		714	820	925	985	1029	1062	1090	0.1
64		714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
128		714	820	925	986	1029	1062	1090	0.1
4	T _{cen}	64	222	533	743	875	959	1016	0.1
16		38	204	550	766	894	973	1025	0.1
64		28	199	555	772	898	976	1027	0.1
128		27	199	556	773	899	976	1027	0.1

LEVEL 7 - Special features

A Heat transfer in voids

1 - D case

In table 8 the temperatures, after the thermal equilibrium is reached, of the inside surfaces (upper and lower) are given. The results of the TASEF calculations can in this case be compared with the analytical solution.

Table 8 Comparison between TASEF calculated void surface temperature with various numbers of nodes and the exact solution for a 1-D problem.

	number of side elements, N in the void	Lower surface (in the void)	Upper surface (in the void)
TASEF calculation	2	789	198
	4	774	229
	8	779	220
Analytical solution		779.4	220.6

2 - D case

The meshes are the same as in the previous case. The left external side is kept at 1000 °C. The results of the TASEF calculations are shown in table 9 and figure 6a.

Table 9 Radiative heat transfer: 2 - D case. The temperatures of the nodes of the left and right inside surfaces.

	N = 2				N = 4				N = 8			
	left nodes		right nodes		left nodes		right nodes		left nodes		right nodes	
Time min	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}	T _{cor}	T _{cen}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	872	835	302	261	868	850	147	154	872	859	114	123
20	892	859	460	443	899	882	363	367	902	889	317	321
30	903	880	518	512	915	900	465	470	918	906	433	436
40	908	891	542	542	922	908	497	503	926	914	473	476
50	910	896	551	554	924	910	506	513	928	917	485	488
60	911	897	555	558	925	911	509	516	1000			

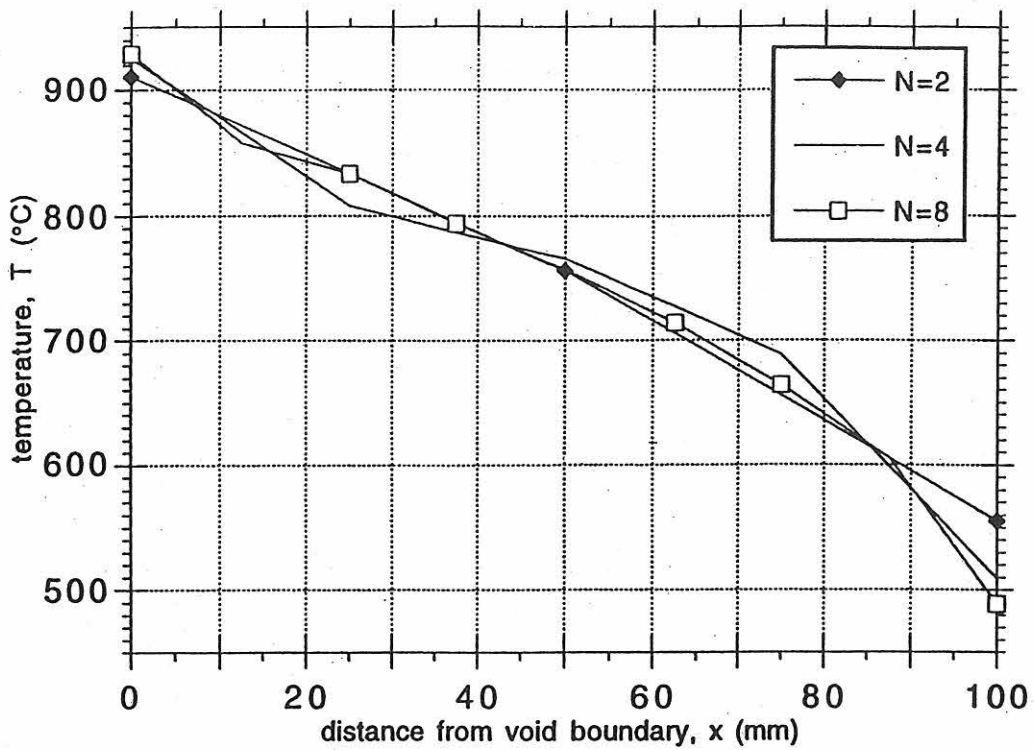


Figure 6b The temperature distribution along the inner longer surface after one hour.

References

1. E. Sterner, U. Wickström, TASEF - Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire- User 's Manual, Borås, SP Report 1990:05.

**

Anhang 3:

Berechnung der Referenzbeispiele 4 und 5 nach Anhang 2

Gegenüber der ersten Fassung der Referenzbeispiele (Wickström, März 1997, vgl. Anhang 1 dieser Arbeit) sind in der zweiten Version (Wickström, Oktober 1997, vgl. Anhang 2 dieser Arbeit) bei den Eingabewerten für die Referenzbeispiele 4 und 5 Änderungen vorgenommen worden.

Beim **Referenzbeispiel 4** ist entgegen der ursprünglichen Version die spezifische Wärmekapazität des Betons nun wie folgt vorzugeben:

für $0 < \vartheta < 100 \text{ °C}$	$c = 1208 \text{ J/(kgK)}$
für $100 \leq \vartheta \leq 120 \text{ °C}$	$c = 1208 \text{ J/(kgK)}$
für $120 < \vartheta < 1100 \text{ °C}$	$c = 1222 \text{ J/(kgK)}$

Die übrigen Baustoffkennlinien, Rand- und Anfangsbedingungen sind unverändert geblieben.

Wertet man die mit diesen Werten von TASEF-2D und INST2D im Zentrum des Körpers berechneten Temperaturen (vgl. Tab. 9.1 und Tab. 9.2) aus, so erkennt man, daß nun kaum noch Abweichungen auftreten. Um die Übersichtlichkeit nicht zu beeinträchtigen, sind die Temperatur-Zeit-Verläufe der Beispiele 4a und 4b separat in den Diagr. 9.1 und 9.2 dargestellt. Zur genaueren Spezifizierung des Beginns und des Endes der Phasenumwandlung wurde beim Referenzbeispiel 4b die Zeitschrittweite auf 5 min verkürzt. Die Abweichungen zwischen den mit TASEF-2D und INST2D errechneten Temperaturen (vgl. Tab. 9.3 bis 9.6 und Diagr. 9.3 bis 9.6) sind nur noch minimal. Das ist umso bemerkenswerter als beide Programme unterschiedliche Verfahren zur Berücksichtigung der Phasenumwandlung benutzen.

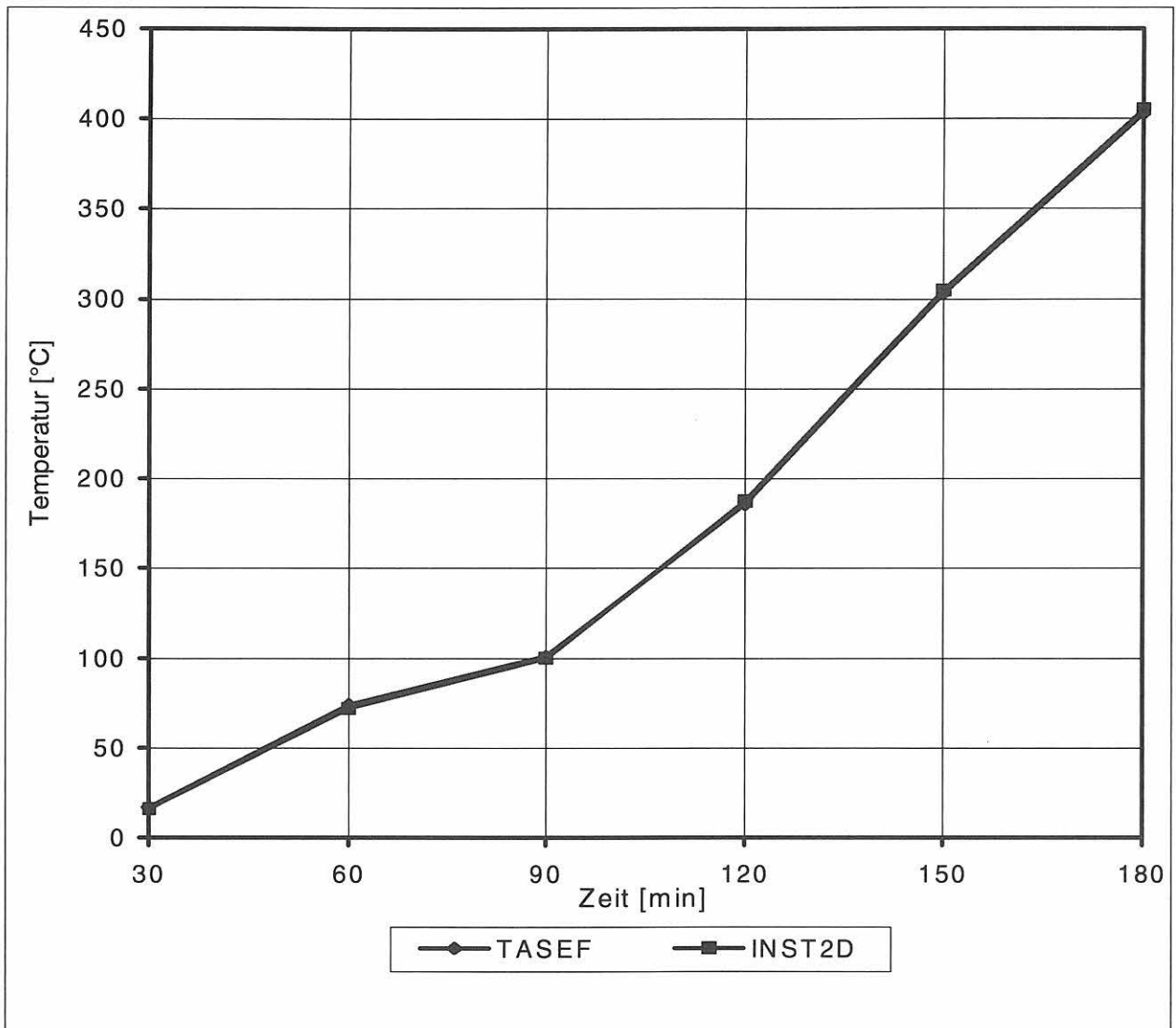
Tab. 9.1 Ergebnisse für Beispiel 4a - Anhang 2 (1000°C)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	975,0	961,6	972,0	975,0	977,0	979,2
n = 16	T _{sur} / 1	953,0	954,9	967,0	966,8	974,0	974,3
n = 64	T _{sur} / 1	948,0	948,7	965,0	964,8	973,0	973,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	948,0	947,1	965,0	964,2	973,0	972,6
n = 4	T _{cor} / 3	1004,0	999,2	998,0	999,5	998,0	999,6
n = 16	T _{cor} / 5	997,0	998,5	999,0	999,2	999,0	999,4
n = 64	T _{cor} / 9	998,0	998,1	999,0	999,0	999,0	999,4
n = 128/256	T _{cor} / 17	998,0	998,0	999,0	999,0	999,0	999,4
n = 4	T _{cen} / 7	35,0	51,0	92,0	100,0	112,0	151,3
n = 16	T _{cen} / 21	22,0	26,4	79,0	84,8	104,0	100,0
n = 64	T _{cen} / 73	18,0	18,9	75,0	75,1	102,0	99,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	17,0	16,3	74,0	71,9	101,0	99,7
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	981,0	982,7	984,0	985,6	987,0	987,9
n = 16	T _{sur} / 1	979,0	979,2	983,0	983,0	986,0	985,9
n = 64	T _{sur} / 1	978,0	978,3	982,0	982,3	985,0	985,4
n = 128/256	T _{sur} / 1	978,0	978,1	982,0	982,1	985,0	985,2
n = 4	T _{cor} / 3	999,0	999,7	999,0	999,7	999,0	999,8
n = 16	T _{cor} / 5	999,0	999,6	1000,0	999,6	1000,0	999,7
n = 64	T _{cor} / 9	1000,0	999,5	1000,0	999,6	1000,0	999,7
n = 128/256	T _{cor} / 17	1000,0	999,5	1000,0	999,6	1000,0	999,7
n = 4	T _{cen} / 7	185,0	262,9	284,0	361,5	371,0	447,6
n = 16	T _{cen} / 21	175,0	208,1	295,0	320,2	392,0	416,2
n = 64	T _{cen} / 73	184,0	190,9	301,0	307,4	401,0	407,0
n = 128/256	T _{cen} / 273	186,0	187,4	303,0	304,8	403,0	405,1

Tab. 9.2 Ergebnisse für Beispiel 4b – Anhang 2 (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	703,0	661,4	884,0	878,7	955,0	955,9
n = 16	T _{sur} / 1	732,0	721,8	877,0	876,6	952,0	952,2
n = 64	T _{sur} / 1	728,0	724,2	875,0	874,7	951,0	951,1
n = 128/256	T _{sur} / 1	728,0	724,8	875,0	874,2	951,0	950,8
n = 4	T _{cor} / 3	850,0	797,7	924,0	919,2	984,0	982,6
n = 16	T _{cor} / 5	816,0	809,2	922,0	921,2	984,0	983,7
n = 64	T _{cor} / 9	813,0	811,4	923,0	922,0	985,0	984,2
n = 128/256	T _{cor} / 17	813,0	812,3	923,0	922,4	985,0	984,5
n = 4	T _{cen} / 7	17,0	22,6	66,0	77,1	105,0	100,0
n = 16	T _{cen} / 21	11,0	12,3	60,0	63,9	100,0	98,5
n = 64	T _{cen} / 73	9,0	9,0	56,0	56,3	98,0	95,3
n = 128/256	T _{cen} / 273	8,0	8,1	56,0	54,0	98,0	93,8
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	1005,0	1006,0	1043,0	1044,1	1074,0	1074,8
n = 16	T _{sur} / 1	1003,0	1003,4	1042,0	1042,2	1073,0	1073,3
n = 64	T _{sur} / 1	1003,0	1002,7	1042,0	1041,7	1073,0	1072,9
n = 128/256	T _{sur} / 1	1003,0	1002,6	1042,0	1041,6	1073,0	1072,7
n = 4	T _{cor} / 3	1027,0	1026,7	1061,0	1060,7	1089,0	1088,4
n = 16	T _{cor} / 5	1028,0	1027,5	1062,0	1061,3	1089,0	1088,9
n = 64	T _{cor} / 9	1028,0	1027,9	1062,0	1061,6	1089,0	1089,1
n = 128/256	T _{cor} / 17	1028,0	1028,1	1062,0	1061,8	1089,0	1089,2
n = 4	T _{cen} / 7	127,0	192,6	231,0	299,2	327,0	396,5
n = 16	T _{cen} / 21	115,0	128,2	231,0	255,6	340,0	361,6
n = 64	T _{cen} / 73	111,0	100,0	239,0	243,1	348,0	351,9
n = 128/256	T _{cen} / 273	110,0	100,0	241,0	241,0	350,0	350,4

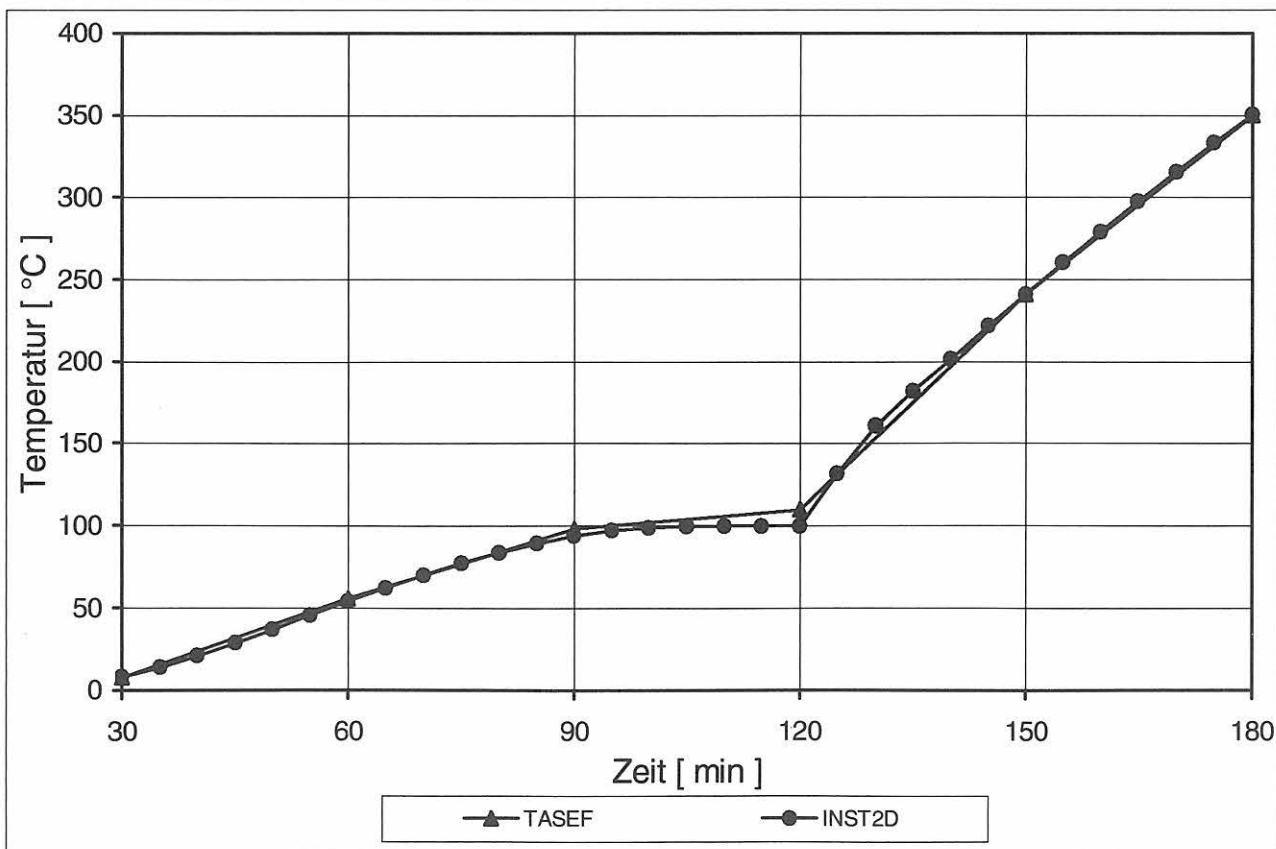
TASEF und INST2D	Zeit [min]					
TASEF (1000°C)	30	60	90	120	150	180
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	17,0	74,0	101,0	186,0	303,0	403,0
INST2D (1000°C)						
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	16,3	71,9	99,7	187,4	304,8	405,1



Diagr. 9.1: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für Beispiel 4a entsprechend **Anhang 2**

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei n = 128	30	60	90	120	150	180
TASEF (ISO 834)	8,0	56,0	98,0	110,0	241,0	350,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei n = 256 INST2D (ISO 834)	5	10	15	20	25	30
	0	0,0	0,2	1,3	3,9	8,1
	35	40	45	50	55	60
	13,9	20,9	28,7	37,0	45,5	54,0
	65	70	75	80	85	90
	62,3	70,1	77,4	83,9	89,4	93,8
	95	100	105	110	115	120
	97,0	98,9	99,8	100,0	100,0	100,0
	125	130	135	140	145	150
	131,5	160,9	182,0	201,5	221,4	241,0
	155	160	165	170	175	180
	260,2	279,0	297,4	315,4	333,1	350,4

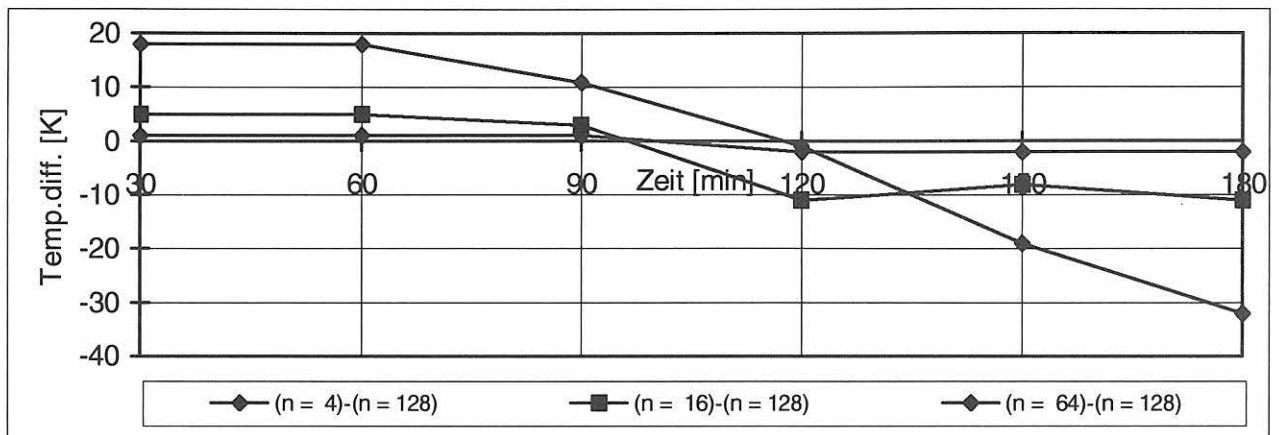


Diagr. 9.2: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für Beispiel 4b entsprechend **Anhang 2**

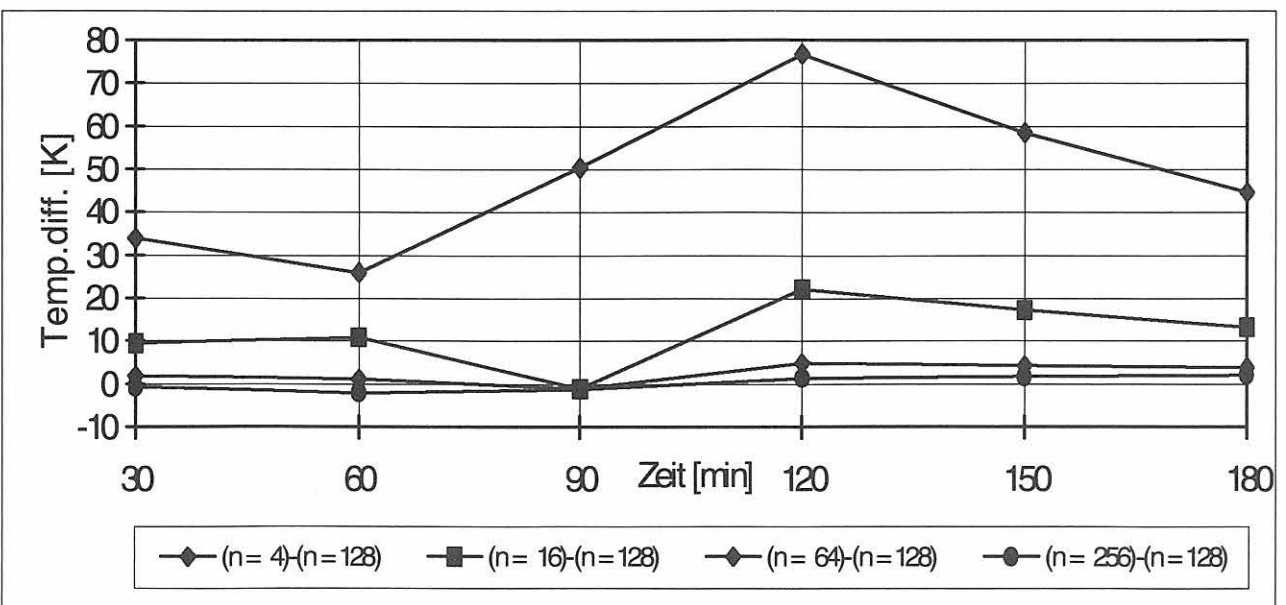
Tab. 9.3; 9,4/ Diagr. 9.3; 9,4

Beispiel 4a – Anhang 2 (1000°C)**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	18,0	18,0	11,0	-1,0	-19,0	-32,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,0	5,0	3,0	-11,0	-8,0	-11,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	1,0	1,0	-2,0	-2,0	-2,0

**Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

INST2D -TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	34,0	26,0	50,3	76,9	58,5	44,6
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	9,4	10,8	-1,0	22,1	17,2	13,2
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,9	1,1	-1,1	4,9	4,4	4,0
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-0,7	-2,1	-1,3	1,4	1,8	2,1

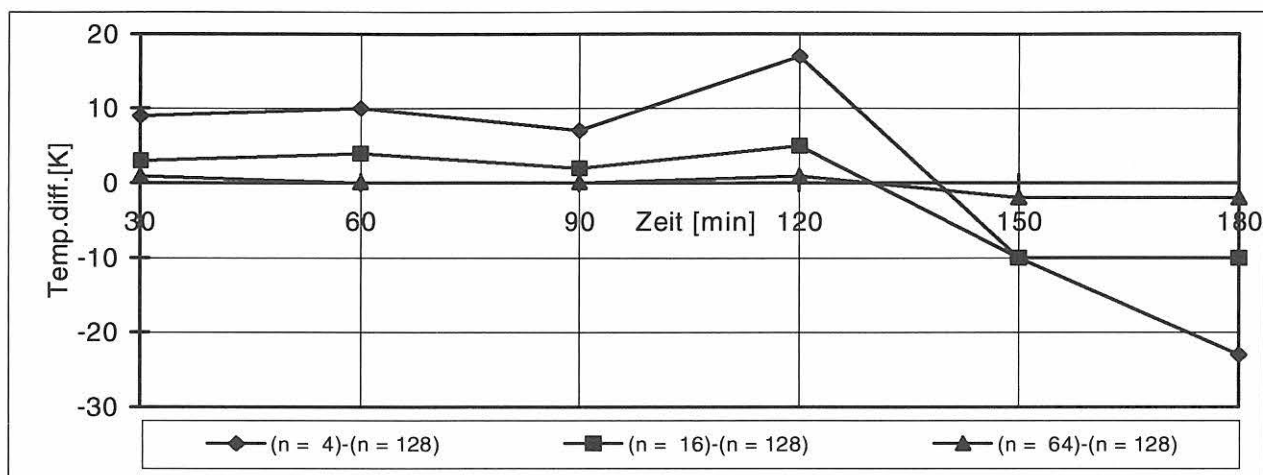


Tab. 9.5; 9.6 /Diagr. 9,5; 9,6

Beispiel 4b – Anhang 2 (ISO 834)

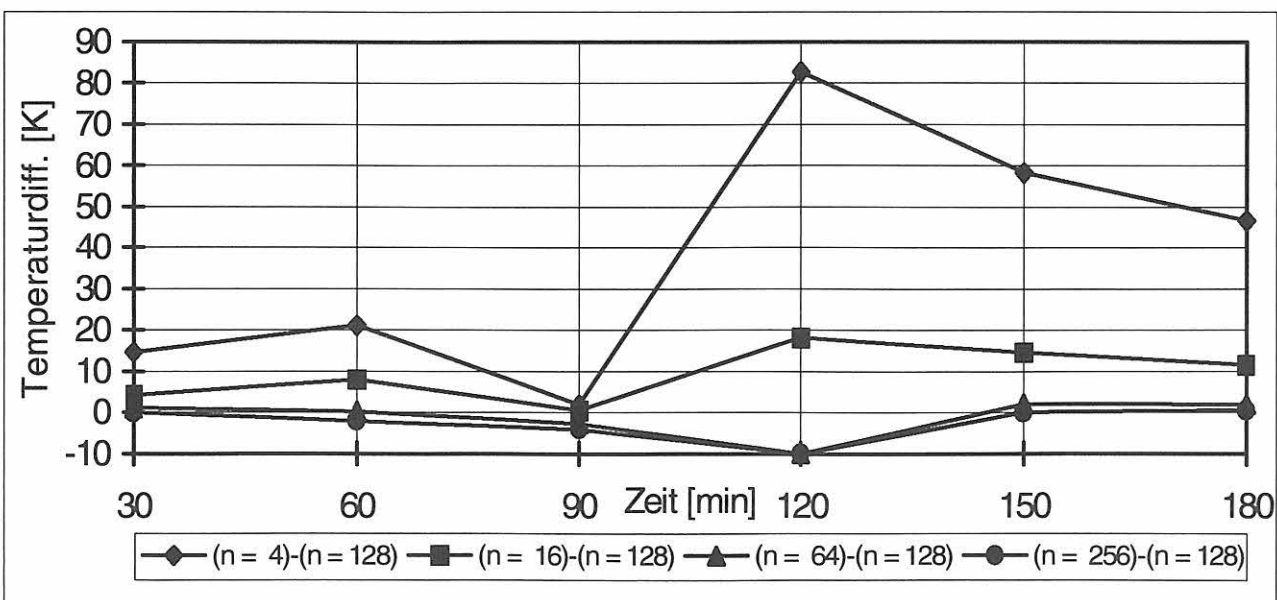
Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	9,0	10,0	7,0	17,0	-10,0	-23,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,0	4,0	2,0	5,0	-10,0	-10,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,0	0,0	1,0	-2,0	-2,0



Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	14,6	21,1	2,0	82,6	58,2	46,5
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	4,3	7,9	0,5	18,2	14,6	11,6
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,0	0,3	-2,7	-10,0	2,1	1,9
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	0,1	-2,0	-4,2	-10,0	0,0	0,4



Beim **Referenzbeispiel 5** ist entgegen der ursprünglichen Version (vgl. Anhang 1) und auch abweichend von den in der zweiten Version (Wickström, Oktober 1997, vgl. Anhang 2) für Referenzbeispiel 4 vorgeschriebenen Werten die spezifische Wärmekapazität des Betons wie folgt vorzugeben:

für $0 < \vartheta < 100 \text{ °C}$	$c = 1208 \text{ J/(kgK)}$
für $100 \leq \vartheta \leq 120 \text{ °C}$	$c = 1208 \text{ J/(kgK)}$
für $120 < \vartheta < 1100 \text{ °C}$	$c = 1211 \text{ J/(kgK)}$

Die übrigen Baustoffkennlinien, Rand- und Anfangsbedingungen sind unverändert geblieben.

In Tab. 10.3 und 10.4 sind die mit TASEF-2D und INST2D berechneten Temperaturen zusammengestellt. In Diagr. 10.3 sind die einzelnen Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils feinsten Elementierung dargestellt. Aus Tab. 10.5 bis 10.8 sowie aus Diagr. 10.4 bis 10.7 sind die Abweichungen zwischen den mit TASEF-2D und den mit INST2D im Zentrum des Körpers errechneten Temperaturen ersichtlich. Auch hier treten ebenso wie bereits beim Referenzbeispiel 4 nur noch geringe Temperaturdifferenzen auf, obwohl die beiden Programme unterschiedliche Verfahren zur Berücksichtigung der Phasenumwandlung benutzen.

Tab. 10.3 Ergebnisse für Beispiel 5a – Anhang 2 (1000°C)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	953,0	942,6	976,0	976,5	981,0	981,0
n = 16	T _{sur} / 1	950,0	950,1	969,0	968,5	976,0	976,4
n = 64	T _{sur} / 1	944,0	943,8	966,0	966,3	975,0	975,1
n = 128/256	T _{sur} / 1	944,0	941,9	966,0	965,6	975,0	974,8
n = 4	T _{cor} / 4	986,0	982,4	993,0	993,7	995,0	995,7
n = 16	T _{cor} / 7	980,0	981,6	989,0	990,3	992,0	993,2
n = 64	T _{cor} / 11	975,0	977,4	988,0	988,7	992,0	992,3
n = 128/256	T _{cor} / 19	975,0	976,1	987,0	988,3	991,0	992,1
n = 4	T _{cen} / 13	32,0	46,5	88,0	100,0	111,0	142,5
n = 16	T _{cen} / 43	19,0	21,8	75,0	78,6	103,0	100,0
n = 64	T _{cen} / 111	14,0	15,1	70,0	69,4	101,0	99,5
n = 128/256	T _{cen} / 343	14,0	12,9	69,0	66,4	101,0	99,1
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	984,0	984,4	987,0	987,0	989,0	989,2
n = 16	T _{sur} / 1	981,0	981,3	985,0	984,8	987,0	987,5
n = 64	T _{sur} / 1	981,0	980,5	984,0	984,2	987,0	987,0
n = 128/256	T _{sur} / 1	980,0	980,3	984,0	984,0	987,0	986,9
n = 4	T _{cor} / 4	995,0	996,5	996,0	997,2	997,0	997,6
n = 16	T _{cor} / 7	994,0	994,8	995,0	995,8	996,0	996,6
n = 64	T _{cor} / 11	994,0	994,2	995,0	995,4	996,0	996,2
n = 128/256	T _{cor} / 19	994,0	994,0	995,0	995,3	996,0	996,2
n = 4	T _{cen} / 13	179,0	254,4	280,0	354,3	369,0	441,8
n = 16	T _{cen} / 43	163,0	195,7	286,0	310,6	387,0	408,8
n = 64	T _{cen} / 111	172,0	177,6	293,0	296,8	395,0	398,7
n = 128/256	T _{cen} / 343	174,0	173,7	295,0	293,9	397,0	396,6

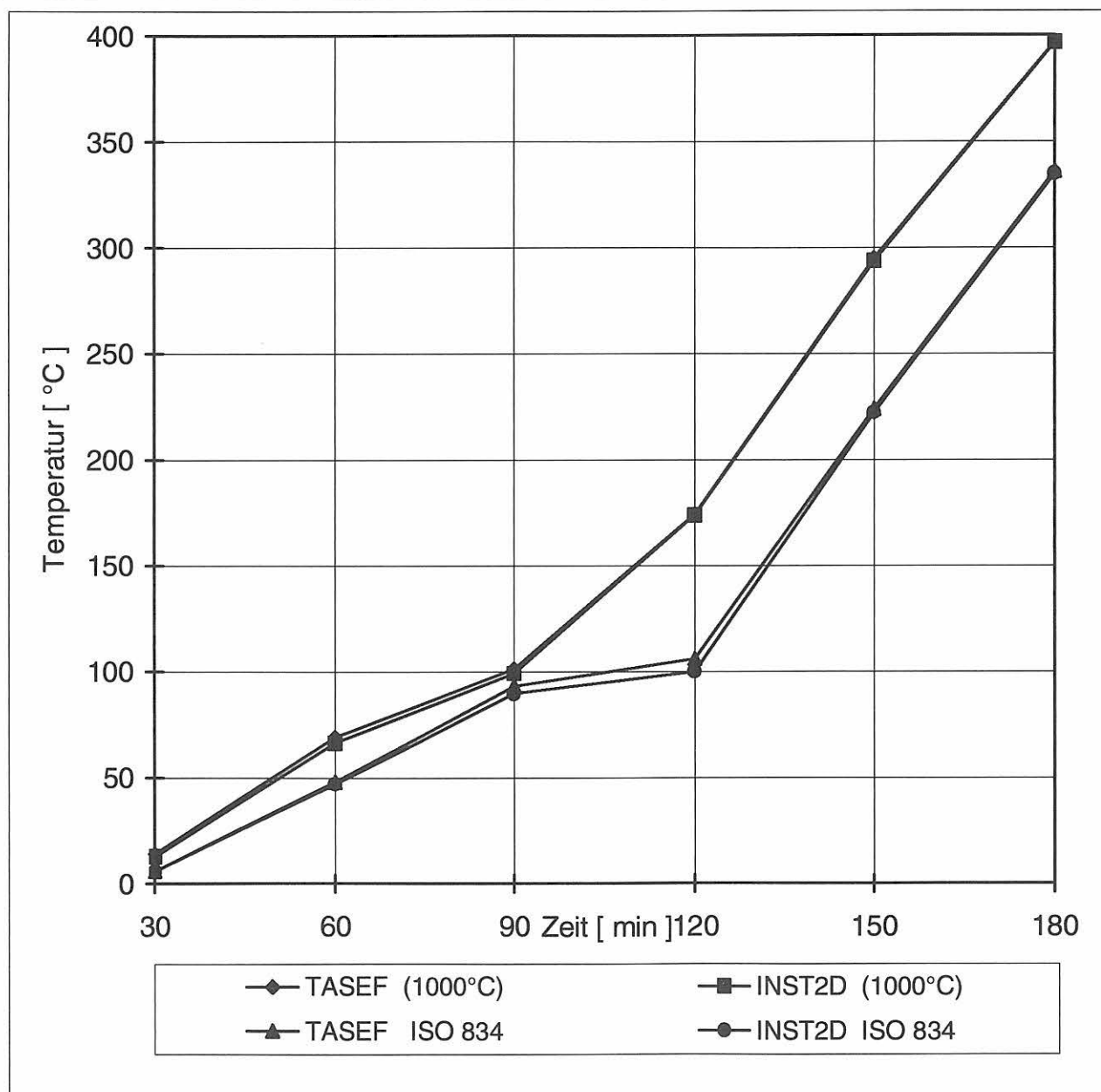
Tab. 10.4

Ergebnisse für Beispiel 5b – Anhang 2 (ISO 834)

Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		30	30	60	60	90	90
n = 4	T _{sur} / 1	581,0	562,8	865,0	856,4	954,0	953,3
n = 16	T _{sur} / 1	640,0	624,9	862,0	864,9	950,0	949,5
n = 64	T _{sur} / 1	644,0	647,9	860,0	863,0	948,0	948,4
n = 128/256	T _{sur} / 1	645,0	649,9	860,0	862,6	948,0	948,0
n = 4	T _{cor} / 4	646,0	647,2	973,0	897,7	999,0	974,2
n = 16	T _{cor} / 7	724,0	687,2	921,0	897,2	992,0	971,7
n = 64	T _{cor} / 11	688,0	698,1	890,0	895,5	969,0	970,7
n = 128/256	T _{cor} / 19	688,0	699,8	890,0	894,9	969,0	970,4
n = 4	T _{cen} / 13	14,0	18,7	61,0	72,6	103,0	100,0
n = 16	T _{cen} / 43	9,0	9,7	53,0	57,8	96,0	97,1
n = 64	T _{cen} / 111	6,0	6,6	49,0	49,1	94,0	90,9
n = 128/256	T _{cen} / 343	6,0	5,8	48,0	47,0	93,0	89,4
Elementierung	Punkt Bez./Nr. INST2D	Zeit [min]					
		TASEF	INST2D	TASEF	INST2D	TASEF	INST2D
		120	120	150	150	180	180
n = 4	T _{sur} / 1	1004,0	1004,8	1043,0	1043,4	1074,0	1074,3
n = 16	T _{sur} / 1	1002,0	1002,3	1041,0	1041,6	1073,0	1073,0
n = 64	T _{sur} / 1	1001,0	1001,6	1041,0	1041,2	1072,0	1072,6
n = 128/256	T _{sur} / 1	1001,0	1001,5	1041,0	1041,0	1072,0	1072,5
n = 4	T _{cor} / 4	1020,0	1021,2	1056,0	1056,7	1084,0	1085,3
n = 16	T _{cor} / 7	1040,0	1019,6	1076,0	1055,6	1084,0	1084,5
n = 64	T _{cor} / 11	1018,0	1019,0	1054,0	1055,1	1083,0	1084,1
n = 128/256	T _{cor} / 19	1018,0	1018,8	1054,0	1055,0	1083,0	1084,0
n = 4	T _{cen} / 13	119,0	178,3	219,0	287,2	318,0	386,5
n = 16	T _{cen} / 43	111,0	100,0	215,0	239,7	328,0	348,4
n = 64	T _{cen} / 111	106,0	100,0	222,0	224,8	335,0	337,0
n = 128/256	T _{cen} / 343	106,0	100,0	224,0	222,2	336,0	335,0

TASEF	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 128$	30	60	90	120	150	180
TASEF (1000°C)	14,0	69,0	101,0	174,0	295,0	397,0
TASEF (ISO 834)	6,0	48,0	93,0	106,0	224,0	336,0

INST2D	Zeit [min]					
T_{cen} [°C] bei $n = 256$	30	60	90	120	150	180
INST2D (1000°C)	12,9	66,4	99,1	173,7	293,9	396,6
INST2D (ISO 834)	5,8	47,0	89,4	100,0	222,2	335,0



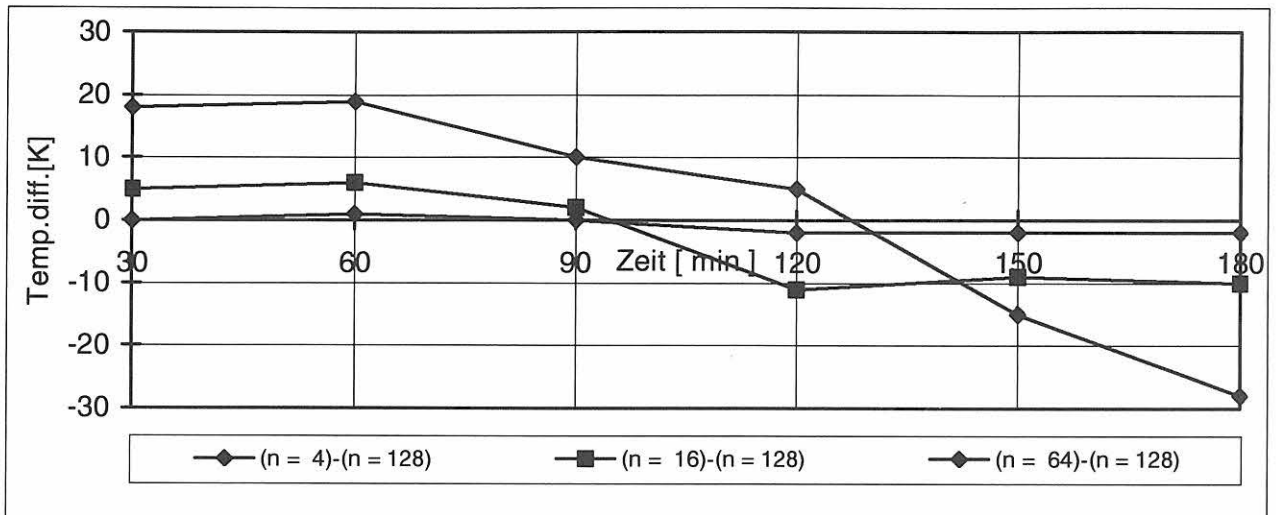
Diagr. 10.3: Temperatur-Zeit-Verläufe im Zentrum des Körpers bei der jeweils höchsten Elementierung für die Beispiele 5a und 5b entsprechend **Anhang 2**

Tab. 10.5; 10.6 /Diagr. 10.4; 10.5

Beispiel 5a – Anhang 2 (1000°C)

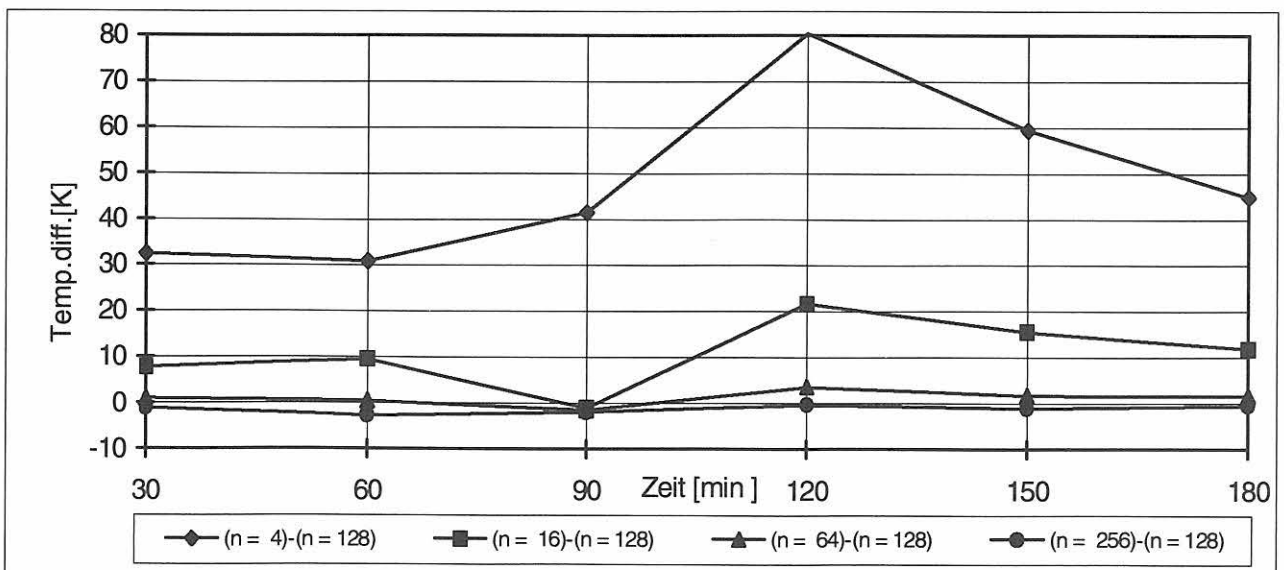
Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	18,0	19,0	10,0	5,0	-15,0	-28,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	5,0	6,0	2,0	-11,0	-9,0	-10,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,0	1,0	0,0	-2,0	-2,0	-2,0



Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D

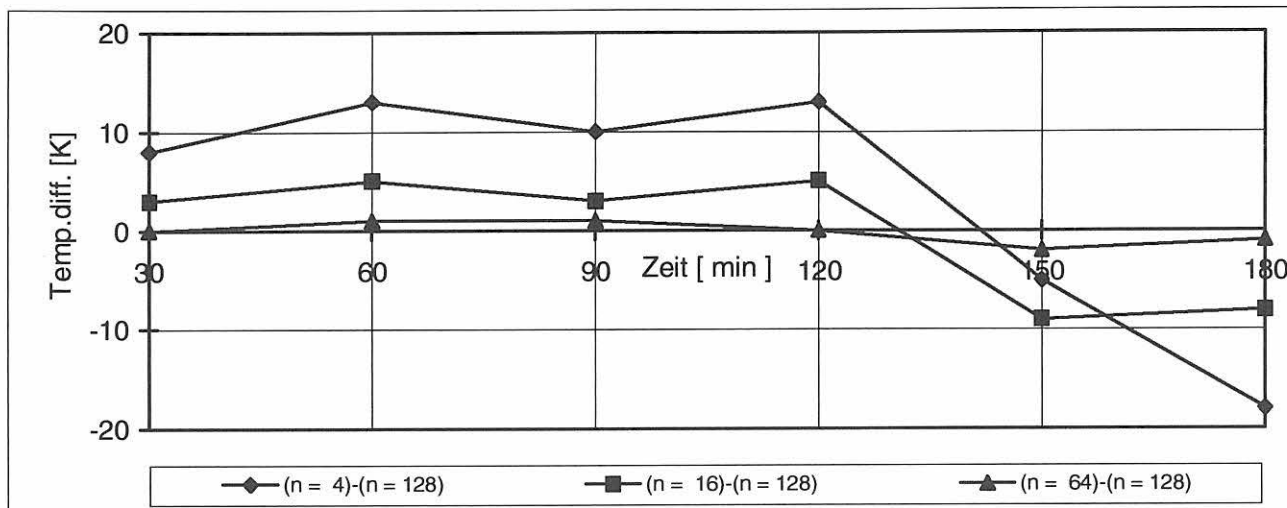
INST2D -TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	32,5	31,0	41,5	80,4	59,3	44,8
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	7,8	9,6	-1,0	21,7	15,6	11,8
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	1,1	0,4	-1,5	3,6	1,8	1,7
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-1,1	-2,6	-1,9	-0,3	-1,1	-0,4



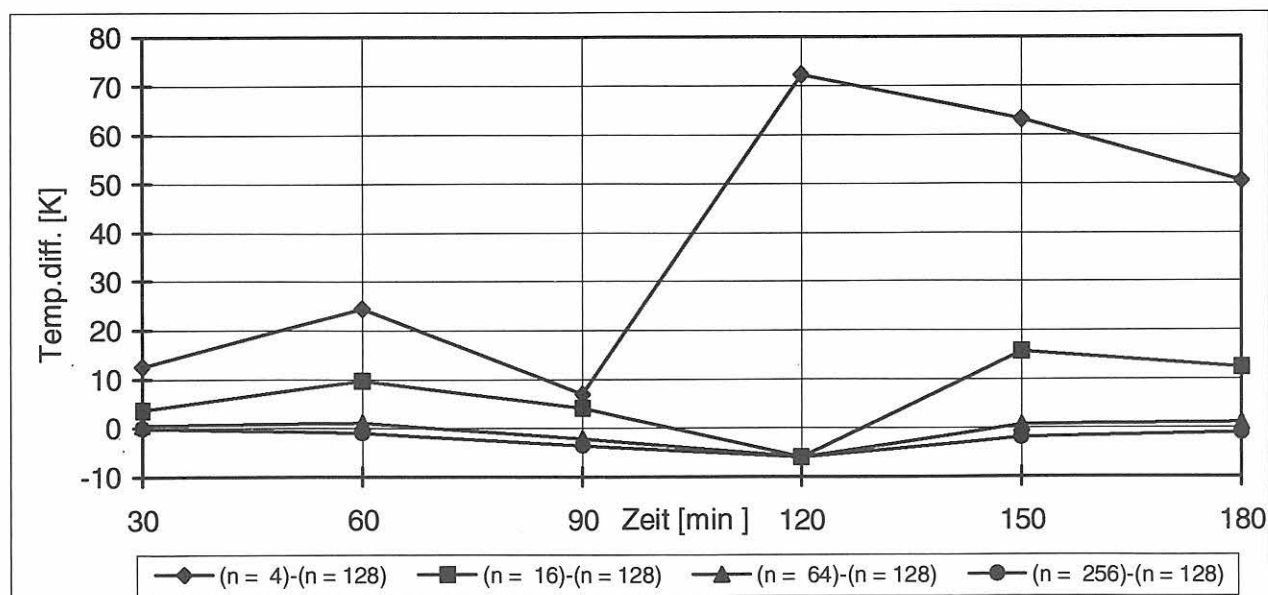
Tab. 10.7; 10.8 /Diagr. 10.6; 10.7

Beispiel 5b – Anhang 2 (ISO 834)**Temperaturdifferenz zwischen TASEF-2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

TASEF- TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	8,0	13,0	10,0	13,0	-5,0	-18,0
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,0	5,0	3,0	5,0	-9,0	-8,0
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,0	1,0	1,0	0,0	-2,0	-1,0

**Temperaturdifferenz zwischen INST2D und der höchsten Elementierung von TASEF-2D**

INST2D-TASEF(128)	Zeit [min]					
	30	60	90	120	150	180
ΔT [K]; (n = 4)-(n = 128)	12,7	24,6	7,0	72,3	63,2	50,5
ΔT [K]; (n = 16)-(n = 128)	3,7	9,8	4,1	-6,0	15,7	12,4
ΔT [K]; (n = 64)-(n = 128)	0,6	1,1	-2,1	-6,0	0,8	1,0
ΔT [K]; (n = 256)-(n = 128)	-0,2	-1,0	-3,6	-6,0	-1,8	-1,0



Weitere Literatur zum Thema:

- Nr.22: R. Rudolphi, E. Knublauch
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
26 Seiten, 1973 DM 11,50
- Nr.24: J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
42 Seiten, 1973 DM 13,50
- Nr.33: A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meß-
verfahrens
42 Seiten, 1975 DM 13,50
- Nr.72: R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
138 Seiten, 1980 DM 25,50
- Nr.74: R. Rudolphi, R. Müller
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperatur-
verteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
174 Seiten, 1980 DM 28,50
- Nr.84: R. Müller, R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand
38 S., ISBN 3-88314-226-3, 1982 DM 14,00
- Nr.123: D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall orga-
nisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
152 S., 106 Abb., ISBN 3-88314-531-9, 1986 DM 35,50
- Nr.189: W. Matthees, G. Magiera
Impedanzeigenschaften von Finiten Elemente Modellen bei Integration im Zeitraum
128 S., 12 Tab., zahlr. fbg. Abb., ISBN 3-89429-244-X, 1993 DM 44,50
- Nr.227: F. Liebau, R. Rudolphi
Berechnung von Temperatur- und Wärmestromverteilungen mittels algebraischer Mehrgitter-
methoden auf der Basis der Methode der finiten Volumen bei allgemeiner Triangulierung mit Win-
keln über 90°
64 S., 30 Abb., 13 Tab., ISBN 3-89701-187-5, 1989 DM 24,00

Zu beziehen durch:
Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10 · D-27511 Bremerhaven
Telefon (0471) 9 45 44-61 · Telefax (0471) 9 45 44 88
email: NW-Verlag@t-online.de
internet: www.nw-verlag.de

