

### 4.3 Wärmestrahlung Abbrand eines Holzbalken-Querschnittes

#### Lernziel

Es wird ein Modell mit Wärmeleitung und Strahlungswärmeaustausch transient berechnet. Zwei Varianten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften werden verglichen. Im Postprocessing wird mit einer Programmierung mit Macros und mit der ANSYS-Parametersprache eine Sonderauswertung durchgeführt.

#### 4.3.1 Variante 1

##### 4.3.1.1 Aufgabenstellung

Bei der Verwendung von Holzbalken in Bauwerken sind besondere Brandvorschriften zu beachten. Festlegungen dazu gibt es zum Beispiel in DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ und in ISO 834 „Feuerwiderstandsprüfungen“. Nach einer dieser Vorschriften wird im Brandfall eine Erwärmung der Umgebung innerhalb von 10 Minuten auf  $T=1073\text{ K}$  ( $800^\circ\text{C}$ ) (linear ansteigend) angenommen. Unter dieser Randbedingung ist nachzuweisen, dass für eine bestimmte Zeit mindestens noch ein Restquerschnitt des Balkens unterhalb einer zulässigen Temperatur von  $T=873\text{ K}$  ( $600^\circ\text{C}$ ) liegt, damit bis zum Räumen des Gebäudes die Standsicherheit gewährleistet ist.

In Variante 1 dieses Beispiels ist ein rechteckiger Balken aus Holz mit einer Breite von  $b=150\text{ mm}$  und einer Höhe von  $h=250\text{ mm}$  nachzuweisen. Abb. 4.3-1 zeigt den Balken. Die Anfangstemperatur beträgt  $T=273\text{ K}$  ( $0^\circ\text{C}$ ).

Die Materialwerte sind vorgegeben. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt  $\lambda = 1.70\text{ W / (m K)}$ , die Dichte  $\rho = 900\text{ kg / m}^3$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p = 1500\text{ J / (kg K)}$ .

Während des Brandes ist ein konvektiver Wärmeübergang mit einem Wärmeübergangsbeiwert von  $\alpha = 250\text{ W / (m}^2\text{ K)}$  zugrunde zu legen. Der Emissionskoeffizient für den Wärmeaustausch über Strahlung ist mit  $\epsilon=0.4$  einzusetzen.

Bei der Ergebnisauswertung soll es möglich sein, zu einem bestimmten Zeitpunkt die Fläche aller Elemente aufsummiert zu können, deren Temperatur unterhalb einer Grenztemperatur von  $T=873\text{ K}$  ( $600^\circ\text{C}$ ) liegt. Gesucht ist der Flächenanteil dieser Elemente im Verhältnis zur Gesamtquerschnittsfläche.

##### 4.3.1.2 Variante 1: Idealisierung

Bei der Idealisierung dieser Aufgabenstellung wird davon ausgegangen, dass in Balkenlängsrichtung keine Temperaturunterschiede vorliegen und nur der Bereich nachzuweisen ist, der nicht von den Balkenenden beeinflusst ist. Daher wird ein 2-dimensionales Modell des Balkenquerschnitts mit dem ANSYS-Element PLANE55 erstellt. Das Element dieses Typs wird in der Standardeinstellung verwendet, bei der ein ebenes Problem mit der Ausdehnung von einer Längeneinheit (hier: 1 m) in Tiefenrichtung zugrunde liegt.

Es liegen Symmetrien in Bezug auf die 2 Achsen vor, die durch die Querschnittmitte gehen. Daher wird nur ein Viertel des Querschnitts modelliert. Abb. 4.3-1 zeigt dieses Viertel, das bei der folgenden Dateneingabe zugrunde liegt.



Abb. 4.3-1 Aufgabenstellung

Die für die Konvektion maßgebenden Daten sind die Temperatur der Umgebungsluft und der Wärmeübergangskoeffizient. Die Temperatur des umgebenden Mediums beträgt zu Beginn der Berechnung  $T=273\text{ K}$  ( $0\text{ °C}$ ), steigt dann in 10 Minuten linear auf  $T=1073\text{ K}$  ( $800\text{ °C}$ ) und bleibt anschließend auf diesem Wert.

Der Strahlungs-Wärmeaustausch zwischen der Balkenoberfläche und der Umgebung ist in dieser Aufgabe einfach zu idealisieren, da der Sicht- bzw. Formfaktor sich für jeden Teil der Balkenoberfläche zu 1.0 ergibt. Dieser Wert trifft zu, wenn eine Fläche im Strahlungsaustausch mit dem gesamten Halbraum steht, der die Oberfläche überspannt. Im vorliegenden Fall entspricht dies einem Brand, bei dem die gesamte Umgebung des Balkens die vorgegebene Umgebungstemperatur angenommen hat und nun von jeder Position des umgebenden Raumes Strahlungswärme an den Balken abgegeben wird. Für diese Strahlungsbedingung eignet sich bei einer 2-dimensionalen Modellierung besonders der ANSYS-Elementtyp SURF151. Dieser Elementtyp stellt ein linienförmiges Oberflächeneffekt-Element dar, das am Rand des Modells angeordnet werden kann. Das Element kann den Strahlungsaustausch zwischen dem Modellrand und einem Umgebungsknoten abbilden, wobei das Stefan-Boltzmann-Gesetz zugrundeliegt. Jedes dieser Elemente ist beschrieben durch 2 Knoten, die an einer Elementkante des Modells liegen, und einem weiteren Knoten, der die Umgebung repräsentiert. Dieser Umgebungsknoten ist bei der 2-dimensionalen Anwendung zwar an einem Ort in der Ebene angeordnet, die Position ist jedoch nicht von Bedeutung. Das Element ist in diesem Fall nichtlinear, da der Strahlungs-Wärmeaustausch nicht von der Differenz der Temperaturen  $T$ , sondern von der Differenz der absoluten  $T^4$ -Werte abhängt. Ein entsprechender Elementtyp für 3-dimensionale Anwendungen ist der ANSYS-Elementtyp SURF152.

Die Temperatur des Umgebungsknotens, der den umgebenden Raum repräsentiert, verläuft über die Zeit wie bei der Konvektion beschrieben: zu Beginn der Berechnung  $T=273\text{ K}$  ( $0\text{ °C}$ ), in 10 Minute linear auf  $T=1073\text{ K}$  ( $800\text{ °C}$ ) ansteigend und anschließend auf diesem Wert gleichbleibend.

Es werden SI-Einheiten und für die Temperaturen die Kelvin-Skala verwendet.

#### 4.3.1.3 Variante 1: Das Preprocessing

Auswahl des Preprocessor mit  
**/PREP7**

Der Elementtyp für den Balkenquerschnitt ist hier PLANE55 ohne besondere Optionen (keine Rotations- bzw. Axisymmetrie)

**ET,1,PLANE55**

Zusätzlich deklarieren wir den Elementtyp, der an der Oberfläche die Strahlungsbedingung zur Umgebung abbilden wird, hier SURF151. Für den Einsatz in unserem Beispiel verwenden wir besondere Einstellungen dieses Elementtyps, die über die Schalterwerte der "key options" ausgewählt werden

**ET,2,SURF151,1,,,1,1**

**KEYOPT,2,9,1**

Als Zusatzdaten (real constants) verlangt dieser Elementtyp die Vorgabe des Formfaktors sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante. Wir geben dieser Datengruppe die laufende Nummer 2 und verwenden hierfür

**R,2,1.0,5.67e-8**

Als Materialverhalten werden die Wärmeleitfähigkeit, die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und der Emissionsgrad eingegeben

**MP,KXX,1,1.7**

**MP,DENS,1,900**

**MP,C,1,1500**

**MP,EMIS,1,0.40**

Die Geometrie des Balkenquerschnitts wird in der x-y-Ebene mit der "top-down"-Methode definiert. Das Rechteck, das wir für das abzubildende Viertel festlegen müssen, steht direkt als Standardgeometrie (primitive) zur Verfügung. Die Kantenlängen werden als Parameter vereinbart (so dass sie später

einfacher zu zitieren sind)

**BREITE=150e-3**

**HOEHE=250e-3**

und als Abmessungen des Rechtecks eingesetzt

**RECT,0,BREITE/2,0,HOEHE/2**

Zur automatischen Vernetzung schreiben wir vor, dass eine Elementkantenlänge von 10e-3 m nicht überschritten werden soll und dass ausschließlich Rechteckelemente verwendet werden sollen

**ESIZE,10e-3**

**MSHKEY,1**

**MSHAPE,0,2D**

**MSHAPE,0,3D**

Die Fläche wird vernetzt mit

**AMESH,ALL**

Die Elementierung kann grafisch kontrolliert werden mit

**EPLOT**

Abb. 4.3-2 zeigt die Anordnung der Elemente.

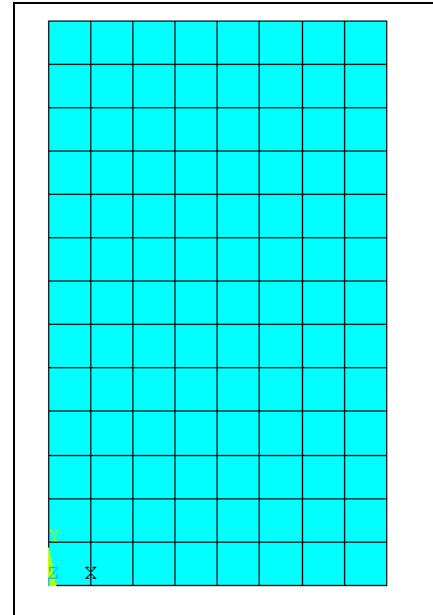


Abb. 4.3-2 Elemente

Die Elemente des Außenrandes, die die Strahlung abbilden, werden als Elemente des Elementtyps 2 und der Zusatzdaten (real constants) 2 in unserem Beispiel festgelegt. Diese Zuweisungen werden als Schalter festgelegt mit

**TYPE,2**

**REAL,2**

Die Oberflächen, die mit diesen Elementen zu belegen sind, sind durch die Linien 2 und 3 gebildet. Vergleichen Sie hierzu die Modellkanten mit

**/PNUM,LINE,1**

**L PLOT**

Durch die Selektion der genannten Linien und der auf diesen Linien liegenden Punkte mit

**LSEL,S,,,2,3**

**NSLL,S,1**

sind die zu verwendenden Oberflächen festgelegt. Zur Vorbereitung der Festlegung der Oberflächenelemente wird noch ein Knoten definiert, der im weiteren Verlauf die Umgebungsbedingungen erhält und der Ausgangspunkt der Strahlung aus der Umgebung sein wird. Wir verwenden für diesen Knoten eine beliebige, zur Zeit freie Knotennummer und eine beliebige geometrische Position (denndie Strahlungsbedingungen sind durch die Strahlerflächen und den Sichtfaktor vollständig festgelegt, der Abstand und die Richtung sind nicht mehr ausschlaggebend)

**N,490,BREITE/1.8,HOEHE/1.8**

Die entlang dieser Kante zu erzeugenden Elemente werden automatisch mit

**ESURF,490**

geschaffen, wobei der Knoten 490 als Umgebungsknoten eingetragen wird.

Wir machen die Selektion der Geometriegrößen rückgängig mit

**ALLS**

Eine grafische Kontrolle der Elementanordnung erfolgt mit einem Plot der Elemente, bei dem zuvor die Nummerierung der Elementtyp-Nummern eingeschaltet wird

**/PNUM,TYPE,1**

**EPLOT**

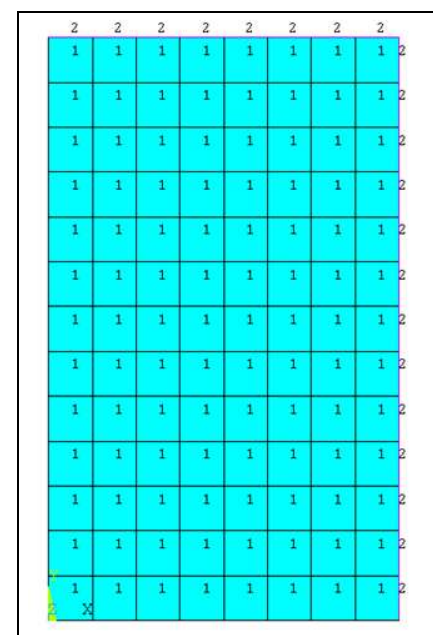


Abb. 4.3-3 Elemente, Typ-Nummern

Eine noch deutlicher erkennbares Bild wird durch eine verkleinerte Darstellung der Elemente erreicht (shrinking) mit

**/SHRINK,.2**

**EPlot**

**Utility Menu> PlotCtrls> Style> Size and Shape**

**/SHRINK Shrink entities by 20 percent**

**OK**

**Utility Menu> Plot> Elements**

Bei dieser Darstellung wird jedes Element für sich verkleinert dargestellt, wie ein Pullover, der zu heiß gewaschen wurde. Dadurch sind die Grenzen der Elemente deutlich erkennbar. Besonders die Kombination der ebenen und Linien-Elemente am Rand des Modells wird getrennt dargestellt. Stellen Sie danach die Verkleinerung wieder zurück mit

**/SHRINK**

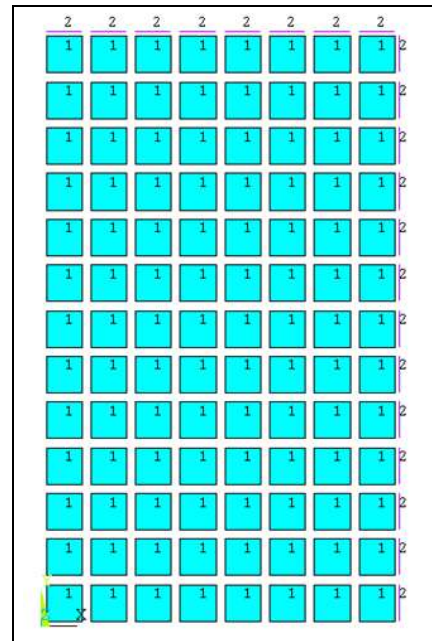


Abb. 4.3-4 Elemente, Typ-Nummern, verkleinert (shrink)

#### 4.3.1.4 Variante 1: Der Lösungsabschnitt

Der Aufruf des Lösungsteils des ANSYS/ED-Programms

**/SOLU**

Es wird die transiente Berechnungsmethode ausgewählt

**ANTYPE,TRANS**

Als zusätzliche Festlegung, die für alle folgenden Lastfälle gilt, werden die Ergebnisdaten für jeden Zeitschritt und in vollem Umfang zur Abspeicherung auf der Ergebnisdatei angefordert mit dem Kommando

**OUTRES,ALL,ALL**

Hiermit werden insbesondere auch die Resultate von Zwischenschritten (substeps) abgespeichert (standardmäßig wird nur der Endzustand eines Lastschrittes und somit nur der letzte Substep abgespeichert).

Bei den folgenden Zeitschrittberechnungen soll das ANSYS/ED-Programm innerhalb gewisser, vom Anwender vorzugebender Grenzwerte die Schrittweite automatisch auswählen. Diese Zeitschrittautomatik ist generell zu empfehlen, da das Programm die erforderlichen und zulässigen Schrittweiten aus den aktuellen Ergebnissen und Ergebnisinkrementen gut bestimmen kann und dadurch viel Rechenzeit eingespart werden kann. Nur in besonderen Fällen sollte auf die Automatik verzichtet werden. Die Zeitschrittautomatik wird aktiviert mit

**AUTOTS,ON**

Die Startbedingungen werden nun als **Lastschritt 1** eingegeben. Das Ergebnis dieses Lastschrittes ist eine Lösung, die die Temperaturverteilung unter den zu Beginn vorliegenden Konditionen darstellt. Im vorliegenden Fall ist die Lösung trivial: der gesamte Querschnitt hat  $T = 273$  K. Diese Vorgehensweise, hierfür einen gesonderten Lastschritt ablaufen zu lassen, wird hier jedoch dargestellt, da vielfach in anderen Anwendungen eine Transiente ausgehend von einer ungleichförmigen Verteilung zu berechnen ist.

Bei dieser Vorgehensweise wird mit der folgenden Eingabe die Temperatur angegeben, die zu Beginn des ersten Lösungsschrittes zur Bestimmung der nichtlinearen Materialdaten verwendet wird

**TUNIF,273**

**Main Menu> Solution> -Loads- Settings> Uniform Temp**

Von diesem Wert ausgehend wird in allen Berechnungsschritten jeweils die am Knoten bzw. im Element berechnete Temperatur verwendet. Diese uniforme Starttemperatur ist keine Festlegung der Temperatur, also nicht zu verwechseln mit einer Randbedingung. Die uniforme Starttemperatur ist nur eine Hilfe für den Berechnungsstart. Wenn die Lösung beginnt und bei nichtlinearen, temperaturabhängigen Eigenschaften – hier bei uns die Strahlung – eine erste Temperatur gewählt werden muss, um die Austauschkoefizienten mit  $T^4$  konkret zu berechnen, dann soll das Programm nicht  $T = 0$  einsetzen, sondern  $T = 273$ . Das wird die erste Iteration schon „richtiger“ machen, also schon zu einem geringeren Residuum (Ungleichgewicht) führen. Dann wird mit weniger Iterationen die

Konvergenz erreicht werden. Diese Starttemperatur ist besonders bei Strahlungsaufgaben sinnvoll, bei denen mit absoluten Temperaturen (also Kelvin) gerechnet wird. Ohne

**TUNIF,273**

würde dann in der ersten Iteration mit  $T=0$  gestartet werden, möglicherweise als Lösung eine etwas geringere Temperatur als dieser Startwert, also eine negative Temperatur, berechnet werden. Dies wird programmintern abgefangen und erzeugt eine Fehlermeldung und einen Abbruch der Lösung, weil negative Absoluttemperaturen physikalisch unsinnig sind. Ein solcher Abbruch ist eine lästige Behinderung, die durch den Start bei 273 K vermeidbar ist.

Die Konvektion wird an den Knoten der Ränder festgelegt, die geometrisch bei den Koordinaten  $x = \text{breite}/2 = 0.150/2$  m und  $y = \text{hoehe}/2 = 0.250/2$  m liegen. Diese Knoten werden selektiert mit

**NSEL,S,LOC,X,BREITE/2**

**NSEL,A,LOC,Y,HOEHE/2**

und (um sie später als Gruppe zitieren und ansprechen zu können) als Komponente unter dem Namen "ausssen" gespeichert mit

**CM,AUSSEN,NODE**

Eine graphische Kontrolle der Knoten, die hiermit erfasst werden, kann erfolgen mit

**/PNUM,NODE,1**

**NPLOT**

Für den durch diese Knoten dargestellten Rand wird die erzwungene Konvektion eingegeben mit einem Wärmeübergangskoeffizienten (HCOEF) von  $\alpha = 250 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  und einer Umgebungstemperatur (TBULK) von  $T_B = 273 \text{ K}$

**ALPHA=250**

**SF,ALL,CONV,ALPHA,273**

Die Selektion der Randknoten wird aufgehoben mit

**ALLS**

Die Temperatur der Strahlungsumgebung wird eingegeben durch

**D,490,TEMP,273**

Die Problemzeit für diesen Anfangszustand setzen wir so klein ein, dass noch keine transienten Effekte wirksam werden

**TIME,1e-6**

(alternativ kann dies auch über das Ausschalten der transienten Effekte mit **TIMINT,OFF** erfolgen) und lassen die Lösung erstellen mit

**SOLVE**

Damit ist die Dateneingabe von **Lastschritt 1** abgeschlossen. Die Temperaturverteilung wird berechnet, die Eingabe der weiteren Lastschritte kann folgen.

Als **Lastschritt 2** wird nun der Zeitabschnitt berechnet, in dem die Temperatur der Umgebung linear ansteigt von dem Startwert  $T=273 \text{ K}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) bis zum Endwert von  $T=1073 \text{ K}$  ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die folgenden Angaben stellen die Werte für den Endpunkt des Zeitabschnittes dar. Für dieses Intervall wird die Konvektion entsprechend dem Endwert für die außen liegenden Knoten (diese sind als Komponente unter dem Namen "außen" vorher bereits zusammengefasst worden) festgelegt mit

**SF,AUSSEN,CONV,ALPHA,273+800**

Die Temperatur der Strahlungsumgebung wird ebenfalls erhöht auf

**D,490,TEMP,273+800**

Die Konvektion ist damit für den gesamten Zeitabschnitt definiert durch

- die Festlegung des vorangegangenen Lastschrittes (der für den aktuellen Lastschritt ja die Startbedingungen darstellt),
- die hier gerade festgelegten Endwerte und
- einen linearen Verlauf innerhalb des Zeitintervalls, das der aktuelle Lastschritt 2 umfasst.

Der lineare Verlauf ist standardmäßig vorgesehen. Zur Verdeutlichung wird jedoch das Kommando genannt, das diese Einstellung beeinflusst

**KBC,0**

**Main Menu> Solution> Load Step Opts> Time/Frequenc> Time and Substeps**

**KBC Stepped or ramped b.c. Ramped**

(diese "Kennziffer für boundary conditions" kann mit 0 auf linearen Verlauf (ramp change) und mit 1 auf Verlauf entsprechend einer Sprungfunktion (step change) eingestellt werden).

Der Endpunkt des Zeitabschnittes von Lastschritt 2 beträgt 10 Minuten (eingetragen als  $10 \cdot 60$  s in der Zeiteinheit dieses Beispiels)

**TIME,10\*60**

Dieser Zeitabschnitt von Lastschritt 2 (loadstep 2) soll in 60 Zwischenschritten (substeps) - also Zwischenschritten von jeweils 600/60 s bzw. 10 s - abgearbeitet werden. Die Anzahl der Substeps wird als Anfangswert von uns vorgegeben. Im weiteren Verlauf wird jedoch der Zeitschrittautomatik der Spielraum zur Anpassung der Substep-Anzahl durch die Grenzwerte von  $N_{max} = 60$  und  $N_{min} = 20$  gegeben

**NSUBST,60,60,20**

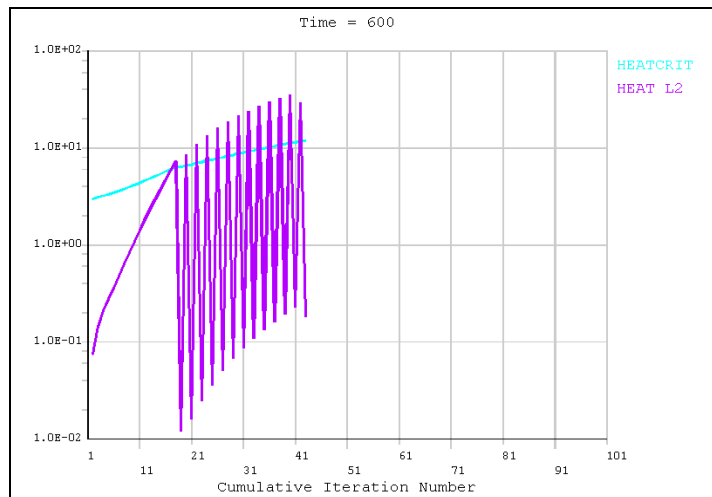


Abb. 4.3-5 Konvergenz-Monitor

Diese Angaben reichen aus, um das zu berechnende transiente Geschehen zu beschreiben. Die Lösung erfolgt mit

**SOLVE**

Der Konvergenz-Monitor – also die Überwachung des Konvergenzverhaltens bei der Lösung – zeigt am Anfang einige Schritte, bei denen sofort Konvergenz erreicht ist und das Ungleichgewicht HEAT kleiner ist als das Kriterium HEATCRIT. Bei höheren Temperaturen ist der Einfluss der Strahlung auf die Systemmatrix zu erkennen, es treten immer mal Iterationen mit unzulässig hohem Ungleichgewicht auf, die eine Korrektur und eine neue Iteration erfordern, bevor Konvergenz erreicht ist und der nächste Substep begonnen werden kann.

Damit ist **Lastschritt 2** abgeschlossen.

Der nun folgende **Lastschritt 3** ist der Zeitabschnitt, in dem die Temperatur der Umgebung den Endwert von 1073 K (800 °C) erreicht hat und nicht geändert wird. Die Lastangaben ändern sich also nicht mehr, es werden nur einige Optionen des Berechnungsablaufes geändert und das zu berechnende Zeitintervall festgelegt.

Der Endpunkt des Zeitabschnittes von Lastschritt 3 beträgt 20 Minuten

**TIME,20\*60**

Auch dieser Zeitabschnitt von Lastschritt 3 soll in maximal 60 und mindestens 20 Zwischenschritten abgearbeitet werden

**NSUBST,60,60,20**

Die Lösung erfolgt mit

**SOLVE**

Damit ist **Lastschritt 3** abgeschlossen.

**4.3.1.5 Variante 1:  
Das Postprocessing mit dem Zeitverlauf-Postprocessor**

Zur Auswertung dieser transienten Berechnung wird der Zeitverlaufs-Postprozessor POST26 mit **/POST26**

**Main Menu> TimeHist Postpro**

aufgerufen. Dieser Postprozessor verarbeitet ausgesuchte Ergebniswerte der Berechnung als Zeitverlauf, also als Wertetabelle, bei der jeder Wert dem jeweiligen Zeitpunkt zugeordnet ist.

Standardmäßig wird die Problemzeit als Tabelle 1 eingelesen und bereitgestellt.

Im vorliegenden Beispiel werden die Temperaturen der Knoten in der Mitte der oberen kurzen Kante (an der Symmetrielinie), im Zentrum des Querschnitts und in der Mitte der langen rechten Kante (ebenfalls an der Symmetrielinie) ausgewertet. Diese Positionen haben die Koordinaten (0,hoehe/2,0), (0,0,0) und (breite/2,0,0). Ohne die Nummern der dort angeordneten Knoten zu kennen, können mit den folgenden Kommandos die Temperaturen für diese Knoten bezeichnet werden

```

NSOL,2,NODE(0,HOEHE/2,0),TEMP,,Oben
NSOL,3,NODE(0,0,0),TEMP,,Zentrum
NSOL,4,NODE(BREITE/2,0,0),TEMP,,Seite
NSOL,5,490,TEMP,,Last
Main Menu> TimeHist Postpro> Define Variables
    
```

Die letzte dieser Eingabezeilen fordert das Einlesen der Temperatur des Umgebungsknotens.

Ehe wir das Diagramm darstellen lassen, wird noch vorbereitend festgelegt, dass ein Liniengitter unterlegt werden soll

```

/GRID,1
Utility Menu> PlotCtrls> Style>
Graphs> Modify Grid
    und dass die Achsen mit folgenden Texten beschriftet werden sollen
/AXLAB,Y,TEMP [K]
/AXLAB,X,Zeit [s]
Utility Menu> PlotCtrls> Style>
Graphs> Modify Curve
    
```

Nun lassen wir die berechneten Temperaturen an diesen Knoten des Modells für alle berechneten Zeitpunkte als Diagramm darstellen mit

```

PLVAR,2,3,4,5
Main Menu> TimeHist Postpro>
Graph Variables
    
```

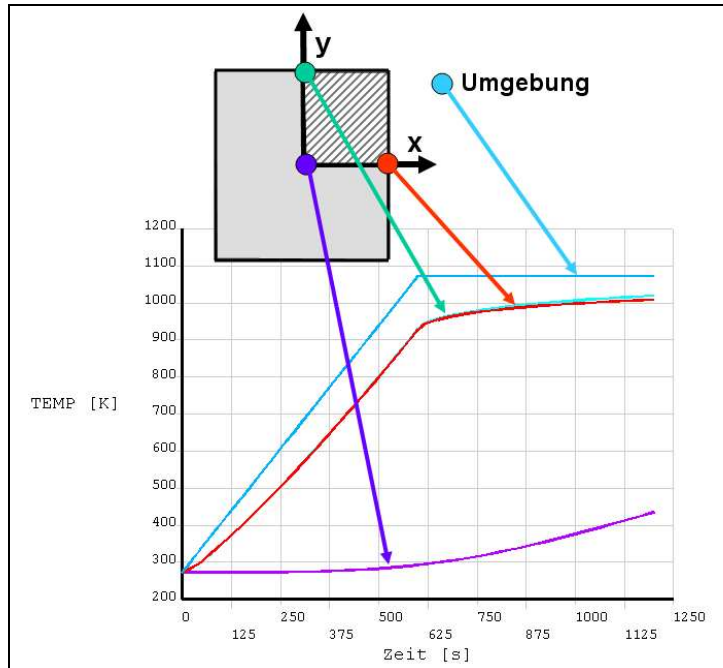


Abb. 4.3-6 Temperatur-Zeitverlauf

### 4.3.1.6 Variante 1: Das Postprocessing mit dem allgemeinen Postprocessor

Zu dieser Auswertung wird der allgemeine Postprocessor POST1 mit

```

/POST1
    aufgerufen. Zunächst kann ein Überblick hergestellt werden, für welche Zeitpunkte Ergebnisdaten vorliegen. Dies geschieht mit dem Kommando
SET,LIST
    
```

Die Auswertung von Ergebnissen eines Zeitpunktes - z.B. des letzten berechneten Zeitpunktes - erfolgt durch das Einlesen der gewünschten Ergebnisse mit

```

SET,LAST
    und die grafische Darstellung der Temperaturverteilung für diesen Zeitpunkt mit
PLNS,TEMP
    
```

Für die Auswertung der Restquerschnittsfläche, die unterhalb der Grenztemperatur liegt, wird hier eine Vorgehensweise gewählt, die auf die ANSYS-Parametersprache aufbaut (ANSYS parametric design language, APDL). Es wird ein Macro FLAESUM.MAC dargestellt, das die Summation der Flächen durchführt. Das Macro kann - wenn es einmal erstellt ist - wie ein eigenes Spezialkommando in der interaktiven ANSYS/ED-Programmanwendung benutzt werden.

Das Macro kann im ANSYS/ED-Programm erstellt werden oder in einem beliebigen Editor auf Ihrem Rechner geschrieben werden. Bei der Erstellung im ANSYS/ED-Programm müssen die Kommandos \*CREATE,.. mit dem Namen des Macros (hier gewählt: FLAESUM.MAC) am Anfang des Blockes und \*END am Ende des Blockes stehen. Bei Verwendung eines Editors entfallen diese beiden Zeilen, die geschriebene Datei muss dann unter dem Namen (hier FLAESUM.MAC) abgespeichert werden.

Alle Texte, die auf Ausrufungszeichen (!) folgen, sind Kommentare, die nicht vom ANSYS/ED-Programm ausgeführt werden. Diese Zeilen können auch weggelassen werden, ohne die Funktion des Macros zu beeinträchtigen.

Das Macro ist mit folgenden Zeilen zu erstellen

```
*CREATE,FLAESUM,MAC
/NOPT
*GET,ZEIT,ACTIVE,,SET,TIME
FLAGES=0
EAKT=0
:A1
EAKT=ELNEXT(EAKT)
*IF,EAKT,LE,0,:E1
N1=NELEM(EAKT,1)
N2=NELEM(EAKT,2)
N3=NELEM(EAKT,3)
N4=NELEM(EAKT,4)
NANZ=4
*IF,N4,EQ,0,THEN
NANZ=3
*ENDIF
T1=TEMP(N1)
T2=TEMP(N2)
T3=TEMP(N3)
T4=TEMP(N4)
TM=(T1+T2+T3+T4)/NANZ
*IF,TM,LE,TGRENZ,THEN
*GET,EFLA,ELEM,EAKT,AREA
FLAGES=FLAGES+EFLA
*ENDIF
*GO,:A1
:E1
/GOPR
*MSG,NOTE,FLAGES
DIE RESTFLAECHE BETRAEGT %G
*END
```

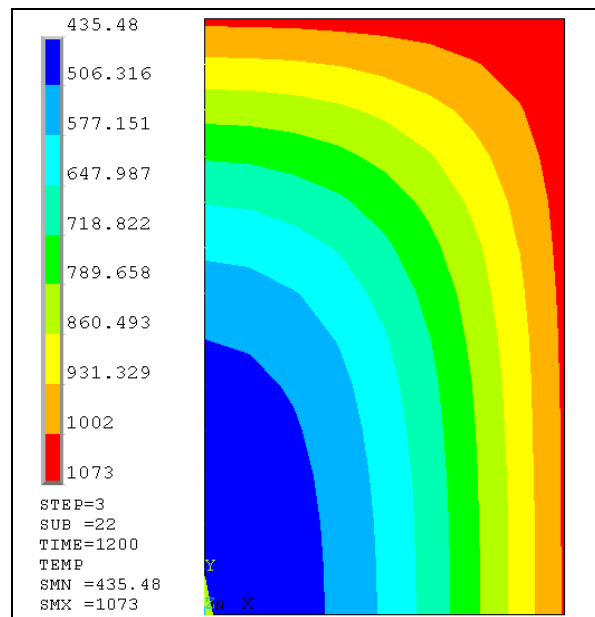


Abb. 4.3-7 Temperaturverteilung, Zeit 1200

Die Funktion des Macro und der einzelnen Kommandos innerhalb des Blockes ist anhand der Kommentare sowie mit den Angaben von Band 1 der Reihe „FEM für Praktiker“ zur Erläuterung der allgemeinen Kommandos des ANSYS/ED-Programms nachvollziehbar. In kurzen Worten werden im Macro folgende Schritte durchgeführt:

- die Ausgabe im Output-Fenster wird ausgeschaltet (dies spart Zeit)
- die aktuelle Problemzeit der gerade untersuchten Ergebnisse wird abgefragt,
- der Wert der Summe der Restflächen flages wird auf Null als Startwert gesetzt,
- die Nummer des aktuell verarbeiteten Elements wird auf Null als Startwert gesetzt,
- eine Sprungmarke :a1 wird eingefügt,
- die auf EAKT als nächsthöhere Elementnummer folgende Elementnummer der im Augenblick selektierten Menge der Elemente wird abgefragt,
- wenn diese Nummer als Null gemeldet wird, wird zu Marke :e1 gesprungen,
- die Temperaturen der Eckknoten des Elementes EAKT werden abgefragt,
- der Mittelwert dieser Temperaturen gebildet,
- dabei wird eine Vorsorge für dreieckige Elemente getroffen.
- Wenn dieser Mittelwert unterhalb des Grenzwertes tgrenz liegt, wird die Fläche des aktuellen Elementes zu der Summe der Restflächen FLAGES hinzuaddiert.



- Anschließend wird vor die Abfrage nach der nächsten Elementnummer (Sprungmarke :a1) gesprungen.
- Am Ende wird die Ausgabe im Output-Fenster wieder eingeschaltet und ein Hinweistext mit dem Ergebnis ausgegeben.

Wenn nun das Macro verfügbar ist (also entweder als Ergebnis dieser Eingabe im ANSYS/ED-Programm oder einer Editor-Eingabe (ohne die Kopfzeile \*CREATE,FLAESUM,MAC und die Endzeile \*END) im aktuellen Verzeichnis abgespeichert ist), dann kann die Anwendung im allgemeinen Post-processor erfolgen.

Die Auswahl eines Zeitpunktes, an dem die Auswertung erfolgen soll, kann z.B. unter Angabe des Lastschrittes (load step) und des Zwischenschrittes (substep) erfolgen mit **SET,3,8**

Hiermit wird Lastschritt 3, Zwischenschritt 8 ausgewählt. Die Problemzeit dieses Schrittes beträgt  $t = 800$  s, die Temperaturkurve lässt erwarten, dass ein Teil des Balkenquerschnittes unterhalb der Grenztemperatur von  $273+600$  K =  $600$  °C liegt (vergl. Kurve Zentrum) und ein Außenbereich oberhalb dieser Grenztemperatur (vergl. Kurven Oben und Seite).

Die Temperaturverteilung für diesen Zeitpunkt kann mit

**PLNS,TEMP**

grafisch dargestellt werden. Zusätzlich können noch die Zahlenwerte der Isolinien umgestellt werden auf  $273^\circ$ ,  $373^\circ$ , ...,  $1173^\circ$  mit

**/CONT,,9,273,100**

**PLNS,TEMP**

Die Auswertung wird für alle Elemente des Balkenquerschnitts durchgeführt, die zum Elementtyp 1 gehören

**ESEL,S,TYPE,,1**

Der Temperaturgrenzwert wird vorgegeben mit

**TGRENZ=600+273**

und das Macro aufgerufen über

**FLAESUM**

Nach dem Ablauf des Macros kann die Fläche abgelesen werden. Ebenso können die aktuellen Werte der verwendeten Parameter abgefragt werden, z.B. der Wert des Parameters FLAGES, der die Summe der Flächen aller Elemente enthält, die eine mittlere Temperatur kleiner oder gleich der Grenztemperatur haben

**\*STATUS,FLAGES**

Im vorliegenden Beispiel beträgt diese Restfläche  $7.48197E-03 = 0.00748$  m<sup>2</sup>. Die Ausgangsfläche des Querschnitts betrug  $0.009375$  m<sup>2</sup>.

Die Auswertung des Zeitpunktes  $t = 1200$  s ergibt mit

**SET,3,22**

**ESEL,S,TYPE,,1**

**TGRENZ=600+273**

**FLAESUM**

eine Restfläche von  $6.67067E-03 = 0.00667$  m<sup>2</sup>.

An diesem Beispiel soll zusätzlich gezeigt werden, wie ein Macro (hier die Restflächenberechnung mit der Eingabe FLAESUM.MAC) innerhalb eines weiteren Macros verwendet werden kann und so die eigenen Prozeduren in mehreren Ebenen geschachtelt werden können.

Wenn das Macro FLAESUM.MAC verfügbar ist, kann mit der folgenden Kommandofolge automatisch für jeden Zeitpunkt des Ablaufes der transienten Berechnung die Restfläche berechnet und grafisch

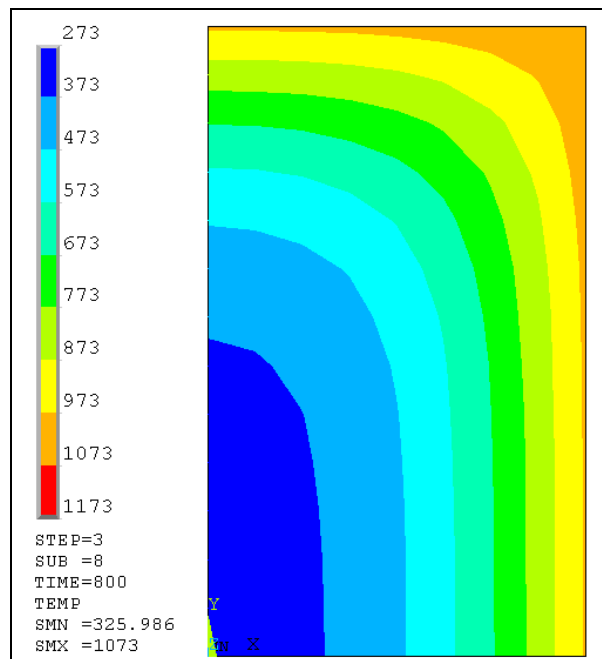


Abb. 4.3-8 Temperaturverteilung, Zeit 800

aufgetragen werden. Dies kann durch eine Schleife programmiert werden, so dass automatisch die Folge der Lastschritte ausgewertet und das Macro FLAESUM angewendet wird. Dieser Ablauf sollte dadurch nachvollzogen werden, dass die folgenden Zeilen im Editor eingegeben werden und unter dem Namen ALLE.MAC als Datei abgespeichert werden

```
*CREATE,ALLE,MAC
/NOPT
TGRENZ=600+273
! DER LETZTE ZEITPUNKT
SET, LAST
*GET, LZT, ACTIVE, SET, TIME
*DIM, EAR, TABLE, 200
! DER ERSTE ZEITPUNKT
ESEL, S, TYPE, 1
N=1
SET, FIRST
FLAESUM
EAR(N)=FLAGES
! DIE SCHLEIFE
:A2
SET, NEXT
*GET, ZEIT, ACTIVE, SET, TIME
*IF, ZEIT, GE, LZT, :E2
N=N+1
ESEL, S, TYPE, 1
FLAESUM
EAR(N)=FLAGES
*GO, :A2
:E2
*VLEN, N
*VPLO, EAR(1)
*END
```

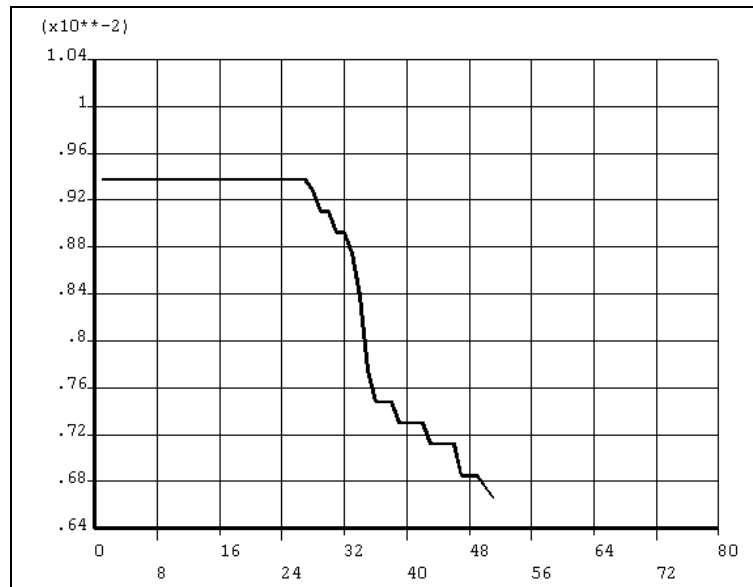


Abb. 4.3-9 Zeitverlauf Restfläche

Der erste Abschnitt dieser Eingabe legt einige Ausgangswerte fest und wertet den ersten nach der Berechnung abgespeicherten Lastzustand aus. Der zweite Abschnitt enthält eine Rücksprunglogik, mit der ein Lastzustand nach dem anderen ausgewertet wird, jeweils das Macro zur Berechnung der Restfläche FLAESUM verwendet wird und der Ergebniswert FLAGES in ein Parameter-Array EAR eingetragen wird. Am Ende der Eingabe wird das Parameter-Array EAR grafisch dargestellt. Diese Eingabefolge wird abgearbeitet mit der Eingabe **alle**

Die Ergebnisdarstellung ist in Abb. 4.3-9 gezeigt. Die Abb. 4.3-9 zeigt einen stufigen Verlauf, da in der Auswertung der Restfläche jeweils die mittlere Temperatur jedes Elementes abgefragt wird. Sobald dieser Wert die Grenztemperatur überschreitet, wird die gesamte Fläche dieses Elementes aus der Restfläche entfernt. Um den Verlauf kontinuierlicher zu berechnen, ist bei dieser Auswertungslogik eine Netzverfeinerung erforderlich.

### 4.3.2 Variante 2

#### 4.3.2.1 Variante 2: Aufgabenstellung

In Variante 2 soll unter gleichen Randbedingungen ein Balken aus anderem Material untersucht werden. Mit gleichen Außenabmessungen wird ein Doppel-T-Profil aus Stahl zugrunde gelegt, bei dem die Kehle mit Beton gefüllt ist. Die Abmessungen sind wie vorher 150 mm und 250 mm.

Die Materialwerte sind

- für den Stahl eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 40 \text{ W / (m K)}$ , eine Dichte von  $\rho = 7850 \text{ kg / m}^3$  und eine spezifische Wärmekapazität von  $c_p = 500 \text{ J / (kg K)}$ ,
- für den Beton eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 10 \text{ W / (m K)}$ , eine Dichte von  $\rho = 2000 \text{ kg / m}^3$  und eine spezifische Wärmekapazität von  $c_p = 1000 \text{ J / (kg K)}$ .

Der Wärmeübergangsbeiwert zur Umgebung bleibt  $\alpha = 250 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ , der Emissionsgrad für den Wärmeaustausch über Strahlung 0.4.

#### 4.3.2.2 Variante 1: Die Idealisierung

Die Idealisierung folgt den gleichen Grundsätzen wie Variante 1. Auch hier wird nur ein Viertel des Querschnitts modelliert. Abb. 4.3-10 zeigt dieses Viertel, das bei der folgenden Dateneingabe zugrunde liegt.

Die Elementierung wird wie bei Variante 1 durchgeführt. Nach dem automatischen Erzeugen der Elemente werden jedoch die Materialkennungen für die Elemente des Betonquerschnitts umgestellt.

Auch die Lasten bleiben ungeändert: die Temperatur des umgebenden Mediums und die Strahlungstemperatur der Umgebung beträgt zu Beginn der Berechnung 273 K (0 °C), steigt dann in 10 Minuten linear auf 1073 K (800 °C) und bleibt anschließend auf diesem Wert.

Es werden SI-Einheiten und für die Temperaturen die Kelvin-Skala verwendet.

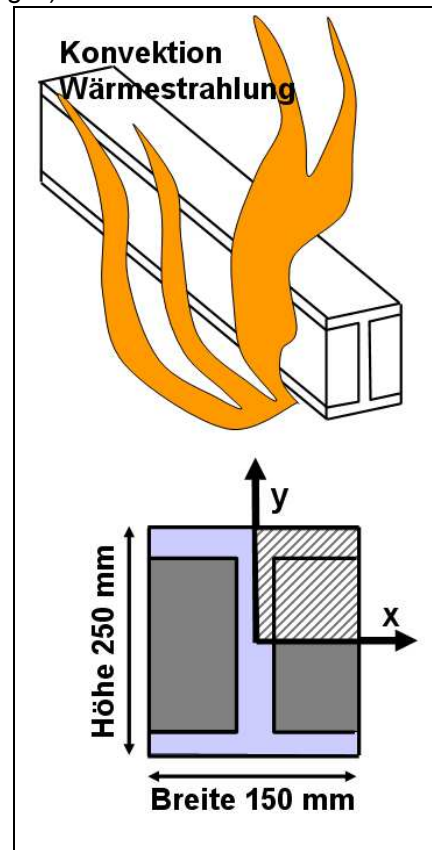


Abb. 4.3-10 Aufgabenstellung

#### 4.3.2.3 Variante 2: Das Preprocessing

Die Eingabedaten entsprechen weitgehend denjenigen der Variante 1. Daher werden hier nur die Eingabe-Kommandozeilen aufgelistet, die zur Berechnung verwendet wurden.

**/PREP7**

**! ELEMENTTYPEN**

**ET,1,PLANE55**

**ET,2,SURF151,1,,1,1**

**KEYOPT,2,9,1**

**! QUERSCHNITTSWERTE**

**R,2,1,0,5.67E-8**

**! MATERIALDATEN STAHL**

**MP,KXX,1,40.**

**MP,DENS,1,7850.**

**MP,C,1,500.**

**MP,EMIS,1,.40**

**! MATERIALDATEN BETON**

**MP,KXX,2,10.**

**MP,DENS,2,2000.**

**MP,C,2,1000.**

**MP,EMIS,2,.40**

```
! GEOMETRIE
! BALKENQUERSCHNITT
BREITE=150E-3
HOEHE=250E-3
RECT,0,BREITE/2,0,HOEHE/2
ESIZE,10E-3
ESHAPE,2
TYPE,1
MAT,1
REAL,1
AMESH,ALL
```

```
! AUSSENRAND
TYPE,2
REAL,2
LSEL,S,,2,3
NSLL,S,1
N,490,BREITE/1.8,HOEHE/1.8
ESURF,490
ALLS
! AENDERN DER KENNUNG FUER
! BETONELEMENTE
NSEL,S,LOC,X,20E-3,999
NSEL,R,LOC,Y,-1,95E-3
ESLN,S,1
ESEL,R,TYPE,,1
EMOD,ALL,TYPE,1
EMOD,ALL,MAT,2
ALLS
```

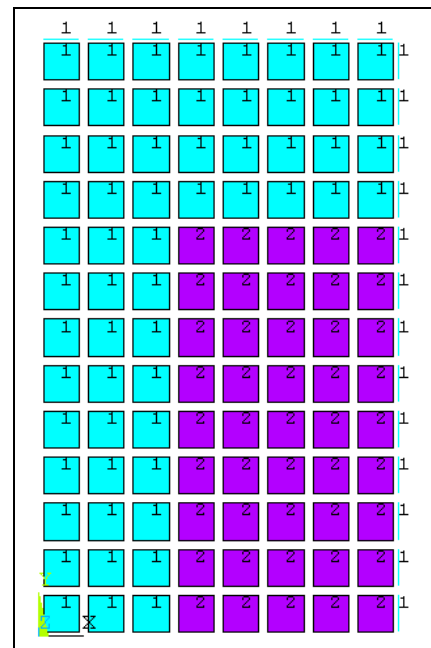


Abb. 4.3-11 Elemente, Typ-Nummern, verkleinert (shrink)

Eine grafische Kontrolle der Elementtyp-Zuweisung kann ausgeführt werden mit

```
/PNUM,TYPE,1
/SHRINK,.2
EPLT
```

und eine Kontrolle der Material-Zuweisung (Abb. 4.3-11) mit

```
/PNUM,MAT,1
EPLT
```

#### 4.3.2.4 Variante 2: Der Lösungsabschnitt

In diesem Abschnitt der Dateneingabe ergibt sich keine Änderung. Die verwendeten Kommandos hierfür lauteten

```
/SOLU
ANTYP,TRANSIENT
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,ON
```

! LASTFALL 1

```
! STATIONAERER ANFANGSZUSTAND
TUNIF,273
NSEL,S,LOC,X,BREITE/2
NSEL,A,LOC,Y,HOEHE/2
CM,AUSSEN,NODE
! UEBERGANGSKOEFFIZIENT
ALPHA=250.
SF,ALL,CONV,ALPHA,273
ALLS
! TEMPERATUR DER
! STRAHLUNGSUMGEBUNG
D,490,TEMP,273
```

```

TIME,1E-6
SOLVE

! LASTFALL 2
! TRANSIENTE
SF,AUSSEN,CONV,ALPHA,273+800
D,490,TEMP,273+800
KBC,0
NSUBST,60,60,20
TIME,10*60
SOLVE

! LASTFALL 3
! TRANSIENTE
TIME,20*60
SOLVE
    
```

### 4.3.2.5 Variante 2: Das Postprocessing

Im allgemeinen Postprocessor wird die Verteilung der Temperaturen am Ende des Berechnungszeitraumes dargestellt mit

```

/POST1
SET, LAST
/CONT,
ESEL,S,TYPE,,1
NSEL,U,,,490
/UDOC,1,CNTR,LEFT
PLNS,TEMP
    
```

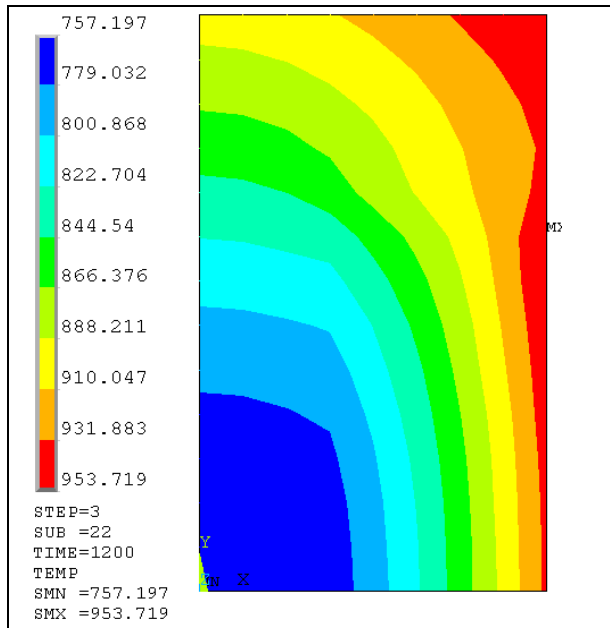


Abb. 4.3-12 Temperaturverteilung, Zeit 1200

Es ist zu erkennen, dass durch die hohe Leitfähigkeit des Stahles die Mitte des Profils relativ schnell warm wird. Dadurch wird die Tragfähigkeit des Stahlquerschnittes verringert.

Im Postprocessing wird der Zeitverlauf der Balkeneckpunkte grafisch aufgezeichnet. Die Punkte, die dafür abgefragt werden, sind wie bei Variante 1 das Zentrum, die Außenseiten seitlich und oben und zusätzlich die Lastfunktion, also die außen anliegende Umgebungstemperatur. Das Diagramm wird dargestellt mit

```

/POST26
NSOL,2,NODE(0,HOEHE/2,0),TEMP,,OBEN
NSOL,3,NODE(0,0,0),TEMP,,ZENTRUM
NSOL,4,NODE(BREITE/2,0,0),TEMP,,SEITE
NSOL,5,490,TEMP,,LAST
/GRID,1
/AXLAB,Y,TEMP [K]
/AXLAB,X,ZEIT [S]
PLVAR,2,3,4,5
    
```

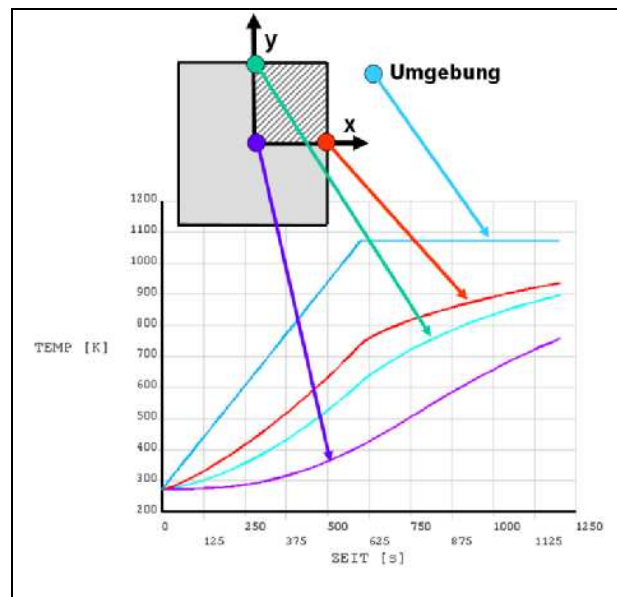


Abb. 4.3-13 Temperatur-Zeitverlauf