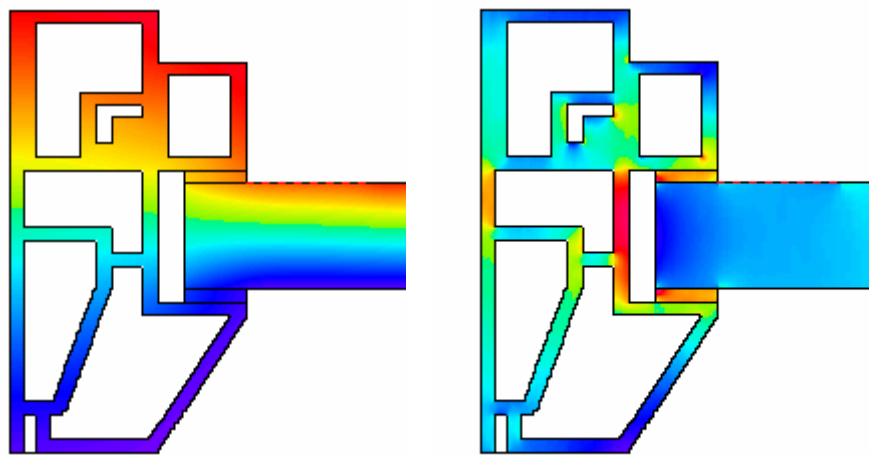


HEAT2

PC-Programm für zweidimensionalen Wärmedurchgang

Handbuch mit Einführung in die theoretischen Grundlagen
und Beispielen.

Version 5.0



Stand: 1. August 2000

Dr. Thomas Blomberg

**Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
Department of Building Physics, Lund University
Building Technology Group, Massachusetts Institute of Technology**

Deutsche Fassung, Oktober 2005

Inhalt

1.	EINFÜHRUNG	7
1.1	SCHNELLEINSTIEG	7
1.2	EINFÜHRUNG IN HEAT2	7
1.2.1	<i>Einsatzmöglichkeiten</i>	7
1.2.2	<i>Programmfunktionen und -merkmale</i>	7
1.2.3	<i>Kartesische Koordinaten</i>	8
1.2.4	<i>Numerische Methode</i>	8
1.2.5	<i>Grafische Eingabeoberfläche (Preprozessor)</i>	9
1.3	UPDATE-INFO ZU HEAT2 VERSION 5.0	10
1.3.1	<i>Integrierter Preprozessor</i>	10
1.3.2	<i>Materialdatenbank</i>	10
1.3.3	<i>Import von Klimadaten</i>	11
1.3.4	<i>3D-Flächendiagramm</i>	11
1.4	HINWEISE ZUM HANDBUCH	11
1.5	SYSTEMVORAUSSETZUNGEN.....	11
1.6	INSTALLATION.....	11
1.7	TECHNISCHER SUPPORT	11
2.	MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG.....	13
2.1	DIFFERENTIALGLEICHUNGEN DER WÄRMELEITUNG	13
2.2	RANDBEDINGUNGEN	13
2.3	ANFANGSBEDINGUNGEN	14
2.4	BEREICHE MIT FLÜSSIGKEITEN ODER GASEN	14
2.5	MIT STRALUNG GEKOPPELTE WÄRMELEITUNG IN HOHLRÄUMEN.....	15
3.	NUMERISCHE FORMULIERUNG	17
3.1	EINFÜHRUNG	17
3.2	BERECHNUNGSNETZ.....	17
3.3	WÄRMELEITWERTE	17
3.4	WÄRMESTRÖME	19
3.5	NEUE TEMPERATUREN	20
3.6	WAHL DES ZEITINTERVALLS.....	20
3.7	ITERATIVE BERECHNUNG.....	20
3.8	STATIONÄRER FALL	20
3.9	INTERNE BEREICHE MIT FLÜSSIGKEITEN ODER GASEN	21
4.	EINGABE IM ÜBERBLICK.....	23
4.1	EINGABEOBERFLÄCHE (PREPROZESSOR)	23
4.2	RANDBEDINGUNGEN	24
4.3	BERECHNUNG EINES STATIONÄREN PROBLEMS.....	26
4.4	BERECHNUNG EINES INSTATIONÄREN PROBLEMS	28
4.5	EINGABENETZ	32
4.6	BERECHNUNGSNETZ.....	33
4.6.1	<i>Einfache Netzgenerierung</i>	35
4.7	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN	36
4.8	AUSGANGSTEMPERATUREN	37
4.9	INTERNE MODIFIKATIONEN.....	39
4.10	INTERNE WIDERSTÄNDE.....	40
4.11	ZUSAMMENFASSUNG	41
5.	ARBEITEN MIT HEAT2	43
5.1	EINGABEOBERFLÄCHE (PREPROZESSOR)	43
5.1.1	<i>Einführung</i>	43
5.1.2	<i>Werkzeugleiste</i>	43
5.1.3	<i>Objekte kopieren</i>	44

5.1.4	Materialauswahl	44
5.1.5	Snap to grid (Am Raster ausrichten).....	44
5.1.6	Zoomfaktor.....	45
5.1.7	Skalierungsfaktor (Maßstab).....	45
5.1.8	Zeichnen in metrischen oder englischen Einheiten.....	46
5.1.9	Aufbereitung der Geometrie für die Berechnung (Update).....	47
5.1.10	Lange Randsegmente	47
5.1.11	Berechnungsnetz (Numerical mesh).....	48
5.1.12	Einfügen von Bildern	49
5.1.13	Preprozessor-Dateien H2P	49
5.1.14	Zeichenfläche mit internen Modifikationen.....	49
5.2	MATERIAEDITOR	52
5.2.1	Einführung	52
5.2.2	Speichern der Materialdateien.....	55
5.2.3	Importieren und Mischen von Materialdaten.....	55
5.3	LADEN UND SPEICHERN VON EINGABEDATEN	55
5.4	EINFÜGEN VON NETZKOORDINATEN (KONSTRUKTIONSSACHSEN).....	56
5.5	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN.....	59
5.6	RANDBEDINGUNGEN	60
5.7	AUSGANGSTEMPERATUREN (INITIAL TEMPERATURES).....	61
5.8	INTERNE MODIFIKATIONEN	61
5.8.1	Einführung	61
5.8.2	Arten interner Modifikationen.....	62
	Hinweise zum Typ G - Hohlraum mit Luft unter Berücksichtigung von Strahlungswärmeaustausch und Belüftung	65
5.8.3	Definition der Gebiete mit internen Modifikationen	66
5.9	FUNKTIONEN	66
5.9.1	Sinusfunktion.....	67
5.9.2	Schrittweise konstante und schrittweise lineare Funktion	68
5.9.3	Import anderer Dateiformate	69
5.9.4	Beispiel 1 - Sinusfunktion mit einer Periode von einem Jahr	69
5.9.5	Beispiel 2 - Sinusfunktion mit einer Periode von einem Tag	70
5.9.6	Beispiel 3 - Schrittweise konstante Funktion	70
5.9.7	Beispiel 4 – Schrittweise lineare Funktion.....	71
5.10	INTERNE WIDERSTÄNDE	71
5.11	NUMERISCHE BERECHNUNG	72
5.11.1	Stop-Kriterium für den stationären Fall	72
5.11.2	Sukzessive Überrelaxation bei stationären Berechnungen	73
5.11.3	Simulationszeit für instationäre Berechnungen	73
5.11.4	Simulationsfenster.....	74
5.11.5	Bildschirmupdate	74
5.11.6	Berechnung zurücksetzen (Reset).....	75
5.12	AUSGABE (OUTPUT).....	75
5.12.1	Wärmeströme über die Randflächen.....	75
5.12.2	Wärmeströme für interne Modifikationen	75
5.12.2.1	Beispiel 1.....	75
5.12.2.2	Beispiel 2.....	76
5.12.3	Berechnungsergebnisse für Hohlräume mit Strahlung	79
5.12.4	Temperaturen und Wärmeströme an einem Punkt.....	80
5.13	EXPORT VON WÄRMELEITWERTEN UND KAPAZITÄTEN	81
5.14	EXPORT VON TEMPERATUREN (MATLAB).....	81
5.15	REKORDER	82
5.15.1	Was kann aufgezeichnet werden?	85
5.16	ÄNDERUNGEN IN DER AUFZEICHNUNGSLISTE	86
5.16.1	Einführung	86
5.16.2	Hilfe.....	87
5.16.3	Einstellungsmöglichkeiten im Diagrammeditor.....	87
5.17	INFO LOG - FENSTER	88

5.18	GRAFISCHE AUSGABEOBERFLÄCHE (POSTPROZESSOR)	88
5.18.1	<i>Einführung</i>	88
5.18.2	<i>Grundlegende Befehle</i>	89
5.18.3	<i>Menüpunkt File</i>	90
5.18.3.1	Speichern von Grafiken	90
5.18.3.2	Ausdrucken von Grafiken aus HEAT2	91
5.18.4	<i>Menüpunkt Options</i>	93
5.18.4.1	Darstellung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität	93
5.18.4.2	Umrisse der Materialrechtecke	94
5.18.4.3	Absolute Längenangaben	95
5.18.4.4	Widerstandslinien	96
5.18.5	<i>Menüpunkt Bounds (Ränder)</i>	96
5.18.6	<i>Menüpunkt T and Q</i>	97
5.18.6.1	Bessere Bildqualität durch Option Zeichnen Pixel für Pixel	99
5.18.6.2	Wärmestromdichte	101
5.18.6.3	Wärmestromvektoren	102
5.18.6.3.1	Optionen für die Wärmestromvektoren	102
5.18.6.3.2	Ausdruck der Wärmestromvektoren	107
5.18.6.4	Darstellung von Isothermen	107
5.18.6.5	Umgekehrte Grautonskala	109
5.18.6.6	Anzeige von Temperaturen und Wärmeströmen in Hohlräumen	109
5.18.7	<i>Menüpunkt Tools</i>	110
5.18.8	<i>Menüpunkt Einstellungen (Settings)</i>	111
5.18.9	<i>Menüpunkt Plot3D</i>	111
6.	BERECHNUNGEN MIT ROHREN	113
6.1	ROHR MIT VORGEGEBENEM WÄRMESTROM	113
6.1.1	<i>Rohr, Idealisierung als Quadrat</i>	113
6.1.2	<i>Rohr, Idealisierung mit Abstufungen</i>	113
6.2	ROHR MIT EINER VORGEGEBENEN TEMPERATUR	113
6.2.1	<i>Berücksichtigung des Rohrwiderstandes</i>	114
6.2.2	<i>Vernachlässigung des Rohrwiderstandes</i>	114
7.	RECHENLEISTUNG	115
7.1	RICHTWERTE	115
8.	BEISPIELE	117
8.1	BEISPIEL 1 – WAND MIT WÄRMEBRÜCKE	117
8.1.1	<i>Einführung</i>	117
8.1.2	<i>Eingabe mit dem Preprozessor</i>	117
8.1.3	<i>Randbedingungen</i>	118
8.1.4	<i>Eingabe ohne Benutzung des Preprozessors</i>	121
8.2	BEISPIEL 2 – WÄRMEVERLUSTE ERDBERÜHRTER BAUTEILE	123
8.2.1	<i>Einführung</i>	123
8.2.2	<i>Eingabenetz</i>	123
8.2.3	<i>Materialkennwerte</i>	126
8.2.4	<i>Randbedingungen</i>	127
8.2.5	<i>Berechnung</i>	128
8.2.6	<i>Instationäre (transiente) Berechnung</i>	130
8.2.7	<i>Eingabe mit dem Preprozessor</i>	134
8.2.7.1	Zeichnen der Geometrie	134
8.2.7.2	Zeichnen von Teilen des geometrischen Modells	136
8.3	BEISPIEL 3 – BAUTEIL MIT WÄRMEBRÜCKEN AUS METALL	137
8.3.1	<i>Einführung</i>	137
8.3.2	<i>Eingabe mit dem Preprozessor</i>	138
8.3.3	<i>Alternatives Eingabenetz</i>	142
8.3.4	<i>Berechnung für verschiedene Raster</i>	143
8.3.5	<i>Schlußfolgerungen</i>	144
8.4	BEISPIEL - DACHSEGMENT AUS HOHLZIEGELN	145
8.4.1	<i>Einführung</i>	145

8.4.2	<i>Im Preprozessor gezeichnete Geometrie</i>	145
8.4.3	<i>Ergebnisse für verschiedene Berechnungsraster</i>	147
8.4.4	<i>Wahl der Referenztemperatur T_{so} und der Konvergenzrate</i>	151
8.4.5	<i>Schlußfolgerungen</i>	151
9.	STRAHLUNGSWÄRMEAUSTAUSCH UND BELÜFTUNG IN HOHLRÄUMEN	153
9.1	EINFÜHRUNG	153
9.2	EINGABEDATEN	153
9.3	AUSGABEDATEN	154
9.4	NUMERISCHE BERECHNUNG FÜR DEN HOHLRAUM.....	155
9.4.1	<i>Strahlungsgleichungen in Temperaturform</i>	155
10.	ANALYSE VON FENSTERRAHMEN	157
10.1	EINFÜHRUNG.....	157
10.2	OPTIONEN BEI DER BERECHNUNG DER RAHMENHOHLRÄUME	157
10.3	DEFINITION VON RAHMENHOHLRÄUMEN	158
10.4	BEISPIEL 1 – PVC-ABSCHLUßPROFIL MIT FÜNF HOHLRÄUMEN	159
10.5	BEISPIEL 2 - ALUMINIUMRAHMENPROFIL	161
11.	HINWEISE	167
11.1	EINFÜHRUNG.....	167
11.2	NUMERISCHE ASPEKTE	167
11.2.1	<i>Berechnungsnetz (Numerical mesh)</i>	167
11.2.2	<i>Expansives Berechnungsnetz</i>	167
11.2.3	<i>Stationäre Berechnungen</i>	167
11.2.4	<i>Symmetrische Fälle</i>	167
11.2.5	<i>Modellgröße bei erdberührten Bauteilen</i>	168
11.2.6	<i>Instationäre Berechnung von Wärmeverlusten ins Erdreich</i>	168
11.2.7	<i>Schräge Ränder bzw. Materialgrenzen</i>	168
	LITERATURVERZEICHNIS	169
	ANHANG A. GRENZEN UND BESCHRÄNKUNGEN DER EINGABEDATEN	171
	ANHANG B. MATERIALDATEN	173
	ANHANG C. BEISPIEL EINER EINGABEDATEI	177

1. Einführung

1.1 Schnelleinstieg

Lesen Sie das Kapitel 4 *Eingabe im Überblick*, wenn Sie sofort mit einer Berechnung beginnen wollen. Die Beispiele in Kapitel 8 geben ebenfalls eine kurze Einführung.

Hinweise zur deutschen Ausgabe des Handbuchs:

Im deutschsprachigen Handbuch sind Zahlen mit Dezimalstellen mit einem Dezimalkomma (z.B. 1,02) und nicht wie im Programm mit dem im englischen Sprachraum üblichen Punkt (1.02) dargestellt. Beachten Sie, daß Eingaben in das Programm mit einem Dezimalpunkt erfolgen müssen.

Das Programm beinhaltet neben englischsprachigen Materialdatenbanken (*Default.mtl*, *General.mtl*) auch eine deutschsprachige Materialdatei mit über 200 Baustoffen aus DIN V 4108-4 (*DIN no cap.mtl*). Sollten Sie als Standardmaterialliste "*Default*" diese Datei verwenden, ist zu beachten, daß nach dieser Änderung HEAT2-Eingabedateien mit Materialien aus anderen Materialdatenbanken (z.B. die im Unterverzeichnis *examples* mitgelieferten Beispiele) nicht mehr richtig angezeigt werden können, da das entsprechende Material nicht gefunden wird. Für eine korrekte Anzeige dieser Dateien muß die bei der Eingabe verwendete Materialliste wieder geladen werden (bei den *examples* die englische Materialdatei *Default.mtl*). Beachten Sie auch, daß die Datei *DIN no cap.mtl* keine Wärmekapazitäten enthält und diese bei eventuellen instationären Berechnungen manuell eingegeben werden müssen.

1.2 Einführung in HEAT2

1.2.1 Einsatzmöglichkeiten

HEAT2 ist ein PC-Programm zur Berechnung zweidimensionaler stationärer und instationärer Wärmeleitung innerhalb von Objekten, die durch ein rechtwinkliges Koordinatensystem beschrieben werden können. Es gehört zur neuesten Generation von Computermodellen der schwedischen **Lund Group for Computational Building Physics**.

Das vorliegende Programm ist unter anderem für folgende bauphysikalische Anwendungen geeignet:

allgemeine Probleme der Wärmeleitung
Analyse von Wärmebrücken
Berechnung von U-Werten/Wärmebrückenverlustkoeffizienten von Konstruktionsdetails
Bestimmung von Oberflächentemperaturen (bzw. des Tauwasser- und Schimmelrisikos)
Berechnung des Wärmedurchgangs erdberührter Bauteile
Optimierung von Dämmstoffdicken
Analyse von Fußbodenheizungen
Analyse von Fensterrahmen

Neben HEAT2 gibt es noch zwei ähnliche Programme: HEAT3 für dreidimensionale Wärmeleitung (Blomberg, 1998) und HEAT2R für radialsymmetrische (zylindrische) Koordinaten (Blomberg, 1994).

1.2.2 Programmfunktionen und -merkmale

Im Folgenden finden Sie eine Auflistung einiger verfügbarer Funktionen:

- Eine integrierte Eingabeoberfläche (Preprozessor) erleichtert die Eingabe, siehe hierzu auch Abschnitt 1.2.5.
Die komplette Eingabe eines durchschnittlich komplizierten Beispiels beträgt nach einigen Stunden Einarbeitungszeit in der Regel weniger als 10 Minuten.
- Materialdaten können leicht editiert oder hinzugefügt werden. Es sind mehrere Materialdatenbanken verfügbar, unter anderem eine Datei mit über 200 Baustoffdaten aus DIN V 4108-4 und EN 12524. Weiterhin sind die englischsprachigen Materialdateien *Default.mtl* mit über 200 gebräuchlichen Baustoffen und *General.mtl* mit über 1200 Materialien enthalten.

- Postprozessor mit umfangreichen grafische Fähigkeiten: Darstellung von Geometrie, Baustoffen, Berechnungsnetz, Randbedingungen, Temperatur- und Wärmestromfeldern, Isothermen, 2D- und 3D-Diagrammen; Farb- oder Grautonskala; hohe Druckauflösung. Funktionen wie Zoom, Drehen und Verschieben. Wärmeströme und Temperaturen können während einer Simulation aufgezeichnet oder angezeigt werden. Vektordarstellungen der Wärmeströme erleichtern die Analyse von Wärmebrücken und ermöglichen eine Optimierung der Wärmedämmung in Bereichen mit hohen Wärmeverlusten.
- Ein Rekorder kann Temperaturen und Wärmeströme in ausgewählten Punkten, Wärmeströme durch die Randsegmente, Wärmeströme durch interne Linien oder durch modifizierte interne Flächen (verfügbare Modifikationen siehe Kapitel 5.8) in Intervallen aufzeichnen (stationär oder instationär).
- Es steht eine einfache automatische Netzgenerierung (Diskretisierung) zur Verfügung. Bei Bedarf kann das Netz geändert werden.
- Es können alle aus aneinandergrenzenden oder sich überlappenden Rechtecken zusammengesetzten Konstruktionen mit willkürlichen Materialkombinationen simuliert werden. Dabei können bis zu 62.500 (250·250) Knoten genutzt werden.
- Die Randbedingungen werden durch Wärmeströme oder durch Temperaturen mit zugehörigem Wärmeübergangswiderstand definiert. Für dynamische, d.h. instationäre (transiente) Berechnungen können diese Randbedingungen zeitabhängig in Form von schrittweise konstanten, linearen oder Sinusfunktionen angegeben und auch in verschiedenen Dateiformaten, z.B. EXCEL, importiert werden.
- Verfügbare Modifikationen: Wärmequellen, interne Grenzen mit vorgegebener Temperatur, interne Bereiche mit Luft oder Flüssigkeit einer bestimmten Temperatur, interne Widerstände. Der Strahlungswärmeaustausch innerhalb von Hohlräumen kann berücksichtigt werden. Interne Modifikationen sind für bis zu 100 Flächen möglich (eine Anwendung dieser Funktion ist z.B. die Analyse von Fußbodenheizungen mit vielen Leitungen).
- Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten können in Materialdatenbanken abgespeichert werden.
- Berechnete Temperaturfelder können in Dateien abgespeichert und in andere Programme, z.B. Matlab, importiert werden.
- Temperaturen, Wärmeströme und numerische Elementenummerierungen können für beliebige Koordinaten (x, y) ausgegeben werden.

Das Programm entspricht den Anforderungen der Norm EN ISO 10211 und ermöglicht sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen von Bauteilen und Wärmebrücken. Auf der Grundlage der Norm EN ISO 10077-2 sind auch umfassende Analysen von Fensterrahmen möglich. Eine Berechnung erdberührter Bauteile kann nach der Norm EN ISO 13370 erfolgen.

1.2.3 Kartesische Koordinaten

HEAT2 ermöglicht die Berechnung der meisten mit kartesischen (orthogonalen) Koordinaten beschreibbaren Probleme der Wärmeleitung. Die Beschränkung auf rechtwinklige Koordinaten kann in einigen Fällen eine Einschränkung bedeuten, häufig reduziert sie jedoch die Anzahl der benötigten Eingabedaten. Hinzu kommt, daß das Bauwesen ohnehin oft eine "kartesische Welt" ist. Treten schräge Flächen auf, wie z.B. bei dem Fensterrahmen in Bild 1.1, müssen diese in HEAT2 in rechtwinklige Teile zerlegt (abgetrept) werden. Durch die integrierte Eingabeoberfläche (Preprozessor) ist es jedoch vergleichsweise einfach, Abtreppungen zu zeichnen bzw. einzufügen.

1.2.4 Numerische Methode

HEAT2 löst die Wärmeleitungsgleichungen mit Hilfe der Methode der expliziten finiten Differenzen, welche in Kapitel 3 beschrieben wird. Der Nutzer wählt das Berechnungsnetz; das stabile Zeitintervall (siehe Kapitel 3.6) wird automatisch bestimmt. Für den Fall der stationären Wärmeleitung wird eine schnelle Berechnung durch eine Überrelaxation erreicht.

Die erforderliche Berechnungszeit für ein durchschnittlich schwieriges stationäres Problem mit 10.000 Knoten beträgt auf einem Pentium-PC in der Regel deutlich weniger als eine Minute.

1.2.5 Grafische Eingabeoberfläche (Preprozessor)

Der integrierte Preprozessor ist ein CAD-ähnliches Zeichenprogramm, das die Eingabe einer Vielzahl von Wärmeleitproblemen erleichtert. Die Geometrie wird aus aneinandergrenzenden oder überlappenden Rechtecken willkürlicher Materialien konstruiert. Das geometrische Modell und das Berechnungsnetz werden anschließend automatisch generiert. Vor einer Berechnung müssen noch die Randbedingungen definiert werden.

Folgende Edit-Funktionen sind möglich: Zoom, Zoom auf Fenstergröße, Auswählen, Alle Auswählen aus gleichem Material, Verschieben, In den Vordergrund, In den Hintergrund, Import von Bilddateien (EMF, WMF, BMP, ICO), Import von Objekten aus anderen HEAT2-Eingabedateien, Einfügen von Referenzpunkten.

Bild 1.1 zeigt ein Konstruktionsdetail eines Fensterrahmens. In Bild 1.2 und 1.3 sind die berechneten Temperaturen bzw. Wärmeströme dargestellt.

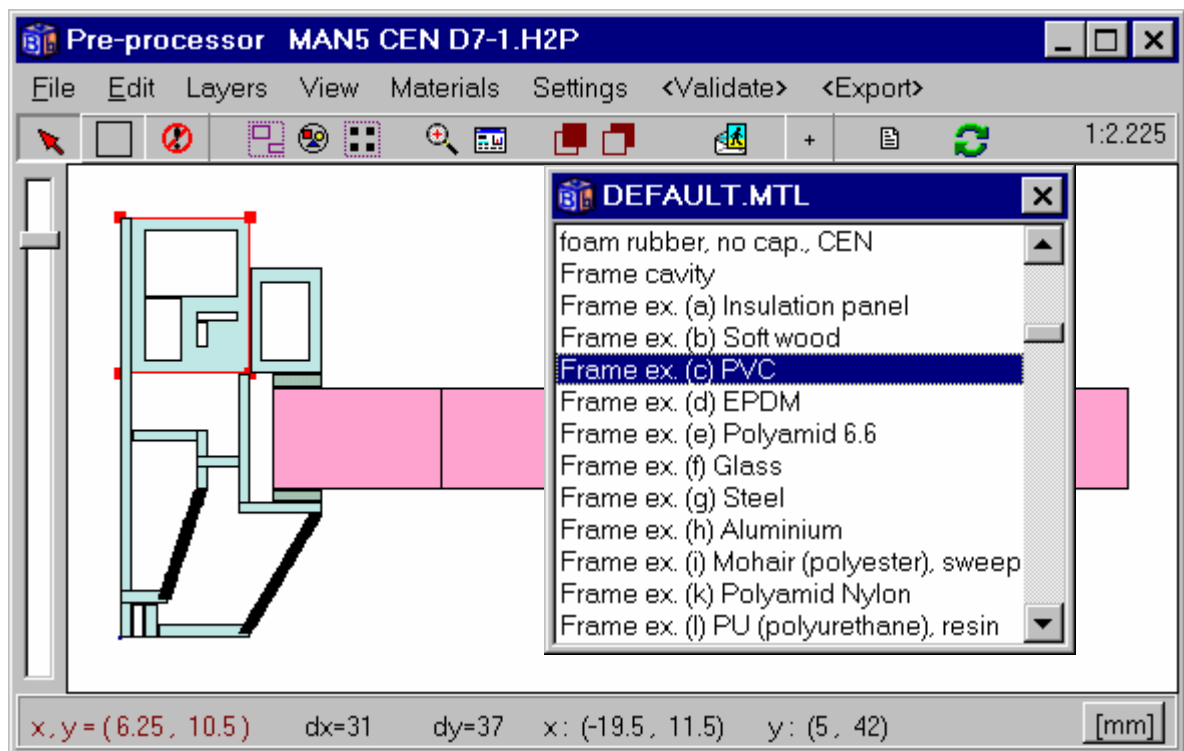


Bild 1.1: Konstruktionsdetail eines Fensterrahmens, gezeichnet mit dem Preprozessor.

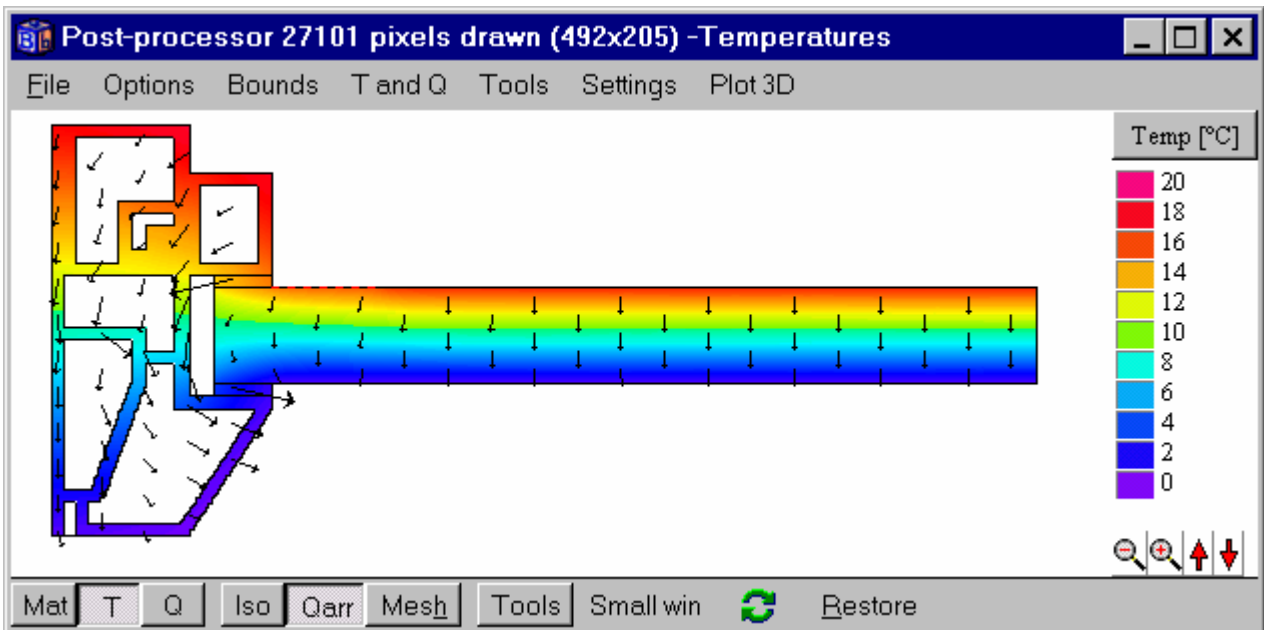


Bild 1.2: Berechnetes Temperaturfeld und Richtung der Wärmeströme.

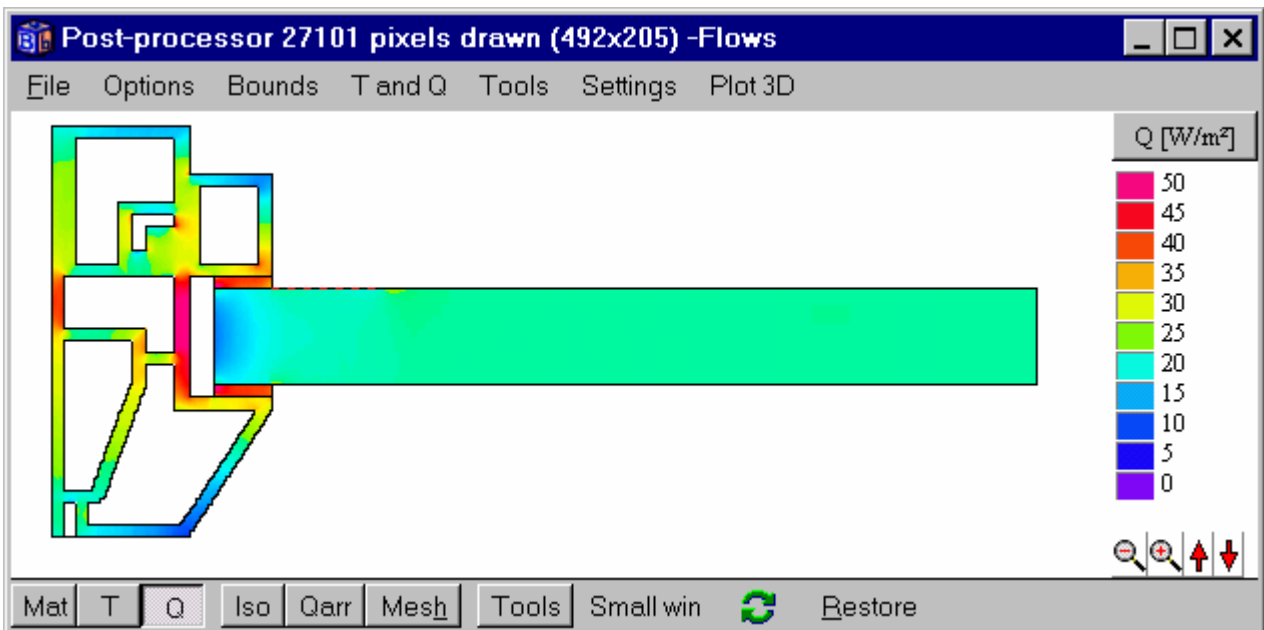


Bild 1.3: Berechnete Wärmestromdichte.

1.3 Update-Info zu HEAT2 Version 5.0

HEAT2 Version 5.0 liest Eingabedateien von früheren Versionen, allerdings können mit Version 5.0 gespeicherte Dateien nicht von älteren Versionen gelesen werden. Die folgende Auflistung zeigt die wichtigsten Neuerungen gegenüber Version 4.0.

1.3.1 Integrierter Preprozessor

Es wurde eine neue CAD-ähnliche Eingabeoberfläche entwickelt (siehe Kapitel 4.1).

1.3.2 Materialdatenbank

Materialeigenschaften können einfacher editiert und hinzugefügt werden. Es stehen Daten für über 1200 Materialien und Baustoffe zur Verfügung (siehe Kapitel 5.2).

1.3.3 Import von Klimadaten

Klimadaten können in verschiedenen Dateiformaten importiert werden (siehe Kapitel 5.9.3).

1.3.4 3D-Flächendiagramm

Es können Flächendiagramme von Temperaturen und Wärmeströmen erzeugt werden (siehe Kapitel 5.18.9).

1.4 Hinweise zum Handbuch

Das Handbuch ist in zwei Teile untergliedert. Der erste Teil beinhaltet die mathematische Beschreibung (Kapitel 2) und die numerische Formulierung (Kapitel 3). Der zweite Teil befaßt sich mit der Dateneingabe sowie der Programmumgebung und zeigt einige Beispiele (Kapitel 4 und folgende). Um das Programm zu nutzen ist es nicht unbedingt notwendig, den ersten Teil zu lesen.

1.5 Systemanforderungen

Voraussetzung ist ein PC mit Pentium-Prozessor (oder gleichwertiger Prozessor), einem Arbeitsspeicher von mindestens 16 MB sowie Windows 95/98/NT/2000.

1.6 Installation

Bevor Sie die Installationsdiskette benutzen, sollten Sie eine Sicherheitskopie erstellen. Zur Installation von HEAT2 starten Sie unter Windows das Programm SETUP.EXE. HEAT2 Version 5.0 wird standardmäßig im Verzeichnis *HEAT2_50* installiert. Gehen Sie bei der Installation wie folgt vor:

1. Starten Sie das SETUP-Programm (SETUP.EXE).
2. Folgen Sie den Anweisungen auf dem Bildschirm.

Es werden folgende Dateien installiert:

- HEAT2.EXE, das Hauptprogramm.
- Dateien mit der Endung MTL, die Materialdatenbanken.
- MTRL50.TXT, eine Datei mit thermischen Eigenschaften, welche editiert werden kann.
- Dateien mit der Endung DAT, HEAT2-Eingabedateien.
- Dateien mit der Endung H2P, mit dem Preprozessor erstellte Dateien.

1.7 Technischer Support

Neuheiten werden durch den Programmautor im Internet unter www.buildingphysics.com bzw. www.blocon.se veröffentlicht. Fragen und Kommentare an den Autor können per eMail an info@blocon.se gesendet werden.

Eine deutschsprachige Webseite steht unter www.buildingphysics.de zur Verfügung. Deutschsprachigen Support (sofern vereinbart) erhalten über den deutschen Supportpartner:

Dipl.-Ing. Sabine Grosch

Fortunastraße 5 , D-03054 Cottbus

Internet: www.buildingphysics.de

eMail: info@buildingphysics.de

Fax: (0355) 823556 (innerhalb Deutschlands) bzw. +49 355 823556 aus dem Ausland

Supportanfragen richten Sie an uns bitte ausschließlich per **eMail** oder **Fax**. Sofern erforderlich, rufen wir Sie telefonisch zurück.

2. Mathematische Beschreibung

2.1 Differentialgleichungen der Wärmeleitung

Die gültige partielle Differentialgleichung zur zweidimensionalen Wärmeleitung für die Temperatur $T(x,y,t)$ lautet:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + I(x, y, t) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Hierbei ist I [Einheit W/m^3] der Anteil der internen Wärmequellen. λ_x and λ_y [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] bezeichnen die Wärmeleitfähigkeiten in x- bzw. y-Richtung. Die volumenbezogene Wärmekapazität wird als C bezeichnet [$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$] und ergibt sich aus dem Produkt der Dichte ρ [kg/m^3] und der spezifischen Wärmekapazität c_p [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], d.h. $C = \rho \cdot c_p$. Die Wärmeleitfähigkeit ist in beiden Richtungen in der Regel gleich ($\lambda_x = \lambda_y$). Die interne Wärmeerzeugung ist meist gleich Null. Im Fall der stationären Wärmeleitung ist die rechte Seite der Gleichung (2.1) Null.

2.2 Randbedingungen

Es gibt zwei Hauptarten von Randbedingungen, die auf die Randsegmente (*boundary segments* = *b.s.*) bzw. Oberflächen (*surface* = *surf*) angewandt werden können. Die erste Art besteht aus einer vorgegebenen Umgebungstemperatur $T_{b.s.}(t)$ und dem Wärmeübergangswiderstand R [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]:

$$T_{b.s.}(t) - T|_{surf} = R \cdot (-\lambda) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{surf} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.2)$$

Hierbei ist $\partial T / \partial n$ der Differentialquotient in Richtung der Normalen.

Die zweite Art ist durch einen vorgegebenen Wärmestrom in die betrachtete Region definiert:

$$(-\lambda) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{b.s.} = f(t) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.3)$$

Bild 2.1 zeigt eine interne Grenzfläche, die zwei Materialien unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit λ_1 und λ_2 trennt. Die Temperatur an der Grenzfläche ist stetig. Die Normale zur Grenzfläche wird mit \hat{n} bezeichnet. Der Wärmestrom über die Grenzfläche ist ebenfalls stetig. Der Zustand des stetigen Wärmestroms senkrecht zur Grenzfläche kann wie folgt beschrieben werden:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_1 = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_2 \quad (2.4)$$

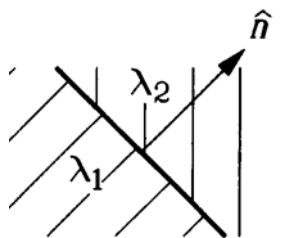


Bild 2.1: Normale \hat{n} an einer internen Grenzfläche.

Es kann einen Kontaktwiderstand R_{ins} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] zwischen zwei Bereichen geben, siehe Bild 2.2. In diesem Fall sind die Temperaturen auf den beiden Seiten des Kontaktwiderstandes unterschiedlich. Der Zustand für den stetigen Wärmestrom an dieser internen "Dämmung" (*insulation = ins*) ist durch folgende Differenzialgleichung definiert:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_2 = \frac{T|_2 - T|_1}{R_{ins}} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_1 \quad (2.5)$$

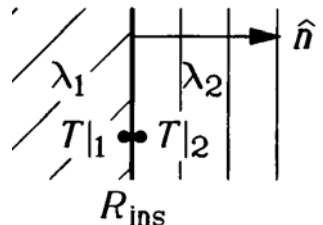


Bild 2.2: Fall mit internem Widerstand R_{ins} (interne Dämmung)

2.3 Anfangsbedingungen

Die Ausgangstemperaturverteilung zur Zeit $t = t_{start}$ wird bei zweidimensionaler Betrachtung mit $T(x, y, t_{start})$ bezeichnet. Bei stationären Berechnungen sind die Anfangstemperaturen für die Lösung nicht relevant.

2.4 Bereiche mit Flüssigkeiten oder Gasen

In Bild 2.3 ist eine Grenzfläche S dargestellt, die einen internen, mit Flüssigkeit oder Gas gefüllten Bereich umschließt. Das Fluid besitzt eine definierte volumenbezogene Wärmekapazität C_{fluid} [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]. Die nach innen gerichtete Normale für den Bereich wird mit \hat{n} bezeichnet und das Volumen des Fluids mit V_{fluid} [m^3]. Den Wärmestrom *in* das Gebiet Q_{in} [W] erhält man durch ein Integral über die Grenzfläche S . Der Wärmestrom entspricht der Anstiegsrate des Wärmegehalts im Fluid:

$$Q_{in} = \oint -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS = C_{fluid} \cdot V_{fluid} \frac{\partial T_{fluid}}{\partial t} \quad [\text{W}] \quad (2.6)$$

Für den Fall eines luftgefüllten Hohlraums kann die Wärmekapazität vernachlässigt werden und die rechte Seite der Gleichung (2.6) wird Null.

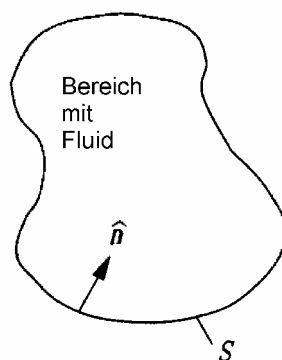


Bild 2.3: Bereich mit Fluid, eingeschlossen durch die Grenzfläche S .

2.5 Mit Strahlung gekoppelte Wärmeleitung in Hohlräumen

Wärmeleitung in Bauteilen, gekoppelt mit dem Austausch langwelliger Wärmestrahlung in luftgefüllten Hohlräumen, ist ein häufig auftretender und untersuchter Vorgang in der Bauphysik. Die numerische Simulation dieser Kopplung stellt jedoch ein besonderes Problem dar. Für jeden Zeitschritt muß ein Gleichungssystem für den Strahlungswärmeaustausch, gekoppelt an die Wärmeübertragung durch Konvektion im Hohlraum und die Wärmeleitung zu den Knoten des Berechnungnetzes, gelöst werden.

Eine systematische Analyse dieses Problems ist in der Dissertation des Programmautors (Blomberg, 1996) dargestellt. Die Anzahl der ursprünglichen $(2N+1)$ Gleichungen wird so weit wie möglich reduziert (auf N Gleichungen). Die endgültigen Formeln, insbesondere der iterative Prozeß der Berechnung der Nicht-Linearität aufgrund der 4. Potenz des Strahlungsgesetzes, werden so formuliert, daß sie für ein Computermodell geeignet sind.

3. Numerische Formulierung

3.1 Einführung

Bei der numerischen Formulierung wird die partielle Differentialgleichung durch eine diskrete Näherung (Differenzgleichung) ersetzt. Das Temperaturfeld wird näherungsweise durch Werte an diskreten Punkten (Knotenpunkten) beschrieben. Daraus ergibt sich ein numerisch lösbares Netz aus Knotenpunkten. Dieses Feld wird in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen mit einem Zeitinkrement Δt betrachtet. Im vorliegenden Fall wird nur eine kartesische (orthogonale) örtliche Diskretisierung verwendet. Die Entfernungen der Berechnungspunkte in x- bzw. y-Richtung werden mit Δx_i bzw. Δy_j bezeichnet. Je kleiner die Intervalle sind, desto besser ist die Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnisse und der "tatsächlichen" Temperaturverteilung.

3.2 Berechnungsnetz

Bild 3.1 zeigt ein zweidimensionales Objekt (d.h. eine Fläche), welches in x- und y-Richtung in Intervalle unterteilt ist. Das rechtwinklige (orthogonale) Raster kann aus Rechenzellen unterschiedlicher Größe bestehen. Die Breite und Höhe der Zellen (i,j) werden mit Δx_i bzw. Δy_j bezeichnet. Die Temperatur im Mittelpunkt der Zelle (i,j) im betrachteten Zeitschritt wird mit $T_{i,j}$ bezeichnet.

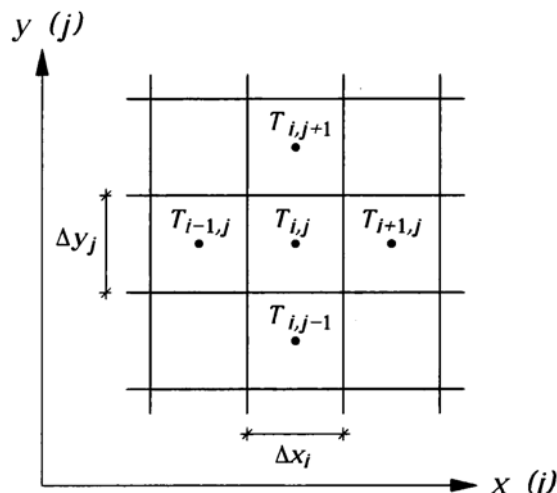


Bild 3.1: Berechnungsraster mit einzelnen Zellen und den zugehörigen Knotenpunkten.

3.3 Wärmeleitwerte

Die thermische Kopplung zwischen den einzelnen Zellen des numerischen Rasters (Berechnungsnetzes) wird durch Wärmeleitwerte beschrieben. Bild 3.2 zeigt die Wärmeleitwerte zwischen einzelnen Zellen bzw. Knotenpunkten mit den entsprechenden Indizes.

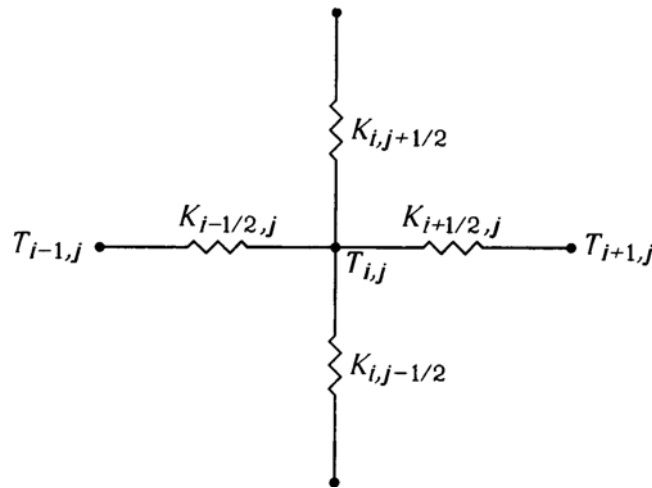


Bild 3.2: Wärmeleitwerte zwischen der Zelle (i,j) und den Nachbarzellen.

Der Wärmeleitwert pro Längeneinheit senkrecht zur (x,y) -Ebene zwischen den beiden Zellen $(i-1,j)$ und (i,j) wird mit $K_{i-1/2,j}$ [W/(m·K)] bezeichnet. Er berechnet sich aus:

$$K_{i-1/2,j} = \frac{\Delta y_j}{\Delta x_{i-1} / (2 \cdot \lambda_{xi-1,j}) + \Delta x_i / (2 \cdot \lambda_{xi,j}) + R_{i-1/2,j}} \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad (3.1)$$

Hierbei ist $\lambda_{xi,j}$ die Wärmeleitfähigkeit der Zelle (i,j) in x-Richtung. Der Wärmeleitwert bezieht sich auf den Gesamtwärmestrom durch die Seite Δy_j pro Längeneinheit. Der erste Term im Nenner ist der thermische Widerstand in x-Richtung für die Hälfte der Zelle $(i-1,j)$, der zweite Term ist der Widerstand für die Hälfte der Zelle (i,j) . Der dritte Term $R_{i-1/2,j}$ [m²·K/W] bezeichnet einen optionalen zusätzlichen Wärmedurchlaßwiderstand an der Kontaktfläche zwischen den zwei Zellen $(i-1,j)$ und (i,j) - siehe Bild 3.3.

Für die in Bild 3.5 gezeigte Randzelle $(1,j)$, die an der Grenze des geometrischen Modells liegt, berechnet sich der Wärmeleitwert $K_{1/2,j}$ aus:

$$K_{1/2,j} = \frac{\Delta y_j}{\Delta x_1 / (2 \cdot \lambda_{xi,j}) + R_{1/2,j}} \quad [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})] \quad (3.2)$$

$R_{1/2,j}$ [m²·K/W] bezeichnet den Wärmeübergangswiderstand an der Modellgrenze (Randfläche).

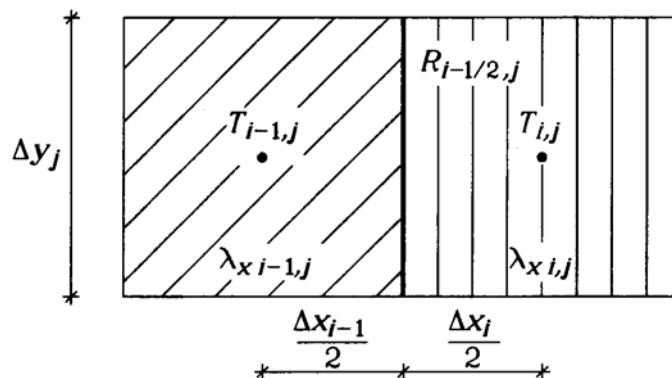


Bild 3.3: Zusätzlicher Wärmedurchlaßwiderstand zwischen den Zellen $(i-1,j)$ und (i,j) .

3.4 Wärmeströme

Bild 3.4 zeigt die einer internen Zelle zugeordneten Wärmeströme.

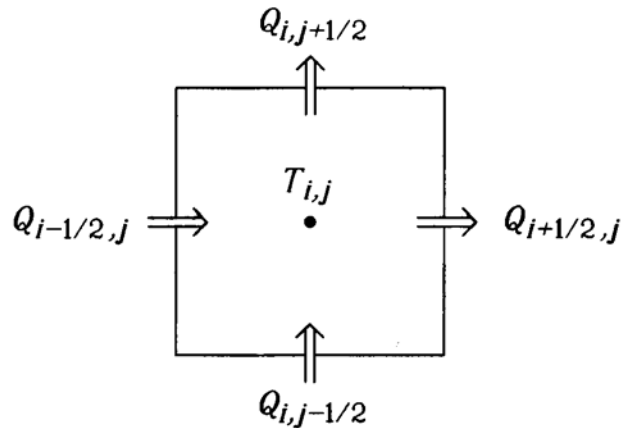


Bild 3.4: Wärmeströme der Zelle (i,j)

Der Wärmestrom durch die linke Grenze $Q_{i-1/2,j}$ [W/m] ergibt sich aus:

$$Q_{i-1/2,j} = K_{i-1/2,j} \cdot (T_{i-1,j} - T_{i,j}) \quad [\text{W/m}] \quad (3.3)$$

Der Wärmestrom durch die untere Grenze $Q_{i,j-1/2}$ ist:

$$Q_{i,j-1/2} = K_{i,j-1/2} \cdot (T_{i,j-1} - T_{i,j}) \quad [\text{W/m}] \quad (3.4)$$

Der Wärmestrom durch die Randzellen wird durch die Randbedingungen bestimmt. Betrachten wir zum Beispiel die Randzelle $(1,j)$ in Bild 3.5. Wenn eine Temperatur-Randbedingung gegeben ist, dann wird die Gleichung (3.3) abgewandelt zu:

$$Q_{1/2,j} = K_{1/2,j} \cdot (T_{b.s.}(t) - T_{1,j}) \quad [\text{W/m}] \quad (3.5)$$

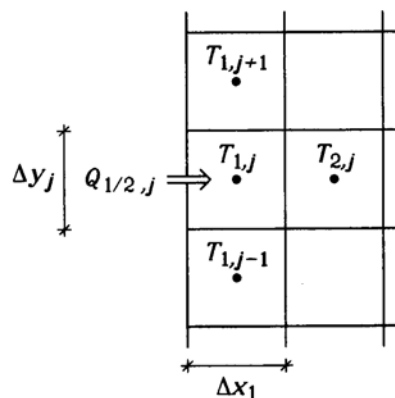


Bild 3.5: Wärmestrom $Q_{1/2,j}$ durch die äußere Grenze der Randzelle $(1,j)$

Ist als Randbedingung ein Wärmestrom $q_{b.s.}$ [W/m²] gegeben, dann ergibt sich der Wärmestrom pro Längeneinheit senkrecht zur (x,y) -Ebene zu:

$$Q_{1/2,j} = q_{b.s.}(t) \cdot \Delta y_j \quad [\text{W/m}] \quad (3.6)$$

Die Summe der Wärmeströme während eines Zeitschritts Δt für das linke Randsegment, zu dem die Zelle (i,j) gehört, beträgt:

$$E_{b.s.}^{new} = E_{b.s.} + \Delta t \cdot \sum_j Q_{1/2,j} \quad [\text{J/m}] \quad (3.7)$$

Bei der Summenbildung werden alle Zellen berücksichtigt, die zum betreffenden Randsegment gehören.

3.5 Neue Temperaturen

Die Wärmekapazität der Zelle (i,j) ergibt sich aus $C_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j$ und ist bezogen auf eine Längeneinheit senkrecht zur (x,y) -Ebene. $C_{i,j}$ [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$] ist die volumenbezogene Wärmekapazität der Zelle (i,j) .

Die Energiezunahme einer interner Zelle während des Zeitschritts Δt wird durch die unten dargestellte Energiebilanzgleichung (3.8) beschrieben. In der Gleichung ist $T_{i,j}$ die alte Temperatur (vor dem Zeitschritt) der Zelle (i,j) und $T_{i,j}^{new}$ die neue (nach dem Zeitschritt). Die zeitliche Entwicklung wird mit Hilfe des Zeitintervalls Δt beschrieben; die neue Zeit ergibt sich aus $t^{new} = t + \Delta t$.

Die Wärmeerzeugung innerhalb der Zelle (i,j) wird mit $I_{i,j}$ [W/m^3] bezeichnet. Ein negativer Wert zeigt einen Wärmeentzug an. Die interne Wärmeerzeugung ist häufig Null.

$$C_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j \cdot (T_{i,j}^{new} - T_{i,j}) = (Q_{i-1/2,j} - Q_{i+1/2,j} + Q_{i,j-1/2} - Q_{i,j+1/2} + I_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j) \cdot \Delta t \quad (3.8)$$

Die Endgleichung für die neue Temperatur ergibt sich zu:

$$T_{i,j}^{new} = T_{i,j} + \frac{\Delta t}{C_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j} (Q_{i-1/2,j} - Q_{i+1/2,j} + Q_{i,j-1/2} - Q_{i,j+1/2} + I_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j) \quad (3.9)$$

3.6 Wahl des Zeitintervalls

Ein stabiles Zeitintervall Δt für die Zelle (i,j) wird durch folgendes Stabilitätskriterium beschrieben:

$$\Delta t < \frac{C_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j}{K_{i-1/2,j} + K_{i+1/2,j} + K_{i,j-1/2} + K_{i,j+1/2}} \quad \text{für alle } i \text{ und } j \quad (3.10)$$

Dieses Kriterium muß bei allen Zellen (i,j) erfüllt sein. Um die Stabilität zu garantieren, wird das kleinste ermittelte Zeitintervall aller Zellen verwendet. Die Analyse, die zu diesem Kriterium führt, wird in der vorliegenden Programmbeschreibung nicht näher erläutert. Einzelheiten siehe (Efring, 1990).

3.7 Iterative Berechnung

Nach Gleichung (3.9) wird die neue Temperatur auf der Grundlage der Energiebilanz im Zeitintervall Δt ermittelt. Diese Berechnung wird für alle Zellen durchgeführt. Aus den aktualisierten Temperaturen ergeben sich nach den Gleichungen (3.3) - (3.6) die Wärmeströme zwischen den Zellen, welche ihrerseits wieder die Temperaturen ändern, und so weiter.

3.8 Stationärer Fall

Instationäre Probleme werden mit der oben dargestellten expliziten Finite-Differenzen-Methode mit "Vorwärts-Differenzen-Bildung" gelöst. Das bedeutet, daß die Temperaturen aus dem letzten Zeitschritt verwendet werden, um die Wärmeströme zu ermitteln. Die neuen Temperaturen $T_{i,j}^{new}$ ergeben sich dann aus der Gleichung (3.9).

Im Fall der stationären Wärmeleitung wird die Methode der sukzessiven Überrelaxation verwendet (siehe Hirsch, 1992). Die Temperaturen werden hierbei in gleicher Weise ermittelt wie bei dem expliziten Differenzenverfahren mit Vorwärts-Differenzen-Bildung, aber in den Formeln werden die neuen Temperaturen so verwendet wie sie entstehen. Die Berechnung der Temperaturen erfolgt unter Verwendung eines Überrelaxationsfaktors ω , dessen Wert zwischen 1,0 und 2,0 liegt. Ein optimierter ω -Wert kann zu Berechnungszeiten führen, die nur 1/50 bis 1/10 der Zeit einer Berechnung ohne Überrelaxation ($\omega=1,0$) betragen. Der optimierte ω -Wert liegt meist zwischen 1,8 und 2,0. In HEAT2 wird für ω eine Voreinstellung von 1,95 verwendet.

Gleichung (3.9) wird für den stationären Fall abgewandelt zu:

$$T_{i,j}^{new} = T_{i,j} + \frac{\Delta t \cdot \omega}{C_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j} (Q_{i-1/2,j} - Q_{i+1/2,j} + Q_{i,j-1/2} - Q_{i,j+1/2} + I_{i,j} \Delta x_i \Delta y_j) \quad (3.11)$$

Die Wärmekapazitäten der Zellen spielen bei stationärer Wärmeleitung keine Rolle. Das stabile Zeitintervall für jede Zelle bestimmt den Zeitrahmen für Temperaturänderungen innerhalb der Zelle. Es ist besser, wenn alle Zellen den gleichen stabilen Zeitabschnitt haben, d.h. die thermische Reaktionszeit für jede Zelle gleich ist. Dementsprechend werden die Wärmekapazitäten $C_{i,j}$ so gewählt, daß sich für alle Zellen das gleiche Zeitintervall ergibt. Die Wärmekapazitäten werden bestimmt, indem man Δt der rechten Seite in Gleichung (3.10) gleichsetzt. Die Kapazitäten ergeben sich somit zu:

$$C_{i,j} = \Delta t \cdot \frac{K_{i-1/2,j} + K_{i+1/2,j} + K_{i,j-1/2} + K_{i,j+1/2}}{\Delta x_i \Delta y_j} \quad (3.12)$$

Tatsächlich spielt die Wahl von Δt bei stationären Berechnungen keine Rolle, da sich der Wert aus Gleichung (3.11) herauskürzt.

3.9 Interne Bereiche mit Flüssigkeiten oder Gasen

In einigen Fällen ist es erforderlich, ein internes Gebiet mit Flüssigkeit oder Luft zu simulieren. Ein Beispiel hierfür sind z.B. wassergefüllte Hohlräume, die als Wärmespeicher verwendet werden.

Bei der Modellierung eines internen fluidgefüllten Bereichs werden zwei Fälle betrachtet:

- a) das Fluid besitzt eine Wärmekapazität (Flüssigkeit) oder
- b) das Fluid besitzt eine Wärmekapazität, die vernachlässigt werden kann (z.B. Luft).

Für ein gegebenes Volumen V_{fluid} mit einer volumenbezogenen Wärmekapazität C_{fluid} , berechnet sich die Temperatur des Fluids T_{fluid} aus der Energiebilanzgleichung unter Einbeziehung der umgebenden Zellen. Aus Gleichung (2.6) ergibt sich folgende diskrete Näherung:

$$C_{fluid} \cdot V_{fluid} \cdot (T_{fluid}^{new} - T_{fluid}) = \sum_{n=1}^N K_n \cdot (T_n - T_{fluid}) \cdot \Delta t \quad (3.13)$$

Die Temperaturen in den an den Fluidbereich angrenzenden Zellen werden mit T_n bezeichnet. Der Wärmeleitwert zwischen dem Zentrum der entsprechenden Zelle und der Flüssigkeit wird mit K_n bezeichnet. Bei der Berechnung der neuen Flüssigkeitstemperatur T_{fluid}^{new} werden alle Zellen N berücksichtigt, die das Fluidvolumen einschließen.

Luft kann näherungsweise als Fluid mit einer vernachlässigbaren Wärmekapazität betrachtet werden. Die Lufttemperatur T_a in einem internen Bereich ergibt sich als Durchschnitt der Temperaturen der umgebenden Zellen:

$$T_a = \frac{\sum_{n=1}^N (K_n \cdot T_n)}{\sum_{n=1}^N K_n} \quad (3.14)$$

4. Eingabe im Überblick

Im Folgenden wird an einem einfachen Beispiel ein Überblick über die Eingabe und die anschließende Berechnung gegeben.

4.1 Eingabeoberfläche (Preprozessor)

Bild 4.1 zeigt zwei mit dem Preprozessor gezeichnete Rechtecke. In der Symbolleiste oben im Bild ist der Pfeil aktiviert, mit dem Zeichenobjekte ausgewählt werden können. In der Statusleiste am unteren Bildrand sind links die Koordinaten x,y des Mauszeigers dargestellt. Für das ausgewählte Objekt, in diesem Fall das rechte Rechteck, werden außerdem die Breite ($dx = 0,8$) und die Höhe ($dy = 0,3$) angegeben. Weiterhin werden die absoluten Koordinaten in x - und y -Richtung dargestellt ($x = 0,5$ bis $1,3$ und $y = 0,5$ bis $1,8$). Im vorliegenden Fall wurde in der linken unteren Ecke des linken (roten) Rechtecks ein sogenannter *Referenzpunkt* (Koordinatenbezugspunkt) plaziert.

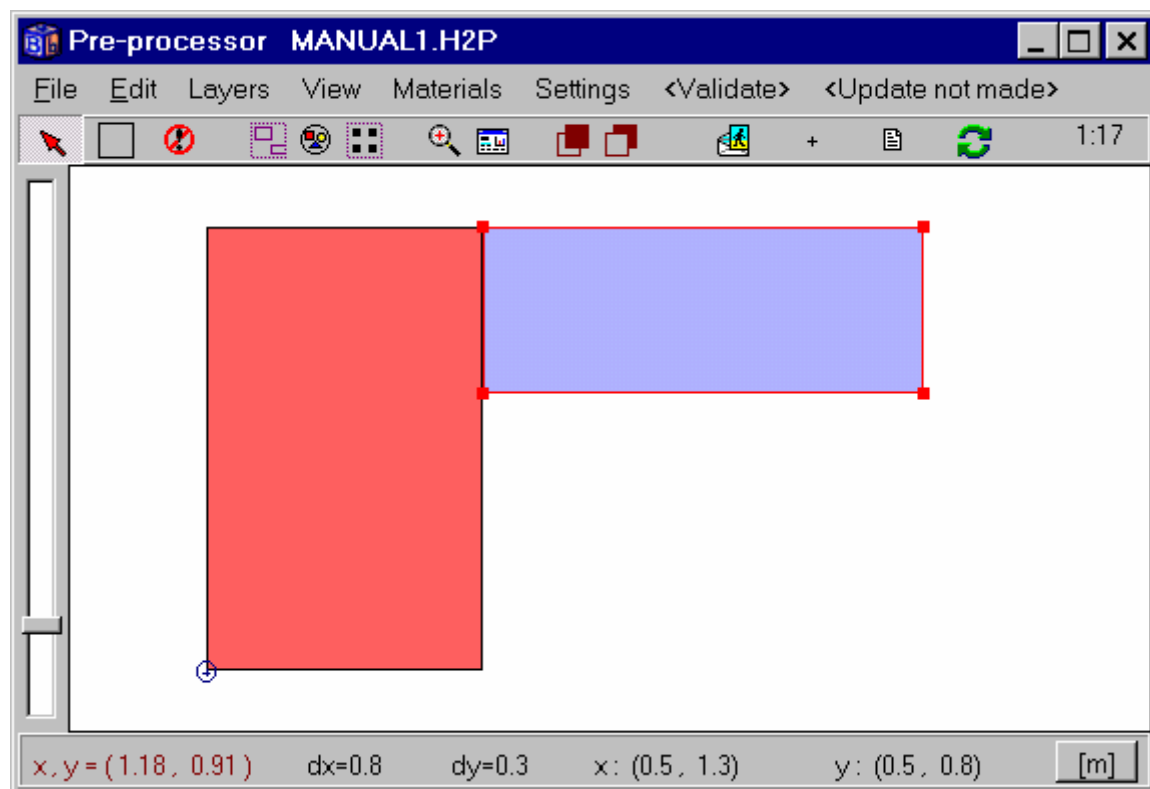


Bild 4.1: Zwei im Preprozessor gezeichnete Materialrechtecke.

Materialien bzw. Baustoffe werden aus einer Materialliste (Materialdatenbank) ausgewählt, siehe Bild 4.2 (links). Bei Doppelklick auf ein Materialrechteck öffnet sich ein Fenster mit Angaben zum Materialnamen und zu den physikalischen Eigenschaften, siehe Bild 4.2 (rechts).

Nach dem Zeichnen der Detailgeometrie mit der Eingabeoberfläche, muß sie für die numerische Berechnung mit HEAT2 aufbereitet werden. Dies erfolgt durch Anklicken von *<Update not made>*, rechts in der Menüleiste. Das vollständige *Eingabernetz (input mesh)* wird dabei automatisch generiert, gleichzeitig werden die äußeren Grenzen erkannt. Bild 4.3 zeigt das erzeugte Eingabernetz sowie die Nummern und Längen der Randsegmente in der grafischen Ausgabe (Postprozessor).

Das Berechnungsnetz enthält neben den Konstruktionsachsen, welche die Materialrechtecke definieren, auch zusätzliche Hilfsachsen, die das geometrische Modell in kleinere Zellen unterteilen. Die Hilfsachsen sind äquidistant verteilt. Die maximale Anzahl der Achsen richtet sich nach den Einstellungen im Preprozessor, Menüpunkt *Settings/Numerical mesh* und beträgt im vorliegenden Fall 50·50. Das Berechnungsnetz kann bei Bedarf später geändert werden.

Bevor eine Simulation erfolgen kann, müssen den Randsegmenten nun noch die Randbedingungen zugeordnet werden.

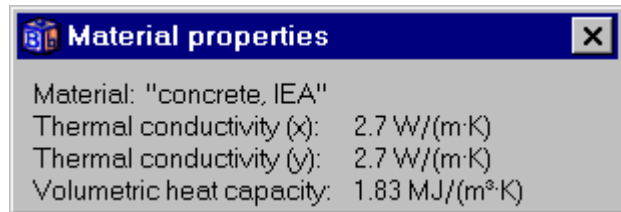


Bild 4.2: Materialliste DEFAULT.MTL (links). Nach Doppelklick auf ein Materialrechteck öffnet sich ein Fenster mit dem Materialnamen und den Eigenschaften (rechts).

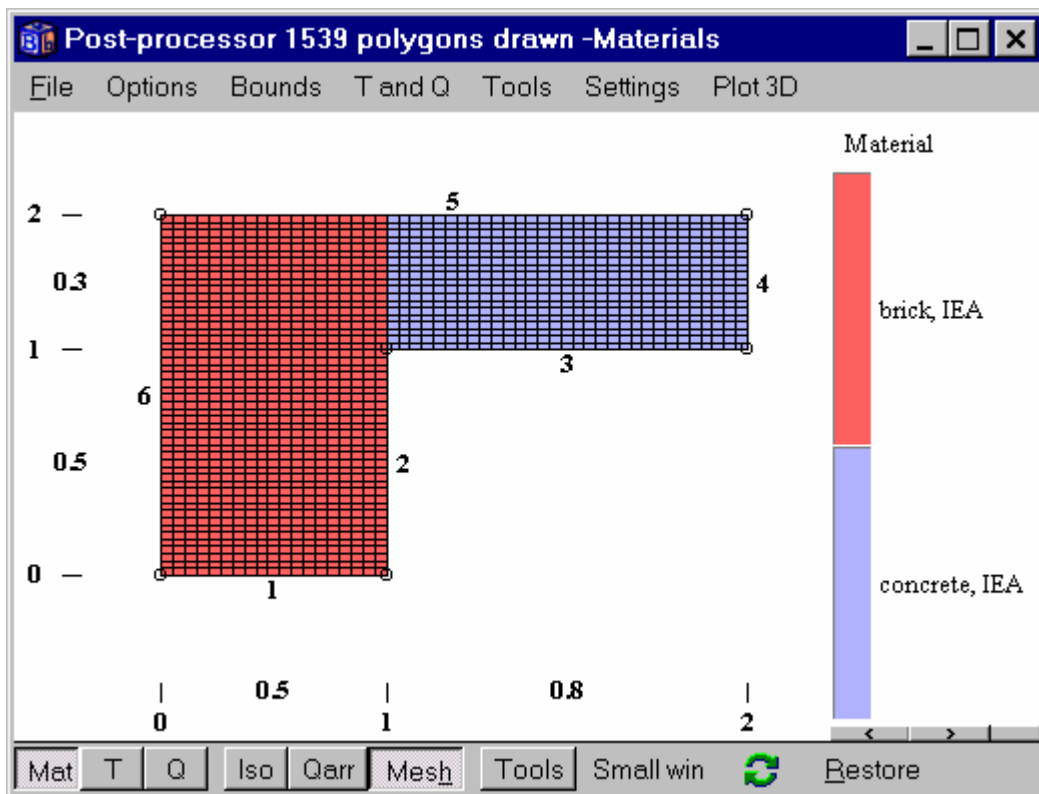


Bild 4.3: Grafische Ausgabe (Postprozessor) mit dem erzeugten Berechnungsnetz sowie Längenangaben und Nummerierungen der Randsegmente.

4.2 Randbedingungen

Es können verschiedene Randbedingungen ("Boundary condition *types*") definiert werden. Randbedingungen können entweder eine Lufttemperatur T [°C] mit einem zugehörigen Wärmeübergangswiderstand R [m²·K/W] oder ein vorgegebener Wärmestrom q [W/m²] sein. Die Temperaturen bzw. Wärmeströme können entweder zeitlich konstant (stationär) sein oder einen zeitabhängigen (instationären) Verlauf in Form einer Sinusfunktion oder einer schrittweise konstanten bzw. einer schrittweise linearen Funktion haben (Funktionen siehe Abschnitt 5.9).

Der Benutzer definiert die Randbedingungen in einer Liste und weist diese den Randsegmenten zu. Betrachten wir Bild 4.4. In diesem Fall gibt es drei Randbedingungen mit den Nummern $n = 1, 2$ und 3 (erste Spalte). Die dritte Spalte zeigt die Randsegmente, denen jeweils eine bestimmte Art von

Randbedingungen zugeordnet ist (die Nummern der Randsegmente sind in der Grafik außerhalb der Rechenfläche dargestellt). Standardmäßig gilt für alle nicht anders definierten Randsegmente der erste Typ der Randbedingungen. Den Randsegmenten 2 und 3 ist im vorliegenden Fall die Randbedingung 2 ($T = 20\text{ °C}$, $R_s = 0,13\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) zugeordnet. Den Randsegmenten 5 und 6 ist der Typ 3 zugeordnet ($T = 0\text{ °C}$, $R_s = 0,04\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$). Für alle anderen Randsegmente (in diesem Fall 1 und 4) gilt der Standardtyp 1, d.h. hier eine adiabate Randbedingung ($q = 0$).

Falls einem Randsegment mehrere Randbedingungen zugeordnet wurden, gilt jeweils die letzte Zuordnung.

Die verwendeten Randbedingungen können im Postprozessor auch grafisch gezeigt werden, siehe Bild 4.5.

n	type	Bounds	function	Q [W/m2]	Temp [C]	Res. [m2K/W]
1	Q=const	Default		0.00000		
2	T=const	2 3			20.00000	0.130000
3	T=const	5 6			0.00000	0.040000

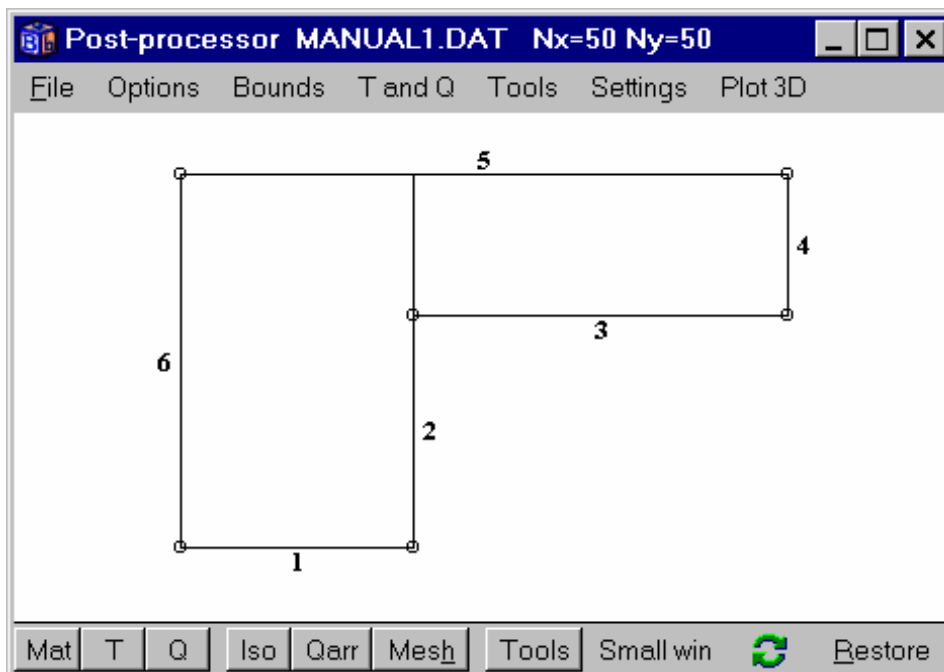


Bild 4.4: Zuordnung der Randbedingungen zu den entsprechenden Randsegmenten 1 bis 6 (oben: Randbedingungen, unten: Numerierung der Randsegmente).

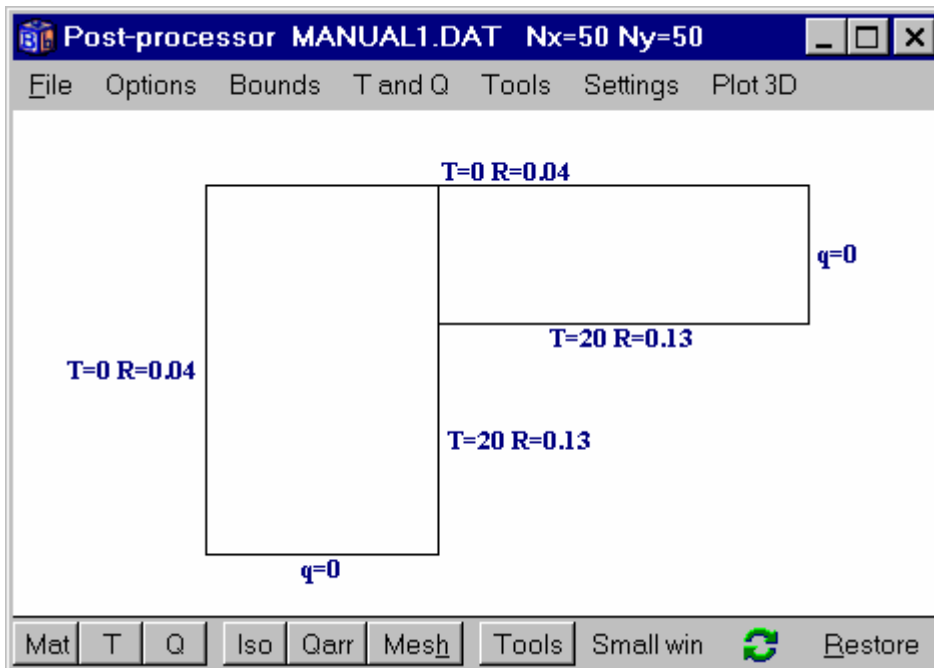


Bild 4.5: Anzeige der Werte der Randbedingungen über die Menüoption *Bounds/BC type values*.

4.3 Berechnung eines stationären Problems

Um eine stationäre Berechnung zu starten, wählen Sie *Solve/Start steady-state calculation*. Es öffnet sich ein Fenster mit verschiedenen Informationen, wie z.B. dem gewählten Stop-Kriterium, der Anzahl der Iterationen sowie einer Fehlerbetrachtung für die ermittelten Temperaturen bzw. Wärmeströme (Bild 4.6). Bild 4.7 zeigt das berechnete Temperaturfeld und den Isothermenverlauf. Die Wärmeströme über die Randsegmente können im Postprozessor über *Bounds/Heat flows* angezeigt werden. Es kann auch eine Liste der Wärmeströme erzeugt werden (*Output/Boundary flows*), Bild 4.8.

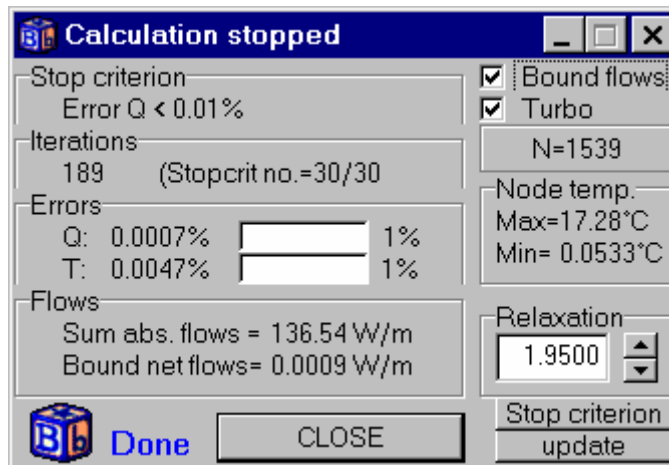


Bild 4.6: Berechnungsfenster bei einer stationären Berechnung.

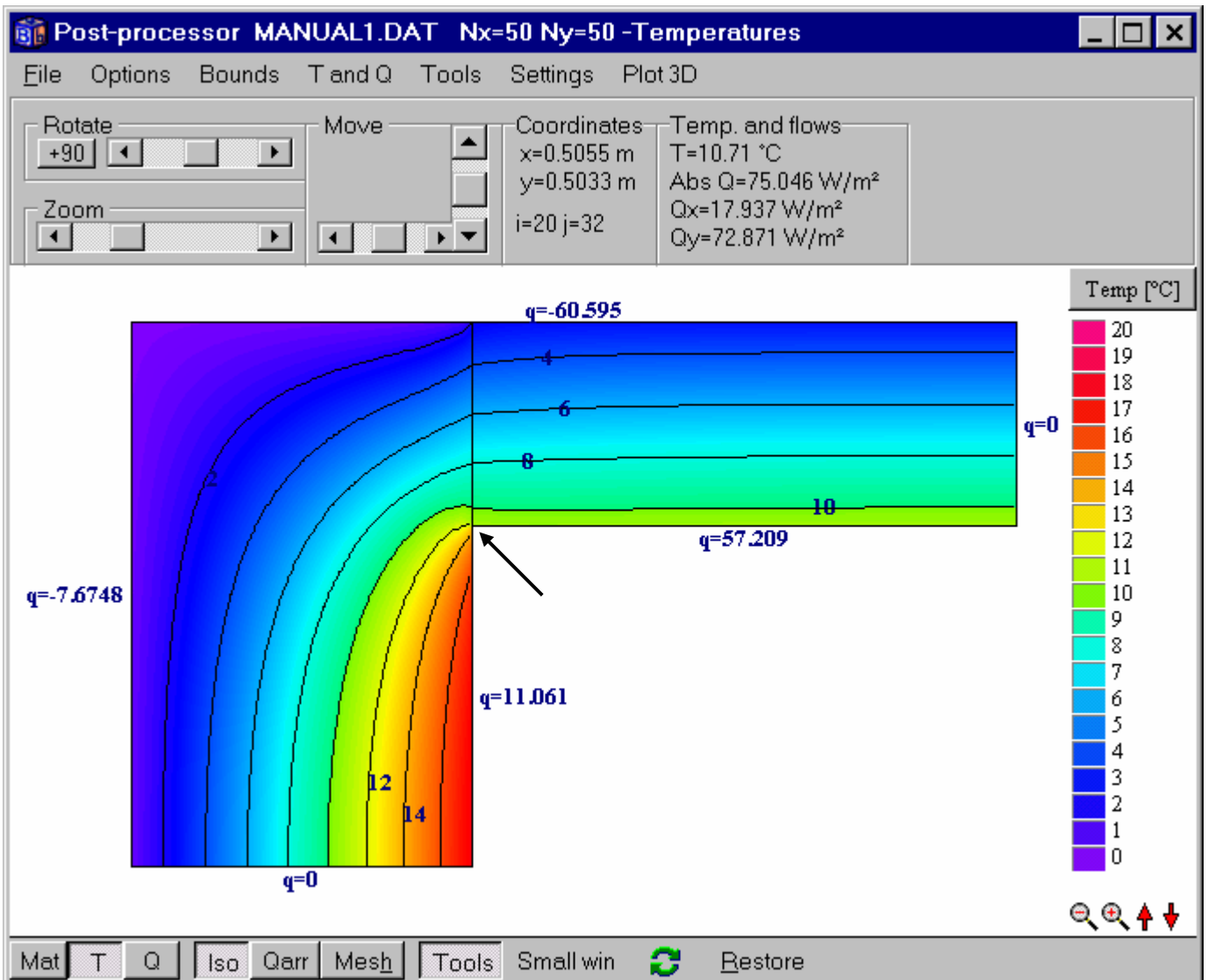


Bild 4.7: Berechnetes Temperaturfeld und Isothermenverlauf. Die obere Werkzeugleiste (Menüpunkt *Tools/Upper toolbar visible*) zeigt die Optionen zum Drehen, Zoomen und Verschieben der Grafik sowie die Koordinaten des Mauszeigers mit den zugehörigen Temperaturen und Wärmeströmen.

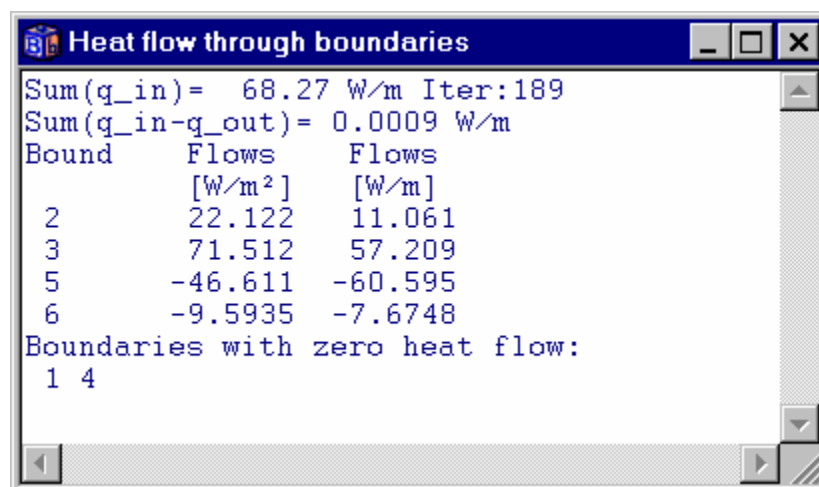


Bild 4.8: Wärmeströme über die Ränder.

4.4 Berechnung eines instationären Problems

Im folgenden Beispiel wird für die betrachtete Ecke eine instationäre (transiente) Berechnung durchgeführt. Für die Außenseite der Ecke sind die Randbedingungen in Form einer Sinusfunktion gegeben. Zunächst wird unter *Input/Functions/Function 1* die Sinusfunktion mit einer Tagesschwankung zwischen 0 und 20 °C und dem Maximum um 12 Uhr definiert, siehe Bild 4.9.

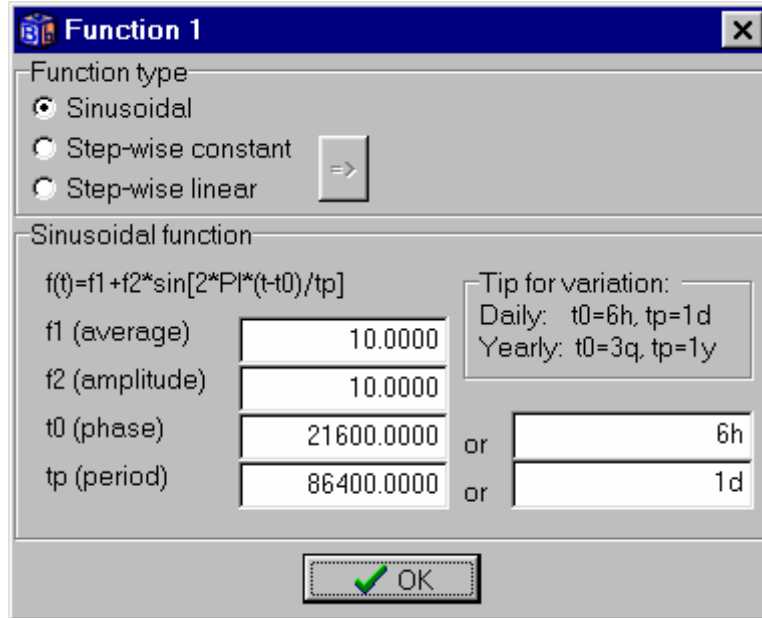


Bild 4.9: Eingabe einer Sinusfunktion mit einer Tagesschwankung zwischen 0 und 20 °C mit dem Maximum um 12 Uhr. Die Zeit für die Phasenverschiebung und die Periodendauer kann entweder in Sekunden oder mit Hilfe eines Zeitstrings (y-Jahr, q-Monat, d-Tag, h-Stunde, s-Sekunde) angegeben werden.

Der nächste Schritt ist die Kopplung der Funktion an eine Randbedingung (*Input/Boundary conditions*), siehe Bild 4.10. Außerdem wird noch die Stop-Zeit, hier 4 Tage, eingegeben (*Solve/Options for transient*), siehe Bild 4.11.

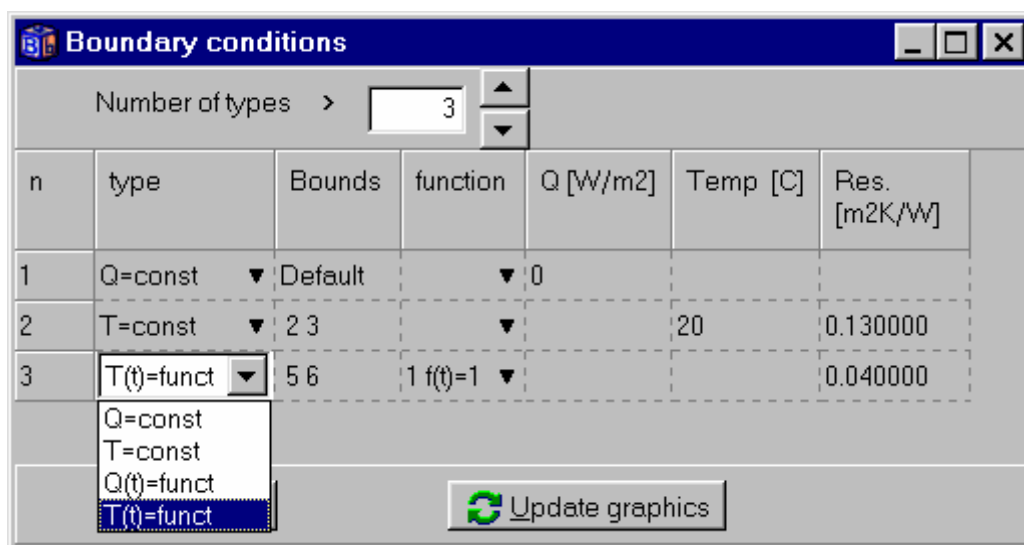


Bild 4.10: In der Auswahlliste für die Art der Randbedingungen "type" wird eine Temperaturfunktion gewählt. In der Auswahlliste "function" wird eine Funktion ausgewählt und die laufende Nummer der entsprechenden Funktion zugeordnet (Standardwert ist 1).

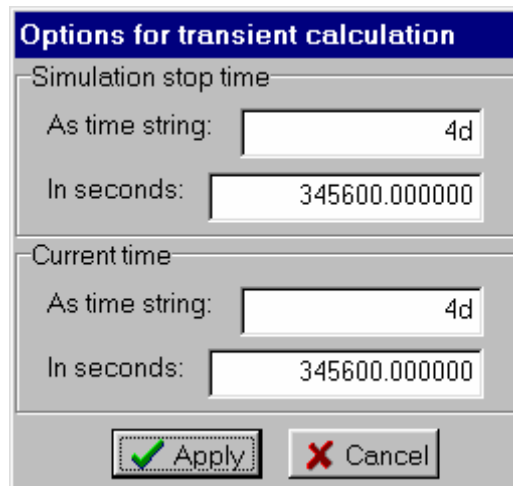


Bild 4.11: Die Stop-Zeit (Simulationsende) beträgt 4 Tage.

In diesem Beispiel möchten wir auch den Wärmestrom durch die beiden innenseitigen Ränder während jeder Stunde ermitteln. Hierfür muß im *Record*-Eingabefenster (Menü *Output/Recorder*) die Aufzeichnung der Werte aktiviert (Checkbox *Record enabled*) und in der Spalte *Type of output* der Listeneintrag "*Q, sum of boundaries i1,i2,.. [W/m]*" ausgewählt werden, siehe Bild 4.12 (oben). Anschließend klickt man in die Spalte *Data* und gibt die Zahlen 2 und 3 für die innenseitigen Randsegmente ein, Bild 4.12 (unten). Das Programm wird nun bei jedem Bildschirmupdate die Summe der Wärmeströme über die beiden Randsegmente aufzeichnen, in diesem Fall jede Stunde. Das Intervall der Updates wird unter *Solve/Update* eingestellt, Bild 4.13. Klickt man jetzt auf den Menüpunkt *Graphics* im *Record*-Eingabefenster, wird der "*Recorder*" geöffnet (dieser ist noch leer, da noch keine Daten aufgezeichnet wurden).

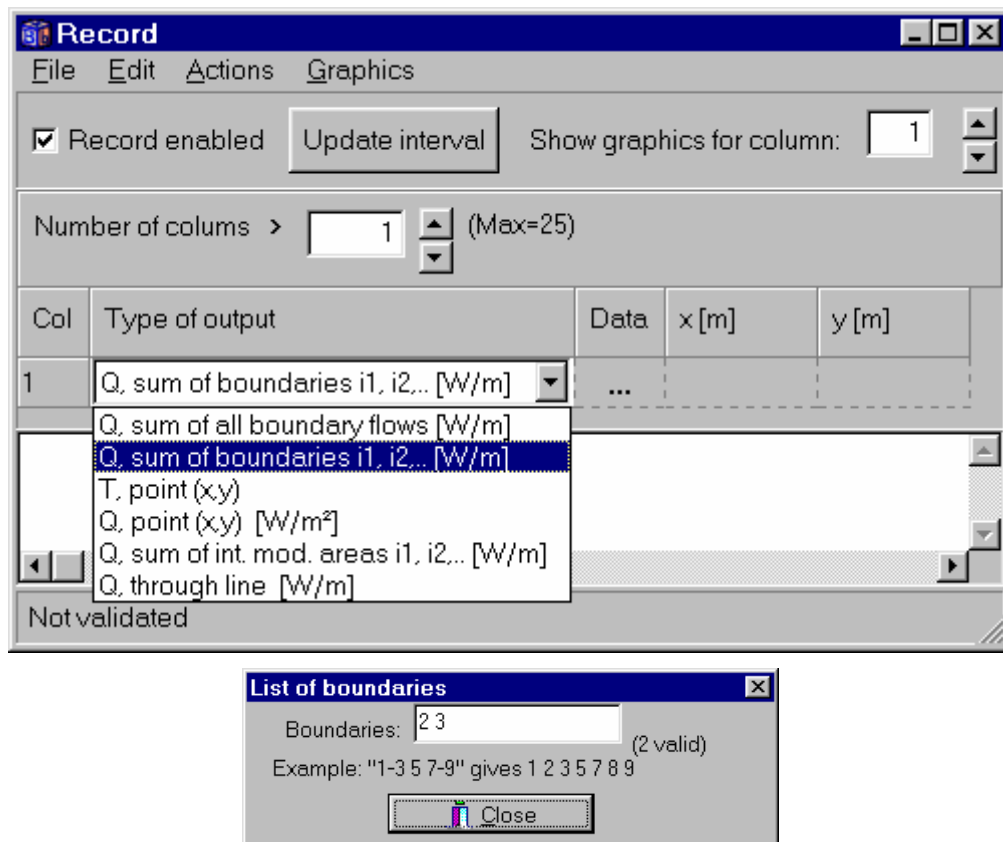


Bild 4.12: Wärmeströme und Temperaturen können während der Simulation in einer Liste aufgezeichnet werden. In diesem Fall wird die Summe der Wärmeströme durch die Ränder 2 und 3 gespeichert.

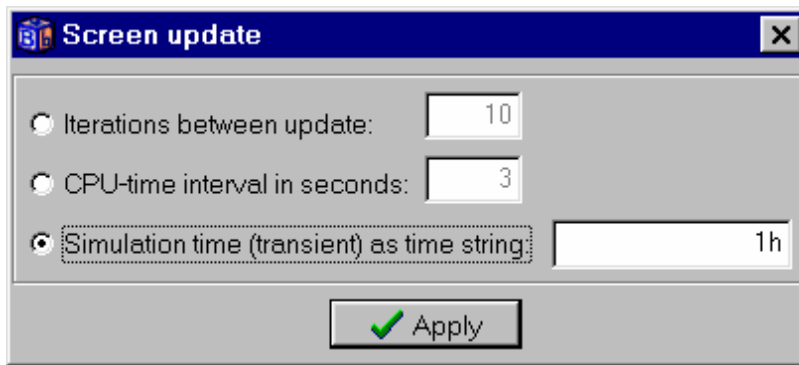
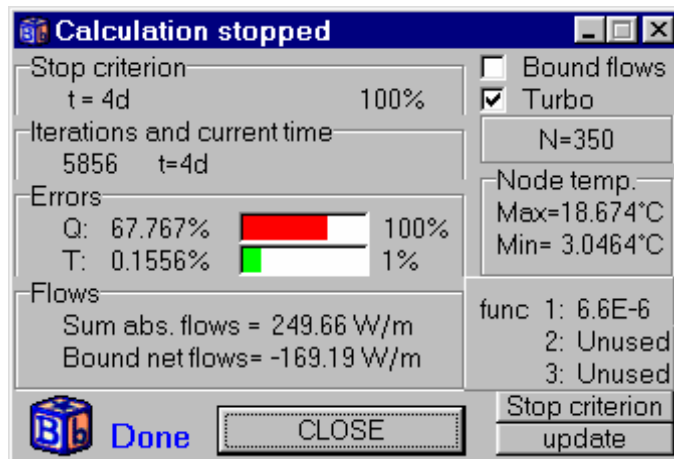
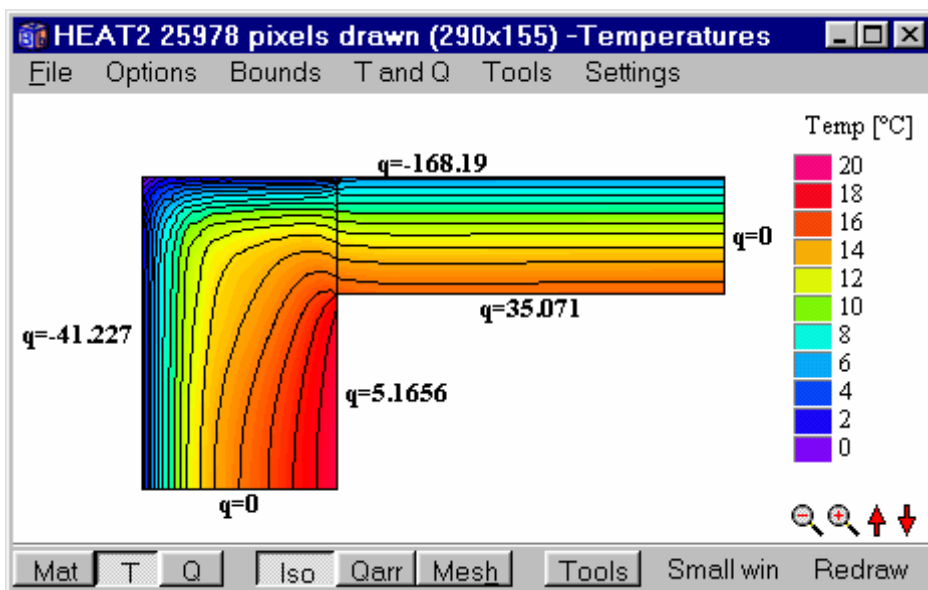


Bild 4.13: Eingabe des Zeitintervalls für die Aufzeichnung von Daten bei instationärer Berechnung unter *Solve/Update*.

Die instationäre Berechnung wird durch Auswahl von *Solve/Start transient calculation* gestartet. Es öffnet sich ein Fenster (Bild 4.14, oben) mit Informationen zum gewählten Stop-Kriterium, zur Anzahl der Iterationen und zu den Fehlern (Differenzen) von Temperaturen und Wärmeströmen. Das "Recorder"-Fenster (Bild 4.14, unten links) und das Diagrammfenster (Bild 4.14, unten rechts) zeigen den Wärmestrom über die beiden innenseitigen Randsegmente während jeder Stunde.



a



b

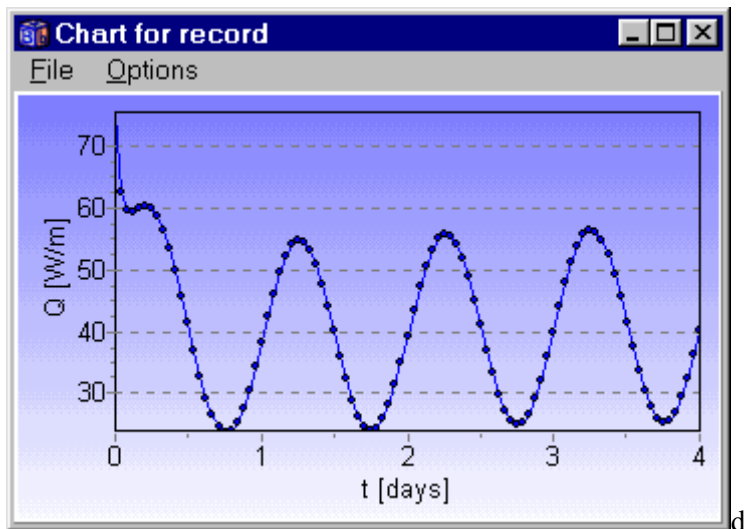
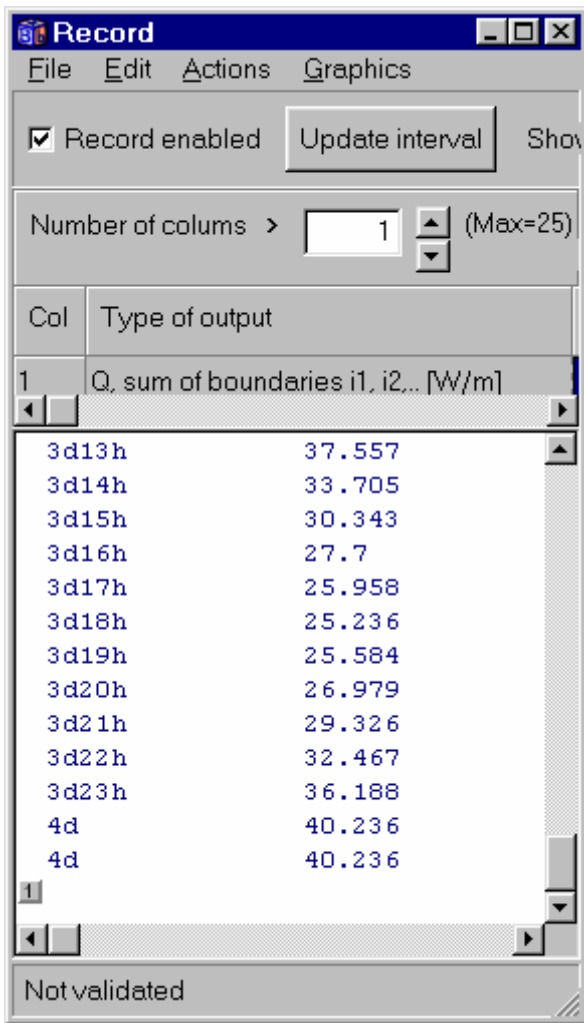


Bild 4.14: Das Berechnungsfenster (a) zeigt das gewählte Stop-Kriterium, die Anzahl der Iterationen und die Fehler (Differenzen) für Temperaturen und Wärmeströme. Das "Recorder"-Fenster (c) und das Diagrammfenster (d) zeigen den Wärmestrom für jede Stunde.

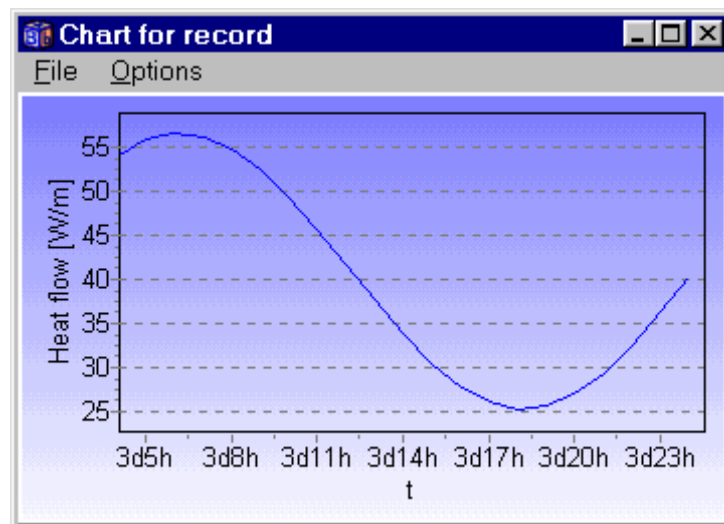


Bild 4.15: Diagrammfenster mit vergrößerter Darstellung des Wärmestromverlaufs. Das Maximum des Wärmestroms über die innenseitigen Randsegmente in die Wand ergibt sich um 6 Uhr und das Minimum um 18 Uhr.

4.5 Eingabenetz

Die Definition eines Eingabenetzes (*input mesh*) ist Voraussetzung für die Beschreibung der Geometrie, des Berechnungsnetzes (*numerical mesh*) und der Randbedingungen. Bei Nutzung des Preprozessors wird das Eingabenetz mit allen erforderlichen Konstruktionsachsen automatisch erzeugt. Es ist jedoch ebenso möglich, die Eingabe vollständig numerisch, ohne Benutzung des Preprozessors, durchzuführen. Im weiteren finden Sie eine Beschreibung des Eingabenetzes. Zur Eingabe der Geometrie siehe auch Bild 4.1.

Betrachten wir als ein relativ einfaches Beispiel die L-förmige Konstruktion in Bild 4.16 mit dem zugehörigen Eingabenetz. I, J bezeichnen die laufenden Nummern entlang der Konstruktionsachsen des Eingabenetzes (*input mesh coordinates*). Die Länge des Segments I (*mesh segment*) zwischen den Koordinatennummern $I-1$ und I beträgt ΔX_I . Das Segment J zwischen den Koordinatennummern $J-1$ und J hat die Länge ΔY_J . Die Anzahl der Konstruktionssegmente I_{\max} bzw. J_{\max} ist für jede Richtung definiert. Bei der Konstruktion in Bild 4.16 gibt es zwei in jeder Richtung.

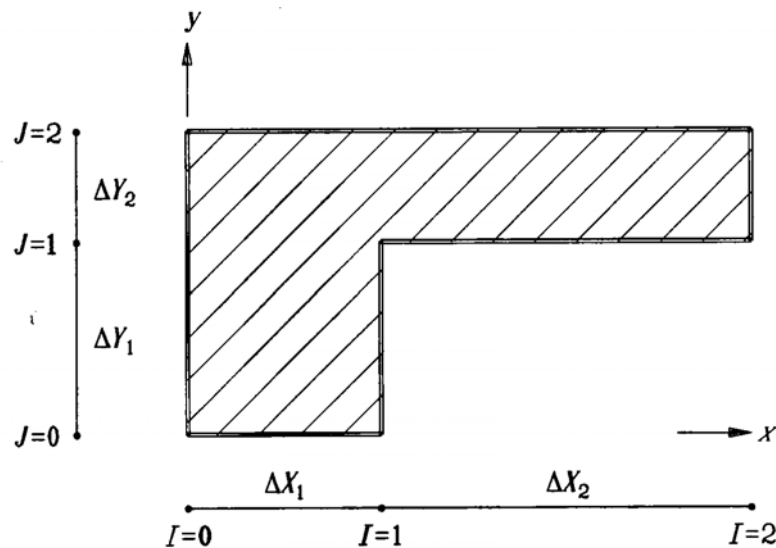


Bild 4.16: Einfaches Beispiel mit Eingabenetz (Numerierung der Konstruktionsachsen und Längen der einzelnen Segmente (Achsabstände)).

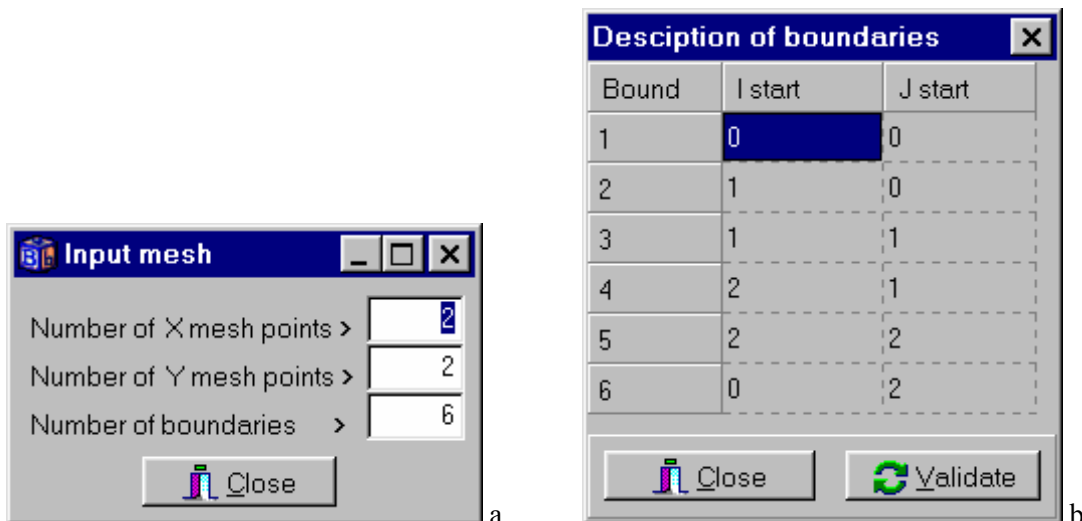


Bild 4.17: Bei einer numerische Eingabe muß zunächst die Anzahl der Netzkoordinaten für jede Richtung (ohne den Koordinatenursprung) und die Anzahl der Randsegmente vorgegeben werden (a), Menüpunkt *Input/Input mesh*. Das Berechnungsgebiet wird anschließend durch eine aufeinanderfolgende Beschreibung der Randsegmente entgegen dem Uhrzeigersinn unter Benutzung der Koordinaten des Eingabenetzes definiert (b), Menüpunkt *Input/Description of boundaries*.

Das Berechnungsgebiet wird durch einer Anzahl gerader Linien begrenzt, welche als Randsegmente (*boundary segments*) bezeichnet werden. Die Randsegmente werden aufeinanderfolgend entgegen dem Uhrzeigersinn unter Benutzung der Koordinaten des Eingabenetzes definiert. Sie werden entsprechend der Reihenfolge ihrer Eingabe nummeriert. Es spielt keine Rolle, mit welchem Randsegment begonnen wird. Beginnt man bei (0,0), sind die Randsegmente wie folgt definiert: $(I,J) = (0,0), (1,0), (1,1), (2,1), (2,2), (0,2)$ und zurück zum Ausgangspunkt (0,0) - siehe Bild 4.17. Bild 4.18 zeigt die Randsegmente 1 bis 6.

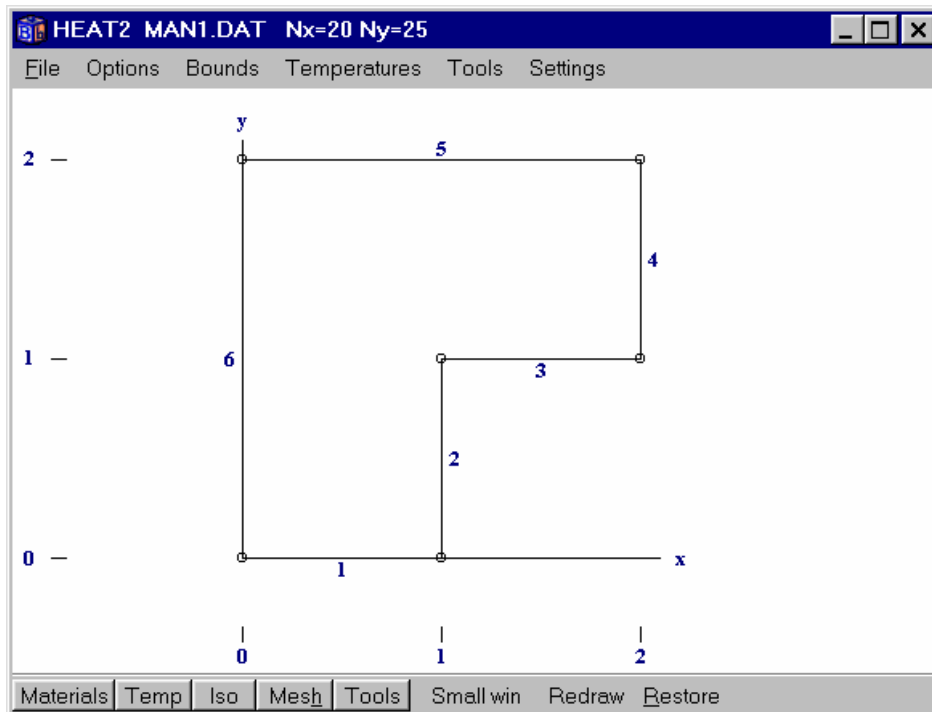


Bild 4.18: Definition des Rechengebiets durch sechs Randsegmente.

4.6 Berechnungsnetz

Die Längen ΔX_I und ΔY_J (Abstände der Konstruktionsachsen) und die Anzahl der Berechnungszellen N_I und N_J werden für jedes Netzsegment festgelegt, siehe Bild 4.19. Die Berechnungszellen ergeben sich durch zusätzlich eingefügte Hilfsachsen, welche in der Regel äquidistant verteilt sind. Die Berechnungszellen innerhalb eines Segments haben somit die gleiche Größe, siehe Bild 4.20. Bitte beachten Sie, daß sich Großbuchstaben auf das Eingabenetz beziehen (z.B. ΔX_I), während das Berechnungsnetz mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet wird (z.B. Δx_i). In jedem Segment des Eingabenetzes muß sich mindestens eine Berechnungszelle befinden. In Bild 4.20 gibt es 10 Zellen in beiden Segmenten der x -Richtung. In y -Richtung gibt es 15 Zellen im ersten Segment und 10 Zellen im zweiten. Die Länge der einzelnen Segmente wird ebenfalls im Bild gezeigt.

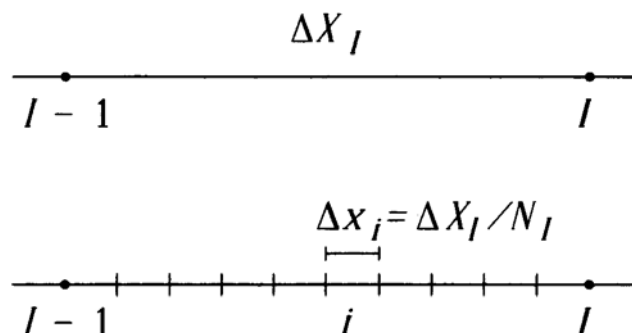


Bild 4.19: Länge Δx_i im Berechnungsnetz.

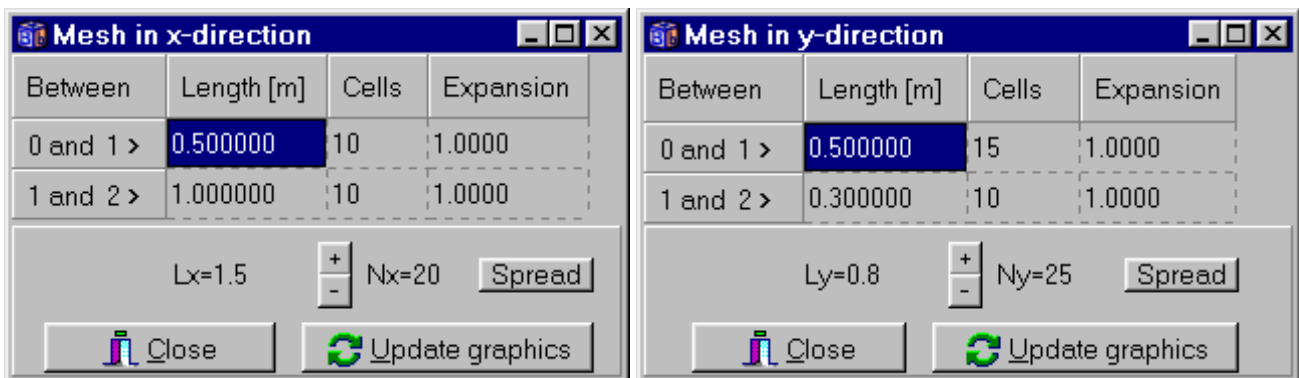
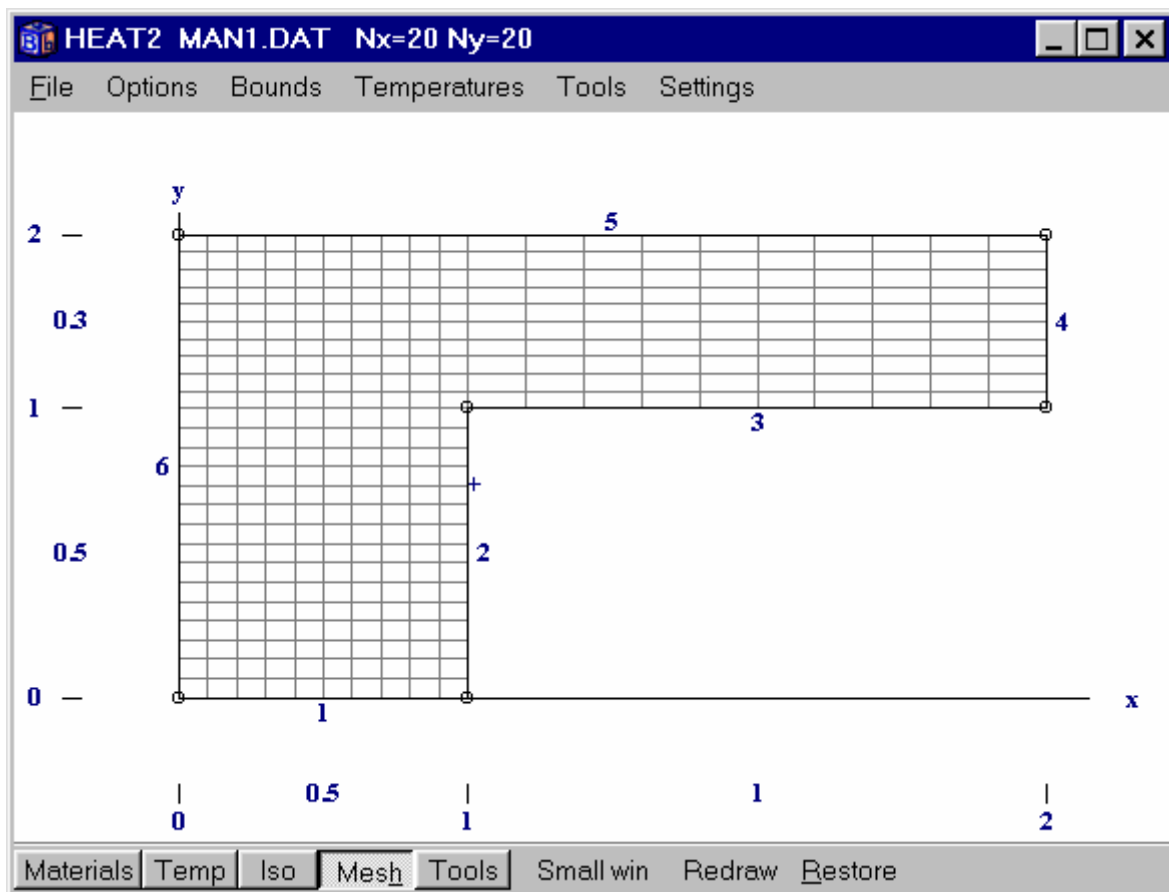


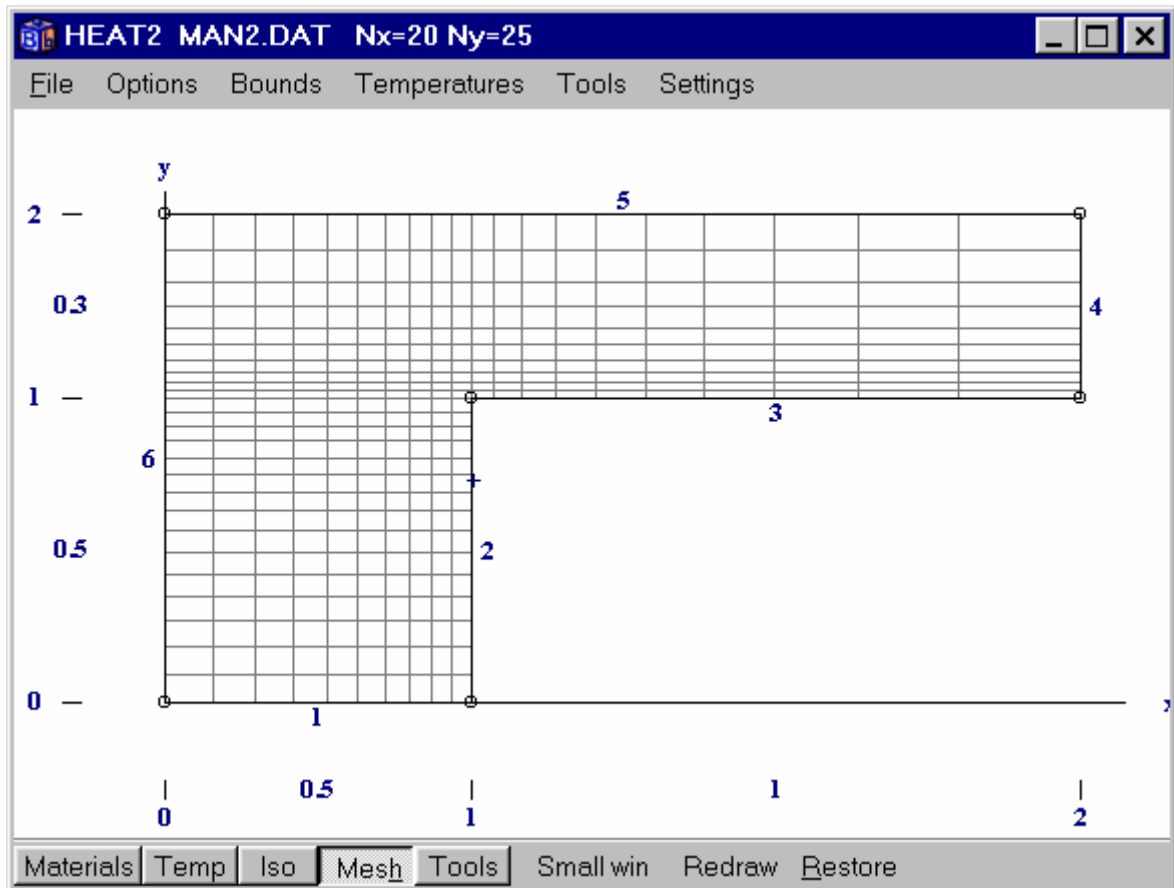
Bild 4.20: Berechnungsnetz mit 20·25 Zellen und äquidistanter Verteilung der Berechnungszellen in allen Segmenten.

Um die Anzahl der Berechnungszellen in Gebieten mit hohen Temperaturgradienten zu erhöhen, kann auch eine ungleichmäßige Verteilung gewählt werden. Für jedes Segment wird dabei ein Expansionskoeffizient gewählt. Die Länge der in einem Segment aufeinanderfolgenden Rechenzellen kann dabei um diesen Faktor erhöht oder verringert werden. Betrachten wir beispielsweise ein 21 Meter langes Segment mit 3 Zellen, dann beträgt die Länge jeder dieser Rechenzellen bei einem äquidistanten Raster 7 Meter (Expansionskoeffizient = 1). Ein Koeffizient von 2,0 ergibt dagegen eine zunehmende Netzdichte mit Segmentlängen von 3, 6 und 12 m. Bei 0,5 ergibt sich eine abnehmende Netzdichte mit Längen von 12, 6 und 3 m.

Beachten Sie, daß ein expandierendes Netz zu kleinen Berechnungszellen führen kann und dadurch der stabile Zeitschritt gegebenenfalls sehr kurz wird. Ein schlecht gewähltes Berechnungsnetz kann deshalb die Rechenzeit drastisch erhöhen, insbesondere bei instationären Analysen. Benutzen Sie keine extremen Expansionskoeffizienten gemeinsam mit einer großen Anzahl von Zellen, da dies zu sehr kleinen Zellen innerhalb der Segmente führt. "Normale" Werte liegen in den meisten Fällen zwischen 0,8 und 1,25.

Bild 4.21 zeigt die Konstruktion bei Verwendung eines expansiven Berechnungsnetzes. Für das erste Segment in x -Richtung beträgt der Expansionskoeffizient 0,9, d.h. die Zellgrößen verringern sich in x -

Richtung. Im zweiten Segment beträgt der Expansionskoeffizient 1,2 und die Zellgrößen erhöhen sich. Die Expansionskoeffizienten in y-Richtung betragen 0,95 bzw. 1,2. Um eine günstige Verteilung zu erreichen, kann man verschiedene Expansionsfaktoren ausprobieren und das erzeugte Netz visuell überprüfen.



Between	Length [m]	Cells	Expansion
0 and 1 >	0.500000	10	0.9000
1 and 2 >	1.000000	10	1.2000

Lx=1.5 + Nx=20 Spread

Close Update graphics

Between	Length [m]	Cells	Expansion
0 and 1 >	0.500000	15	0.9500
1 and 2 >	0.300000	10	1.2000

Ly=0.8 + Ny=25 Spread

Close Update graphics

Bild 4.21: Expansives Berechnungsnetz mit kleineren Zellen nahe der inneren Ecke (da der Temperaturgradient in der Ecke höher ist, sind kleinere Zellen zur Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit vorteilhaft).

4.6.1 Einfache Netzgenerierung

Bild 4.22 (links) zeigt das Eingabefenster für das Netz in x-Richtung. Über die Schaltflächen "+" und "-" kann die Anzahl der Zellen in den Rastersegmenten verdoppelt oder halbiert werden. Die Schaltfläche **Spread** verteilt die Zellen weitgehend gleichmäßig in einem äquidistanten Berechnungsnetz. Im Eingabefenster wird auch die Gesamtlänge angezeigt ($L_x = 0,7$).

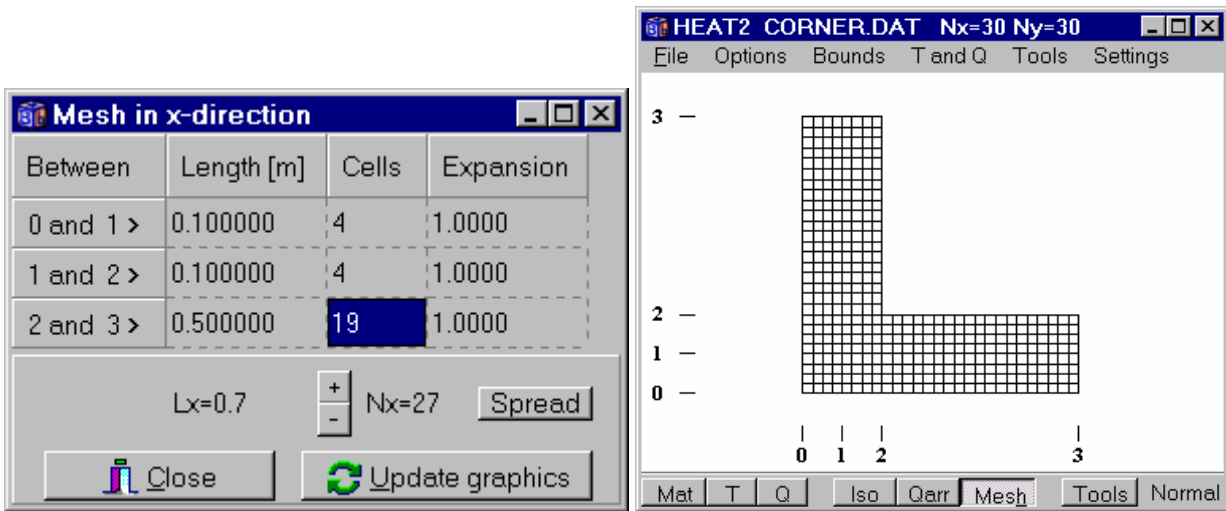


Bild 4.22: Einfaches äquidistantes Berechnungsnetz.

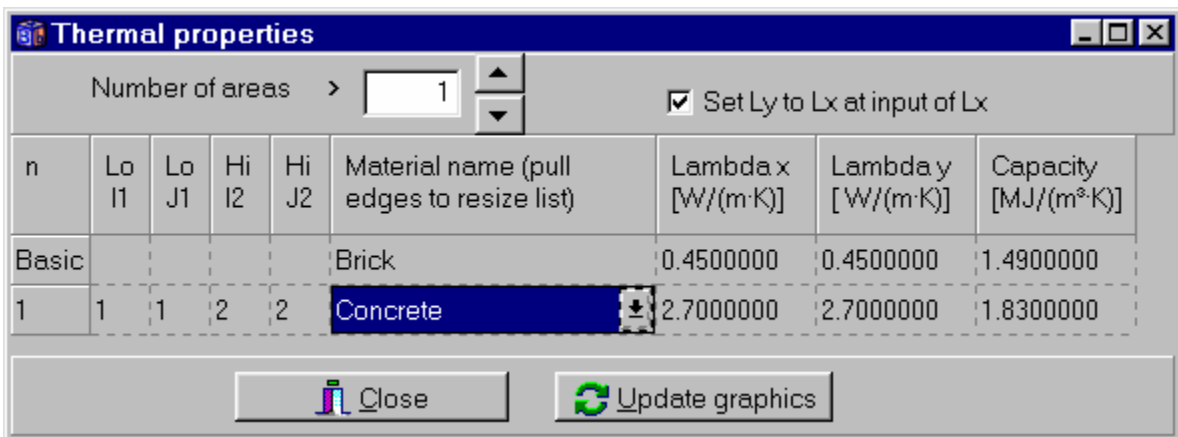
4.7 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften werden definiert durch die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] und die volumenbezogene Wärmekapazität C [J/(m³·K)], welche als Produkt der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität definiert ist ($C = \rho \cdot c_p$). Die Wärmeleitfähigkeit kann in der x - und der y -Richtung unterschiedlich sein (λ_x, λ_y).

In der vom Preprozessor genutzten Materialdatenbank (Materialliste) sind die thermischen Eigenschaften der am häufigsten benutzten Materialien bzw. Baustoffe bereits definiert. Es ist jedoch auch möglich, die Werte zu ändern oder neue Materialien einzugeben. Wird der Preprozessor nicht für die Eingabe genutzt, müssen zunächst die sogenannten Basiswerte (λ_x, λ_y, C) für fehlende Flächen eingegeben werden, welche für das gesamte Berechnungsgebiet gültig sind. Dann werden mit Hilfe der Koordinaten von 2 gegenüberliegenden Eckpunkten (Ecken "unten links" und "oben rechts") einzelne Rechtecke mit konkreten thermischen Eigenschaften definiert. Die Rechtecke können einander überlappen. Dabei gelten jeweils die Daten für das zuletzt definierte (im Vordergrund liegende) Rechteck.

Betrachten wir das Beispiel in Bild 4.23, wo zwei Materialien definiert wurden. Das grüne Gebiet (oben rechts) zeigt ein Rechteck mit den Koordinaten "unten links" (1,1) und "oben rechts" (2,2).

Hinweis: Die Materialdatenbank "DIN no cap.mtl" enthält keine Wärmekapazitäten. Bei instationären Berechnungen ist C deshalb numerisch einzugeben (Eingabefenster siehe Bild 4.23 oben). Für stationäre Berechnungen ist die Wärmekapazität nicht relevant.



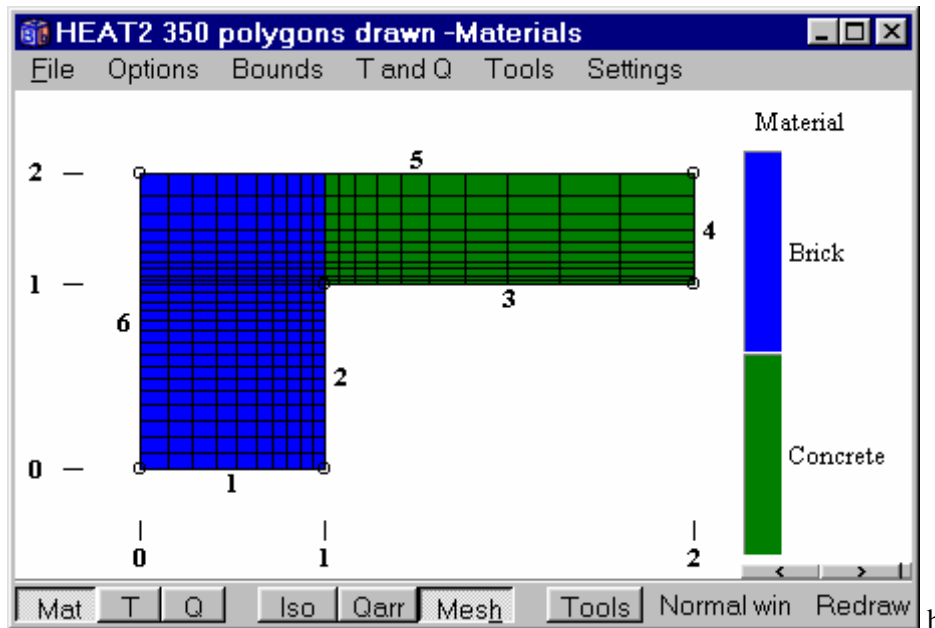


Bild 4.23: Oben (a): Definition der thermischen Eigenschaften durch die Eingabe von Basiswerten für nicht gesondert aufgelistete Flächen (gültig für das gesamte Berechnungsgebiet) und die einzelnen überlappenden Rechtecke im Menüpunkt *Input/Thermal properties*. Unten (b): Das grüne Gebiet "Concrete" (oben rechts) zeigt das Rechteck mit den Koordinaten "unten links" (1,1) und "oben rechts" (2,2).

4.8 Ausgangstemperaturen

Gebiete mit unterschiedlichen Ausgangstemperaturen werden definiert, indem man einer Fläche "Initial temperature area" (Ausgangstemperaturgebiet) aus der Materialliste zuordnet. In Bild 4.24 befinden sich zwei solche Gebiete. Die Gebiete sind durch schwarze Rechtecke begrenzt; das gerade ausgewählte Objekt ist rot markiert.

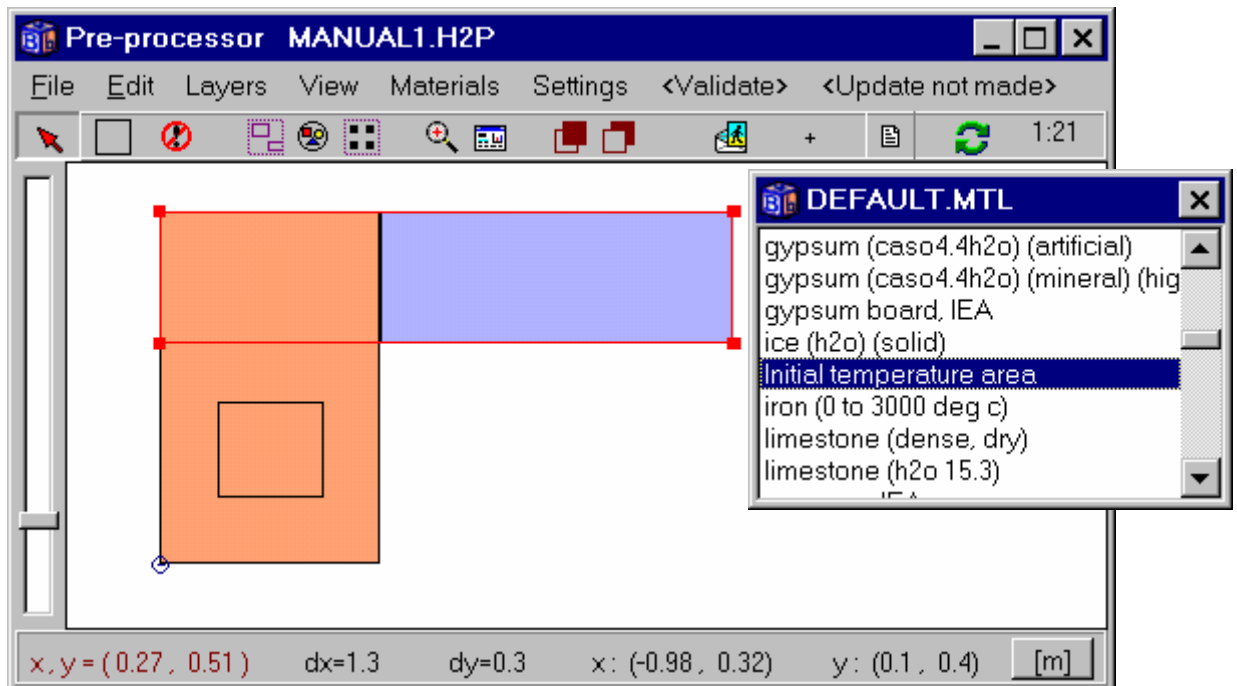


Bild 4.24: Mit *Initial temperature area* kann ein rechteckiges Gebiet mit einer bestimmten Ausgangstemperatur definiert werden.

Der Preprozessor erzeugt das entsprechende Eingabenetz und die Liste der Ausgangstemperaturen wird im Menüpunkt "Input/Initial temperature" angezeigt, siehe Bild 4.25. Die Eingabe der Temperaturwerte wird dem Nutzer überlassen. In unserem Beispiel wird zuerst dem gesamten Gebiet eine (Basis)Temperatur von 20 °C zugewiesen. Anschließend wird ein Rechteck definiert, das für den oberen (grünen) Teil eine Ausgangstemperatur von 10 °C festlegt. Einem dritten Gebiet wird eine Temperatur von 5 °C zugewiesen.

Hinweis: Die Ausgangstemperaturen sind bei stationären Berechnungen für das Berechnungsergebnis nicht relevant, eine Eingabe ist daher in diesem Fall nicht erforderlich.

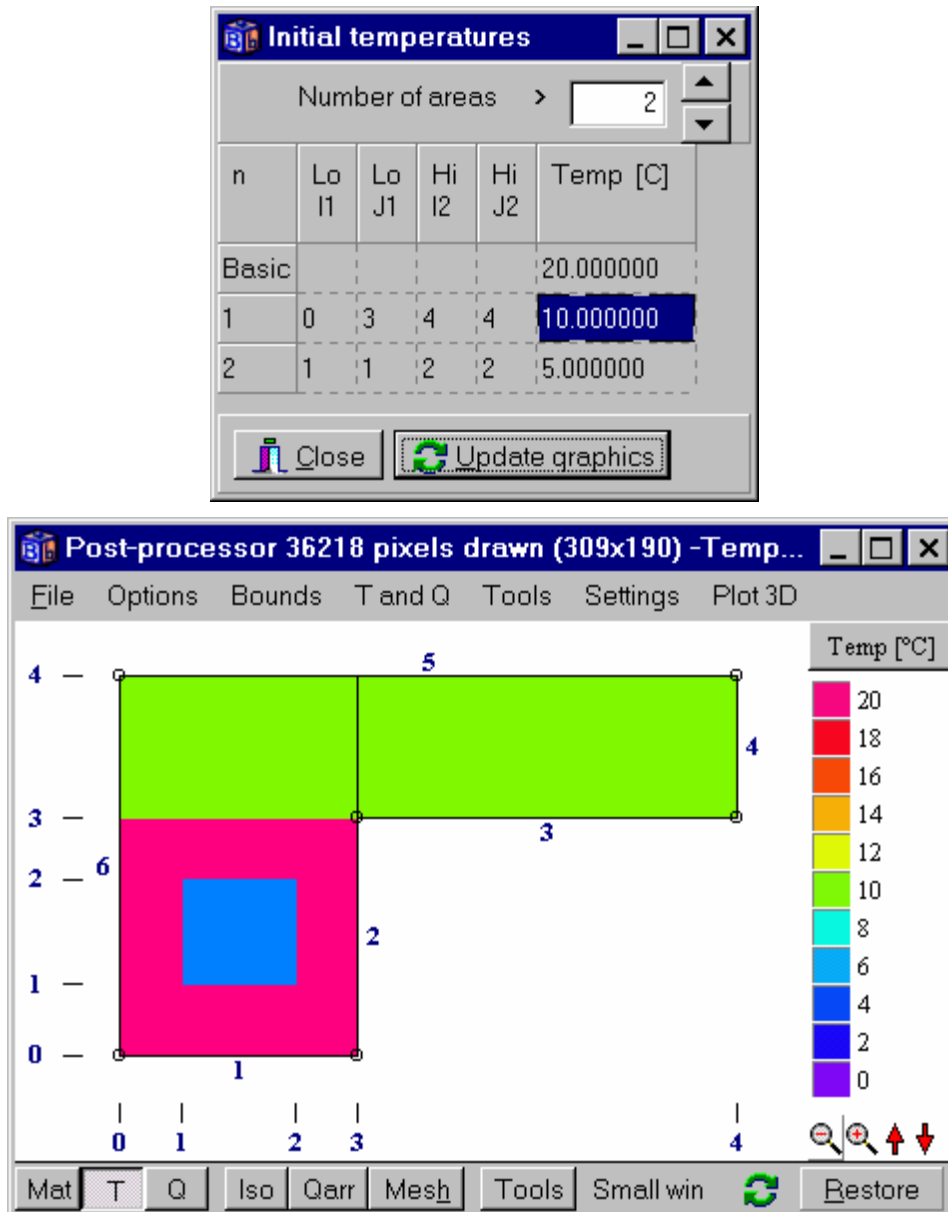


Bild 4.25: Ausgangstemperaturen werden durch Eingabe einer (Basis)Temperatur für alle nicht gesondert definierten Flächen (gültig für die gesamte Rechenfläche) und spezielle Temperatureingaben für einzelne (gegebenenfalls überlappende) Rechtecke festgelegt. Im vorliegenden Fall wurden drei verschiedene Temperaturen zugewiesen.

4.9 Interne Modifikationen

Das Programm ermöglicht sogenannte Interne Modifikationen, welche z.B. zur Beschreibung von Bereichen mit Wärmequellen (konstante oder zeitabhängige), vorgegebenen Temperaturen (konstante oder zeitabhängige), luft- bzw. flüssigkeitsgefüllten Hohlräumen (mit Berücksichtigung der Wärmekapazität oder des Strahlungswärmeaustausches in belüfteten oder unbelüfteten Hohlräumen) verwendet werden können (siehe Kapitel 9). Es können in Annäherung auch kreisförmige Rohre mit einem vorgegebenen Wärmestrom bzw. einer Temperatur (konstant oder zeitabhängig) simuliert werden, siehe Kapitel 6.

Interne Modifikationen können mit dem Preprozessor direkt in das geometrische Modell eingezeichnet werden, Bild 4.26. Die Art der Modifikation wird aus der Materialliste ausgewählt. In Bild 4.26 wurden acht Rechtecke für die Festlegung von Heizrohren mit einer vorgegebenen Temperatur definiert. Die entsprechenden Daten für jedes Rohr werden im Menüpunkt *Input/Modification – Types* eingegeben.

Bild 4.27 zeigt das berechnete Temperaturfeld für den Fall, daß die Rohre eine konstante Temperatur von 30 °C aufweisen. Die Außentemperatur beträgt -15 °C. Die Farbe für $T = 0$ °C wurde hier ausgeschaltet, siehe Skala rechts.

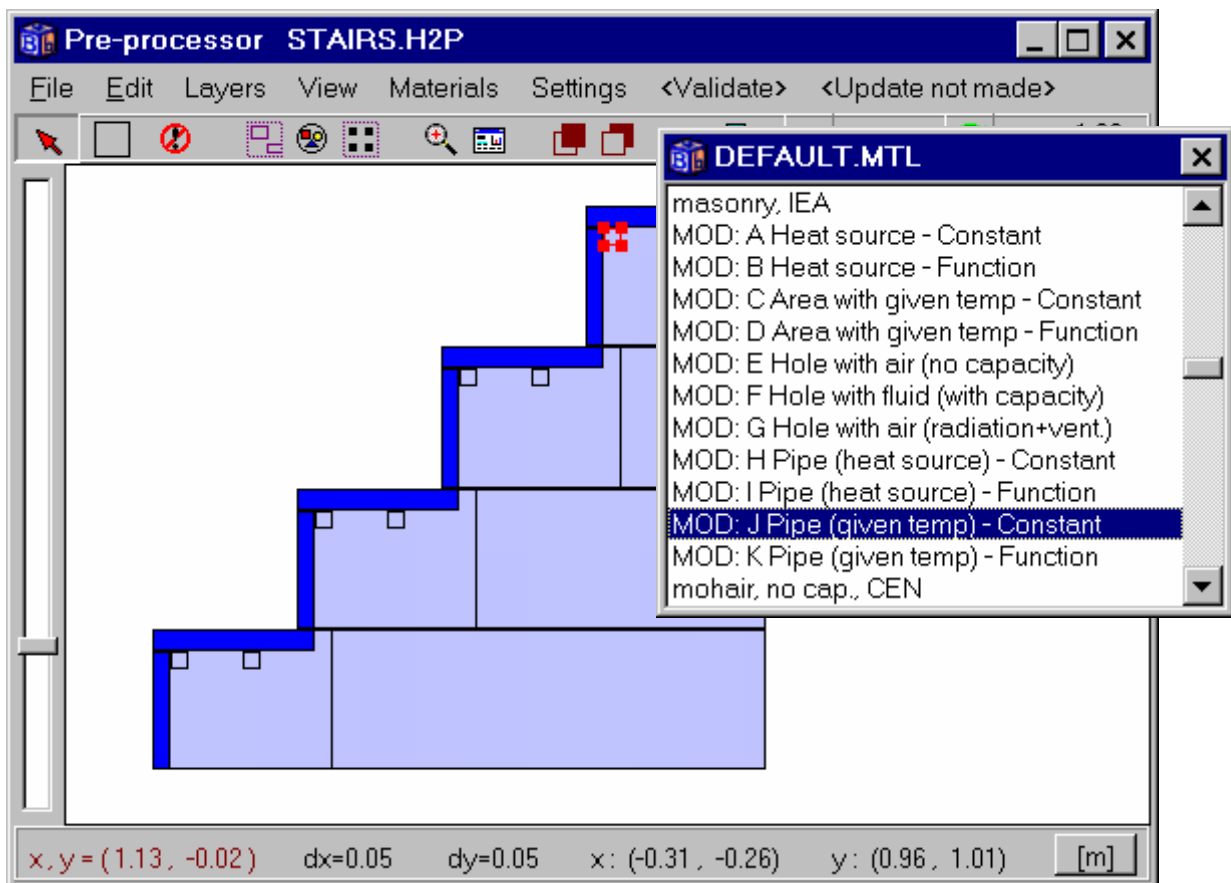


Bild 4.26: Interne Modifikationen können mit dem Preprozessor direkt eingezeichnet werden. Im vorliegenden Fall wurden Heizrohre mit einer konstanten Temperatur definiert.

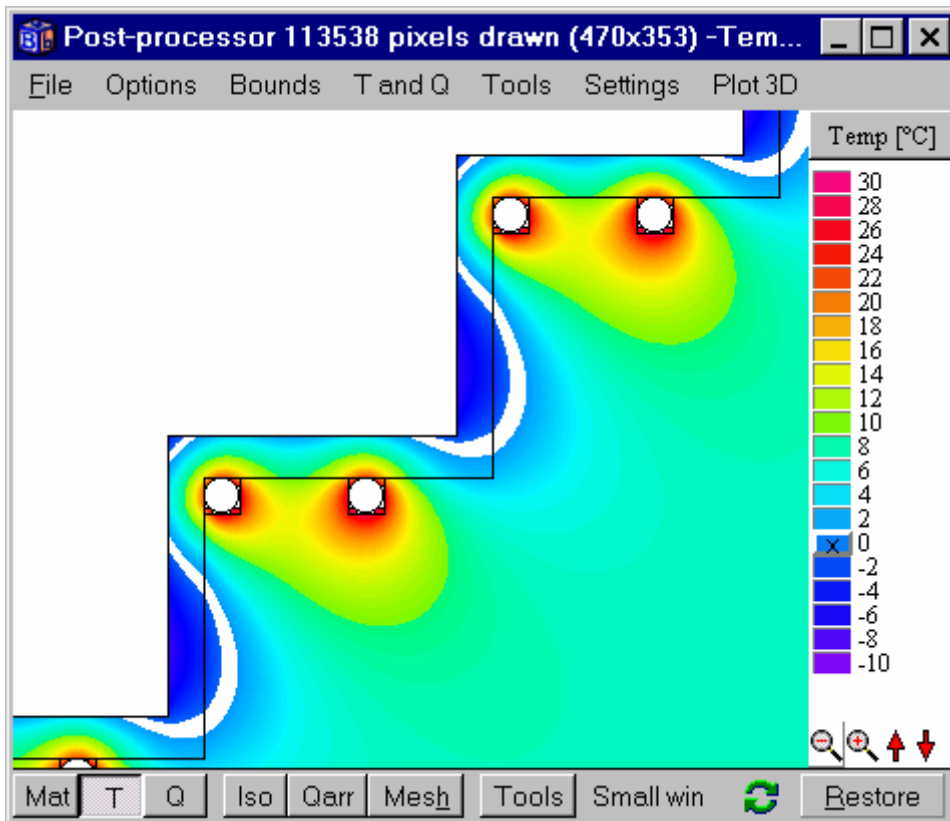


Bild 4.27: Treppenstufen, die durch Rohre mit einer Temperatur von 30 °C beheizt werden. Die Außentemperatur beträgt -15 °C. Die Farbe für $T = 0$ °C ist hier ausgeschaltet (siehe Skala rechts). Das bedeutet, daß Temperaturen zwischen -1 und +1 °C nicht angezeigt werden, wodurch ein weißer Streifen entsteht. Aus dem Bild ist erkennbar, daß die Ränder der Stufen Temperaturen unter 0 °C erreichen und deshalb im Winter vereist sein können.

Die internen Modifikationen müssen nach bestimmten Regeln plaziert werden, siehe Bild 4.28. Es sollte mindestens eine Berechnungszelle zwischen den Gebieten liegen (z.B. zwischen Gebiet 2 und 3). Außerdem muß mindestens eine Zelle zwischen einem Gebiet und dem Rand vorhanden sein (z.B. Gebiete 3 and 4). Zwei Gebiete können sich an den Ecken treffen (Gebiete 1 und 2). Die genannten Regeln treffen auf alle Gebiete mit internen Modifikation zu. HEAT2 überprüft automatisch, ob die gewählten Bereiche konsistent sind.

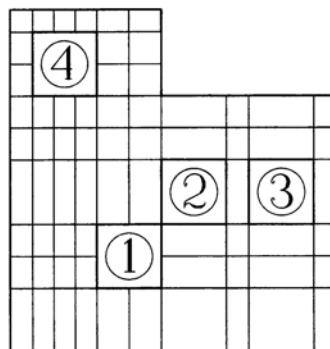


Bild 4.28: Beispiel für die Plazierung von vier internen Modifikationen.

4.10 Interne Widerstände

Interne Widerstände R [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] können durch Linien definiert werden, die entweder in x- oder in y-Richtung senkrecht zu den tatsächlichen Widerständen verlaufen. Betrachten wir Bild 4.29. Die vertikale Linie zwischen den Koordinaten (1,1) und (1,4) des Eingabernetzes stellt einen Widerstand R_x in x-Richtung dar.

4.11 Zusammenfassung

Das geometrische Modell kann unter Benutzung der Eingabeoberfläche (Preprozessor) gezeichnet werden. Die Randsegmente und das Eingaberaster werden automatisch erzeugt.

Die Geometrie kann auch allein über Texteingaben beschrieben werden. Es ist jedoch in der Regel einfacher, den Preprozessor zu benutzen, besonders bei komplexen geometrischen Modellen. Bei Benutzung der Texteingabe muß zunächst ein passendes Eingabenetz definiert werden und zwar unter Berücksichtigung der Geometrie, der Materialien, der Ausgangstemperaturen, der Randsegmente mit unterschiedlichen Randbedingungen, der internen Modifikationen, internen Widerstände und des Berechnungsnetzes.

Betrachten wir Bild 4.29. Das dargestellte Modell beinhaltet die Materialien *A* und *B*. Es soll ein passendes Eingabenetz definiert werden. In beiden Richtungen ergeben sich jeweils 5 Segmente. Die Region *A* hat die Koordinaten "unten links" 0,2 und "oben rechts" 5,5. Das zweite, durch die Koordinaten 3,3 und 4,4 definierte Rechteck bezeichnet das Material *B*. Ein weiteres Rechteck aus Material *B* wird auch durch die Koordinaten 0,0 und 2,2 definiert. Zwischen den Eingaberasterkoordinaten 1,1 und 1,4 befindet sich in *x*-Richtung ein Widerstand R_x .

Es ist egal, welches der Rändersegmente zuerst eingegeben wird, aber die Reihenfolge der Eingabe muß entgegen dem Uhrzeigersinn erfolgen. Wieder zu Bild 4.29. Wird zuerst der Rand zwischen 0,0 und 2,0 ausgewählt, ergibt sich für den Rand zwischen 5,5 und 0,5 zwangsläufig die Nummer 5. Die Ränder des Berechnungsgebietes ergeben sich somit zu 0,0 2,0 2,2 5,2 5,5 0,5 0,0. Die Längen der einzelnen Segmente des Eingabenetzes in *x*-Richtung und *y*-Richtung sind: 0,2 0,3 0,1 0,3 0,1 m bzw. 0,2 0,3 0,2 0,1 0,2 m.

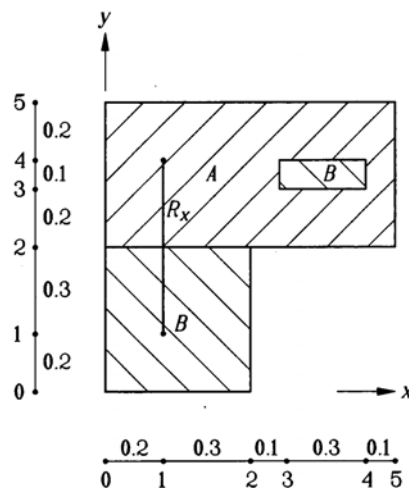


Bild 4.29: Es muß ein passendes Eingabenetz definiert werden. Dabei sind Geometrie, Materialrechtecke, Ausgangstemperaturen, Randsegmente mit unterschiedlichen Randbedingungen, interne Modifikationen, interne Widerstände und Berechnungsnetzes zu berücksichtigen. Die Netzkoordinate 4 in *y*-Richtung wird beispielsweise verwendet, um den Endpunkt für den Widerstand R_x und den oberen Rand für das kleinere Rechteck mit dem Material *B* festzulegen.

5. Arbeiten mit HEAT2

5.1 Eingabeoberfläche (Preprozessor)

5.1.1 Einführung

Die Eingabeoberfläche macht es relativ leicht, die Geometrie und die Materialien für eine große Palette von Berechnungsfällen zu beschreiben. Das Programm arbeitet wie ein normales CAD-Programm für das Erstellen von Zeichnungen. Die Konstruktion wird unter Verwendung von sich überlappenden Rechtecken aus unterschiedlichen Materialien gezeichnet, siehe Übersicht in Abschnitt 4.1.

Über der Zeichenfläche ist eine Werkzeugleiste angeordnet, siehe Bild 4.1. Die Werkzeuge werden ausgewählt, indem man sie mit der Maus anklickt oder den entsprechenden Menüpunkt aktiviert. Um ein Rechteck zu zeichnen, wählt man "Draw" (Rechtecksymbol links in der Werkzeugleiste). Man setzt den Cursor irgendwo auf die Zeichenfläche und betätigt die linke Maustaste. Dann bewegt man die Maus und drückt nochmals die linke Maustaste. Jetzt ist auf der Zeichenfläche ein Rechteck entstanden.

Bild 4.1 zeigt zwei mit dem Preprozessor gezeichnete Rechtecke. In der Statuszeile am unteren Bildrand werden die Koordinaten (x,y) des Mauszeigers rot angezeigt. Für das markierte Objekt werden die Breite ($dx = 0,8$) und die Höhe ($dy = 0,3$) angegeben, in diesem Fall für das rechte Rechteck. Weiterhin werden die Entfernungen zum aktuellen Bezugspunkt in beiden Richtungen angezeigt, z.B. beginnt das Rechteck bei $x = 0,5$ und endet bei $x = 1,3$. In vorliegendem Fall wurde in der linken unteren Ecke des linken Rechtecks ein *Referenzpunkt* (siehe Abschnitt 5.1.2) platziert, welcher den aktuellen Koordinatenbezugspunkt darstellt.

Das Material wird aus einer Materialliste ausgewählt, siehe Bild 4.2 (links). Ein Doppelklick auf ein Rechteck öffnet ein Fenster mit dem Namen des Materials und den Eigenschaften, siehe Bild 4.2 (rechts).

Nachdem das geometrische Modell mit dem Preprozessor eingegeben wurde, muß es für die numerische Berechnung mit HEAT2 aufbereitet werden. Dies erfolgt durch Drücken des oberen rechten Menüpunkts *<Update not made>*. Dabei wird das komplette *Eingaberaster (input mesh)* automatisch generiert, gleichzeitig werden die äußeren Grenzen (Randsegmente) erkannt. Der Postprozessor, siehe Bild 4.3, zeigt das erzeugte Eingabernetz mit der Nummerierung und den entsprechenden Zahlen und Längen der Ränder.

Mit dem Updaten wird auch ein äquidistantes Berechnungsnetz erzeugt (in diesem Fall 50·50 gemäß den Einstellungen im Preprozessor, Menüpunkt *Settings/Numerical mesh*). Das Berechnungsnetz kann bei Bedarf später verändert werden.

Bevor eine Berechnung erfolgen kann, müssen den Randsegmenten noch die Randbedingungen zugeordnet werden.

5.1.2 Werkzeugleiste

Es stehen die folgenden Werkzeuge zur Verfügung:



Select (Pfeil): Auswählen/Markieren von Objekten. Bei einem ausgewählten Objekt können Breite und Höhe durch Ziehen der Seiten oder der Ecken verändert werden. Durch Drücken der Umschalttaste beim Anklicken können mehrere Objekte ausgewählt werden. Die Objekte können dann gemeinsam verschoben werden. Für alle aktuell ausgewählten Objekte kann aus der Materialliste ein Materialname übernommen werden. Um die Markierung eines Objektes aufzuheben, bewegt man den Cursor auf eine leere Fläche und drückt die linke oder die rechte Maustaste (Aktivierung des Werkzeugs **Draw/Rechteck**).



Draw (Rechteck): Materialrechtecke zeichnen. Drücken der rechten Maustaste aktiviert **Select**.



Undo/redo: Rückgängig. Rückgängig bezieht sich auf Löschen und Verschieben von Objekten sowie auf Änderungen der Objektgröße.



Select multiple: Mehrere Objekte auswählen. Es werden alle Objekte innerhalb des aufgezogenen Rechtecks markiert. Es können zusätzliche Objekte markiert werden, indem man beim Anklicken der Objekte die Umschalttaste gedrückt hält.



Select all: Alle Objekte auswählen. Es werden alle Objekte markiert.



Select all of one kind: Alle Objekte der gleichen Art auswählen. Markiert alle Objekte des gleichen Materials (oder der gleichen internen Modifikation). Eine hilfreiche Funktion ist auch das Kopieren der markierten Objekte mit der Taste "STRG-V" und die Taste "Einfügen". Bei den markierten Objekte kann leicht das Material (oder die interne Modifikation) geändert werden.



Zoom: Vergrößert einen begrenzten Bereich (Zoomfenster).



Fit in window: An Fenstergröße anpassen. Der Zoomfaktor wird automatisch so gewählt, daß alle Objekte in das Zeichenfenster passen.



Bring to front: In den Vordergrund bringen. Rechtecke, die hinter anderen Rechtecken verborgen sind, können in den Vordergrund gebracht werden.



Send to back: In den Hintergrund bringen. Rechtecke, die vor anderen Rechtecken liegen, können in den Hintergrund gebracht werden.



Import image: Bild einfügen. Bilddateien (BMP, EMF, WMF, ICO) können importiert und innerhalb der Zeichenfläche durch Anklicken positioniert werden.



Reference point: Referenzpunkt. Einen Referenzpunkt plazieren, der den Koordinatenbezugspunkt definiert (aktueller Koordinatenursprung). Referenzpunkte können verschoben werden (neuer Koordinatenursprung). Es können mehrere Referenzpunkte eingefügt werden. Der als letzter eingefügte (oder verschobene) Referenzpunkt legt den aktuellen Koordinatenursprung fest.



Material pick list: Materialauswahlliste. Öffnet das Fenster der Materialliste (gleiche Funktion wie Tabulator-Taste).



Redraw: Aktualisiert die Zeichenfläche.

5.1.3 Objekte kopieren

Um Objekte zu kopieren und einzufügen, ist wie folgt zu verfahren: Man markiert die Objekte mit *Select* und drückt "Strg-V" oder "Einfg", um sie an die aktuelle Cursorposition zu kopieren, siehe Bild 5.1.

5.1.4 Materialauswahl

Das Material des Rechtecks kann durch Auswahl der gewünschten Zeile in der Materialliste geändert werden (Tabulator-Taste).

5.1.5 Snap to grid (Am Raster ausrichten)

Als Grundeinstellung ist ein Rasterabstand von 10 Pixel festgelegt. Die gezeichneten Rechtecke werden an diesem Raster ausgerichtet. Es ist möglich diese Funktion abzustellen, so daß die Rechtecke an beliebigen Pixeln angeordnet werden können. Meist ist es in diesem Fall jedoch schwieriger die Rechtecke korrekt zu plazieren. Versuchen Sie deshalb zunächst den Skalierungsfaktor zu verändern, bevor Sie *Snap to grid* deaktivieren.

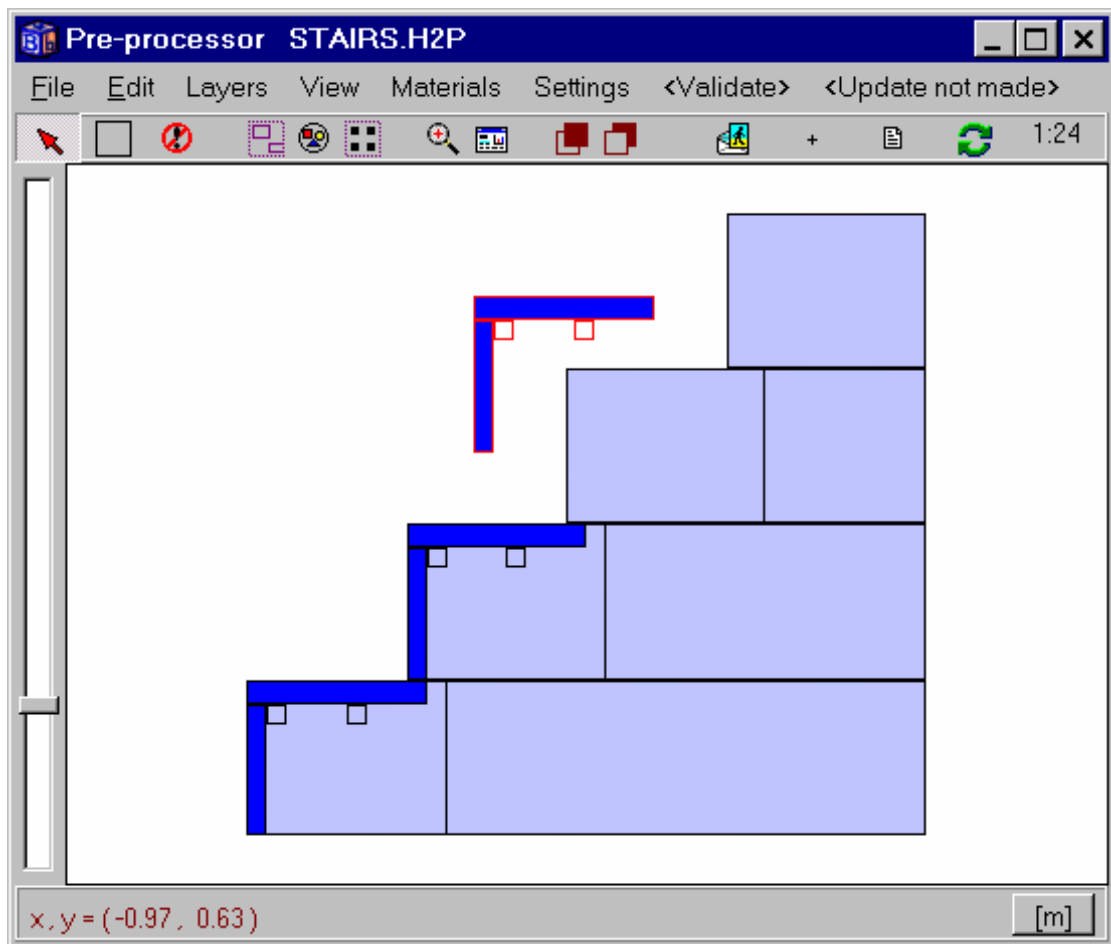


Bild 5.1: Es können mehrere Objekte markiert und kopiert werden. In diesem Fall wird durch das Kopieren einer Stufe eine Treppe mit Heizrohren konstruiert.

5.1.6 Zoomfaktor

Der Maßstab im Zeichenfenster wird rechts in der Werkzeugleiste angezeigt. Zur Änderung des Maßstabs benutzt man den Schieberegler links im Zeichenfenster.

5.1.7 Skalierungsfaktor (Maßstab)

Als Grundeinstellung wird ein Maßstab von 1:10 verwendet. Das bedeutet, daß 1 cm in der Zeichenfläche 10 cm in der Realität entspricht. Die Auswahl von 1:0,01 bedeutet, daß 1 cm 0,1 mm entspricht. Bei 1:1000 entspricht 1 cm in der Zeichenfläche 10 m in der Realität.

Bei der Benutzung des Preprozessors ist das Verhältnis zwischen dem kleinsten und dem größten zu zeichnenden Rechtecks auf 1:3200 begrenzt. Man kann zum Beispiel eine 1,6 m dicke Wand mit einer Wärmebrücke aus einem 0,5 mm dicken Stahldraht zeichnen. Ein anderes Beispiel wäre die Berechnung der Wärmeverlustes eines Hauses zum Erdreich, wobei das Berechnungsgebiet das Erdreich bis 32 m unter das Haus (bzw. seitlich) einschließt. In diesem Fall beträgt die kleinste mögliche Dicke der Bodenplatte oder eines anderen Materials 1 cm. **Hinweis:** Alle Längen können weitgehend willkürlich im Menüpunkt *Input/Mesh in x-dir* bzw. *Input/Mesh in y-dir* geändert werden, nachdem das geometrische Modell mit *<Update>* für die Berechnung aufbereitet worden ist.

Der Skalierungsfaktor sollte normalerweise so festgelegt werden, daß er sich an dem kleinsten zu zeichnenden Maß orientiert, siehe Tabelle 5.1. Die Maße, die gezeichnet werden können, sind Vielfache dieses kleinsten Maßes. Wenn sich zum Beispiel in einer Wärmedämmung ein Stahldraht mit einer Dicke von 0,5 mm befindet, dann könnte der Skalierungsfaktor mit 0,5 gewählt werden. Das bedeutet, daß alle Längen 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm und so weiter bis zu 1,6 m eingegeben werden können. Wenn der Stahldraht eine Breite von 0,7 mm hätte, dann wäre es wahrscheinlich besser als Skalierungsfaktor 0,1 zu benutzen, was dann zu einer Auflösung von 0,1 mm führen würde. Die Grundeinstellung des Skalierungsfaktors beträgt 10.

Kleinstes Maß	Größtes Maß	Faktor
0,5 mm	1,6 m	0,5
1 mm	3,2 m	1
1 cm	32 m	10
1 m	3200 m	1000

Tabelle 5:1: Auswahl des Skalierungsfaktors anhand des kleinsten zu zeichnenden Maßes.

5.1.8 Zeichnen in metrischen oder englischen Einheiten

Als Standard werden die Längen in metrischen Einheiten gezeichnet. Bei Bedarf können die Maßeinheiten auf Zoll (inch), Fuß (foot) oder Yard geändert werden. Dazu klickt man auf die Schaltfläche in der rechten unteren Ecke. Für die Berechnung werden die Längen automatisch in metrische Einheiten umgerechnet (nach der Aufbereitung mit <Update>). Bild 5.2 zeigt ein Rechteck mit einer Breite von 100 Zoll und einer Höhe von 20 Zoll (obere Abbildung). Es werden automatisch die metrischen Längen ermittelt (untere Abbildung). Es ist zu beachten, daß für die gezeichneten Rechtecke immer noch der gewählte Skalierungsfaktor gilt und daß alle Ergebnisse in metrischen Einheiten angegeben werden.

Die Wahl von *m*, *cm* und *mm* beeinflusst nicht die Skalierung. Es werden lediglich die Maßangaben in der Statuszeile (unten) in der entsprechenden Einheit angezeigt.

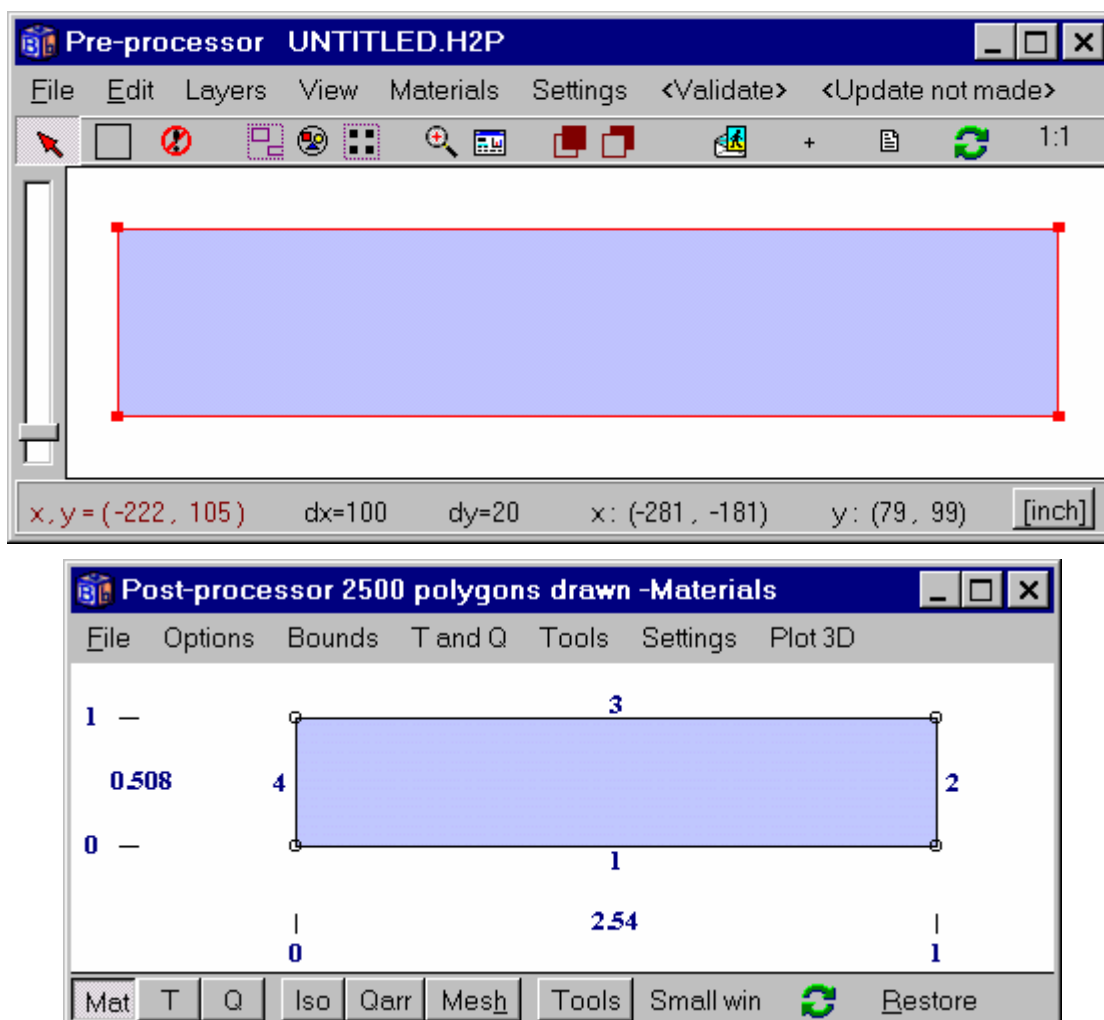


Bild 5.2: Das Rechteck hat eine Breite von 100 Zoll und eine Höhe von 20 Zoll (oben). Die metrischen Längen werden automatisch berechnet und im Postprozessor (unten) in Metern angegeben.

5.1.9 Aufbereitung der Geometrie für die Berechnung (Update)

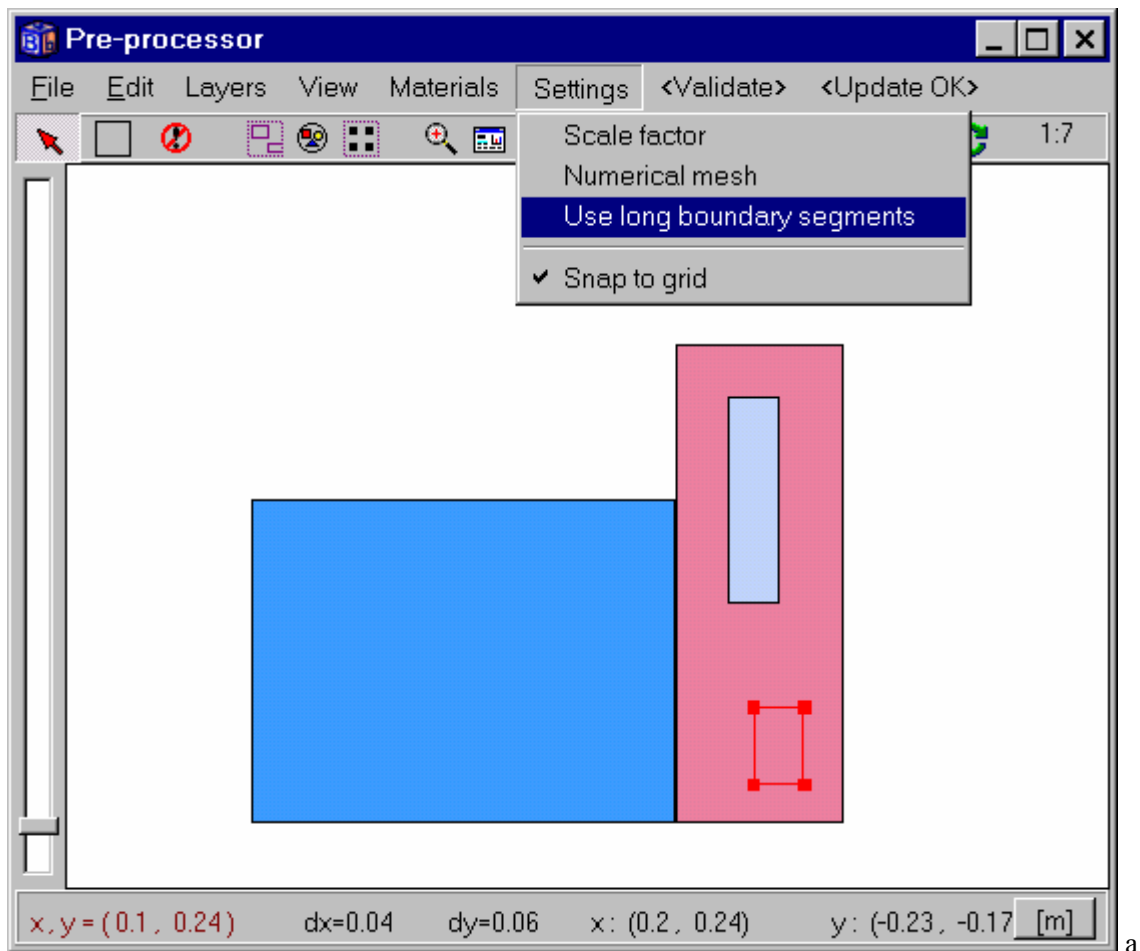
Die im Preprozessor gezeichnete Geometrie ist so lange nicht gültig, bis im Menü die Schaltfläche *<Update not made>* gedrückt wird. Von der Aufbereitung der grafischen Eingaben sind folgenden Formularblätter im Menü *Input* betroffen:

Input mesh (Eingabenetz), *Description of boundaries (Beschreibung der Randbedingungen)*, *Mesh in x-dir (Berechnungsnetz in x-Richtung)*, *Mesh in y-dir (Berechnungsnetz in y-Richtung)*, *Thermal properties (Thermische Eigenschaften)*, *Initial temperatures (Ausgangstemperaturen; sofern eine Ausgangstemperaturfläche eingezeichnet wurde)*, *Modifications - types and areas (Modifikationen - Arten und Flächen; sofern Modifikationen gezeichnet wurden)*.

Es werden mehrere Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, um die Gültigkeit des geometrischen Modells abzusichern. Um nur eine Einschränkung zu nennen: Die Fläche muß zusammenhängend sein. Wenn es in der Zeichnung Öffnungen gibt (leere, durch Rechtecke eingeschlossene Flächen), dann werden sie als Rahmenöffnungen behandelt, siehe Kapitel 10. Über die Schaltfläche *<Validate>* wird geprüft, ob die Zeichnung korrekt eingegeben ist. Es wird die Anzahl der verwendeten Rechtecke und Ränder angegeben, aber es erfolgt keine Aufbereitung der Geometrie für die Berechnung.

5.1.10 Lange Randsegmente

Die Randsegmente um das Berechnungsgebiet herum werden automatisch erzeugt. Als Standard werden sogenannte "Lange Randsegmente" verwendet. Eine Deaktivierung des Menüpunkts *Settings/Use long boundary segments* unterbricht das Randsegment bei jeder Koordinate des Eingabenetzes. Bild 5.3 (oben) zeigt vier Rechtecke. Ein Rechteck überlappt ein anderes aus dem gleichen Material (in der Abbildung markiert). Die mittlere Abbildung zeigt die Anzahl der Randsegmente, wenn "Lange Randsegmente" aktiviert sind. Die untere Abbildung zeigt die Ränder, wenn dieser Punkt nicht aktiviert ist. Im letzten Fall können jedem der Randsegmente 2 - 12 andere Randbedingungen zugeordnet werden.



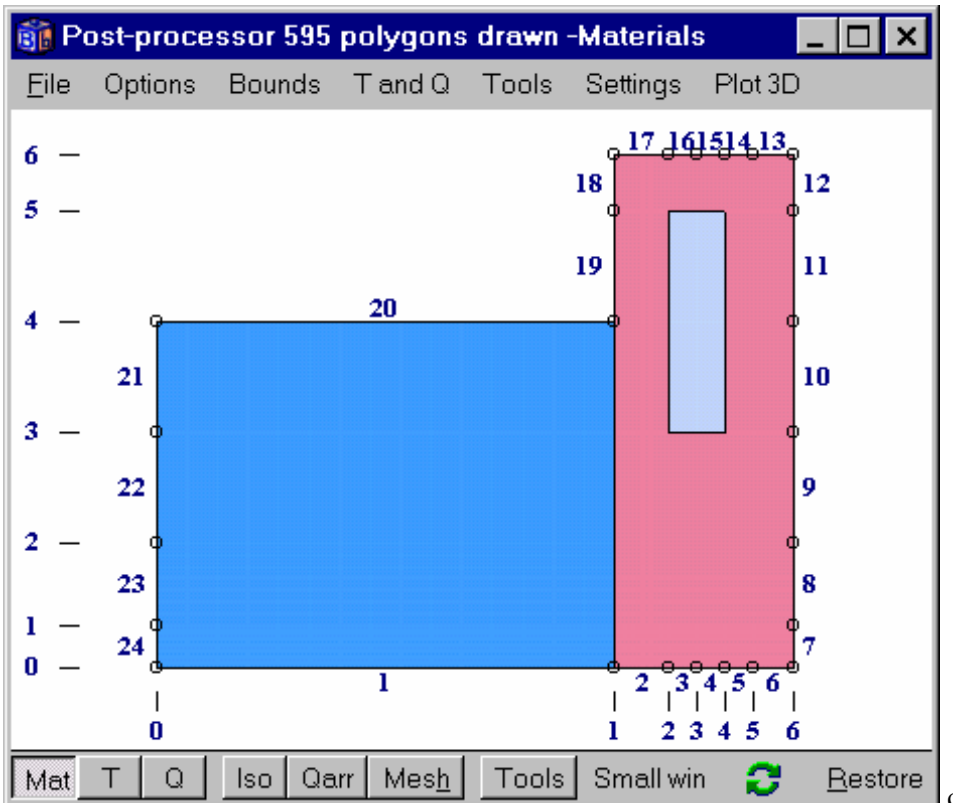
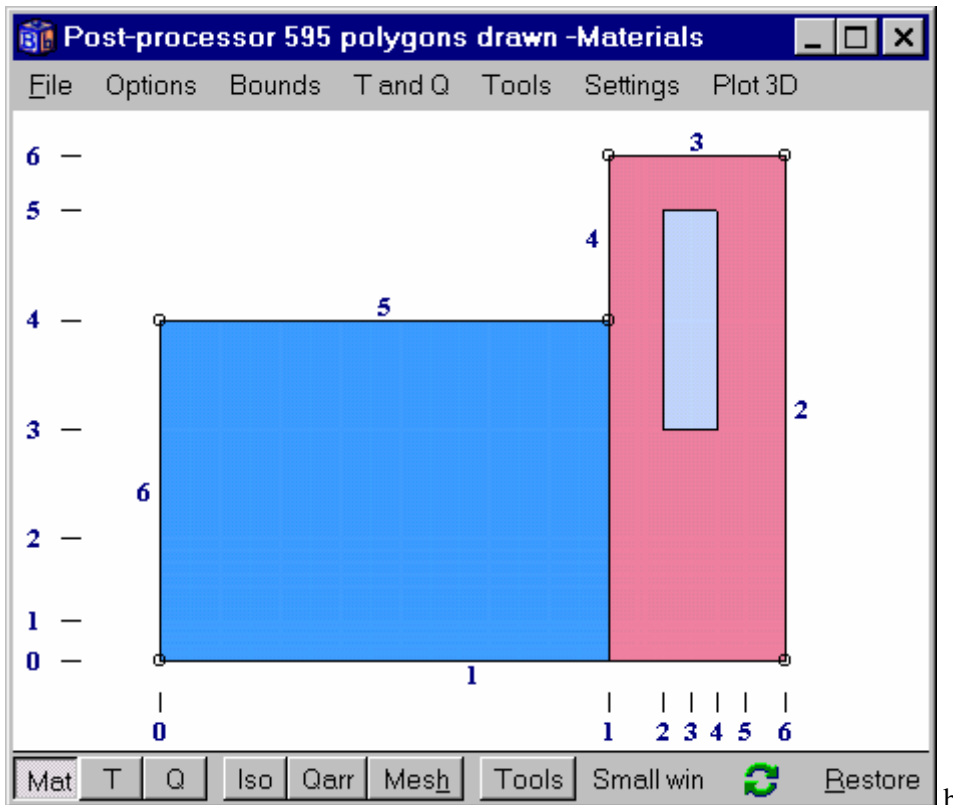


Bild 5.3: Im Preprozessor gezeichnetes geometrisches Modell (a). Lange Randsegmente können aktiviert (b) oder nicht aktiviert (c) sein.

5.1.11 Berechnungsnetz (Numerical mesh)

In jeder Richtung wird die Zahl der Berechnungszellen festgelegt, siehe Bild 5.4. Die Zellen werden vom Programm äquidistant (mit gleichen Abständen) verteilt. Die Standardeinstellung ist 50·50 Zellen. Es ist zu beachten, daß für eine Berechnung eine Mindestanzahl von Zellen definiert sein muß. Dies wird jedoch

automatisch abgesichert. Alternativ ist es auch möglich, das gerade verwendete Berechnungsnetz beizubehalten, d.h. nicht zu überschreiben (Option "Use current mesh instead").

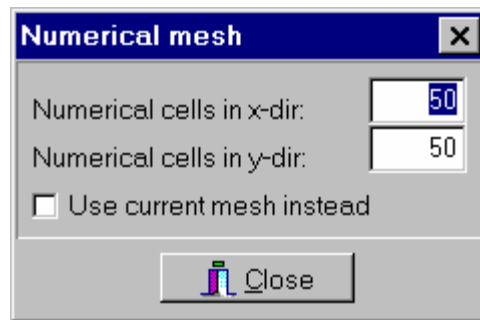


Bild 5.4: Eingabe der Anzahl der Berechnungszellen in x- bzw. y-Richtung.

5.1.12 Einfügen von Bildern

Es können Bilder in den Formaten BMP, EMF, WMF und ICO importiert werden. Ein Anwendungsbeispiel ist das Einfügen einer eingescannten Detailzeichnung. Das geometrische Modell kann dann durch Zeichnen von Rechtecken über dem importierten Hintergrundbild erstellt werden.

5.1.13 Preprozessor-Dateien H2P

Die gezeichnete Geometrie wird im gleichen Verzeichnis wie die numerische Eingabedatei *.DAT (oder *.PSE) abgespeichert und erhält die Dateierweiterung *.H2P. Wenn also eine DAT- (oder PSE-) Datei gespeichert wird, werden die Daten des Preprozessors unter dem gleichen Dateinamen gespeichert, aber mit der Erweiterung H2P.

Bei Bedarf können auch die Geometriedaten einer anderen H2P-Datei importiert werden, siehe Menüpunkt *File/Import H2P*. Die Geometriedaten werden zu den bereits gezeichneten Objekten hinzugefügt, wenn der Menüpunkt *File/Import H2P and add* ausgewählt wird. So kann zum Beispiel einem gezeichneten Wandabschnitt ein Fensterrahmen aus einer Bibliothek von Fensterrahmen hinzugefügt werden.

Es ist ebenso möglich Geometriedaten explizit in eine neue H2P Datei zu exportieren, siehe Menüpunkt *File/Export H2P*.

Die H2P-Datei enthält die Geometrie und die Materialnamen für jedes gezeichnete Objekt. Das bedeutet auch, daß nach einer Änderung der thermischen Eigenschaften eines bestimmten Materials im Materialeditor (siehe Abschnitt 5.2) die neuen Werte verwendet werden, sofern im Preprozessor eine Aufbereitung der Daten (<Update>) erfolgte.

5.1.14 Zeichenfläche mit internen Modifikationen

Für das Zeichnen von Flächen mit internen Modifikationen wählt man die Art der Modifikation in der Materialliste aus (siehe Bild 5.5) und zeichnet die Flächen in der gleichen Weise wie die Materialrechtecke. Es ist darauf zu achten, daß sich die Flächen innerhalb der Berechnungsgebietes befinden müssen und nicht unmittelbar an die Ränder angrenzen (siehe Bild 4.28). Im folgenden Beispiel wurden drei Rohre mit einem Wärmestrom plaziert. Der Wärmestrom wird standardmäßig mit 1 W/m angenommen und kann im Menüpunkt *Input/Types* geändert werden. Beachten Sie das erzeugte Raster, das die runden Rohrquerschnitte näherungsweise wiedergibt. Bild 5.6 zeigt die berechneten Isothermen um die 3 Rohre bei einem vorgegebenen Wärmestrom. Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität für die Fläche mit den internen Modifikationen entsprechen dem Material, auf dem sie gezeichnet sind.

Die internen Modifikationen werden in Abhängigkeit von der Art der Modifikation in weiß oder transparent (nur mit einer Begrenzungslinie) dargestellt.

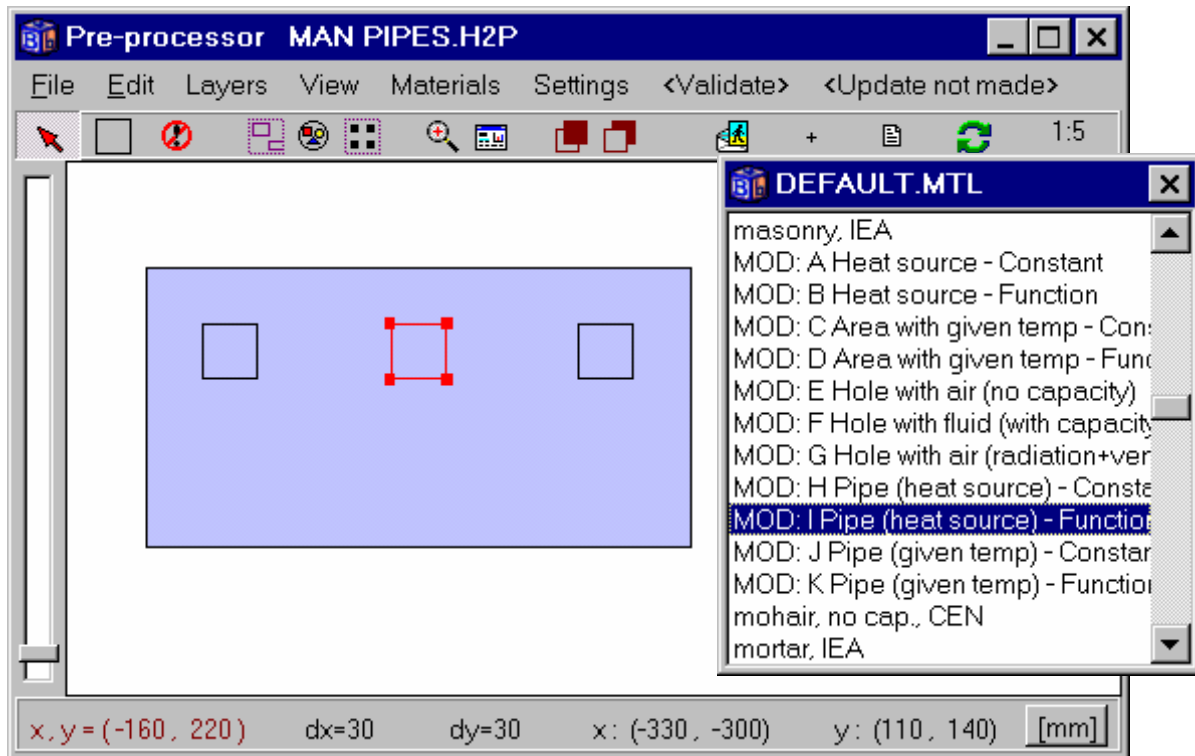
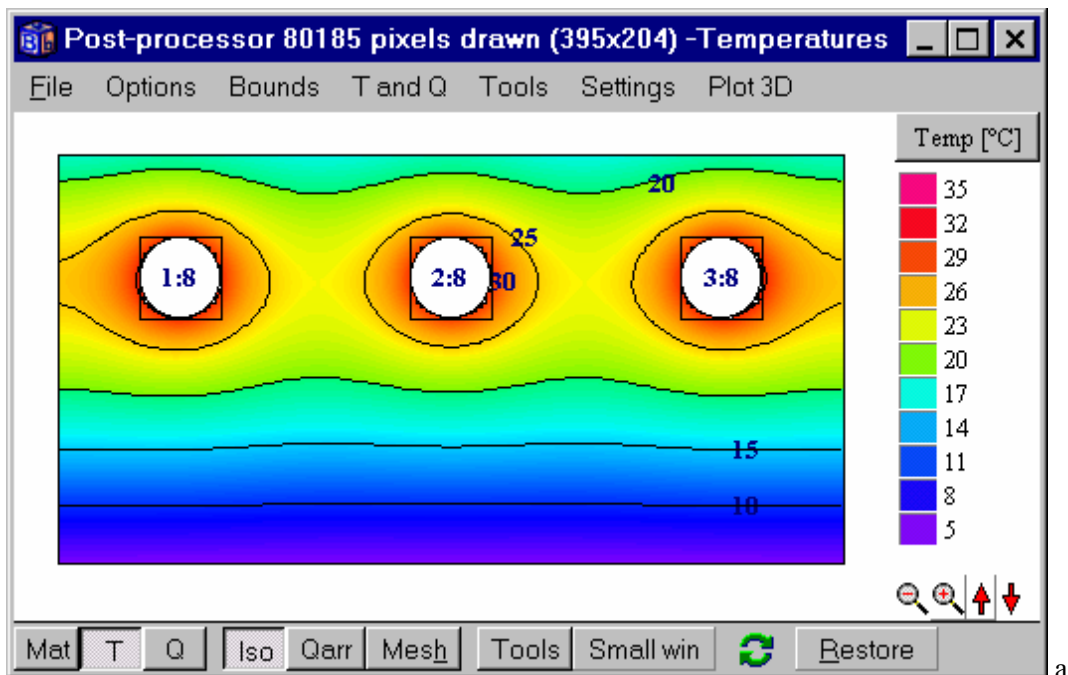
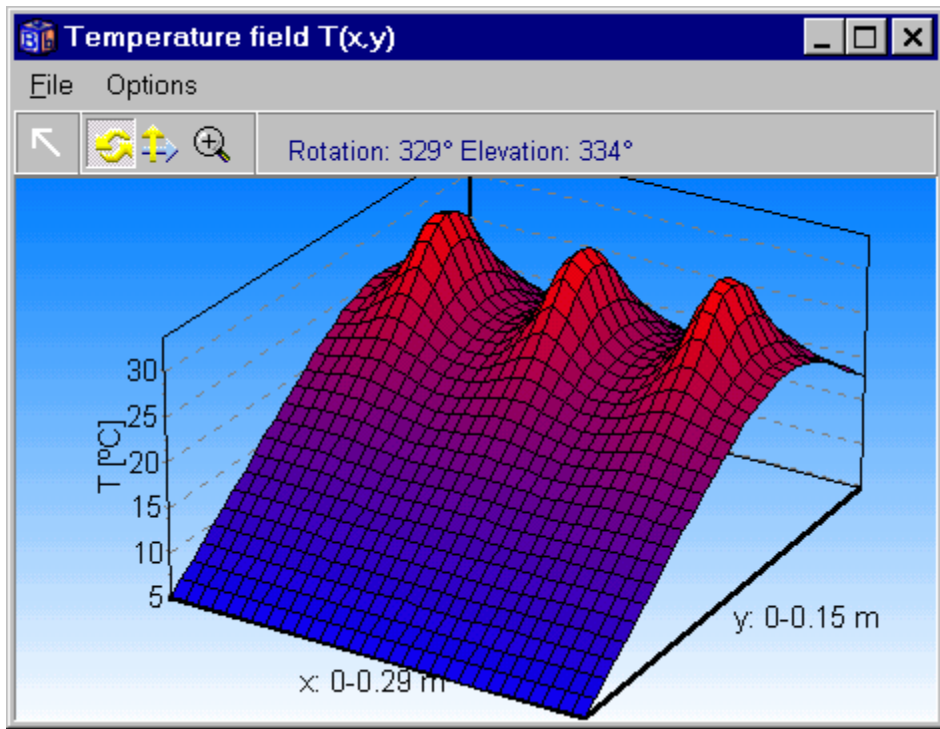
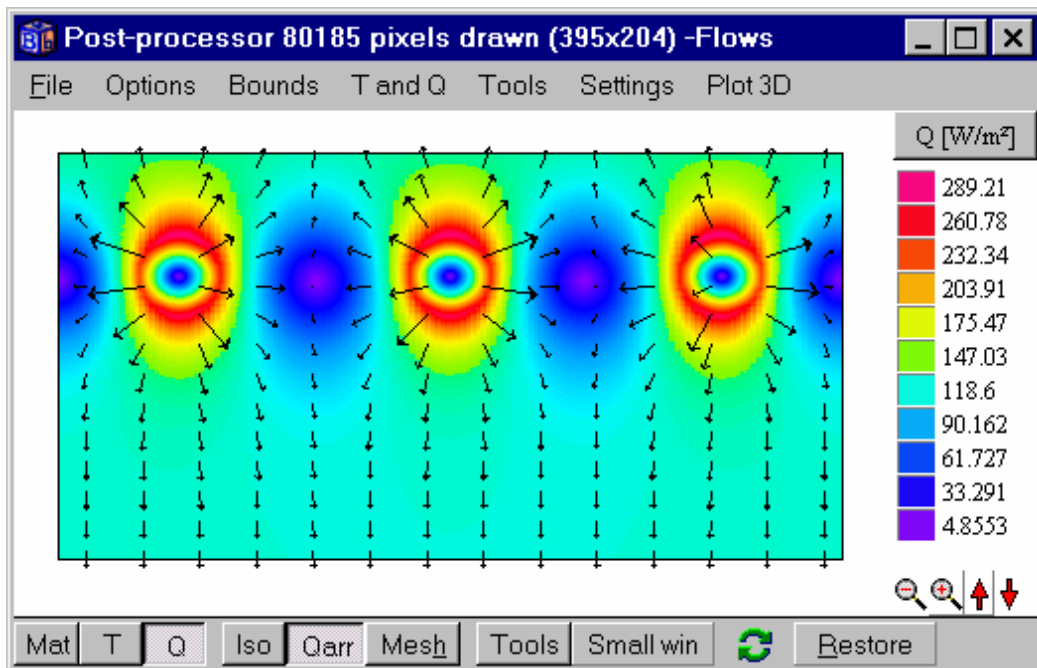


Bild 5.5: Interne Modifikationen können nach Auswahl des Typs der Modifikation (MOD) in der Materialliste wie Materialrechtecke gezeichnet werden.





b



c

Bild 5.6: Die Bilder (a) und (b) zeigen die berechnete Temperaturverteilung, das untere Bild (c) zeigt die Wärmeströme für das Beispiel aus Bild 5.5.

5.2 **Materialeditor**

5.2.1 **Einführung**

Materialeigenschaften können einfach editiert oder ergänzt werden. Es stehen mehrere Materialdatenbanken (Materiallisten) zur Verfügung. Die englischsprachige Standardliste (*Default.mtl*) enthält etwa 200 Baustoffe. Die Liste *General.mtl* beinhaltet über 1200 definierte Materialien. Weiterhin steht die Datei *DIN no cap.mtl* mit über 200 Baustoffen aus DIN V 4108-4 (Deutsches Institut für Normung) zur Verfügung.

Soll als Standardliste z.B. die Datei *DIN no cap.mtl* verwendet werden, ist die Datei zu öffnen und unter dem Namen *Default.mtl* abzuspeichern (vorher eventuell die englischsprachige alte Standardliste unter einem anderen Dateinamen sichern). Diese Umbenennung kann entweder außerhalb von HEAT2 (z.B. mit dem Explorer) oder über das Menü (*Materials/Edit materials/File/Open* bzw. */Save as*) erfolgen. Bitte beachten Sie, daß nach dieser Änderung H2P-Dateien mit Materialien aus anderen Materialdatenbanken im Preprozessor nicht mehr richtig angezeigt werden können, da das entsprechende Material nicht gefunden wird. In diesem Fall muß für eine korrekte Anzeige die bei der Eingabe verwendete Materialliste wieder geladen werden (Menü *Materials/Edit materials/File/Open*).

Updates der Materialdateien finden Sie unter www.buildingphysics.com.

Die Materialeigenschaften sind folgenden Quellen entnommen:

1. A.L. Edwards, A Compilation of Thermal Property Data for Computer Heat Conduction Calculations, UCRL-50589, February 24, 1969.
2. CEN (European Committee for Standardization). Diese Materialien und Baustoffe sind mit "CEN" gekennzeichnet.
3. Die thermischen Eigenschaften stammen aus dem "Catalogue of Material Properties", International Energy Agency, report Annex XIV, Volume 3. Es wurden Durchschnittswerte für die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit verwendet. Diese Materialien sind mit "IEA" gekennzeichnet.
4. Deutsche Industrienorm DIN (Deutsches Institut für Normung, DIN V 4108-4). In der Datei *DIN no cap.mtl* sind keine Wärmekapazitäten angegeben (Verwendung nur für Berechnungen der stationären Wärmeleitung bzw. Ergänzung der entsprechenden Werte).

In Fällen in denen bei der Erstellung der Datenbanken keine Wärmekapazitäten verfügbar waren (gekennzeichnet mit "No Cap.") wurde die Wärmekapazität auf 1 gesetzt. Diese Materialien sollten nur für stationäre Berechnungen verwendet werden.

Bild 5.7 zeigt den Materialeditor (Menüpunkt *Materials/Edit materials* im Preprozessor). Der Liste können neue Materialien hinzugefügt werden. Bestehende Eigenschaften können editiert werden. Es können auch Materialien aus der Liste gestrichen werden.

Das Editieren erfolgt durch Klick auf das entsprechende Material. Es können Materialbezeichnung, thermische Eigenschaften, Farbe und Schraffur geändert werden. Beachten Sie, daß sich Farbe und Schraffur unterschiedlicher Materialien nicht zwangsläufig unterscheiden müssen. Neuen Materialien kann somit auch eine bereits vergebene Farbe und Schraffur zugeordnet werden. Gegebenenfalls kann es vorteilhaft sein, für das Material eine Farbe zu wählen, die der Farbe anderer Materialien gleicher Art ähnelt. So können z.B. Beton, Leichtbeton und Porenbeton mit einem blauen Farbton gekennzeichnet werden.

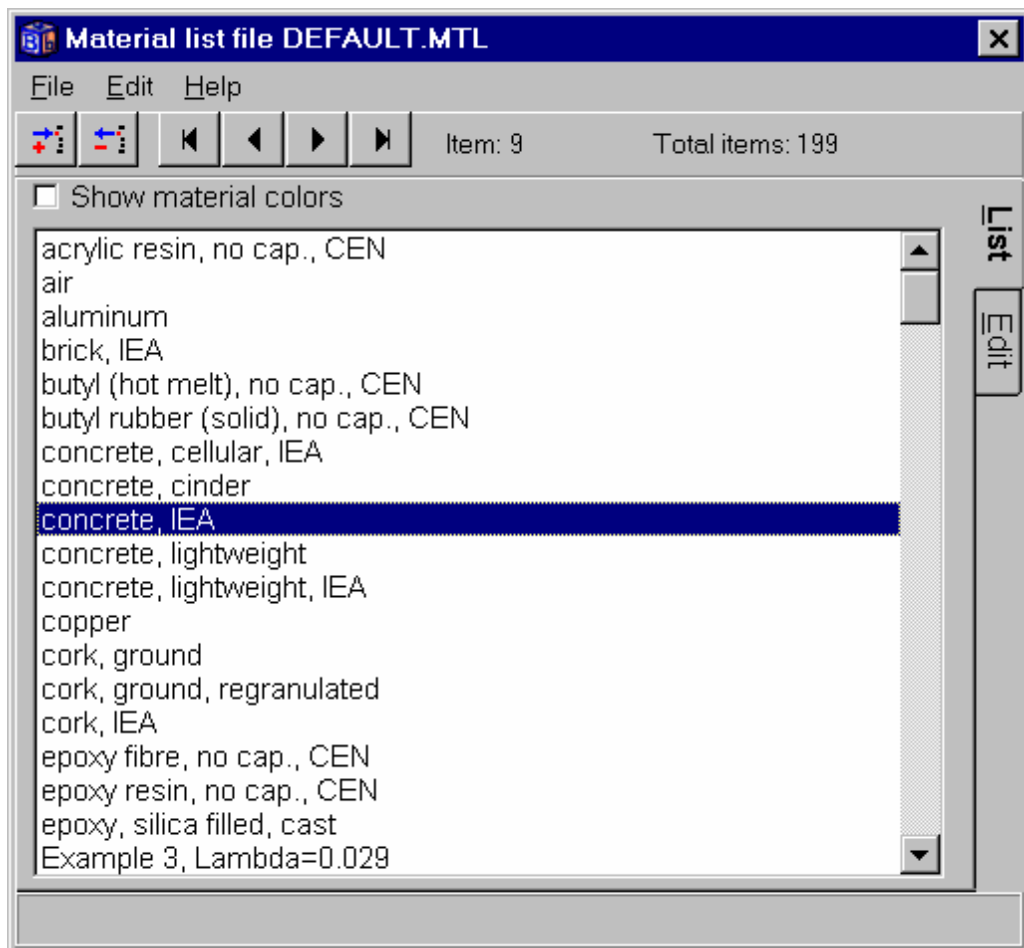


Bild 5.7: Materialeditor.

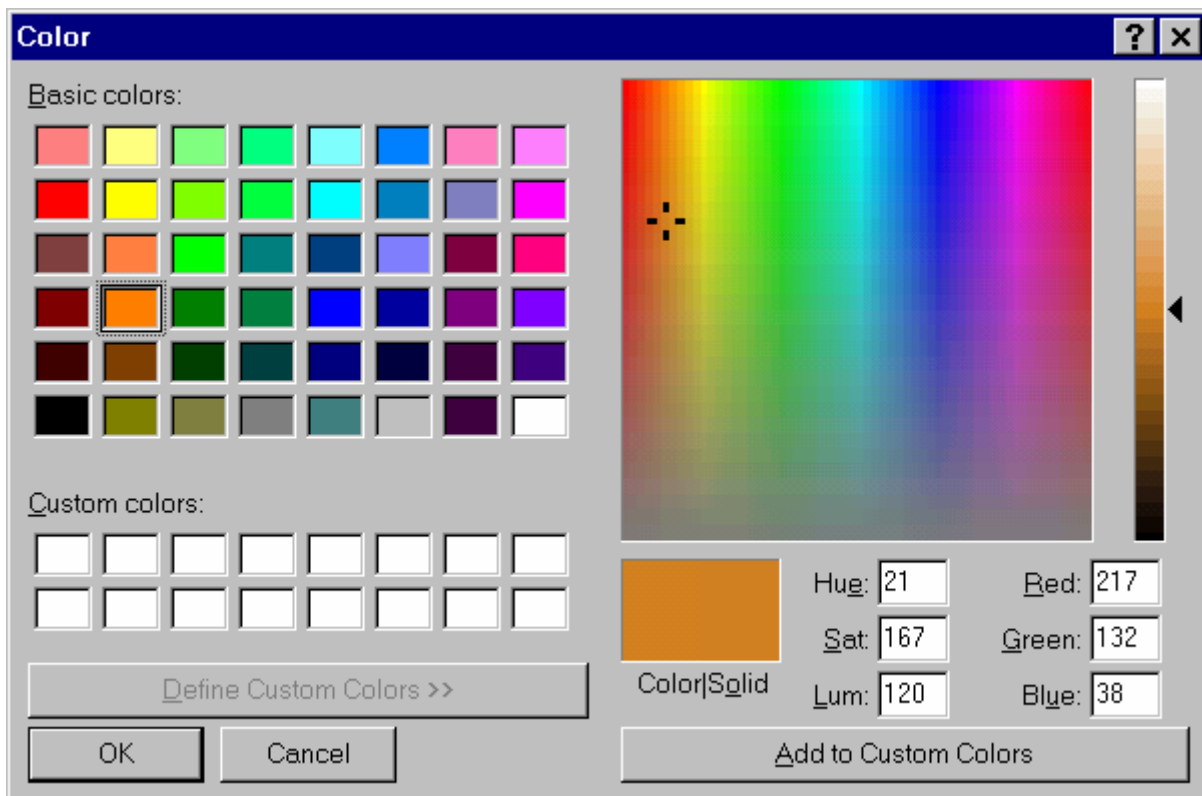
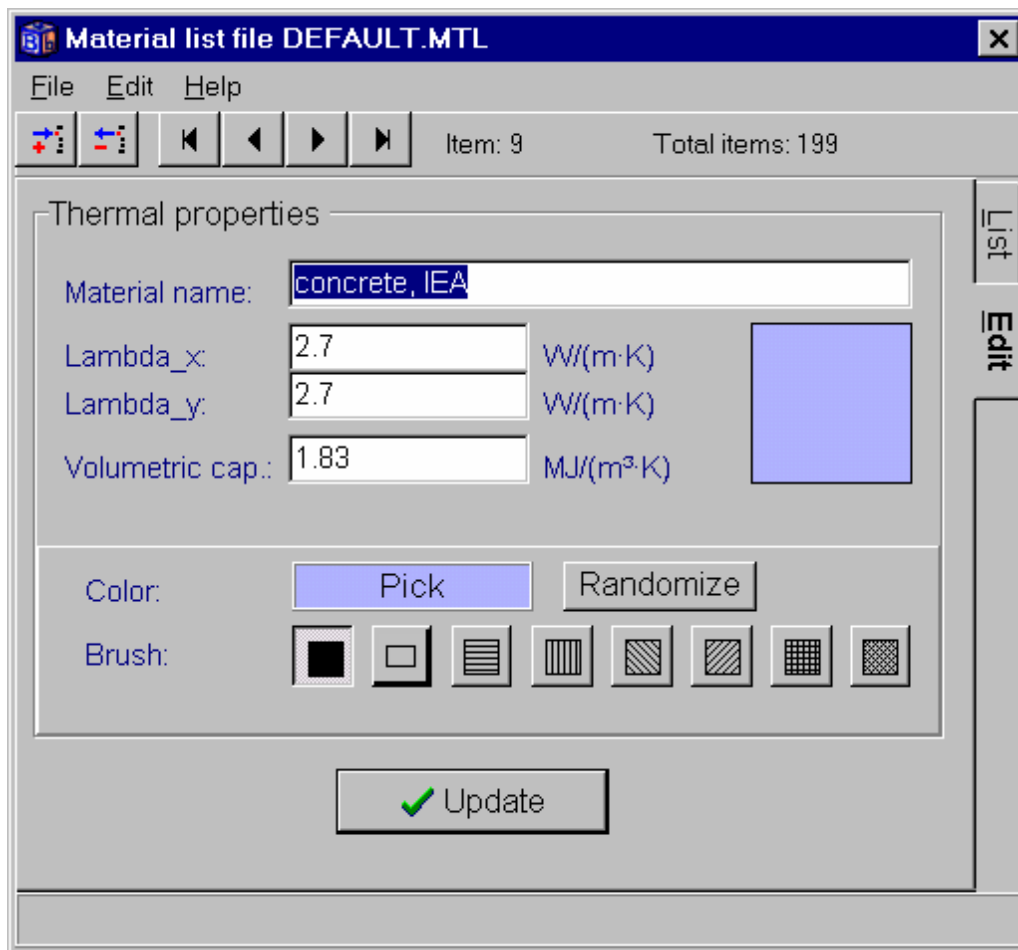


Bild 5.8: Materialbezeichnung, thermische Eigenschaften, Farbe und Schraffur können für jedes Material editiert werden.

5.2.2 Speichern der Materialdateien

Normalerweise fügt der Benutzer neue Materialien hinzu (oder editiert bereits existierende) in der Datei DEFAULT.MTL. Bei jedem Start von HEAT2 wird diese Materialliste geladen. Natürlich ist es ebenso möglich, eine andere Materialdatei zu speichern oder zu öffnen. Eine neue Datei sollte im gleichen Verzeichnis gespeichert werden, in dem sich auch HEAT2.EXE befindet (Menü *File/Save* or *File/Save as*).

Die Eingabedatei (DAT oder PSE) enthält den Namen der Materialliste, sofern es sich nicht um die Standardliste DEFAULT.MTL handelt. Beim Öffnen der Eingabedatei wird in diesem Fall gleichzeitig die zugehörige Materialdatenbank geladen.

Werden Materialeigenschaften im Editor geändert, aber nicht in der Materialdatei gespeichert, werden die Änderungen nur in der momentanen HEAT2-Sitzung berücksichtigt.

Immer wenn das geometrische Modell im Preprozessor für die Berechnung aufbereitet wird (<Update>), werden die Materialnamen eines jeden gezeichneten Rechtecks mit den Namen in der Materialliste in Übereinstimmung gebracht und die in der Materialdatei hinterlegten Materialeigenschaften übernommen. Das bedeutet, daß die aktuell gespeicherten Materialeigenschaften verwendet werden, auch wenn es sich um eine ältere Eingabedatei handelt. Wenn die Materialdatenbank den Materialnamen nicht enthält (weil z.B. das Material eines bereits gezeichneten Rechtecks aus der Liste gelöscht wurde) erscheint eine Warnung und das gezeichnete Rechteck ohne gültigen Verweis wird schwarz markiert.

5.2.3 Importieren und Mischen von Materialdaten

Alternativ zum Hinzufügen von einzelnen Materialien mit Hilfe des Materialeditors können auch Daten in verschiedenen Dateiformaten in die aktuelle Materialliste geladen und eingefügt werden. Wenn der Materialname in der Liste bereits existiert, werden die Materialeigenschaften nicht überschrieben. Materialien können auch aus anderen MTL-Dateien geladen und in die aktuelle MTL-Datei eingefügt werden (Menüpunkt *Materials/Edit materials/File/Merge with material file*). Andere Textformate können wie folgt importiert werden:

Typ 1 (Menüpunkt *Materials/Edit materials/File/Merge with text file format 1*):

Der Materialname sollte in den ersten 40 Spalten definiert werden, dann folgt die volumenbezogene Wärmekapazität C [$J/(m^3 \cdot K)$] und die Wärmeleitfähigkeiten λ_x, λ_y [$W/m \cdot K$]. Wenn λ_y nicht angegeben ist, gilt $\lambda_y = \lambda_x$.

Beispiel:

Materialname eins	1 0.1
Materialname zwei	2 0.1 0.2

Typ 2 (Menüpunkt *Materials/Edit materials/File/Merge with text file format 2*):

Materialname in den ersten 40 Spalten, dann die Dichte [kg/m^3], die spezifische Wärmekapazität c_p [$J/(kg \cdot K)$] und die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_x (= \lambda_y)$ [$W/(m \cdot K)$].

Beispiel:

Materialname eins	1 1 0.1
Materialname zwei	2 2 0.2

5.3 Laden und Speichern von Eingabedaten

Die numerischen Eingabedaten der Berechnungsfälle sind in den Dateien (*.DAT) enthalten.

Die PSE-Datei enthält die Eingabedaten, das Temperaturfeld und bei einem instationären Problem zusätzlich die Summe der Wärmeströme über die Ränder und den Zeitpunkt der Unterbrechung der Berechnung. Diese Werte ermöglichen es, die Simulation (stationär oder instationär) zu stoppen, HEAT2 zu beenden und das Programm später erneut zu starten. Die Simulation kann dort fortgesetzt werden, wo sie unterbrochen wurde. Hierbei ist für die Berechnung zuerst die PSE-Datei abzuspeichern (PSE ist die Abkürzung für *Pause*), bevor HEAT2 beendet wird. Wenn HEAT2 später wieder gestartet wird, öffnet man die PSE-Datei und setzt die Berechnung fort.

5.4 Einfügen von Netzkoordinaten (Konstruktionsachsen)

Normalerweise werden die erforderlichen Netzkoordinaten bzw. Achsen vom Preprozessor erzeugt. Es ist jedoch auch möglich, Achsen unter Verwendung der Texteingabe einzufügen. Angenommen, wir wollen in einem bereits vorhandenem Modell eine Fläche hinzufügen. Vermutlich müssen neue Netzkoordinaten definiert werden. Viele der bereits definierten Flächen, Randbedingungen, Widerstände, Wärmequellen und so weiter müssen dann auf der Grundlage der neuen Koordinaten neu definiert werden.

Das Programm ermöglicht über den Menüpunkt *Input/Insert mesh point* ein automatisches Einfügen von Koordinaten des Eingabernetzes (siehe Bild 5.9). Die neuen Koordinaten werden jeweils in der Mitte eines vorhandenen Segments eingefügt, welches dabei in zwei Segmente aufgeteilt wird (jedes mit der halben Länge des alten). Die Anzahl der Berechnungszellen in jedem der beiden Segmente entspricht der Hälfte der Zellen des ursprünglichen Segments. Ist die Anzahl der Zellen im ursprünglichen Segment eine ungerade Zahl, dann entsteht eine gerade und eine ungerade Anzahl, z.B. sieben Berechnungszellen werden in 3 und 4 Zellen aufgeteilt. Wird eine Koordinate eingefügt, sollte der Anwender die Längen (Teillängen), die Anzahl der Berechnungszellen in den neuen Segmenten und die Expansionskoeffizienten prüfen und gegebenenfalls anpassen. Die erforderliche Änderungen bei der Definition der Flächen, Randbedingungen, Widerstände, Wärmequellen etc. erfolgen automatisch.

Bitte beachten sie, daß es hier keine Funktion "Rückgängig" gibt. Es ist daher zu empfehlen die Daten vor der Aktion zu speichern, damit gegebenenfalls der Ausgangszustand wiederhergestellt werden kann, wenn das Ergebnis nicht den Erwartungen entspricht. Beachten Sie auch, daß Netzkoordinaten nicht wieder entfernt werden können, wenn sie einmal eingefügt wurden.

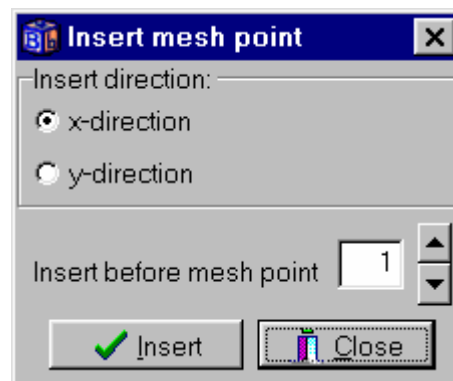


Bild 5.9: Menü für das Einfügen zusätzlicher Koordinaten.

Betrachten wir Bild 5.10. Die obere Darstellung zeigt das Berechnungsbeispiel aus Bild 4.21. Das untere Bild zeigt die Koordinaten nach dem Einfügen einer zusätzlichen Achse in x-Richtung vor der Achse 1.

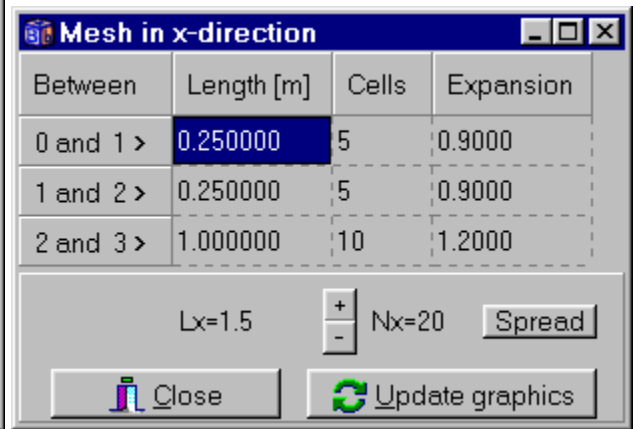
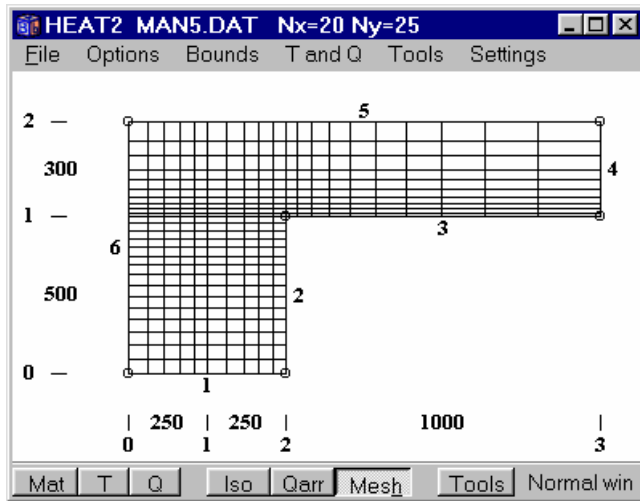
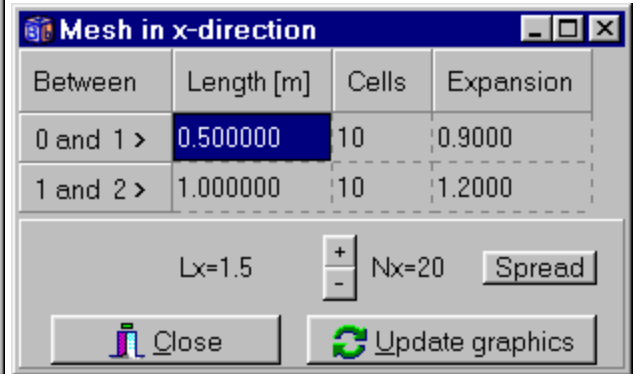
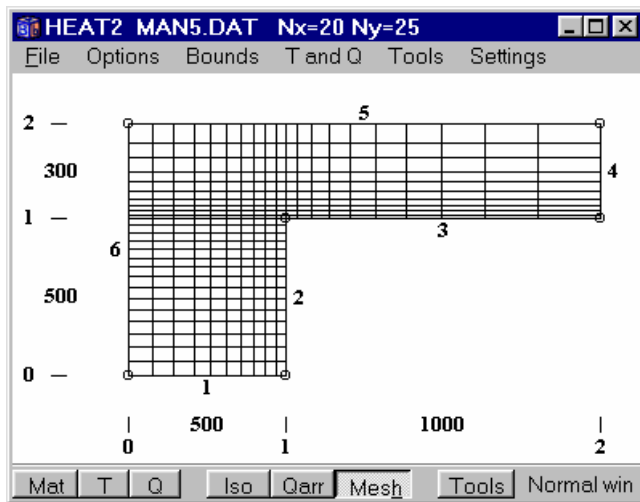


Bild 5.10: In der unteren Abbildung wurde vor der Koordinate (Konstruktionsachse) 1 in x-Richtung eine zusätzliche Achse eingefügt.

Angenommen wir wollen zwei unterschiedliche Randbedingungen am oberen Rand ($y = 0,8 \text{ m}$) bei $0 \leq x < 1 \text{ m}$ und $1 \leq x < 1,5 \text{ m}$ definieren. Wenn das hierfür erforderliche Eingabernetz bei der Eingabe nicht berücksichtigt wurde, muß das vorhandene Netz neu definiert werden. Vor der Koordinate 3 in x-Richtung muß eine neue Netzkoordinate (Achse) eingefügt werden, siehe Bild 5.11.

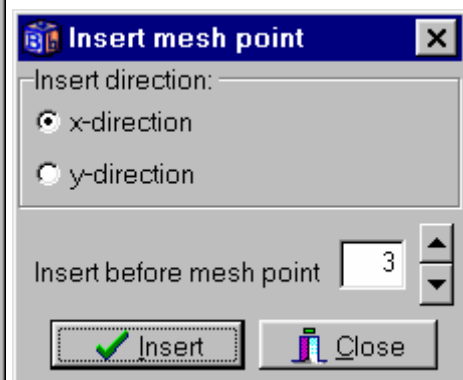
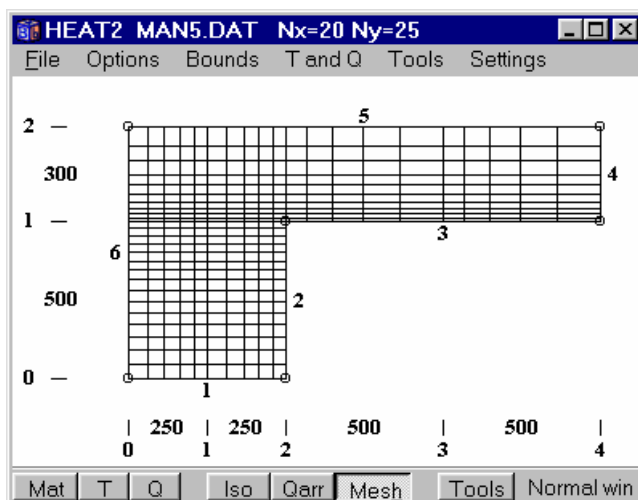


Bild 5.11: Neu eingefügte Netzkoordinate (Achse) in x-Richtung vor der Koordinate 3.

Im nächsten Schritt ändern wir die Anzahl der Ränder (*Input/Output mesh*) von 6 auf 7 sowie die Beschreibung der Randsegmente für die Nummern 6 und 7 (siehe Bild 5.12). Es gibt jetzt vier Segmente in

x-Richtung und insgesamt sieben Randsegmente (begrenzt durch kleine Kreise), siehe Bild 5.13. Den Randsegmenten 5 und 6 können nun verschiedene Randbedingungen zugeordnet werden.

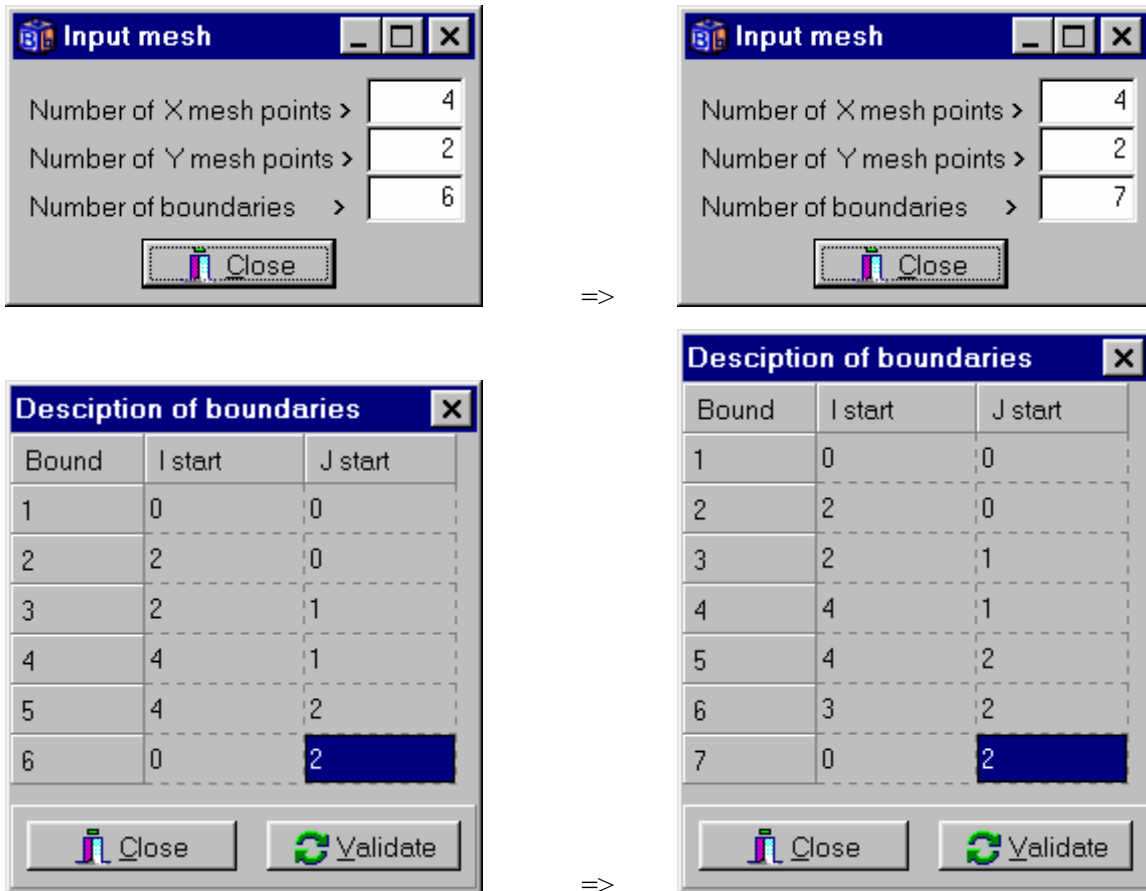


Bild 5.12: Ändern der Anzahl der Randsegmente von 6 auf 7 (oben). Anschließend erfolgt eine Neuordnung der Koordinaten der Randsegmente Nr. 6 und 7.

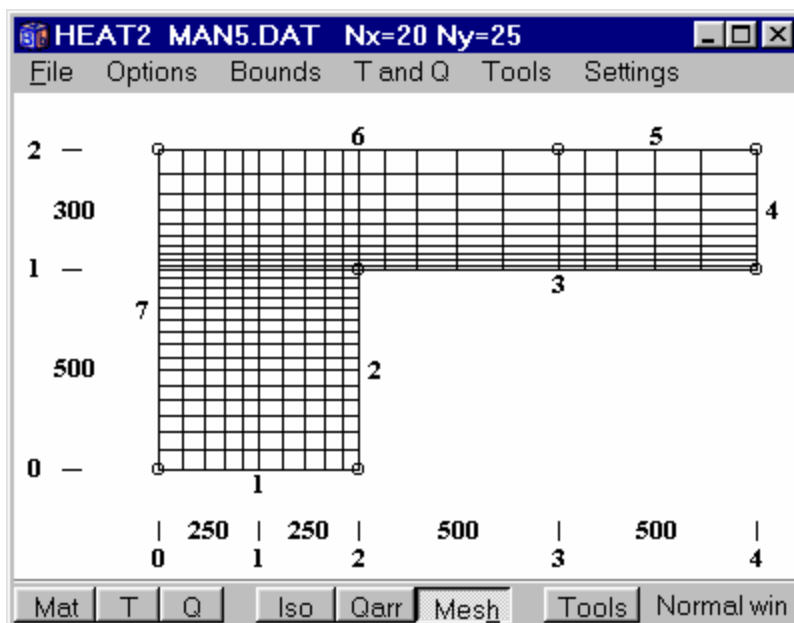


Bild 5.13: Nach den dargestellten Änderungen können den Randsegmenten 5 und 6 jetzt unterschiedliche Randbedingungen zugeordnet werden.

5.5 Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften werden normalerweise im Preprozessor zugeordnet und bearbeitet. Sie können aber auch mit der Texteingabe editiert werden. Bild 5.14 zeigt das Fenster mit den thermischen Eigenschaften. Nähere Informationen zu den thermischen Eigenschaften λ_x , λ_y und C finden Sie in Abschnitt 4.7.

Die gewählten Basiswerte gelten für das gesamte Berechnungsgebiet. Die eingegebenen Materialrechtecke können einander überlappen, dabei gelten jeweils die Daten des zuletzt definierten (obersten) Rechtecks.

Bei Bedarf kann ein alternativer Materialname eingegeben werden. Dieser Name wird in der Eingabedatei gespeichert. Es besteht dabei aber keine direkte Verbindung zwischen dem Namen und den thermischen Eigenschaften. Diese können separat editiert werden. Der Name wird im Postprozessor neben der Skala mit den thermischen Eigenschaften angezeigt.

Es ist auch möglich, aus der Materialliste ein Material auszuwählen und dieses direkt im Preprozessor zu editieren. Wurde ein Material ausgewählt, werden die Materialbezeichnung und die thermischen Eigenschaften der aktuellen Fläche zugeordnet.

Hinweis: Bei älteren Programmversionen, bei denen eine Änderung der Materialdatenbank innerhalb von HEAT2 noch nicht möglich war, kann die Materialdatei (MTRL50.TXT) mit einem externen Editor geöffnet und modifiziert werden.

Die volumenbezogene Wärmekapazität wird mit C [J/(m³·K)] bezeichnet und ist als Produkt aus der Dichte ρ [kg/m³] und der spezifischen Wärmekapazität c_p [J/(kg)] definiert, d.h. $C = \rho \cdot c_p$. Es ist zu beachten, daß C in der Einheit [MJ/(m³·K)] angegeben wird, d.h. $1,0 \cdot 10^6$ J/(m³·K). Der Standardwert für C wird mit 1,0 MJ/(m³·K) angenommen. Für stationäre Simulationen ist der Wert C nicht von Bedeutung.

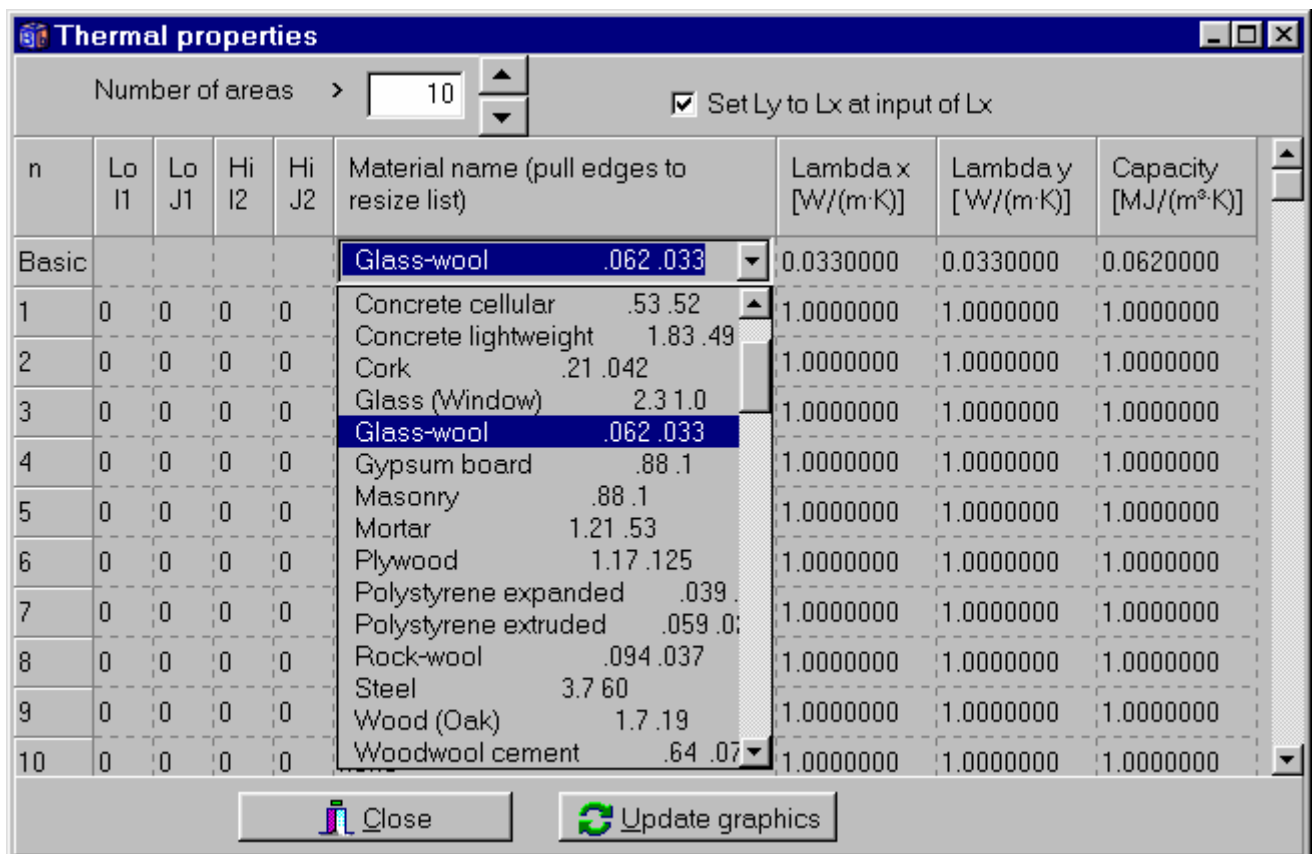


Bild 5.14: Eingabe der thermischen Eigenschaften.

Die Wärmeleitfähigkeit in y -Richtung wird dem Wert in x -Richtung gleichgesetzt, wenn die Checkbox "Set L_y to L_x at input of L_x " (Bild Bild) aktiviert ist (Standardeinstellung). Die meisten Materialien sind isotrop, Holz kann eine Ausnahme darstellen.

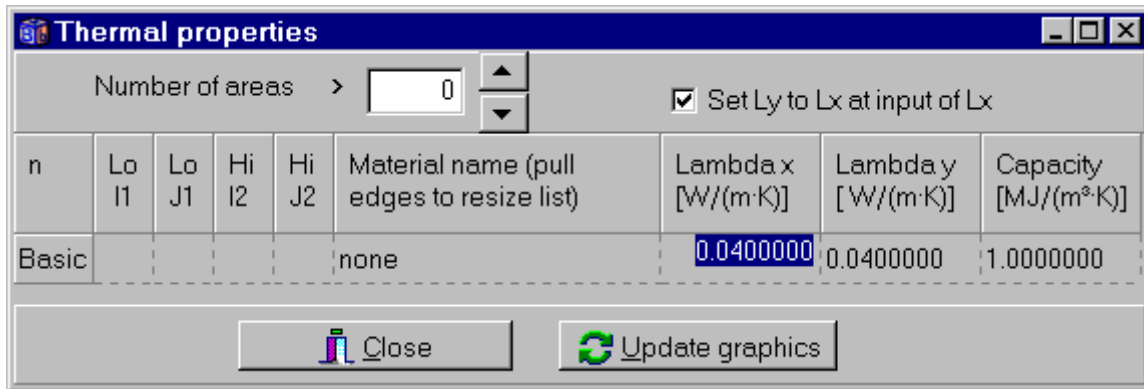


Bild 5.15: Die Wärmeleitfähigkeit in y -Richtung muß nicht explizit festgelegt werden, wenn sie mit dem gleichen Wert wie in x -Richtung angenommen wird und die Checkbox aktiviert ist.

5.6 Randbedingungen

Randbedingungen können eine Temperatur T [°C] mit einem zugehörigen Wärmeübergangswiderstand R_s [m²·K/W] oder ein vorgegebener Wärmestrom Q [W/m²] sein. Die Temperaturen bzw. Wärmeströme sind entweder zeitlich konstant oder zeitabhängig in Form mit einer Sinusfunktion, einer schrittweise konstanten oder einer schrittweise linearen Funktion zu definieren (zu den Funktionen siehe Abschnitt 5.9).

Der Anwender definiert die Randbedingungen in einer Liste und weist sie den Randsegmenten zu. Betrachten Sie Bild 5.16. In diesem Fall gibt es vier Randbedingungen mit den Nummern $n = 1-4$ (erste Spalte). In der zweiten Spalte ist die Art der verwendeten Randbedingungen festgelegt. Die erste Randbedingung gilt für alle Randsegmente, denen nicht explizit eine bestimmte Randbedingung zugewiesen wurde (*Default* = Standardwert).

Die vierte Spalte verweist, sofern erforderlich, auf die zugehörige Funktion (Sinusfunktion bzw. schrittweise konstante oder lineare Funktion). Die Funktion bezieht sich entweder auf die Temperatur oder auf den Wärmestrom.

Die letzte Spalte gibt den Wärmeübergangswiderstand an der Bauteiloberfläche an (betrifft nur Temperaturrandbedingungen).

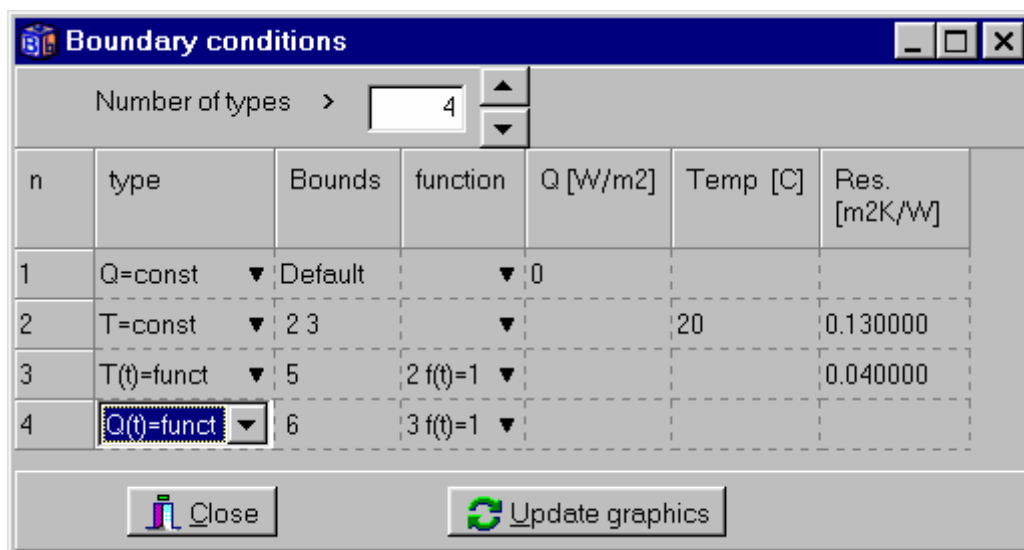


Bild 5.16: Zuordnung der Randbedingungen zu den entsprechenden Randsegmenten.

Für aneinandergrenzende Randsegmente kann die Eingabe der Randnummern in einem verkürzten Format erfolgen. Bild 5.17 zeigt das Eingabefenster der Randbedingungen für eine Bodenplatte auf Erdreich (siehe Eingabedatei slab1.dat). Die vier Randnummern in der zweiten Zeile können alternativ zur Reihe "6 7 8 9" auch in der Form "6-9" eingegeben werden.

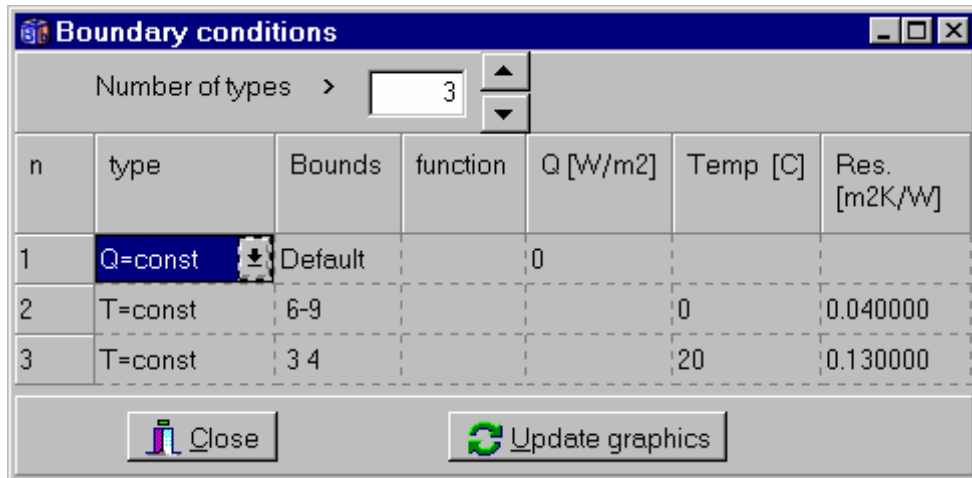


Bild 5.17: Aufeinanderfolgende Randsegmente (zweite Zeile) können alternativ zur Aufzählung "6 7 8 9" auch in der verkürzten Form "6-9" eingegeben werden.

5.7 Ausgangstemperaturen (Initialtemperaturen)

Siehe Kapitel 4.8. Um die Temperaturen zu initialisieren, benutzt man *Solve/Reset Temperatures* oder klickt im Eingabefenster *Initial temperatures* auf die Schaltfläche *Update graphics*, siehe Bild 5.18.

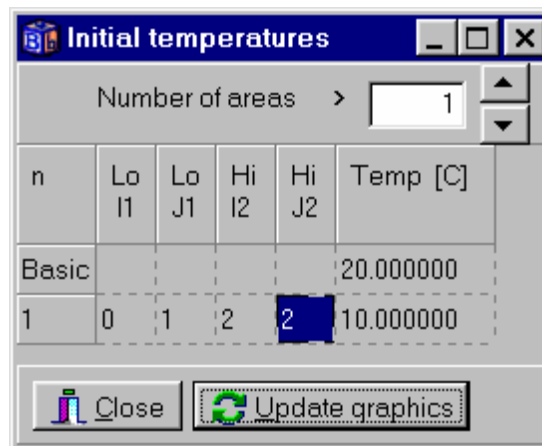


Bild 5.18: Eingabe von Ausgangs- bzw. Initialtemperaturen.

5.8 Interne Modifikationen

5.8.1 Einführung

Interne Modifikationen können verwendet werden, um Probleme wie z.B. Fußbodenheizungen, Hohlräume mit Flüssigkeiten oder Gasen, Strahlung innerhalb von Hohlräumen etc. zu simulieren. Bild 5.19 zeigt ein Beispiel eines Quadrats mit 85 quadratischen Wärmequellen von je 1 W/m, angeordnet in einem Schachbrettmuster. Die kleinen Quadrate haben eine Größe von 4 · 4 mm.

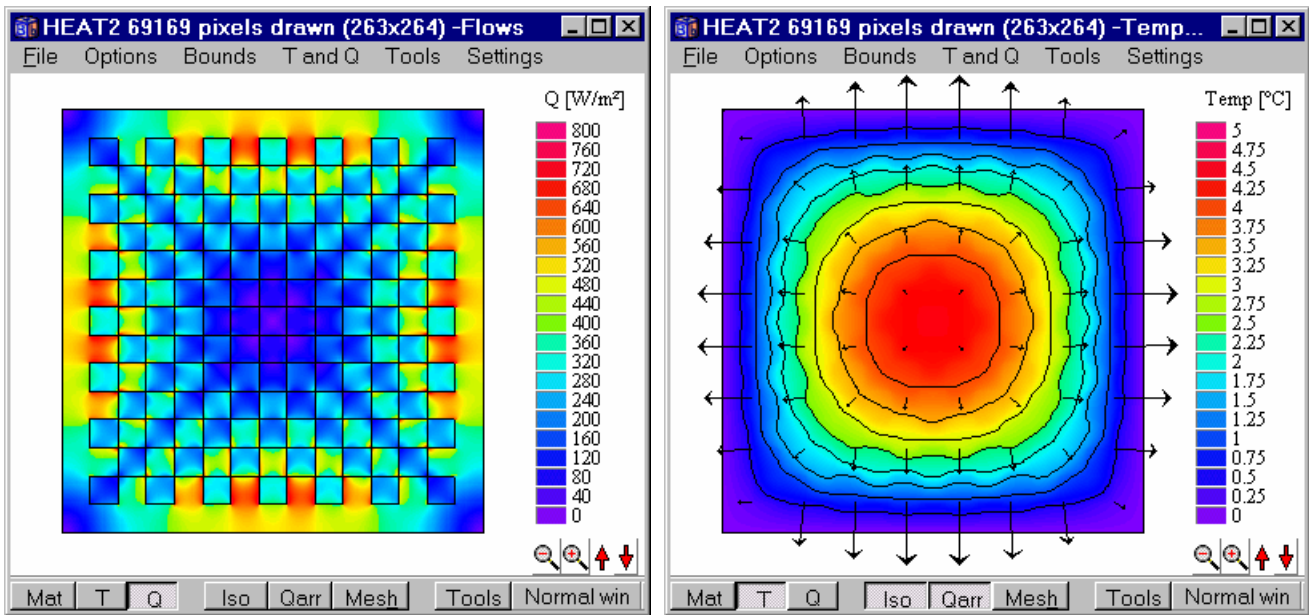


Bild 5.19: In einem Quadrat sind 85 Wärmequellen von je 1 W/m im Schachbrettmuster angeordnet. Die Oberflächentemperatur am Rand beträgt $T = 0\text{ °C}$. Die linke Abbildung zeigt die Wärmestromdichte. In der Mitte des Quadrats ist der Wärmestrom Null. Die rechte Abbildung zeigt die Temperaturverteilung, die Isothermen und die Richtung der Wärmeströme.

5.8.2 Arten interner Modifikationen

Bild 5.20 zeigt das Eingabefenster für die möglichen internen Modifikationen. Es stehen 11 unterschiedliche Typen zur Verfügung. Der entsprechende Typ wird aus der Liste ausgewählt und die Daten in der Spalte "Data" eingegeben. Wenn eine Modifikation zeitabhängig ist, wird die zu verwendende Funktion in der letzten Spalte ausgewählt. Tabelle 5:2 zeigt eine Beschreibung aller verfügbaren Modifikationen und die erforderlichen Eingabedaten.

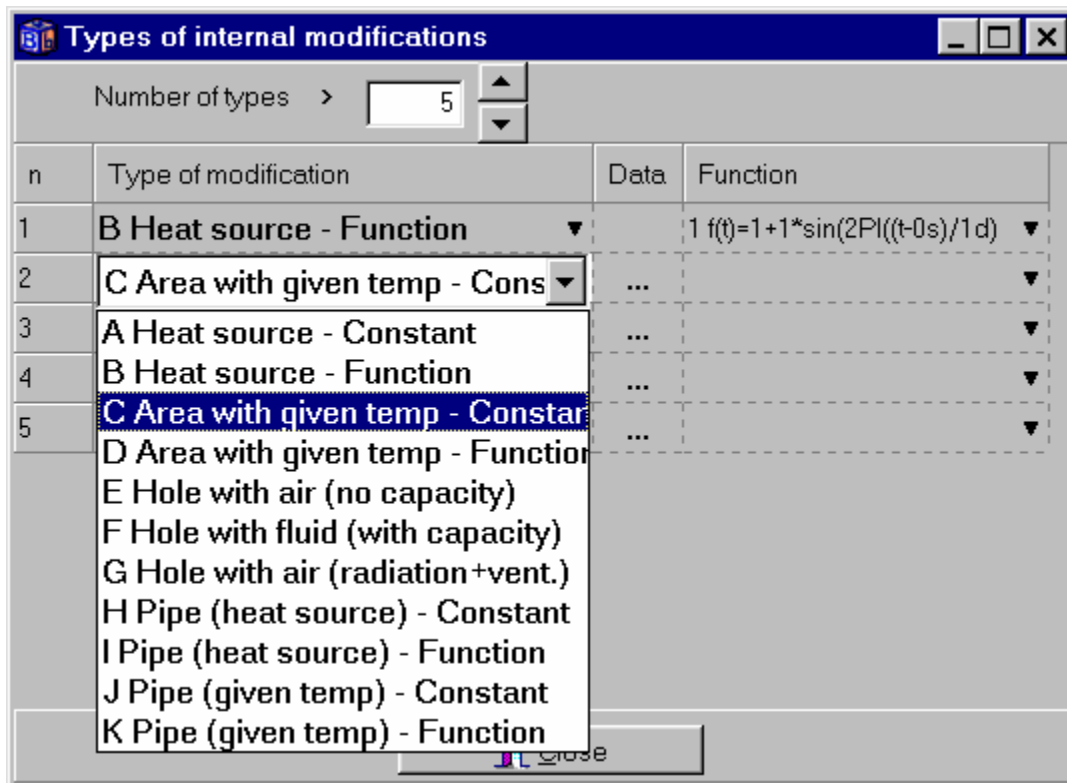
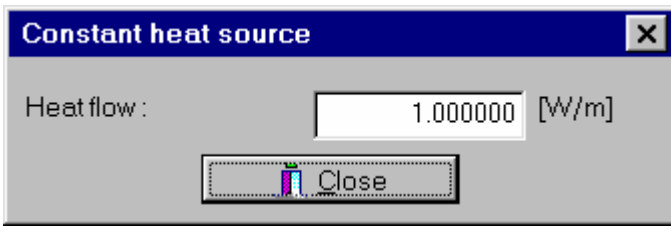


Bild 5.20: Auswahlmönü für die internen Modifikationen (Beschreibung siehe Tabelle 5:2).

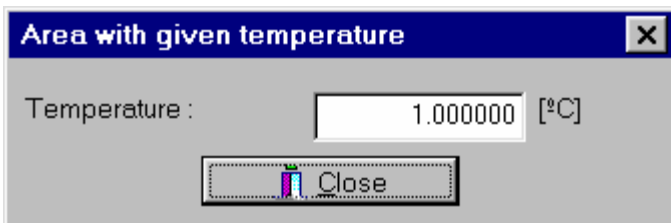
Typ	Beschreibung
A	Wärmequelle mit konstantem Wärmestrom Q [W/m]
B	Wärmequelle mit zeitlich variablem Wärmestrom Q [W/m] (Verweis auf eine vordefinierte Funktion erforderlich)
C	Fläche mit konstanter Temperatur T [°C]
D	Fläche mit zeitlich variabler Temperatur T [°C] (Verweis auf eine vordefinierte Funktion erforderlich)
E	Hohlraum mit Luft (ohne Berücksichtigung der Wärmekapazität der Luft), siehe Kapitel 2.4 und 3.9. Eingabe des Wärmeübergangswiderstandes R_s [m ² ·K/W].
F	Hohlraum mit Flüssigkeit (mit Berücksichtigung der Wärmekapazität). Eingabe des Wärmeübergangskoeffizienten α [W/(m ² ·K)], der volumenbezogenen Wärmekapazität der Flüssigkeit C [MJ/(m ³ ·K)] und der Ausgangstemperatur der Flüssigkeit T_0 [°C].
G	Hohlraum mit Luft unter Berücksichtigung des Strahlungswärmeaustausches (<i>radiation</i>) und einer eventuellen Belüftung (<i>ventilation</i>). Eingabe der Emissionsgrade ε [-] und der <u>konvektiven</u> Wärmeübergangskoeffizienten h_c [W/(m ² ·K)] an den vier Seiten. Der Hohlraum kann mit einer konstanten Einlaßtemperatur T_v [°C] und einer vorgegebenen Luftwechsellrate n [h ⁻¹] belüftet werden. In den meisten Fällen wird der Hohlraum nicht belüftet sein ($n = 0$). Das Gas im Hohlraum hat eine volumenbezogene Wärmekapazität $C = \rho \cdot c_p$ [kJ/(m ³ ·K)]. Der vorgegebene Wert von $C = 1,239$ kJ/(m ³ ·K) gilt für Luft bei Raumtemperatur. Es wird von einer gleichmäßigen (linearisierten) Verteilung der Luft- bzw. Gastemperatur im Hohlraum ausgegangen, siehe Kapitel 9 (Temperaturniveau \tilde{T}_{so}).
H	Rohr als Wärmequelle mit konstantem Wärmestrom Q [W/m]. Das Rohr wird als Quadrat bzw. Rechteck idealisiert, siehe Kapitel 6.
I	Rohr als Wärmequelle mit zeitlich variablem Wärmestrom Q [W/m]. Das Rohr wird als Quadrat bzw. Rechteck idealisiert, siehe Kapitel 6. (Verweis auf eine vordefinierte Funktion erforderlich)
J	Rohr mit konstanter Temperatur T [°C]. Das Rohr wird als Quadrat bzw. Rechteck idealisiert, siehe Kapitel 6.
K	Rohr mit zeitlich variabler Temperatur T [°C]. Das Rohr wird als Quadrat bzw. Rechteck idealisiert, siehe Kapitel 6. (Verweis auf eine vordefinierte Funktion erforderlich)

Tabelle 5:2: Verfügbare interne Modifikationen.

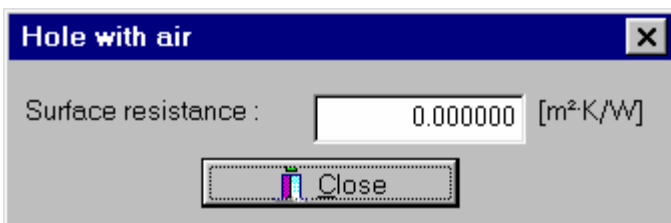
Die folgenden Bilder zeigen die Dateneingabe für alle Modifikationen mit konstanten Randbedingungen. In Fällen mit zeitlich veränderlichen Werten erfolgt der Verweis auf eine Funktion.



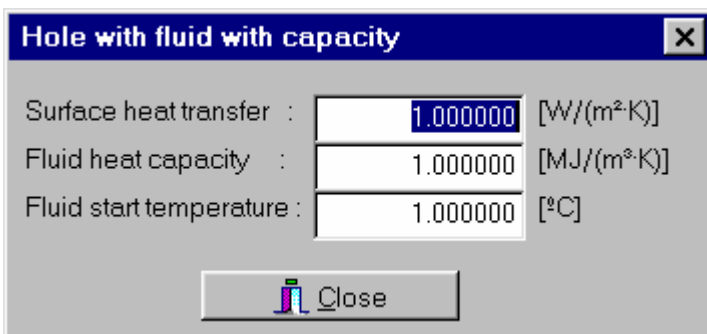
A: Wärmequelle mit konstantem Wärmestrom



C: Fläche mit konstanter Temperatur



E: Hohlraum mit Luft



F: Hohlraum mit Flüssigkeit

Hole with air - radiation and ventilation [X]

Ventilation temperature:

Constant temperature [°C]:

Function T(t):

Temp at point x,y:

Gas heat capacity [kJ/(m³·K)]

Ventilation rate [h⁻¹]

Emissivity at lower side [-]

Emissivity at right side [-]

Emissivity at upper side [-]

Emissivity at left side [-]

Conv. coeff. lower side [W/(m²·K)]

Conv. coeff. right side [W/(m²·K)]


Conv. coeff. upper side [W/(m²·K)]

Conv. coeff. left side [W/(m²·K)]

Reference temperature °C

Order of approximation (1-5)
(this will be used for all areas with radiation)

Show matrices in info log



G: Hohlraum mit Luft unter Berücksichtigung von Strahlungswärmeaustausch und Belüftung

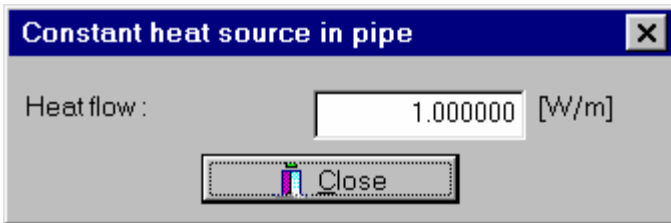
Hinweise zum Typ G - Hohlraum mit Luft unter Berücksichtigung von Strahlungswärmeaustausch und Belüftung

Bei dieser internen Modifikation kann der Hohlraum mit einer vorgegebenen Luftwechselrate belüftet werden. Die Temperatur der durchströmenden Luft kann konstant oder variabel sein. Bei variabler Lufttemperatur ist eine Funktion auszuwählen. Ein Beispiel für variable Belüftungsbedingungen kann ein außenluftdurchströmter Raum sein, wobei die Außentemperatur z.B. sinusförmig variiert.

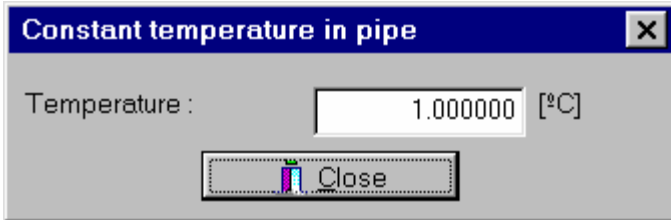
Der Hohlraum kann auch mit Luft einer zu diesem Zeitpunkt an einem willkürlichen Punkt (x,y) berechneten Temperatur durchströmt sein. Der Bezugspunkt der Temperaturwerte muß sich dabei innerhalb der Rechenfläche befinden. Er könnte z.B. innerhalb eines anderen Hohlraums liegen.

Beachten Sie, daß an diesem festgelegten Punkt keine Wärme entzogen bzw. zugeführt wird. Es handelt sich lediglich um eine Temperaturrandbedingung für den belüfteten Hohlraum.

Bei den Eingaben zum Strahlungswärmeaustausch kann der Näherungsgrad der Strahlungsberechnung (Approximationsgrad) gewählt werden, siehe Kapitel 9. Der Wert 1 gilt für eine lineare Näherung (Standardwert). Bei einem höheren Approximationsgrad dauert die Berechnung etwas länger. In den meisten Fällen ist eine lineare Näherung ausreichend, d.h. ungeachtet vom gewählten Approximationsgrad werden die gleichen Ergebnisse erzielt.



H: Rohr mit Wärmquelle



J: Rohr mit vorgegebener Temperatur

5.8.3 Definition der Gebiete mit internen Modifikationen

Flächen mit internen Modifikationen werden normalerweise mit dem Preprozessor eingegeben, alternativ kann aber auch eine Texteingabe erfolgen.

Bild 5.21 zeigt das Eingabefenster für Flächen mit internen Modifikationen. Für jede Fläche werden die Eingabekoordinaten "unten links" und "oben rechts" eingegeben. In der rechten Spalte wird die Art der Modifikation ausgewählt. Es ist zu beachten, daß Flächen mit internen Modifikationen nicht direkt an eine äußere Grenze (Randsegment) oder eine andere Fläche mit internen Modifikationen anschließen darf.

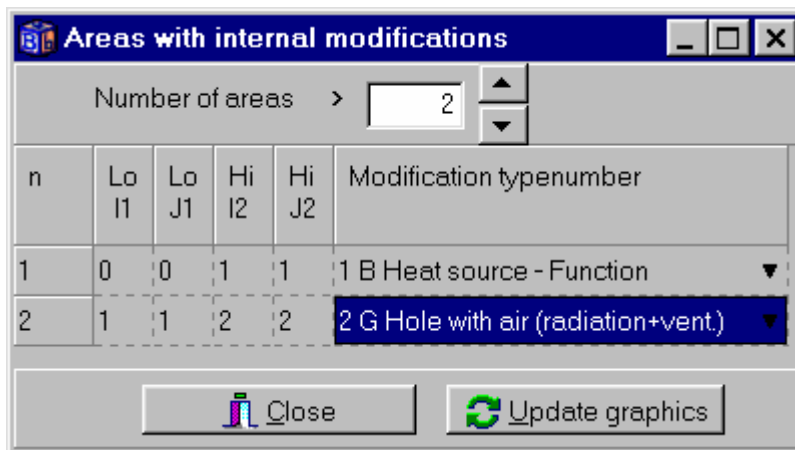


Bild 5.21: Jede Fläche wird durch die Eingabekoordinaten "unten links" und "oben rechts" definiert. Den Flächen wird über eine Auswahlliste eine bereits definierte Modifikation zugewiesen.

5.9 Funktionen

Funktionen dienen der Beschreibung zeitlich variabler Randbedingungen (Temperaturen oder Wärmeströme). Sie können auch für interne Modifikationen verwendet werden, z.B. für Wärmequellen oder Flächen mit einem bestimmten Temperaturverlauf. Bei jeder Berechnung können drei voneinander unabhängige Funktionen verwendet werden. Folgenden Funktionen stehen zur Verfügung:

- $$f(t) = f_1 + f_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{t_p}\right) t_p > 0 \quad (\text{Sinusfunktion})$$

$$\bullet \quad f(t) = \begin{cases} 0 & t < t_1 \\ f_1 & t_1 \leq t < t_2 \\ f_2 & t_2 \leq t < t_3 \\ \text{M} & \\ f_n & t_n \leq t \end{cases} \quad (\text{schrittweise konstante Funktion})$$

$$\bullet \quad f(t) = \begin{cases} f_1 \cdot t_1 & t < t_1 \\ f_1 + (f_2 - f_1) \cdot \frac{(t - t_1)}{(t_2 - t_1)} & t_1 \leq t < t_2 \\ f_2 + (f_3 - f_2) \cdot \frac{(t - t_2)}{(t_3 - t_2)} & t_2 \leq t < t_3 \\ \text{M} & \\ f_n & t_n \leq t \end{cases} \quad (\text{schrittweise lineare Funktion})$$

5.9.1 Sinusfunktion

Bild 5.22 zeigt die Eingabe einer Sinusfunktion. Benötigt werden der Mittelwert f_1 , die Amplitude f_2 , die Phasenverschiebung t_0 und die Periodenlänge t_p . Die Phasenverschiebung und die Periodenlänge werden in Sekunden oder alternativ mit einem Zeitstring (Zeichenkette) angegeben.

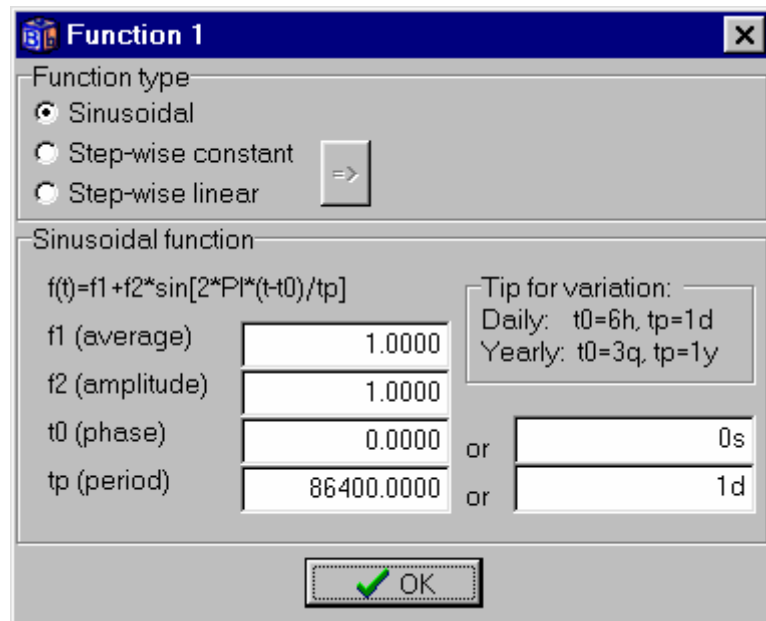


Bild 5.22: Funktionen werden im Menüpunkt *Solve/Function* definiert.

Der Zeitstring ist eine Folge von Zahlen und zugehörigen Buchstaben für die jeweiligen Zeiteinheiten:

- y Jahr [year] (365 Tage bzw. 31 536 000 Sekunden)
- q Monat (Jahr/12 bzw. 30,417 Tage oder 2 628 000 Sekunden)
- d Tag [day] (86 400 Sekunden)
- h Stunde [hour] (3 600 Sekunden)
- m Minute (60 Sekunden)
- s Sekunde (die Angabe des Buchstaben kann bei Sekunden entfallen)

Beachten Sie, daß mit m die Minute und mit q der Monat bezeichnet wird. Hier einige Beispiele:

1y14h	1 Jahr und 14 Stunden
14q3d15	1 Jahr, 2 Monate, 3 Tage und 15 Sekunden (das gleiche wie 1y2q3d15)
86400	1 Tag
1h2d	Ungültig. Der Ausdruck muß in der richtigen Reihenfolge stehen, siehe nächste Zeile.
2d1h	Diese Kette ist in Ordnung, sie bedeutet 2 Tage und 1 Stunde.

5.9.2 Schrittweise konstante und schrittweise lineare Funktion

Die erforderlichen Werte werden in einem Editor eingegeben, siehe Bild 5.23. Zeilenweise ist die entsprechende Zeit (in Sekunden oder als Zeitstring) sowie der Funktionswert anzugeben. Zusätzliche Kommentare können in jeder Zeile nach den Daten oder nach einem %-Zeichen eingefügt werden, siehe Bild 5.23 (rechts).

Die Daten werden im Funktionseditor durch das Anklicken der Schaltfläche *Validate* auf Plausibilität geprüft. Eine Prüfung erfolgt jeweils auch beim Starten einer Simulation. Die rechte Abbildung zeigt einen Eingabefehler in der dritten Zeile, die Fehlermeldung ist in der Statuszeile (unten) dargestellt. Die Funktionswerte aus Bild 5.23 (links) sind in Bild 5.28 und Bild 5.29 grafisch dargestellt. Die Anzahl der Werte ist durch die Speicherkapazität des Editors von maximal 16 MB begrenzt. Benutzt man z.B. 16 Zeichen pro Zeile ergibt sich eine maximale Anzahl von 1 Million Zeilen.

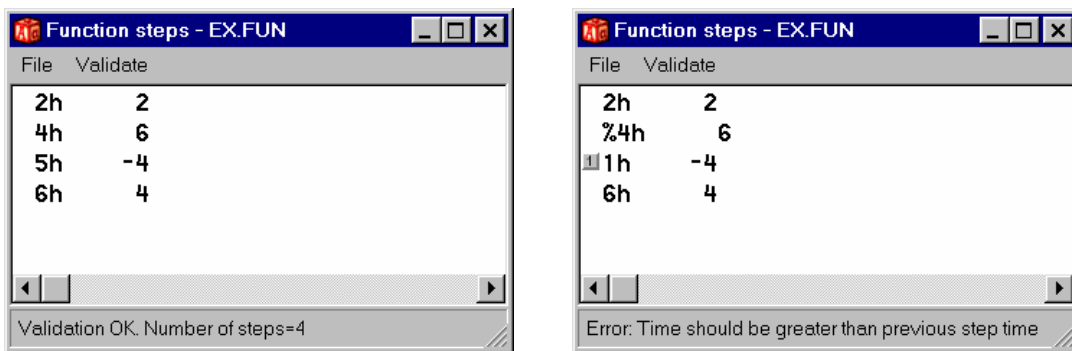


Bild 5.23: Die Daten für die Funktionsschritte werden in einem Editor eingegeben und durch *Validate* geprüft. Im Falle eines Fehlers erfolgt eine Markierung der Zeile und eine Fehlermeldung.

Die Funktionswerte können auch in anderen Programmen erzeugt und anschließend in den Funktionseditor eingefügt werden. Bild 5.24 zeigt für einige Werte der Funktion $\ln(x)$, die im Programm MS Excel erzeugt und dann in den Funktionseditor (bzw. in die Textdatei *EX.FUN*) eingefügt wurden. Daten für die einzelnen Funktionsschritte werden als Textdatei des Typs **.FUN* gespeichert und stehen somit auch für andere Berechnungen mit HEAT2 oder HEAT3 zur Verfügung.

Während einer Berechnung wird im Simulationsfenster der jeweilige Funktionswert angezeigt. Es ist auch möglich, eine Datei mit Funktionswerten (**.FUN*) zu öffnen und die Werte in grafischer Form (als Liniendiagramm) zu betrachten, siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

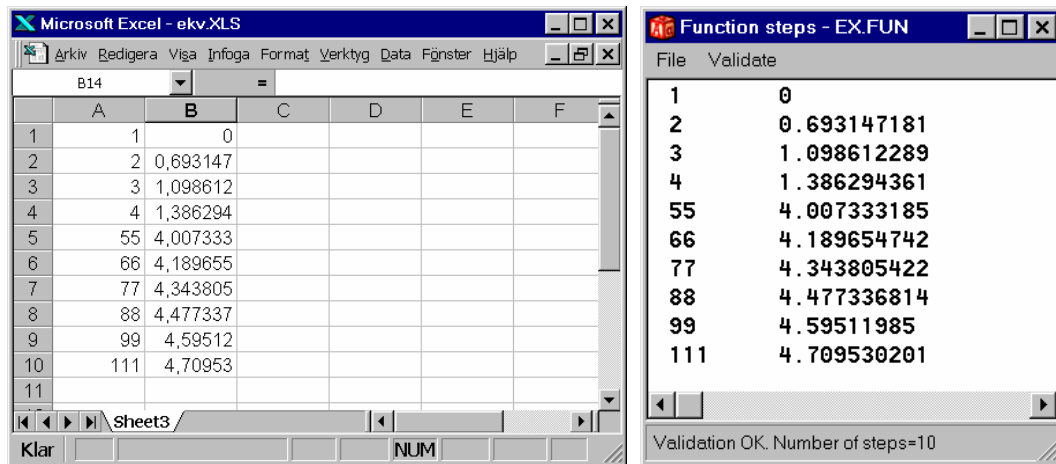


Bild 5.24: Listen mit Zeitangaben und Funktionswerten können auch aus anderen Programmen eingefügt werden. Hier wurde die Funktion $\ln(x)$ für einige Werte mit Excel berechnet und anschließend in den Funktionseditor bzw. die Datei EX.FUN eingefügt (rechts).

5.9.3 Import anderer Dateiformate

Im Funktionseditor können über den Menüpunkt *Import climate file format* verschiedene Formate mit Klimadaten importiert werden. Bild 5.25 zeigt die unterstützten Formate. Nach dem Import können die Daten als normale *FUN*-Datei gespeichert werden.

Klimadateien beinhalten i.d.R. stündliche Daten für ein ganzes Jahr. Um mehrere Jahre unter Verwendung der gleichen Klimadatei zu simulieren, ist wie folgt vorzugehen: Simulieren Sie zuerst das erste Jahr, setzen Sie dann die Berechnung zurück (Menüpunkt *Solve/Reset calculation*) oder setzen Sie die aktuelle Zeit gleich Null (Menüpunkt *Solve/Options for transient*). Simulieren Sie dann das zweite Jahr, setzen Sie die Zeit wieder zurück und so weiter.

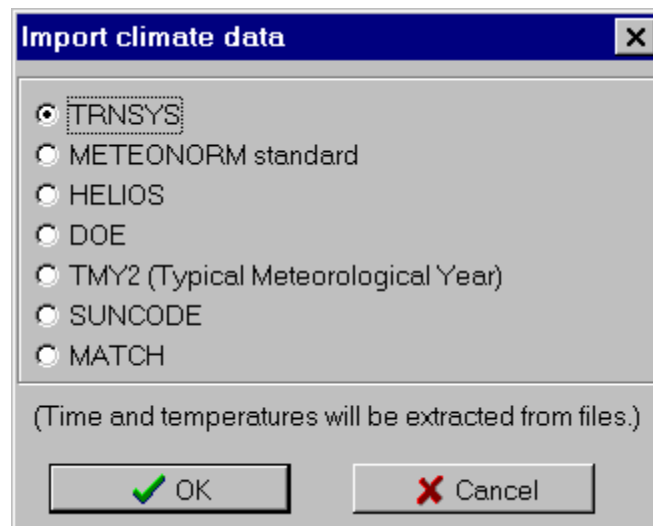


Bild 5.25: Zeit und Temperaturen können aus verschiedenen Klimadateien importiert werden.

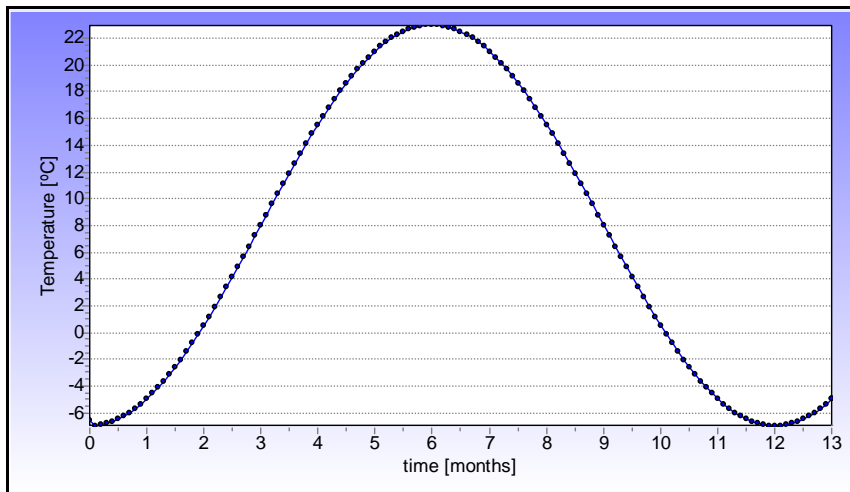
5.9.4 Beispiel 1 - Sinusfunktion mit einer Periode von einem Jahr

Bild 5.26 zeigt eine Sinusfunktion mit einem Mittelwert von $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Amplitude von $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Phasenverschiebung von 3 Monaten ($-3q$) und einer Periode von einem Jahr ($1y$). Bei dieser Phasenverschiebung ($-3q$ oder $+9q$) ergibt sich die niedrigste Temperatur ($-7\text{ }^{\circ}\text{C}$) nach $0, 12, \dots, 12n$ ($0 \leq n < \infty$) Monaten, d.h. am 1. Januar jeden Jahres. Die höchste Temperatur ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) ergibt sich nach $6, 18, \dots$, Monaten, d.h. am 1. Juli jeden Jahres¹.

¹ Bei Verwendung einer Phasenverschiebung von $-4q$ ergibt sich das Minimum am 1. Februar bzw. das Maximum am 1. August.

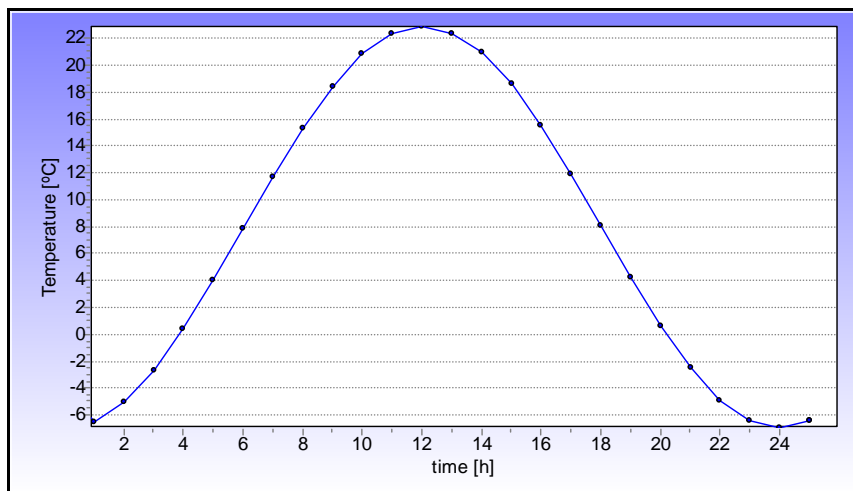
5.9.5 Beispiel 2 - Sinusfunktion mit einer Periode von einem Tag

Bild 5.27 zeigt eine Sinusfunktion mit einem Mittelwert von 8 °C, einer Amplitude von 15 °C, einer Phasenverschiebung von sechs Stunden (-6h) und Periode von einem Tag (1d). Bei dieser Phasenverschiebung (-6h oder +18h) ergibt sich die niedrigste Temperatur (-7 °C) täglich um Mitternacht und die höchste Temperatur (23 °C) täglich 12 Uhr mittags.



$$f(t) = 8 + 15 \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t - 3q)}{1y}\right)$$

Bild 5.26: Sinusfunktion mit $f_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $f_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_o = 3q$ und $t_p = 1y$.



$$f(t) = 8 + 15 \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t - 6h)}{1d}\right)$$

Bild 5.27: Sinusfunktion mit $f_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $f_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_o = 6h$ und $t_p = 1d$.

5.9.6 Beispiel 3 - Schrittweise konstante Funktion

Bild 5.28 zeigt eine schrittweise konstante Funktion mit 4 Temperaturstufen. Die Daten sind rechts im Bild angegeben. Beachten Sie, daß der Funktionswert vor der ersten definierten Stufe Null ist. Wird $t_1 = 0$ anstelle von $t_1 = 2h$ verwendet, dann gilt von Anfang an der erste Wert f_1 . Beachten Sie weiterhin, daß der letzte Funktionswert für die gesamte restliche Simulationszeit gilt.

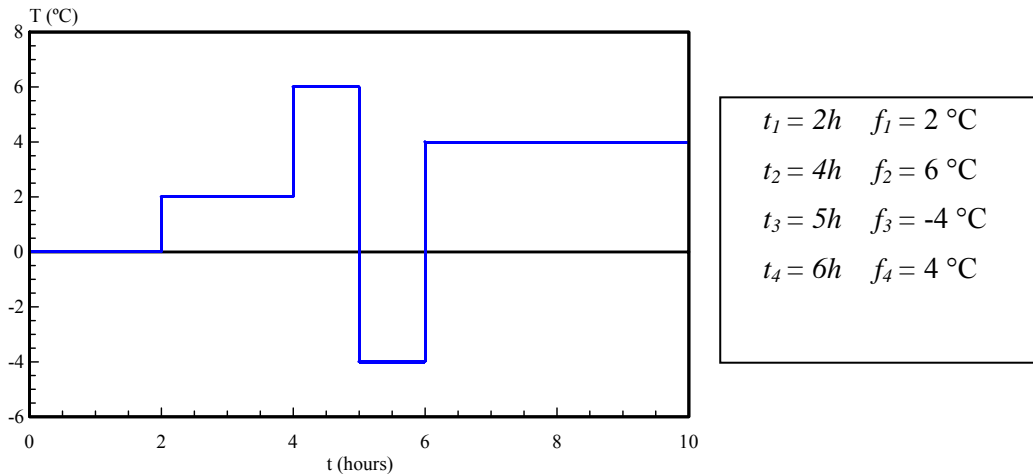


Bild 5.28: Schrittweise konstante Funktion mit 4 definierten Temperaturen (Werte siehe rechts).

5.9.7 Beispiel 4 – Schrittweise lineare Funktion

Bild 5.29 zeigt die schrittweise lineare Funktion für die vier Temperaturen aus Beispiel 3. Beachten Sie, daß der Funktionswert für $t = 0$ Null ist. Er kann verändert werden, wenn man für $t_1 = 0$ einen Funktionswert eingibt. Der letzte Funktionswert bleibt für die restliche Simulationszeit konstant.

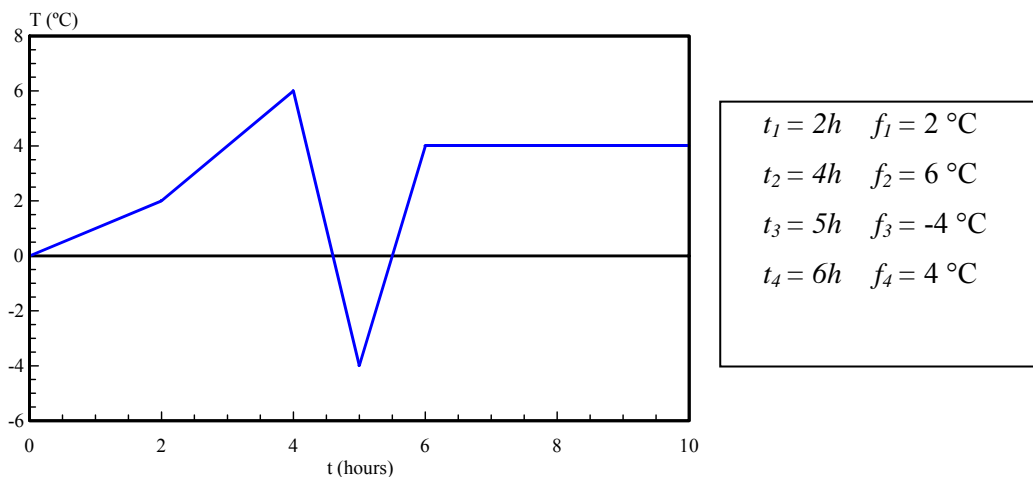


Bild 5.29: Schrittweise lineare Funktion mit 4 definierten Temperaturen (Werte siehe rechts).

5.10 Interne Widerstände

Bild 5.30 zeigt das Eingabefenster für interne Widerstände. Es ist möglich, einen Wärmeübergangswiderstand mit Hilfe einer internen Widerstandslinie einzugeben. Beachte Sie dabei aber, daß sich dieser interne Widerstand und ein eventuell als Randbedingung eingegebener Wärmeübergangswiderstand addieren.

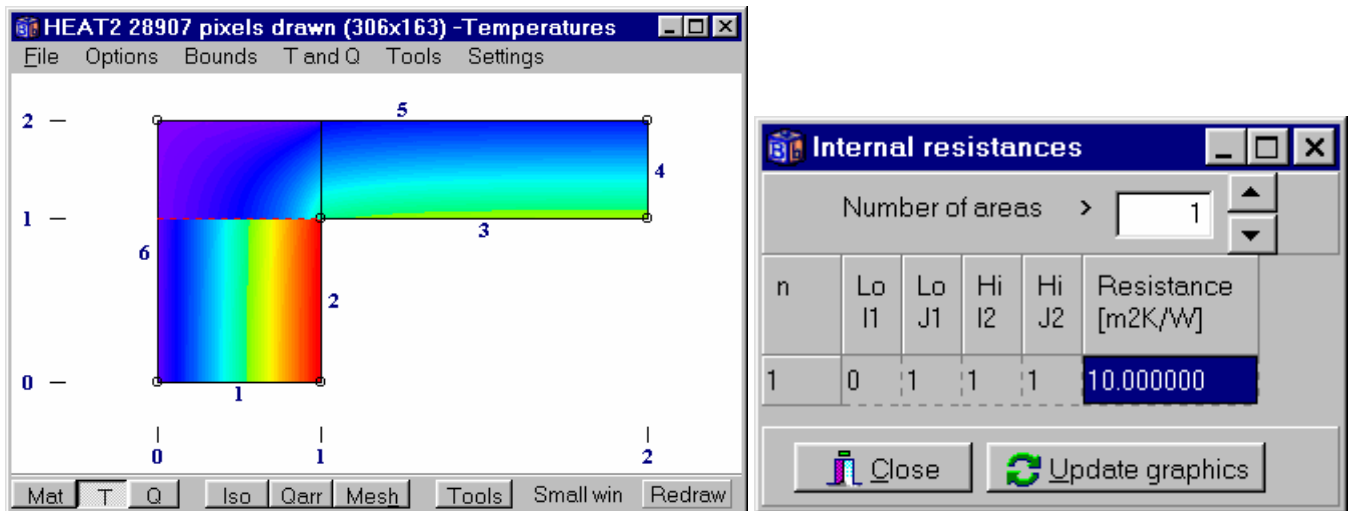


Bild 5.30: Ein vertikaler interner Widerstand von 10 m²·K/W wurde als horizontale Linie mit den Koordinaten "unten links" (0,1) und "oben rechts" (1,1) eingefügt Links ist das berechnete Temperaturfeld dargestellt.

5.11 Numerische Berechnung

5.11.1 Stop-Kriterium für den stationären Fall

Es gibt drei Möglichkeiten ein Abbruchkriterium für eine stationäre Simulation vorzugeben, siehe Bild 5.31. Die erste Möglichkeit bezieht sich auf die Wärmeströme. Die Summe aller Wärmeströme Q_b (positive und negative), die über die Randflächen in das Objekt eindringen, dividiert durch die Summe der Absolutwerte aller dieser Wärmeströme, muß kleiner als ein vorgegebener Wert F sein (siehe Gleichung 5.1). $F/2$ soll nach der Norm EN ISO 10211-1 kleiner als 0,001 (entspricht $F < 0,05\%$) sein. Die Voreinstellung beträgt 0,01 %. Die Wärmeströme aufgrund interner Modifikationen, wie z.B. Wärmequellen, werden bei der Ermittlung von F berücksichtigt.

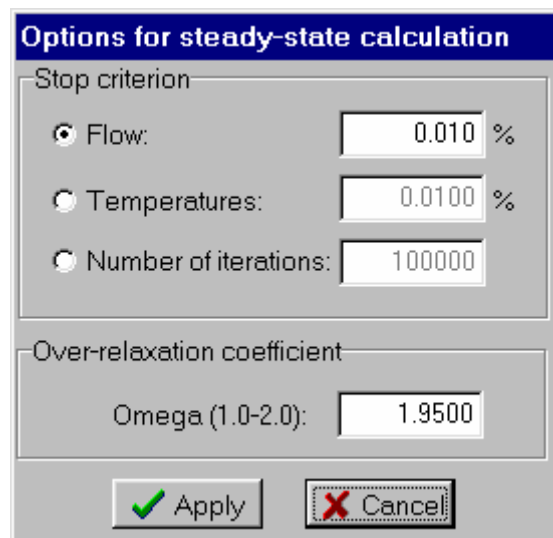


Bild 5.31: Stop-Kriterien für stationäre Berechnungen.

$$\frac{\sum Q_b}{\sum |Q_b|} \leq F \quad (5.1)$$

Die zweite Möglichkeit bezieht sich auf die Temperaturen. Die Berechnung wird abgebrochen, wenn die Differenz der berechneten Temperaturen bei allen Zellen im Berechnungsgebiet zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen den Wert R nicht überschreitet:

$$\left| 1 - \frac{T_{i,j,k}}{T_{i,j,k}^{new}} \right| \leq R \quad (5.2)$$

Die Voreinstellung für R beträgt 10^{-4} (0,01%). Kleinere Werte von F und R führen zwar im Allgemeinen zu geringeren Rechenfehlern, aber auch zu längeren Rechenzeiten. In der Regel ist ein F -Wert zwischen 10^{-5} und 10^{-3} ausreichend.

In einigen Fällen können die Kriterien R und F während des Iterationsvorgangs auch "zufällig" erfüllt sein. Dies kann vermieden werden, wenn die Simulation erst abgebrochen wird nachdem das Kriterium für 30 aufeinanderfolgende² Iterationsschritte erfüllt war.

Eine dritte Möglichkeit ein Abbruchkriterium zu setzen, besteht darin, eine maximale Anzahl der Iterationsschritte vorzugeben.

5.11.2 Sukzessive Überrelaxation bei stationären Berechnungen

Um bei stationären Fällen die Rechenzeit zu verkürzen, können verschiedene numerische Techniken angewandt werden. Eine Variante ist die Methode der sukzessiven Überrelaxation (Hirsch, 1992), siehe Kapitel 3.8. Der optimale Relaxationskoeffizient ω liegt i.d.R. im Bereich 1,8 - 2. Als Voreinstellung wird $\omega = 1,95$ verwendet.

5.11.3 Simulationszeit für instationäre Berechnungen

Das Ende der Simulationszeit (*Simulation stop time*) wird unter *Solve/Options for transient calculation* eingegeben, siehe Bild 5.32. Auch die Startzeit kann mit *Current time* willkürlich gewählt werden. Da *Current time* die aktuelle Zeit darstellt, ändert sich dieser Wert während einer Simulation. Ein Grund, die Startzeit von Null auf einen anderen Wert zu ändern, könnte sein, daß die Startzeit einer bestimmten Zeitstufe einer Funktion entsprechen soll. Nehmen wir beispielsweise an, daß eine Funktion mit wochenweise linearen Werten für die Dauer von 10 Jahren verwendet wird. Will man nur die Funktionswerte des letzten Jahres benutzen, setzt man die Startzeit auf 9 Jahre. Für die Zeiteingabe kann anstelle von Sekunden ein spezielles Format (Zeitstring) benutzt werden, siehe Abschnitt 5.9.1. Bei einem Reset wird die aktuelle Simulationszeit (*Current time*) stets auf Null gesetzt, siehe Abschnitt 5.11.6.

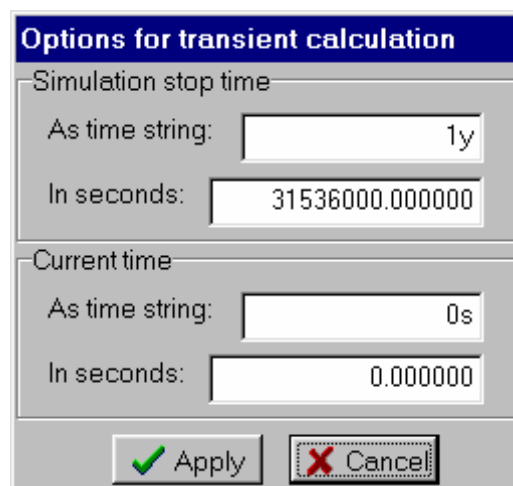


Bild 5.32: Eingabefenster für Simulationsende (*Stop time*) und aktuelle Zeit (*Current time*).

² Bei HEAT2 Version 3.0 ist es ausreichend, wenn das Kriterium für 10 Iterationsschritte erfüllt ist.

5.11.4 Simulationsfenster

Während der Simulation wird ein Fenster mit Informationen über den Stand der Berechnung angezeigt. In Bild 5.33 sind die Fenster für den stationären bzw. den instationären Fall dargestellt. Es werden Werte wie das Stop-Kriterium, die aktuelle Anzahl der Iterationen, Fehlerbetrachtungen, berechnete Wärmeströme, maximale und minimale Knotentemperaturen und die Anzahl der Berechnungszellen N angezeigt. Es gibt Optionsboxen bzw. Schaltflächen für die Anzeige der Wärmeströme über die Detailgrenzen (*Bound flows*, siehe Abschnitt 5.12.1), das Abbruchkriterium (*Stop criterion*, siehe Abschnitt 5.11.1 und 5.11.3) und zum Bildschirmupdate (*update*, siehe Abschnitt 5.11.5).

Im stationären Fall (links) kann der Relaxationskoeffizient geändert werden.

Im instationären Fall (rechts) wird unten links das stabile Zeitintervall dt angezeigt. Werden Funktionen verwendet, wird unten rechts deren aktueller Funktionswert angegeben.

Die Optionsbox "Turbo" ermöglicht es, dem eigentlichen Iterationsprozeß mehr CPU-Zeit zuzuweisen. Die Leistung anderer Prozesse (sogenannter *Threads/Befehlsfolgen*), wie z.B. das Bewegen oder Rotieren von Grafiken (oder die gleichzeitige Arbeit mit anderen Programmen) kann sich dadurch verlangsamen. Das Deaktivieren von "Turbo" gibt den anderen Prozessen mehr CPU-Zeit, verlängert aber auf der anderen Seite die Berechnungszeit von HEAT2.

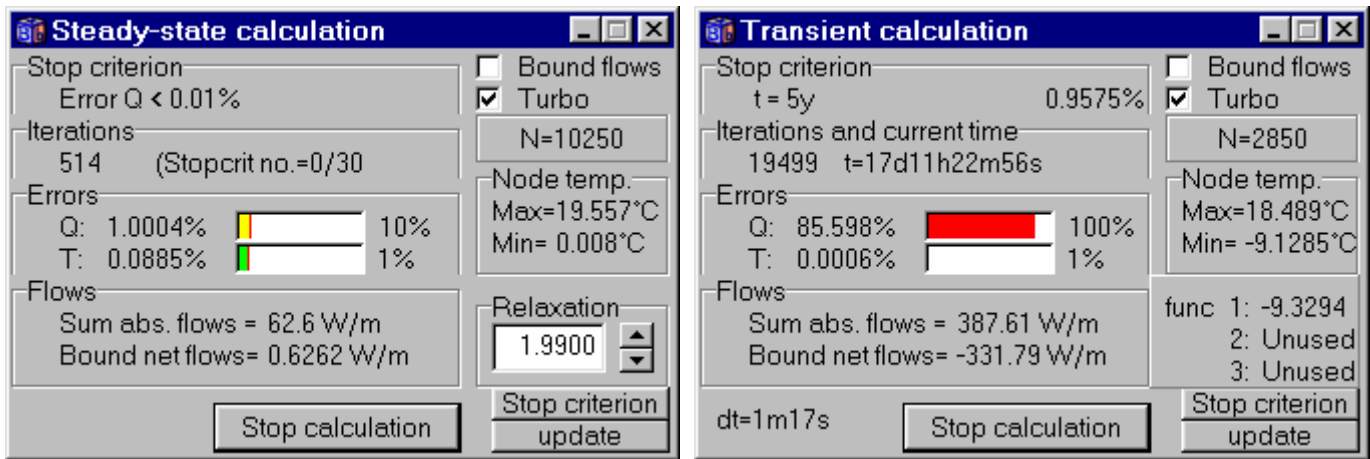


Bild 5.33: Simulationsfenster bei stationären (links) bzw. instationären Berechnungen (rechts).

5.11.5 Bildschirmupdate

Im Menüpunkt *Solve/Screen update* ist festgelegt, in welchen Abständen die während der Berechnung angezeigten Daten aktualisiert werden, siehe Bild 5.34. Das Zeitintervall der Aktualisierung kann in Abhängigkeit von der Anzahl der Iterationen, von der CPU-Zeit (Echtzeit) oder bei instationären Berechnungen von der Simulationszeit gewählt werden. Als Standardwert für das Bildschirmupdate ist 3 Sekunden vorgegeben. Beachten Sie, daß das Zeitintervall der Bildschirmaktualisierung auch die Aufzeichnungsintervalle beeinflusst, siehe Abschnitt Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

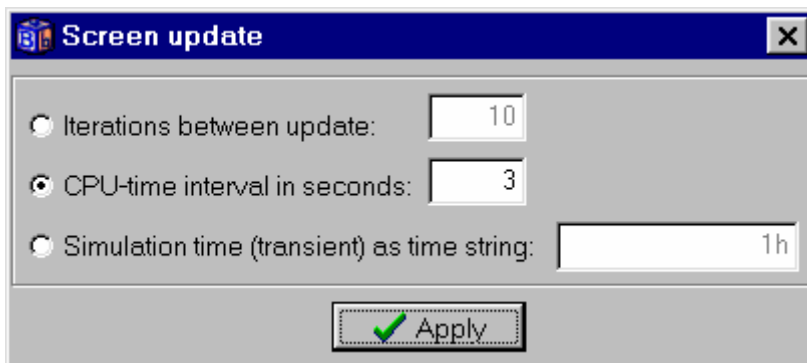


Bild 5.34: Festlegung des Zeitintervalls für die Aktualisierung des Bildschirminhaltes.

5.11.6 Berechnung zurücksetzen (Reset)

Es gibt drei Möglichkeiten eine Berechnung zurückzusetzen, d.h. ein Reset durchzuführen. Bei der ersten Variante über den Menüpunkt *Solve/Reset calculation* werden die Iterationsschritte und die aktuelle Simulationszeit (*Current time*) auf Null gesetzt. Die zweite Variante über den Menüpunkt *Solve/Reset temperatures* initialisiert das Temperaturfeld neu. Bei der dritten Variante *Solve/Reset calculation and temperatures* wird beides durchgeführt.

5.12 Ausgabe (Output)

5.12.1 Wärmeströme über die Randflächen

Bound	Flows [W/m ²]	Flows [W/m]
2	22.047	11.024
3	71.439	71.439
5	-49.858	-74.787
6	-9.5941	-7.6753

Bound	Flows [W/m ²]	Flows [W/m]	Acc. Flows [kWh/m]
2	22.047	11.024	14.043
3	71.439	71.439	88.418
5	-49.858	-74.787	-91.302
6	-9.5941	-7.6753	-9.1007

Bild 5.35 zeigt die jeweiligen Anzeigefenster, für die in das Berechnungsgebiet über die Randflächen eindringenden Wärmeströme für den stationären (links) und den instationären Fall (rechts). In der ersten Zeile wird die Summe aller positiven Wärmeströme durch die Randsegmente in [W/m] sowie die Anzahl der Iterationsschritte angegeben. Die zweite Zeile zeigt die Summe *aller* Wärmeströme (positive und negative). *Alle Wärmeströme in festes Material hinein sind positiv, alle Wärmeströme aus festem Material heraus sind negativ.* Im instationären Fall wird in der zweiten Zeile rechts außerdem die momentane Simulationszeit angezeigt. In den weiteren Zeilen sind für die einzelnen Randsegmente die Wärmeströme in [W/m], die Wärmestromdichten in [W/m²] und im instationären Fall zusätzlich die eingespeicherte Wärmeenergie in [kWh/m] aufgelistet. In der letzten Zeile sind alle Randsegmente ohne Wärmestrom (adiabate Randbedingungen) genannt.

Bild 5.35: Anzeigefenster für die Wärmeströme über die Randflächen für den stationären und den instationären Fall. Die Daten können mit der rechten Maustaste in die Zwischenablage kopiert werden.

5.12.2 Wärmeströme für interne Modifikationen

5.12.2.1 Beispiel 1

Bild 5.36 zeigt die berechneten Wärmeströme für ein Beispiel mit einer Wärmequelle (Hohlraum 1) und einem leeren Hohlraum mit Strahlungswärmeaustausch (Hohlraum 2). Die Randbedingungen sind auf der

linken Oberfläche $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, auf der rechten Oberfläche $T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und oben bzw. unten jeweils $q = 0$. Die Summe der Absolutwerte aller Wärmeströme, die in das Objekt eindringen $\sum |Q_b|$ (im Berechnungsfenster bezeichnet mit **Sum.abs. flows**) beträgt $4,0193 \text{ W/m}$ und beinhaltet sowohl die Wärmeströme über die äußeren Detailgrenzen ($0,679 + 1,679 \text{ W/m}$) als auch über die Ränder der Hohlräume ($1,6613 \text{ W/m}$).

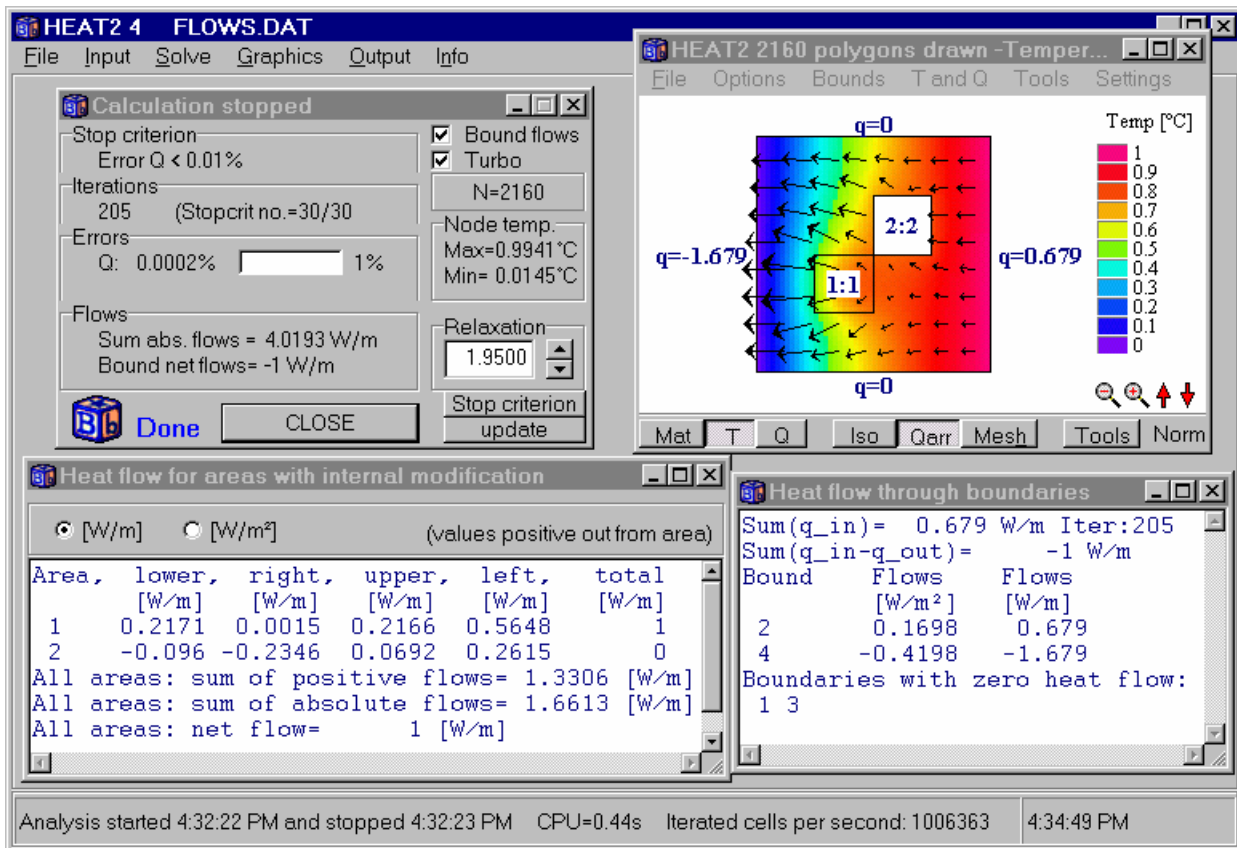


Bild 5.36: Berechnete Wärmeströme für ein Beispiel mit einer Wärmequelle (Hohlraum 1) und einem leeren Hohlraum mit Strahlung (Hohlraum 2).

5.12.2.2 Beispiel 2

Bild 5.37 zeigt ein Beispiel mit zwei internen Modifikationen. Die erste Modifikation ist eine Wärmequelle von 3 W/m , die zweite ein Hohlraum mit Strahlung (weißes Feld mit dem Code 2:2). Die Randbedingungen auf der linken und der rechten Seite sind $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $R_s = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ bzw. $T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $R_s = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$. Die oberen und unteren Ränder haben adiabate Randbedingungen ($q = 0$). Bild 5.38 zeigt die berechneten Wärmestromdichten.

Beachten Sie die Wärmeströme über die Detailgrenzen. Der Wärmestrom am rechten Rand ist oberhalb der Isotherme $T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ (horizontale Linie in der Mitte der rechten Seite) positiv, d.h. Wärme dringt in das Material ein, und unterhalb der Isotherme negativ.

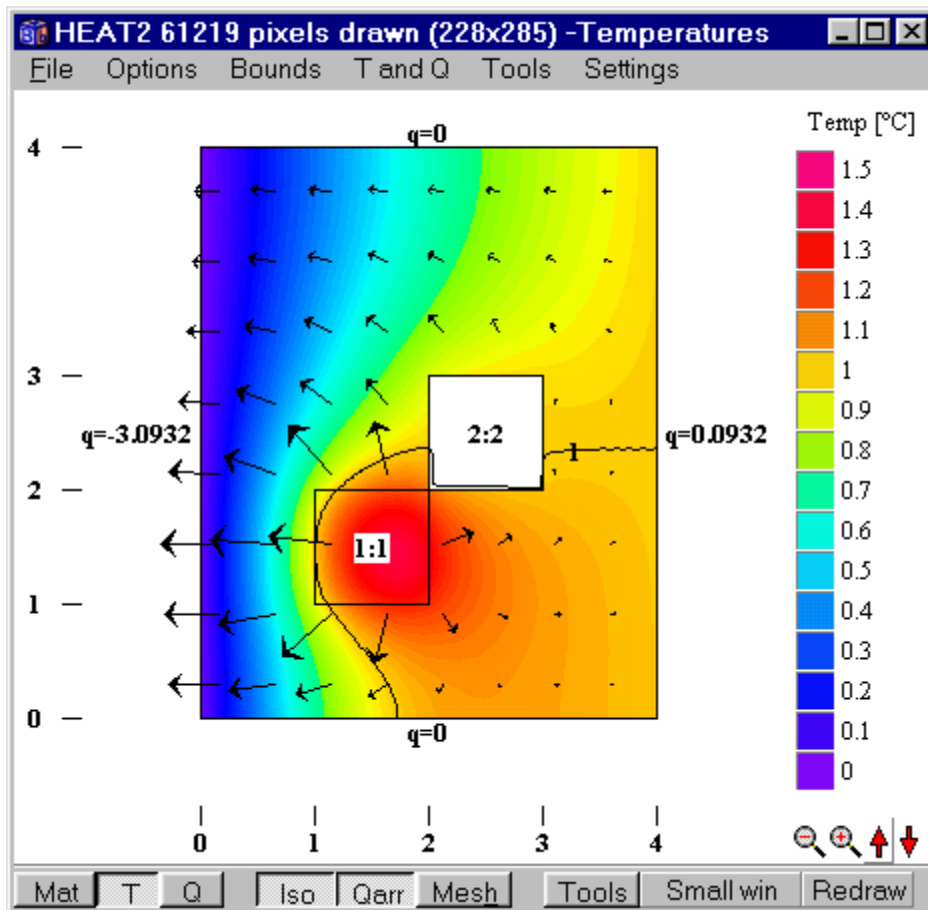


Bild 5.37: Temperaturfeld für ein Beispiel mit zwei internen Modifikationen. Die erste ist eine Wärmequelle von 3 W/m, die zweite ein Hohlraum mit Strahlung (weißes Feld). Die Randbedingungen sind links $T = 0\text{ °C}$ mit $R_s = 0,04\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ und rechts $T = 1\text{ °C}$ mit $R_s = 0,13\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

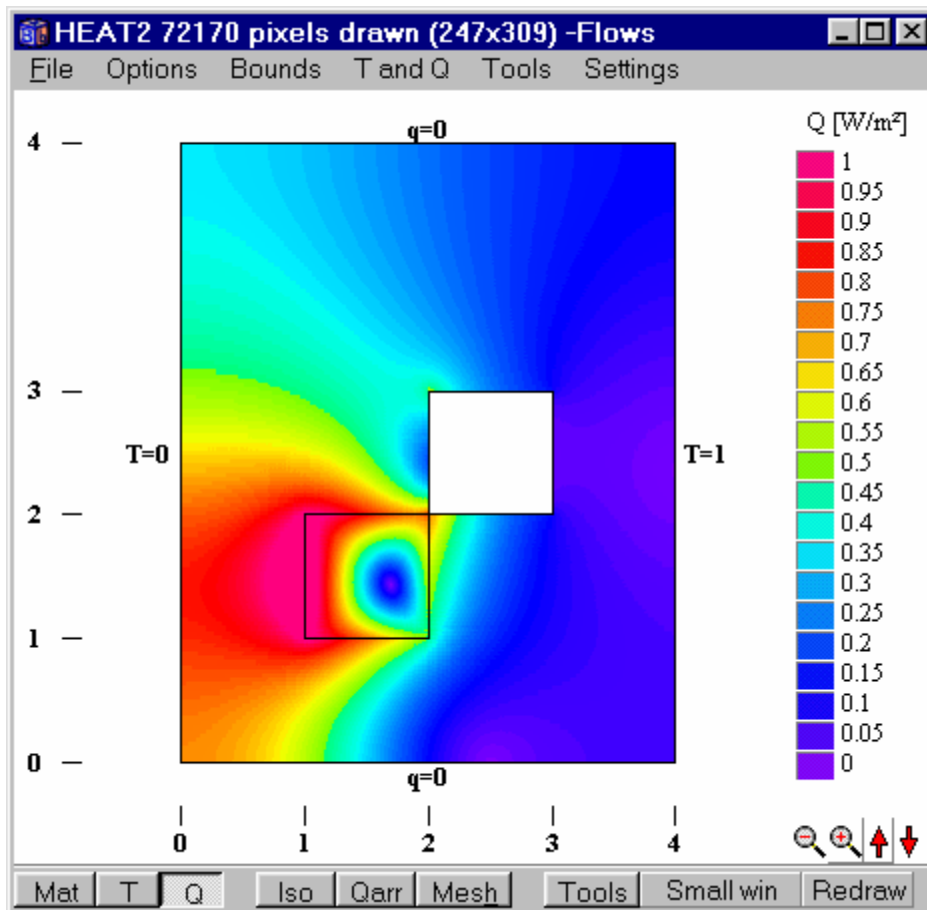


Bild 5.38: Wärmestromdichten.

Bild 5.39 zeigt für die internen Modifikationen die berechneten Wärmeströme über die vier Seiten und den Gesamtwärmestrom jeder Modifikationsfläche im stationären Fall. Wärmeströme, die aus dem Hohlraum in festes Material gerichtet sind, haben ein positives Vorzeichen. Bei der ersten Fläche mit der Wärmequelle sind alle vier Wärmeströme positiv. In die zweite Fläche mit dem Hohlraum dringt Wärme auf der unteren und der rechten Seite ein. Da es keine Belüftung und damit keine Wärmezufuhr bzw. keinen Wärmeentzug gibt, ist die Summe der Wärmeströme Null. In den unteren Zeilen wird für alle Flächen die Summe der positiven Wärmeströme, die Summe der Absolutwerte der Wärmeströme und der "Netto"-Wärmestrom angezeigt.

Die Wärmeströme für die einzelnen Flächen können in den Einheiten [W/m] oder [W/m²] angegeben werden, siehe obere Zeile.

Bild 5.40 zeigt die Wärmeströme über die Detailränder. Beachten Sie den absoluten Wärmestrom im Simulationsfenster, siehe Abbildung 5.41. Die Summe der Absolutwerte der Wärmeströme ($q = 6,8402$) beinhaltet die internen Modifikationen ($q = 3,6539$) und die Wärmeströme über die Detailränder ($q = 0,0932 + 3,0932$). Der im Bild 5.41 unten angezeigte Netto-Wärmestrom bezieht sich auf die Außenränder (d.h. $q = 0,0932 - 3,0932 = -3$ W/m).

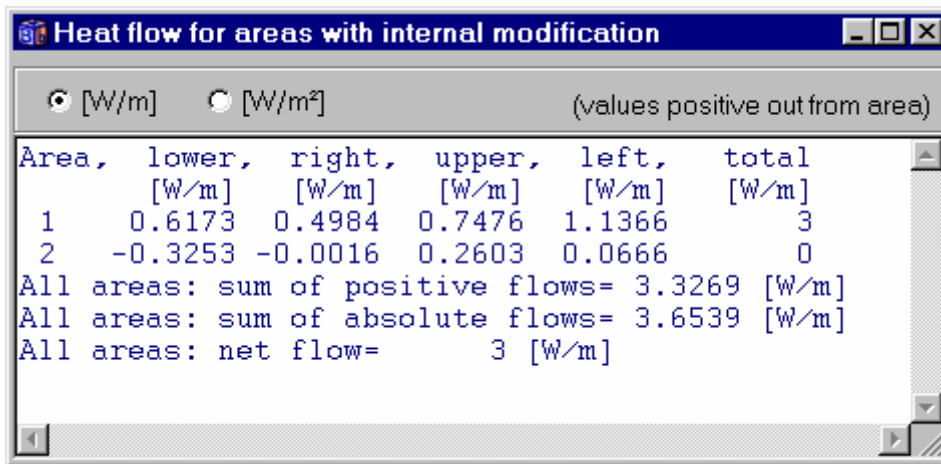


Bild 5.39: Wärmeströme für interne Modifikationen.

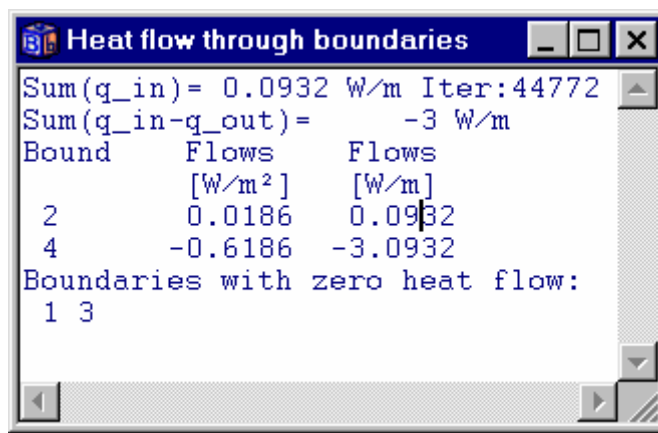


Bild 5.40: Wärmeströme über die Detailränder.

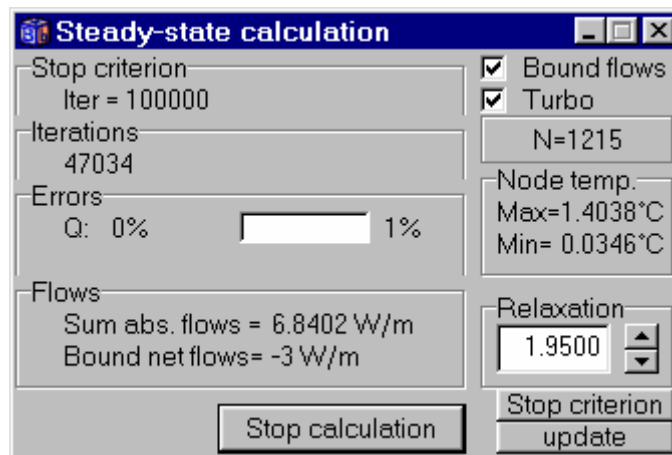


Bild 5.41: Wärmeströme im Simulationsfenster.

5.12.3 Berechnungsergebnisse für Hohlräume mit Strahlung

Bild 5.42 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Fläche 2 des Beispiels 2. In der zweiten Zeile wird die Gastemperatur T_a [°C], der Belüftungsleitwert K_v [W/K], die Fläche des Hohlraums [m²] und die Anzahl der Strahlungsknoten N_R angegeben.

Ist *Details for area* aktiviert, können für die einzelnen Strahlungsknoten folgende Ergebnisse angezeigt werden: berechnete Oberflächentemperaturen T_{sj} für $j = 1 \dots N_R$ (siehe Bild 9.3), Temperaturen in den Randzellen T_{bj} , Leitwerte K_{bj} zwischen der Mitte der Zelle und der Oberfläche der angrenzenden Zellen i,j und Wärmeströme q_{bj} [W/m].

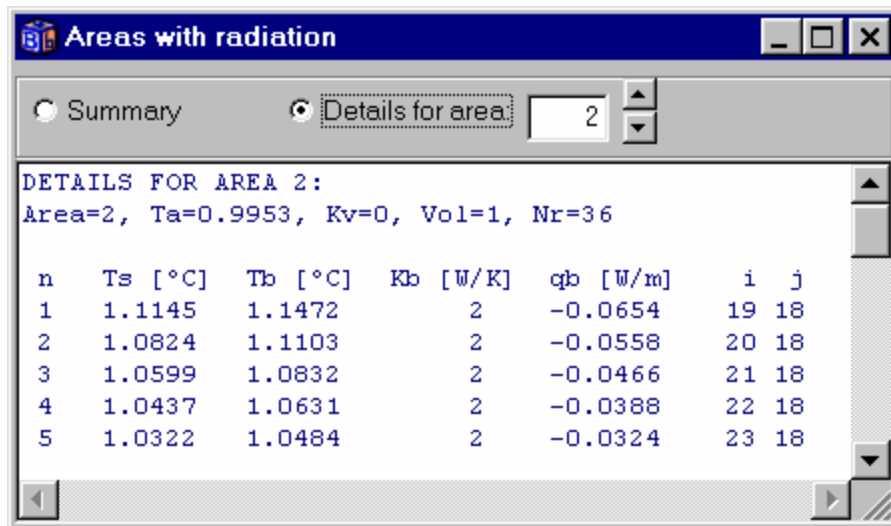


Bild 5.42: Ergebnisse für Flächen mit Strahlungswärmeaustausch.

5.12.4 Temperaturen und Wärmeströme an einem Punkt

Über den Menüpunkt **Output/temp at point** kann für willkürlich ausgewählte Koordinaten (x, y) die Temperatur, der Wärmestrom (mit den Anteilen in x - bzw. y -Richtung) und die Indizes i, j der numerischen Zelle angezeigt werden, siehe Bild 5.43.

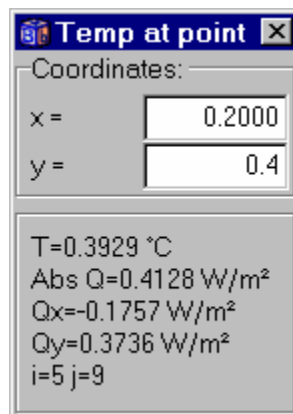


Bild 5.43: **Temp at point** zeigt für willkürlich ausgewählte Punkte (x, y) die Temperatur, den Wärmestrom und die Indizes i, j der numerischen Zelle.

Die Temperatur T , [°C] und die Anteile des Wärmestroms Q_x, Q_y , [W/m²] an einem Punkt (x, y) werden auch im Postprozessor angezeigt, wenn *Tools* aktiviert ist und man den Cursor auf den gewünschten Ort positioniert, siehe Bild 5.44. Die Koordinaten und Indizes (i, j) für die numerische Zelle (in welcher der Punkt liegt) werden ebenfalls angezeigt. Flächen von besonderem Interesse können durch Klick auf die linke Maustaste und Bewegung des Mauszeigers nach oben und unten vergrößert werden.

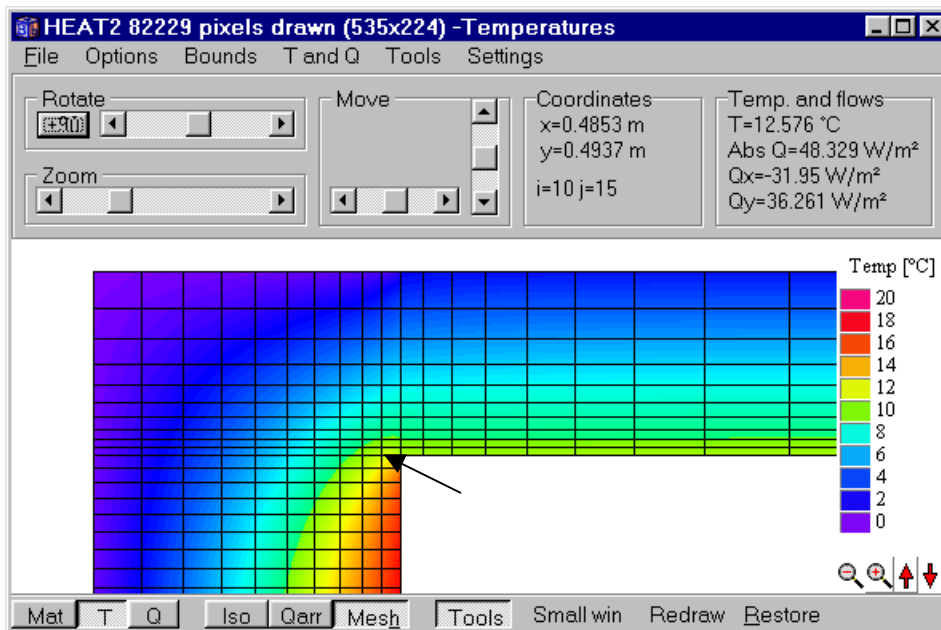


Bild 5.44: Anzeige von Temperatur und Wärmeströmen an einem Punkt (x,y) .

5.13 Export von Wärmeleitwerten und Kapazitäten

Wärmeleitwerte und Wärmekapazitäten können in eine Textdatei geschrieben werden, siehe Menüpunkt *Output/Conductances and capacities to file*. Die erste Zeile enthält die Überschrift. Die folgenden Zeilen zeigen für jede Zelle die Indizes i,j , vier Wärmeleitwerte und die Wärmekapazität:

$$i,j \quad K_{i-1/2,j} \quad K_{i+1/2,j} \quad K_{i,j-1/2} \quad K_{i,j+1/2} \quad C_{i,j}$$

5.14 Export von Temperaturen (MATLAB)

Die berechneten Temperaturen können in eine Datei geschrieben werden, welche mit dem Programm MATLAB (ab Version 4.0) eingelesen werden kann. Es werden drei Dateien mit den Ergänzungen *Dateiname.X*, *Dateiname.Y* und *Dateiname.Z* erzeugt. Die Datei **.Z* enthält die Zelltemperaturen in Form einer Matrix mit $m \cdot n$ Werten. m und n stehen dabei für die Anzahl Zellen in x- bzw. y-Richtung. Die Dateien **.X* und **.Y* enthalten die Koordinaten der Zellenmittelpunkte (Reihe mit m bzw. n Werten). HEAT2 erstellt auch eine MATLAB-Scriptdatei mit dem Namen *Dateiname.M*. Diese Scriptdatei kann direkt in MATLAB ausgeführt werden und erzeugt eine Grafik, siehe Bild 5.45. MATLAB ermöglicht das Zeichnen verschiedener Arten von Grafiken, beispielsweise Kontur- oder Oberflächendiagramme. Weitere Informationen zu MATLAB finden Sie im MATLAB-Handbuch.

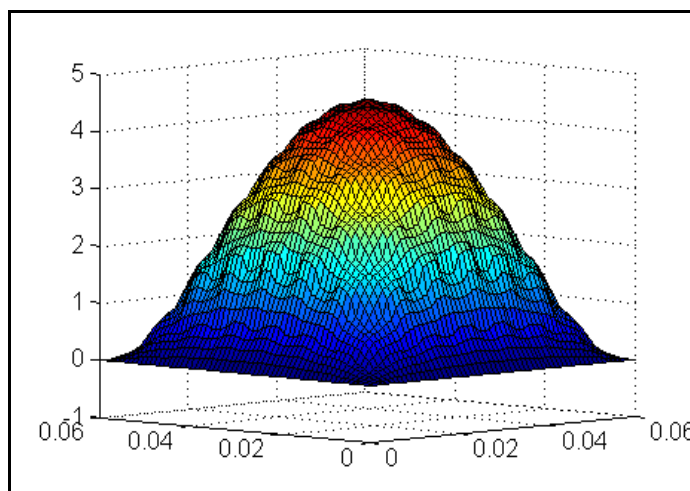


Bild 5.45: Darstellung der Temperaturen für das Beispiel aus Bild 5.19 mit 85 Wärmequellen von je 1 W/m in einer MATLAB-Gitternetzgrafik.

5.15 Rekorder

Während einer Simulation können die Ausgabedaten mit dem sogenannten Rekorder aufgezeichnet werden (Menüpunkt *Output/Recorder*). Er kann bis zu 25 verschiedene Werte als Funktion der Zeit oder der Iterationsschritte speichern. Die aufzuzeichnenden Werte werden aus der in Bild 5.46 gezeigten Liste ausgewählt:

- Q , sum of boundary flows [W/m] Summe der Wärmeströme über alle Randsegmente
- Q , sum of boundaries i1, i2,.. [W/m] Wärmeströme über ausgewählte Randsegmente
- T , point (x,y) Temperatur an einem ausgewählten Punkt
- Q , point (x,y) [W/m²] Wärmestrom an einem ausgewählten Punkt
- Q , sum of int. mod. areas i1, i2,.. [W/m] Summe der Wärmeströme der internen Modifikationen
- Q , through line [W/m] Wärmestrom durch eine Linie

Die einzelnen Ausgabetypen können miteinander kombiniert werden; beispielweise Temperaturen oder Wärmeströme an 20 Punkten sowie Wärmeströme durch 5 verschiedene Randsegmente.

Der Aufzeichnungsmodus ist nur aktiviert, wenn die Optionsbox *Record enabled* angeklickt wurde.

Die Werte werden bei jedem Bildschirmupdate aufgezeichnet (siehe *Solve/Update* oder Schaltfläche *Update interval* im Rekorderfenster). Bild 5.47 zeigt das entsprechende Eingabefenster, in diesem Fall mit einem Update in jede simulierte Stunde. Jede Zeile in der Liste der aufgezeichneten Daten enthält die Zeit (als Zeichenfolge oder in Sekunden) oder die Anzahl der Iterationen sowie in den weiteren Spalten die zu diesem Zeitpunkt aufgezeichneten Werte. Das Updateintervall kann während einer Simulation (oder zwischen zwei Simulationen) geändert werden.

Die Liste mit den Aufzeichnungen kann gespeichert (*.REC) und später geöffnet werden. Über den Menüpunkt *Output/Recorder/Edit* können Daten ausgeschnitten oder eingefügt werden.

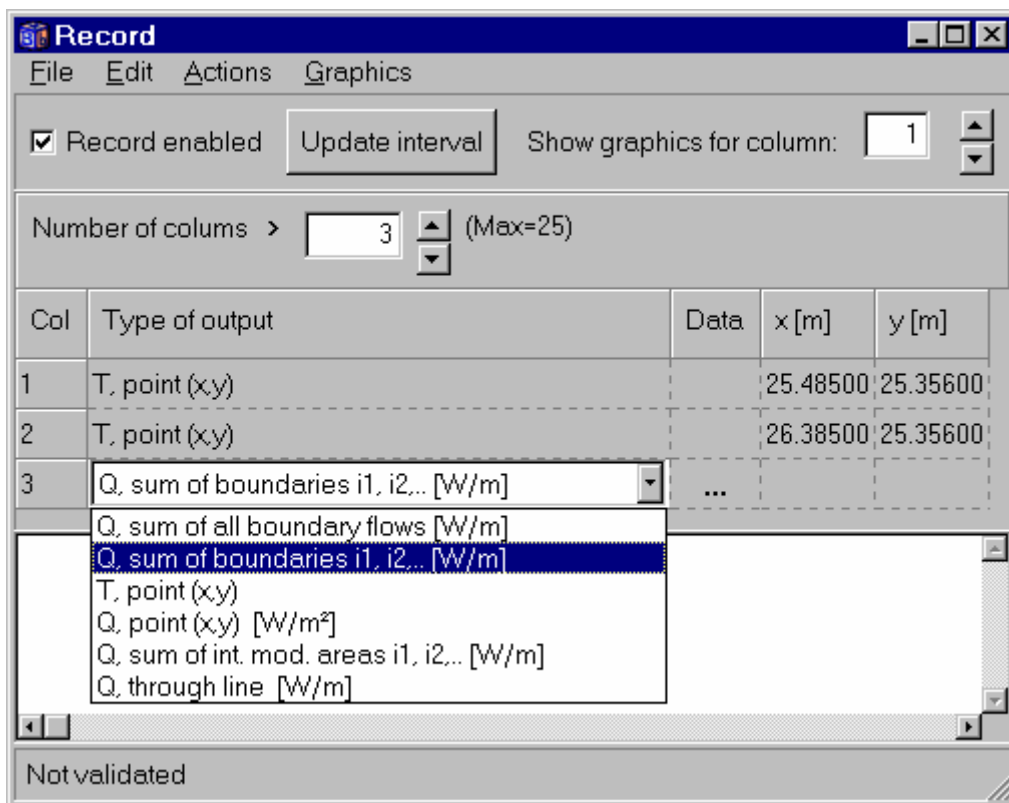


Bild 5.46: Mit dem Rekorder (Menüpunkt *Output/Recorder*) können Daten als Funktion der Zeit (instationärer Fall) oder der Iterationen (stationärer Fall) aufgezeichnet werden.

Bild 5.46 zeigt die Rekordereinstellungen für drei Ausgabewerte (3 Spalten). In den beiden ersten Spalten sollen für das Beispiel Bodenplatte auf Erdreich (siehe Eingabedatei *slab1.dat*) die Temperaturen bei $(x, y) = (25,485; 25,356)$ bzw. $(26,385; 25,356)$ aufgezeichnet werden. Die Punkte befinden sich 0,1 m tief im Fußboden und sind 0,1 m bzw. 1 m von der Innenseite der Wand entfernt. In einer dritten Spalte wird der Wärmestrom durch die Bodenfläche [W/m] aufgezeichnet, welcher über das Randsegment 3 gegeben ist

(Eingabe des Randsegments unter *Data*). Bild 5.48 zeigt die Ausgabedaten bei einem Intervall von 1 Stunde. In Bild 5.49 und Bild 5.50 sind die aufgezeichneten Werte grafisch dargestellt (siehe Menüpunkt *Graphics* und *Show graphics for column* in Bild 5.46).

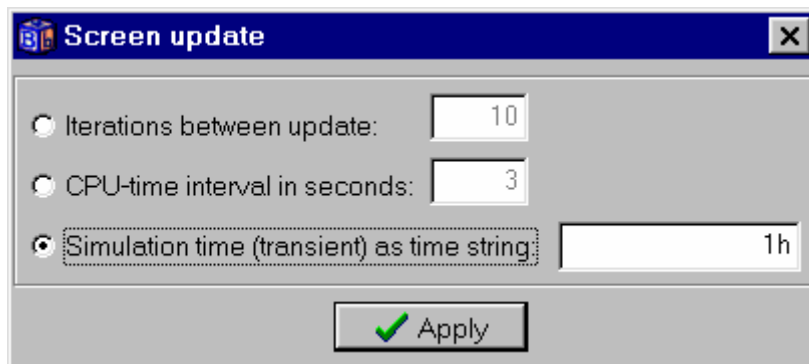


Bild 5.47: Unter *Solve/Update* wird das Zeitintervall für das Bildschirmupdate und die Datenaufzeichnung festgelegt.

% Time	T [°C]	T [°C]	Q [W/m]
0	0	0	865.45
1h	0.8455	1.2551	694.63
2h	1.7581	3.1186	623.67
3h	2.4741	4.8024	563.41
4h	3.0825	6.3023	510.31
5h	3.6298	7.6368	463.21

Bild 5.48: Drei Werte (Spalten), davon zwei Temperaturen und ein Wärmestrom, wurden mit einem Intervall von 1 Stunde aufgezeichnet.

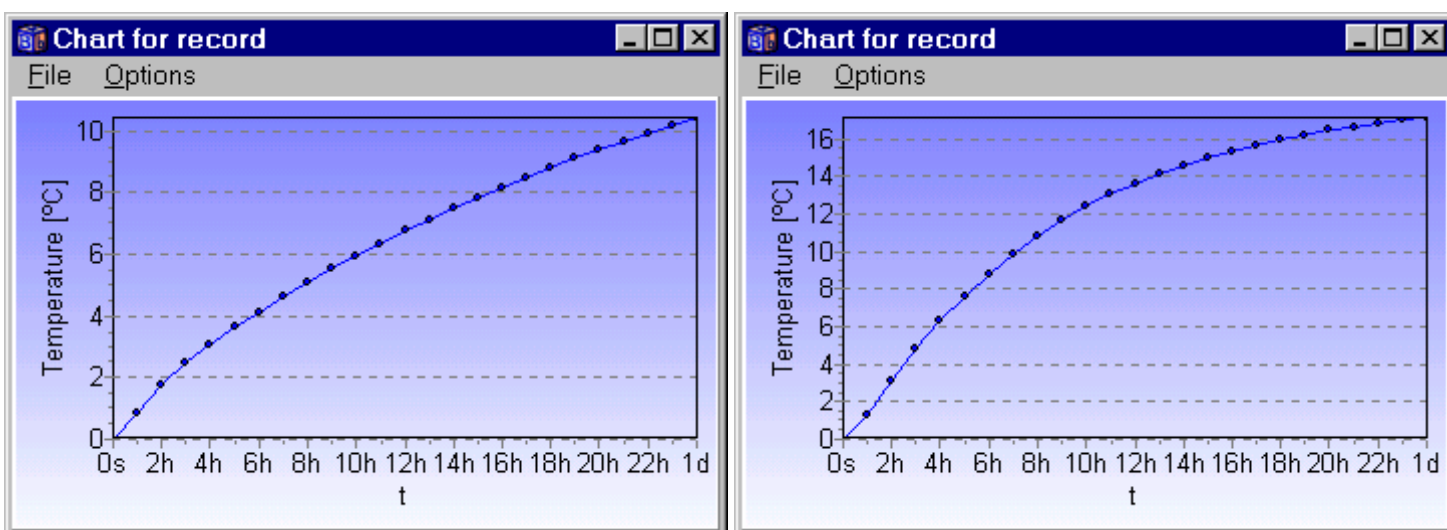


Bild 5.49: Links: Diagramm der Temperatur 0,1 m tief in der Bodenplatte und 0,1 m von der Wand entfernt. Rechts: Temperatur 0,1 m tief in der Bodenplatte und 1 m von der Wand entfernt.

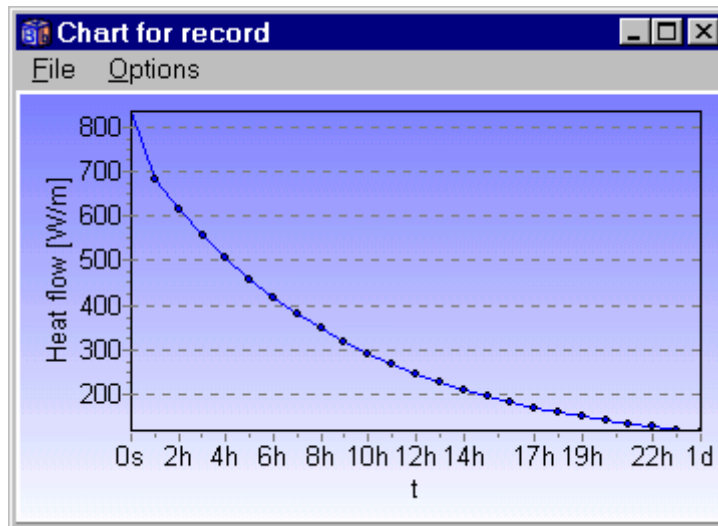


Bild 5.50: Diagramm zum Wärmestrom durch den Fußboden (Randsegment 3).

Ist der Rekorder aktiviert, beginnt die Aufzeichnung der Daten mit dem Start der Simulation und endet zusammen mit der Simulation. Das Rekorderfenster muß dabei nicht geöffnet sein. Die Aktivierung des der Rekorders wird durch einen Hinweis angezeigt (in der Statuszeile des Hauptfensters steht **REC**). Aufgezeichnete Werte werden stets am Listenende angehängt. Die Aufzeichnungsliste kann über das Menü mit *Actions* geleert werden. Drückt man den Menüpunkt *Graphics* im Rekorderfenster, werden die aufgezeichneten Werte grafisch dargestellt.

Bild 5.51 zeigt den berechneten Wärmestrom über die äußeren Ränder für ein stationäres Beispiel. Die Anzahl der Iterationen ist auf der x -Achse angegeben. In diesem Fall wurde eine Aktualisierung (*Solve/Update*) bei jedem Iterationsschritt gewählt. Der "Achterbahn"-Verlauf der Kurve ist auf den verwendeten Relaxationskoeffizienten ($\omega = 1,95$) zurückzuführen. Beachten Sie, daß bei stationären Berechnungen die Bezeichnung der x -Achse mit Iterationen erfolgt. Bei instationären Berechnungen gibt die x -Achse die Zeit an. Die Beschriftung erfolgt über einen ausgewählten Zeitstring (Sekunden, Minuten, Stunden, Tage, Monate, Jahre oder einer Mischung aus diesen).

Das Grafikkfenster wird während der Simulation automatisch aktualisiert, sofern es sichtbar ist. Da dies zu einer Erhöhung die Rechenzeit führt, kann es sinnvoll sein, das Grafikkfenster (und das Aufzeichnungsfenster) bei langen Rechenzeiten zu schließen.

Es ist möglich, sich im Grafikkfenster den gesamten Verlauf oder nur die letzten 20 Werte anzusehen (*Options/Show only 20 last points*).

Das Diagramm kann in die Zwischenablage kopiert oder als Metadatei (EMF, WMF) bzw. Bitmap (BMP) abgespeichert werden. Auch ein direktes Ausdrucken aus HEAT2 ist möglich.

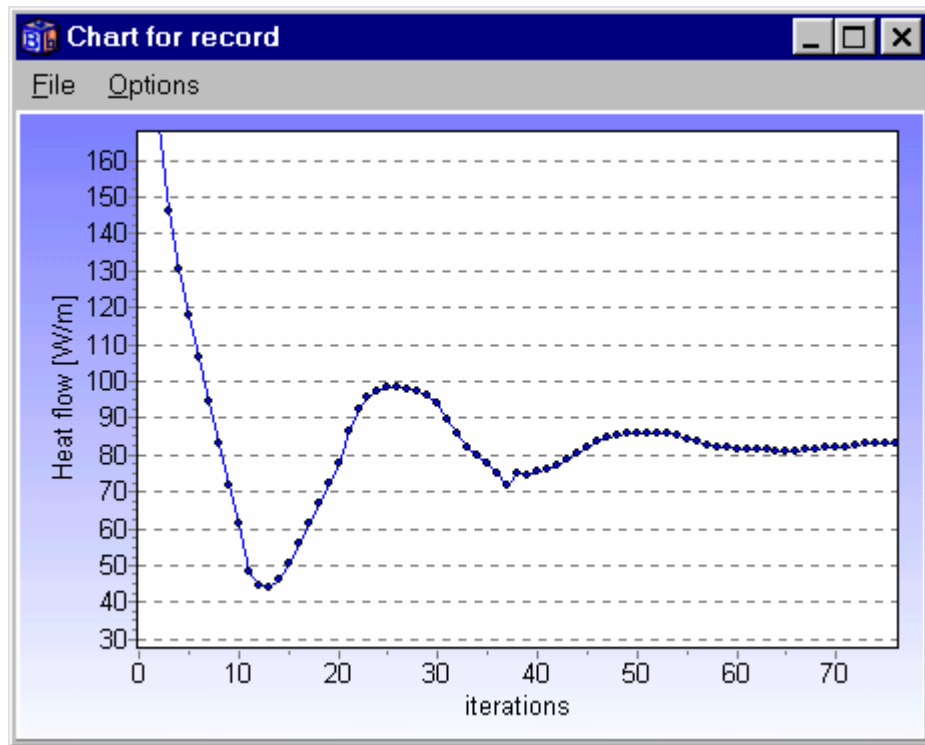


Bild 5.51: Diagramm (*Chart*) mit aufgezeichneten Werten.

Im Grafikfenster können Teilflächen vergrößert werden, indem man mit der linken Maustaste in die obere linke Ecke klickt und den Cursor nach unten rechts zieht. Das Diagramm kann durch Ziehen des Cursors in die entgegengesetzte Richtung (in der Ecke unten rechts beginnend) oder durch Anklicken des Menüpunkts *Options/Reset axis* wiederhergestellt werden. Durch Gedrückthalten der rechten Maustaste kann die Kurve in *x*- und *y*-Richtung verschoben werden. Außerdem sind über *Options/Edit chart* Änderungen an den Diagrammeinstellungen möglich. So kann z.B. der Titel geändert oder eine Legende hinzugefügt werden, siehe Abschnitt 5.16.

Es ist auch möglich, abgespeicherte Funktionen (*.FUN) mit dem Rekorder zu öffnen und die Werte als schrittweise lineare Funktion grafisch darzustellen.

5.15.1 Was kann aufgezeichnet werden?

Die Liste in Bild 5.46 zeigt die 6 Möglichkeiten einer Aufzeichnung:

- | | |
|---|---|
| 1. Q , sum of boundary flows [W/m] | Summe der Wärmeströme über alle Randsegmente |
| 2. Q , sum of boundaries $i1, i2,..$ [W/m] | Wärmeströme über ausgewählte Randsegmente |
| 3. T , point (x,y) | Temperatur an einem ausgewählten Punkt |
| 4. Q , point (x,y) [W/m ²] | Wärmestrom an einem ausgewählten Punkt |
| 5. Q , sum of int. mod. areas $i1, i2,..$ [W/m] | Summe der Wärmeströme der internen Modifikationen |
| 6. Q , through line [W/m] | Wärmestrom durch eine Linie |

Der fünfte Typ bezeichnet den Wärmestrom durch die internen Modifikationsflächen. Es können eine oder mehrere der 4 Ränder einer jeden Fläche ausgewählt werden. Bild 5.52 zeigt die Summe der Wärmeströme durch den unteren Rand der vier Flächen 1, 2, 3 und 5.

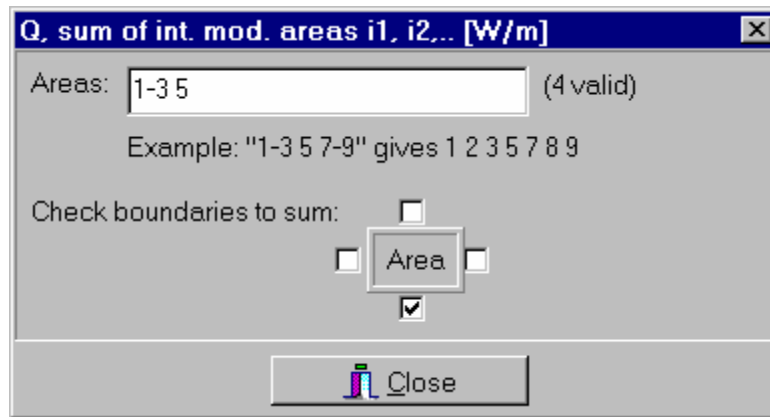


Bild 5.52: Die Summe der Wärmeströme durch den unteren Rand wird für die vier Flächen 1, 2, 3 und 5 aufgezeichnet.

Der sechste Typ bezeichnet den Wärmestrom durch eine interne Linie. Dies ermöglicht die Aufzeichnung von internen Wärmeströmen in willkürlich ausgewählten Bereichen. Die Linie muß vertikal oder horizontal verlaufen und es müssen die Koordinaten "unten links" und "oben rechts" angegeben werden. Wenn es an der gewünschten Stelle bisher kein Eingabernetz gibt, kann über den Menüpunkt *Input/Insert mesh point*, eine neue Netzkoordinate eingefügt werden. Die Linie kann sowohl entlang eines Randsegments als auch innerhalb des Berechnungsgebietes angeordnet werden.

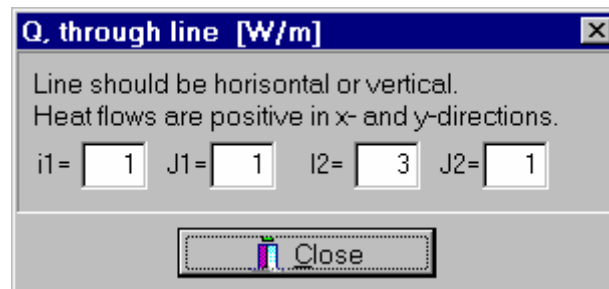


Bild 5.53: Interne Wärmeströme können für eine vertikale oder eine horizontale Linie aufgezeichnet werden.

5.16 Änderungen in der Aufzeichnungsliste

5.16.1 Einführung

Über die Ziffer im Auswahlfeld *Show graphics for column* in Bild 5.46 wird eine der aufgezeichneten Datenspalten für die Anzeige einer Grafik (Diagramm) ausgewählt. Die Diagrammeinstellungen können mit dem Diagrammeditor angepaßt werden (*Options/Edit chart* im Fenster *Chart for record*), siehe Bild 5.54.

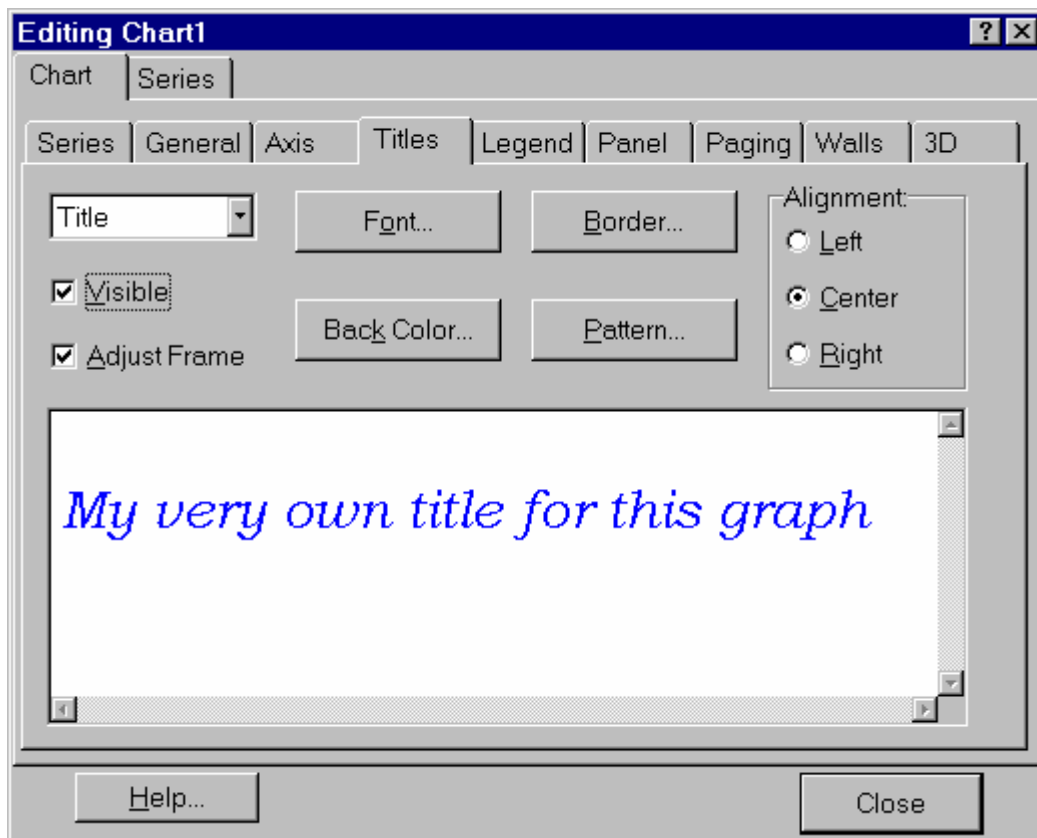


Bild 5.54: Änderung der Diagrammeinstellungen über den Menüpunkt *Options/Edit chart*.

5.16.2 Hilfe

Um Unterstützung zu einem beliebigen Thema im Diagrammeditor zu erhalten, zieht man das im Editorfenster oben rechts befindliche Hilfesymbol (Fragezeichen) auf das entsprechende Thema.

5.16.3 Einstellungsmöglichkeiten im Diagrammeditor

Die Diagrammeinstellungen sind in zwei Hauptrubriken gegliedert, welche mit **Chart** (Diagrammoptionen) bzw. **Series** (Optionen für die Datenreihen) bezeichnet sind.

Chart (Diagrammoptionen)

Es können folgende Grundeinstellungen des Diagramms festgelegt werden:

Series (Serien) - Sie können einen Diagrammtyp auswählen z.B. Linien-, Streifen-, Fläche-, Punktdiagramm etc. Mit *Add...* wird ein neuer Typ hinzugefügt.

General (Allgemein) - Diagrammgröße, Ränder, Zoom und Bildlauf, Druckansicht und Export

Axis - Achsen formatieren. Einige Parameter sind vom ausgewählten Diagrammtyp abhängig.

Title - Titeltext und Fußzeile formatieren.

Legend - Legende formatieren. Formatierte Darstellungen sind abhängig vom ausgewählten Diagrammtyp. Siehe auch "*General*" unter *Series (Reihenoptionen)*.

Panel - Diagrammfläche formatieren. Farben, Abschrägungen, Hintergrundbild, Farben und Ränder.

Paging - Definition der Anzahl der Punkte pro Diagrammblatt.

Walls - Wände formatieren. Größe von linker Seite, unterem Rand, Rückwand. Farben, Muster.

3D - 3D-Ansicht. Verschiedene Einstellungen.

Series (Optionen für die Datenreihen)

Hier können in Abhängigkeit vom speziellen Diagrammtyp Formatierungen der Datenreihe vorgenommen werden:

Format - Diagrammtypspezifische Parameter.

Point - Sichtbare Punkte, Ränder.

General - Allgemeine Datenformatierungen. Achsenanordnung.

Marks - Datenbeschriftungen formatieren. Text, Rahmen, Hintergrundfarbe und Position.

5.17 Info log - Fenster

Das Info log - Fenster (Menüpunkt *Output/Info log*) zeigt Informationen zu den Eingabedaten und zum erzeugten Berechnungsnetz der aktuellen Simulation, siehe Bild 5.55. Es wird das stabile Zeitintervall sowie die Position der maßgebenden Berechnungszelle angegeben. Info log wird automatisch erzeugt, sobald die Simulation gestartet oder eine Eingabedatei geladen wird.

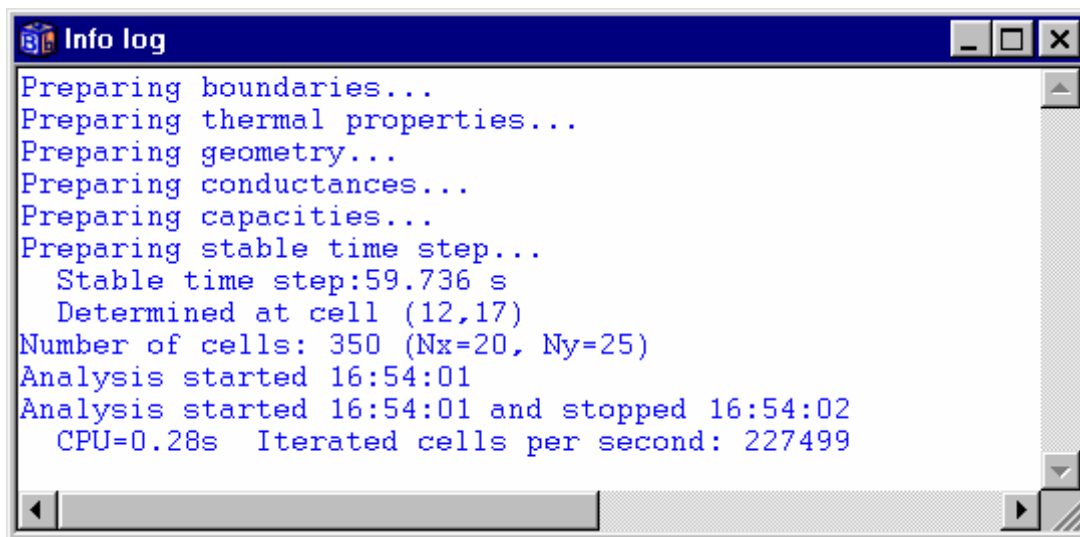


Bild 5.55: Info log – Fenster.

5.18 Grafische Ausgabeoberfläche (Postprozessor)

5.18.1 Einführung

Die grafische Ausgabe von Temperaturen, Isothermen, geometrischem Modell (Materialien), Berechnungsnetz, Randbedingungen und weiteren Daten erfolgt in HEAT2 durch einen sogenannten Postprozessor, siehe Bild 5.56. Das Grafikfenster wird bei jeder neuen Dateneingabe aktualisiert. Bilder mit Temperaturen oder Wärmeströmen werden während der Simulation aktualisiert (Menüpunkt *T and Q/ Update figure on solve*). Farben und Größen können unter *Settings* geändert werden.

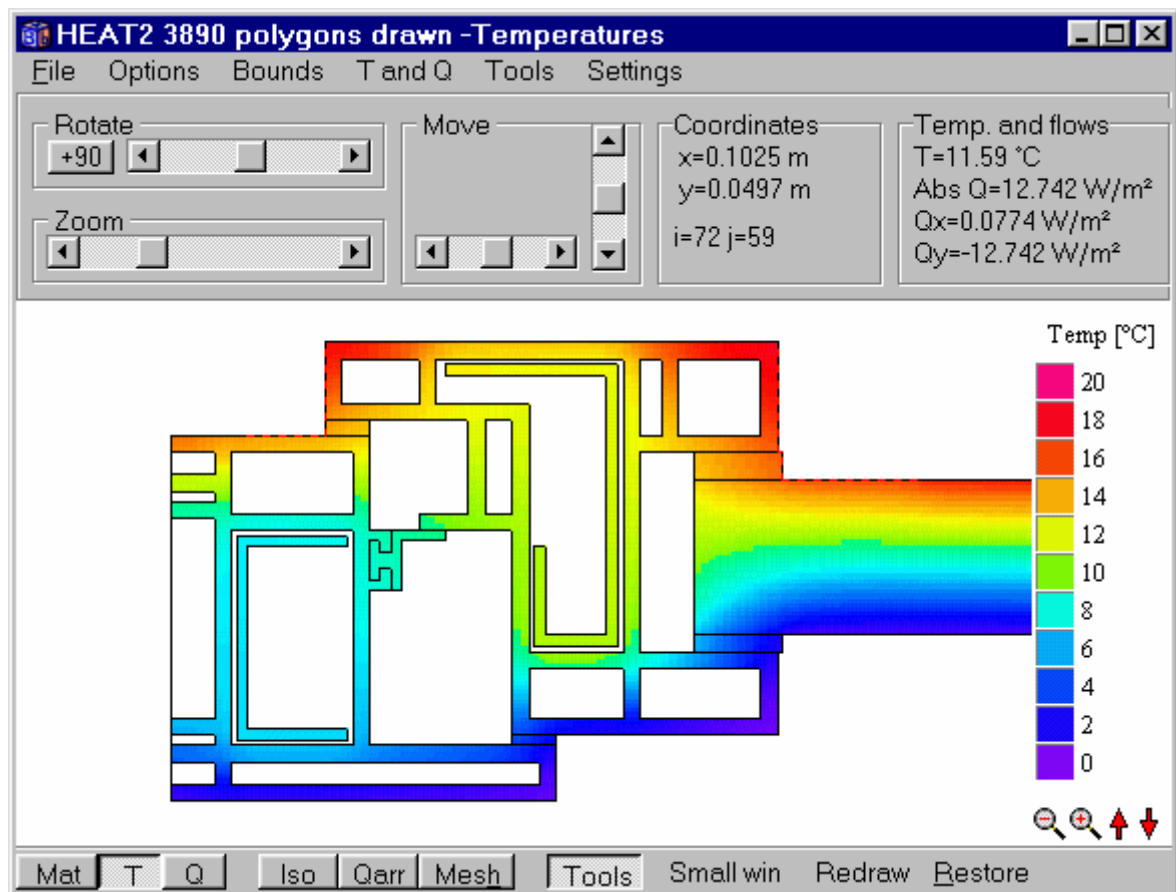


Bild 5.56: Grafikfenster (Postprozessor).

5.18.2 Grundlegende Befehle

Das Bild im Grafikfenster kann unter Verwendung der oberen Werkzeugleiste, der Maus oder direkt über die Tastatur gedreht, verschoben oder gezoomt werden. Bild 5.57 zeigt die entsprechenden Maus- und Tastaturbefehle. Die Liste kann auch über den Menüpunkt *Tools/Help shortcuts* am Bildschirm angezeigt werden.

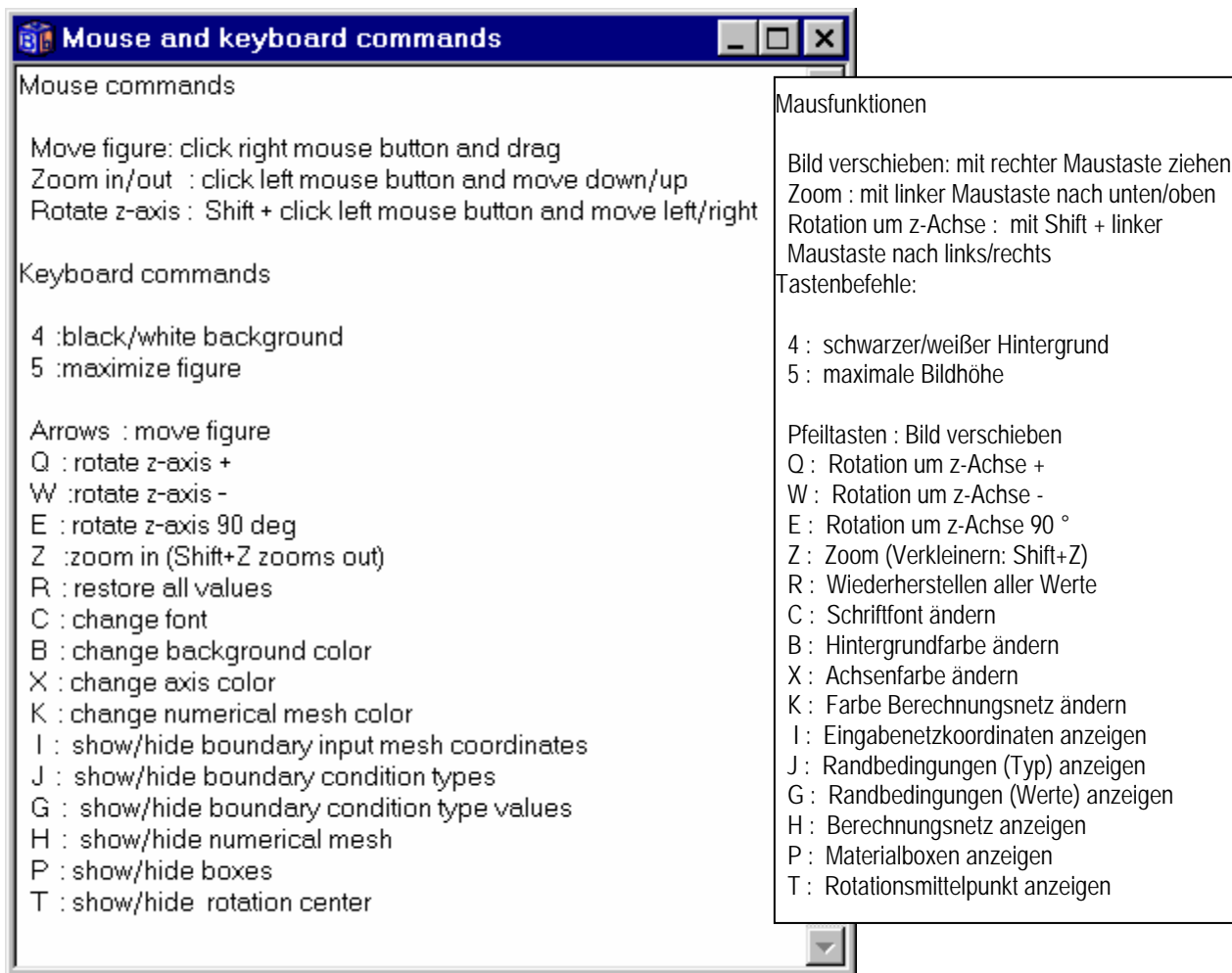


Bild 5.57: Tastaturkürzel für grundlegende Befehle

5.18.3 Menüpunkt *File*

5.18.3.1 *Speichern von Grafiken*

Alle Grafiken können als Bitmap gespeichert (*File/save image as bitmap*) oder in die Zwischenablage kopiert werden (*File/Cut image to clipboard*).

Über die Zwischenablage können die Grafiken in andere Programme, z.B. Microsoft Word eingefügt werden. Bei Verwendung der Option *File/Cut image to clipboard* wird eine Darstellung ohne den oberen Fensterrahmen erzeugt, siehe Bild 5.58 (oben). Die Verwendung der Tastenkombination **Alt-Print Screen** (Druck) erfasst das gesamte aktive Fenster; die Taste **Print Screen** (Druck) den gesamten Bildschirm. Die Bilder können z.B. in Word neu skaliert werden.

Beachten Sie, daß die Auflösung derjenigen auf dem Bildschirm entspricht. Mit hohen Bildschirmauflösungen (z.B. 1024 x 768) können somit bessere Ergebnisse als mit niedrigen (z.B. 640 x 480) erreicht werden. Eine deutlich höhere Qualität als das Drucken über die Zwischenablage bietet allerdings das direkte Drucken aus HEAT2. So führt ein 15"-Bildschirm mit einer Auflösung von 1024 x 768 nur zu etwa 75 dpi gegenüber einem Direktdruck mit z.B. 600 dpi, siehe Bild 5.61.

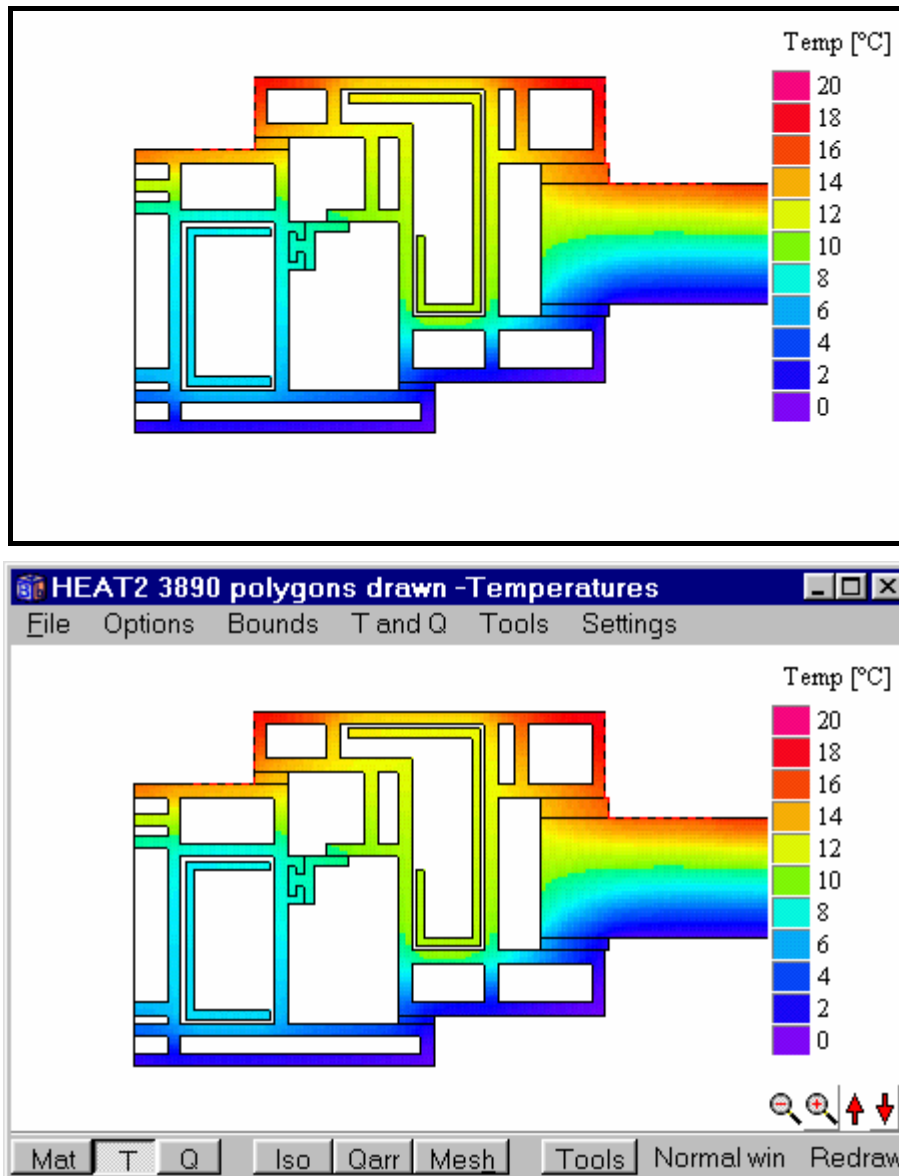


Bild 5.58: Oben: Nutzung der Option in *File/Cut image to clipboard* für eine Darstellung ohne Fensterrand. Unten: Verwendung der Tastenkombination **Alt-Print Screen** für das Kopieren des gesamten aktiven Fensters in die Zwischenablage.

5.18.3.2 Ausdrucken von Grafiken aus HEAT2

Bild 5.59 zeigt die Druckoptionen (Menüpunkt *File/Print...*), mit denen die Strichdicke geändert werden kann.

Im Menü *File* gibt es außerdem eine einfache Druckvorschau (Menüpunkt *File/Preview print...*), siehe Bild 5.60. Der grüne Rahmen stellt den Papierrand dar. Die Größe bzw. Lage der Grafik auf dem Papier kann verändert werden.

Beim direkten Ausdrucken mit dem Befehl *Print* (Menüpunkt *File/Print...*) wird die Auflösung des aktuellen Druckers benutzt, siehe Bild 5.61. Es ist auch möglich, mit *File/Print screen dump* den Bildschirminhalt auszudrucken (in schlechter Qualität).

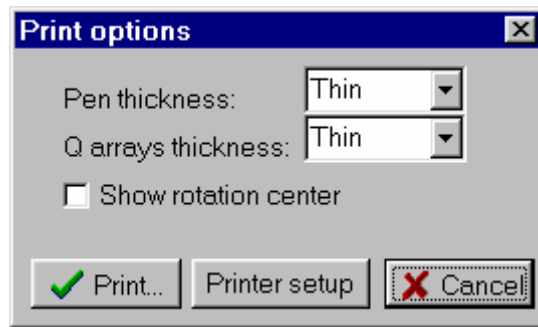


Bild 5.59: Druckoptionen (Menüpunkt *File/Print...*).

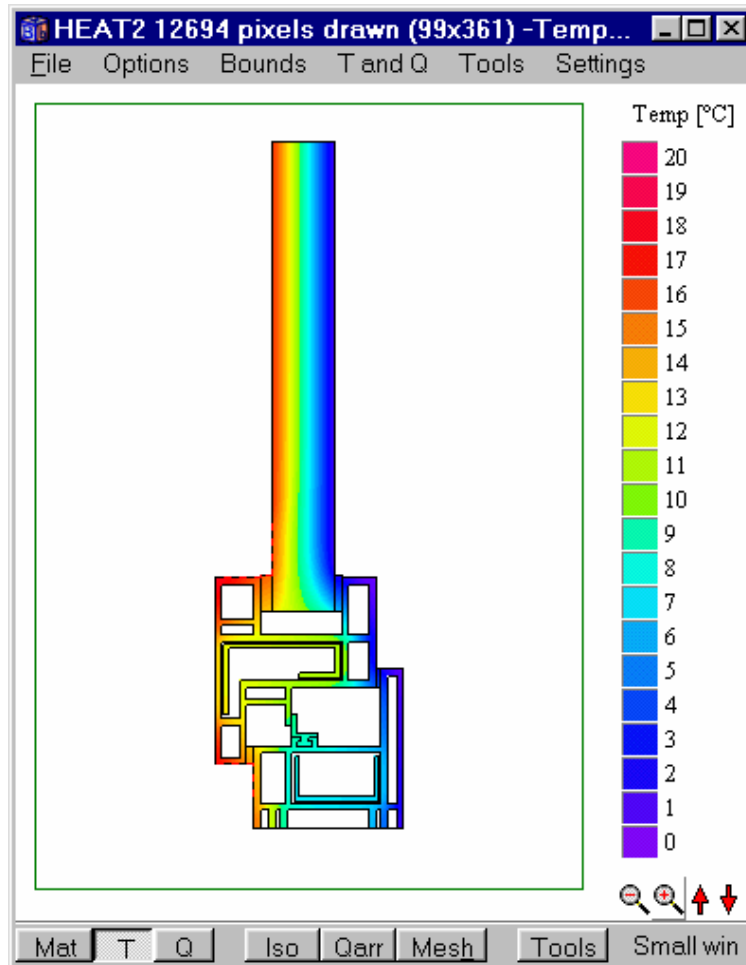


Bild 5.60: Einfache Druckvorschau mit einem grünen Rahmen, der den Papierrand darstellt.

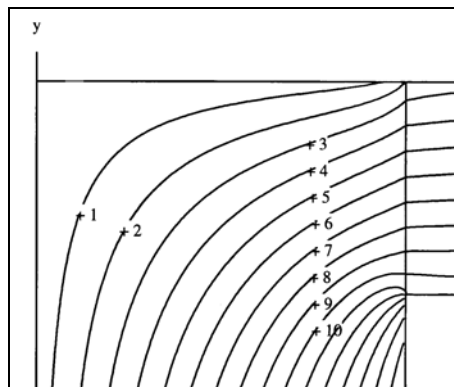


Bild 5.61: Isothermen, direkt aus HEAT2 gedruckt. Es wird die Auflösung des Druckers verwendet, in diesem Fall 600 dpi. Das Bild wurde nach dem Druck in dieses Dokument eingescannt.

5.18.4 Menüpunkt *Options*

Bild 5.62 zeigt das Menü *Options*.

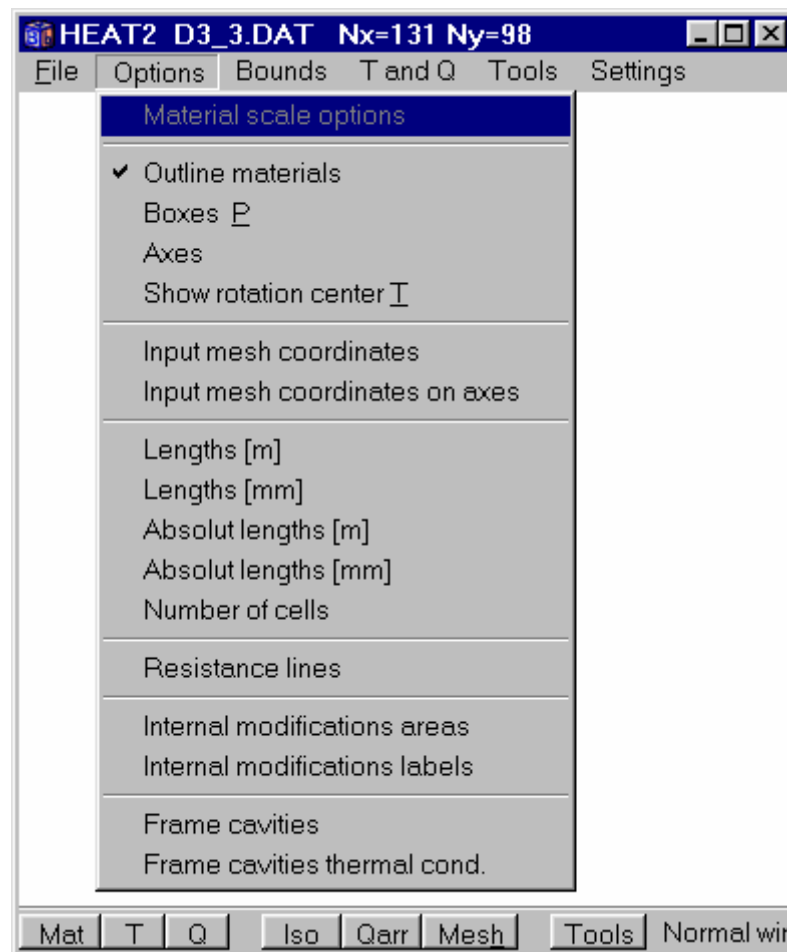


Bild 5.62: Menüpunkt *Options*.

5.18.4.1 Darstellung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität

Bei Drücken der Schaltfläche "Mat" in der unteren Werkzeugleiste werden die einzelnen Materialien bzw. Materialeigenschaften angezeigt, siehe Bild 5.62. Rechts wird eine Skala dargestellt.

Klickt man rechts neben die Skala (oder Menüpunkt *Options/Material scale options*), öffnet sich das in Bild 5.63 gezeigte Fenster. Hier kann eingestellt werden, ob in der Grafik Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten, Boxen (Materialrechtecke) oder Materialbezeichnungen angezeigt werden sollen. Bild 5.64 zeigt oben ein geometrisches Modell mit Materialbezeichnungen (Materialien mit gleichen thermischen Eigenschaften sind möglich, wenn unterschiedliche Materialbezeichnungen verwendet werden), unten befindet sich eine Darstellung mit den einzelnen Boxen.

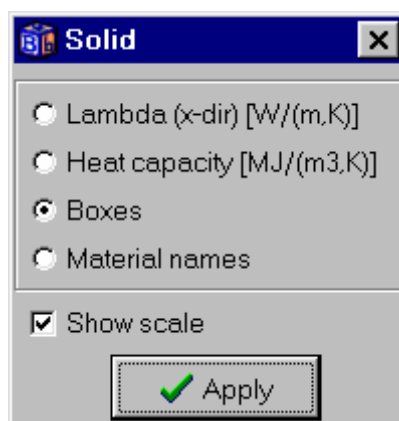


Bild 5.63: Skalenoptionen für Materialeigenschaften. Das Menü öffnet sich durch Klicken rechts neben die Skala (bzw. *Options/Material scale options*).

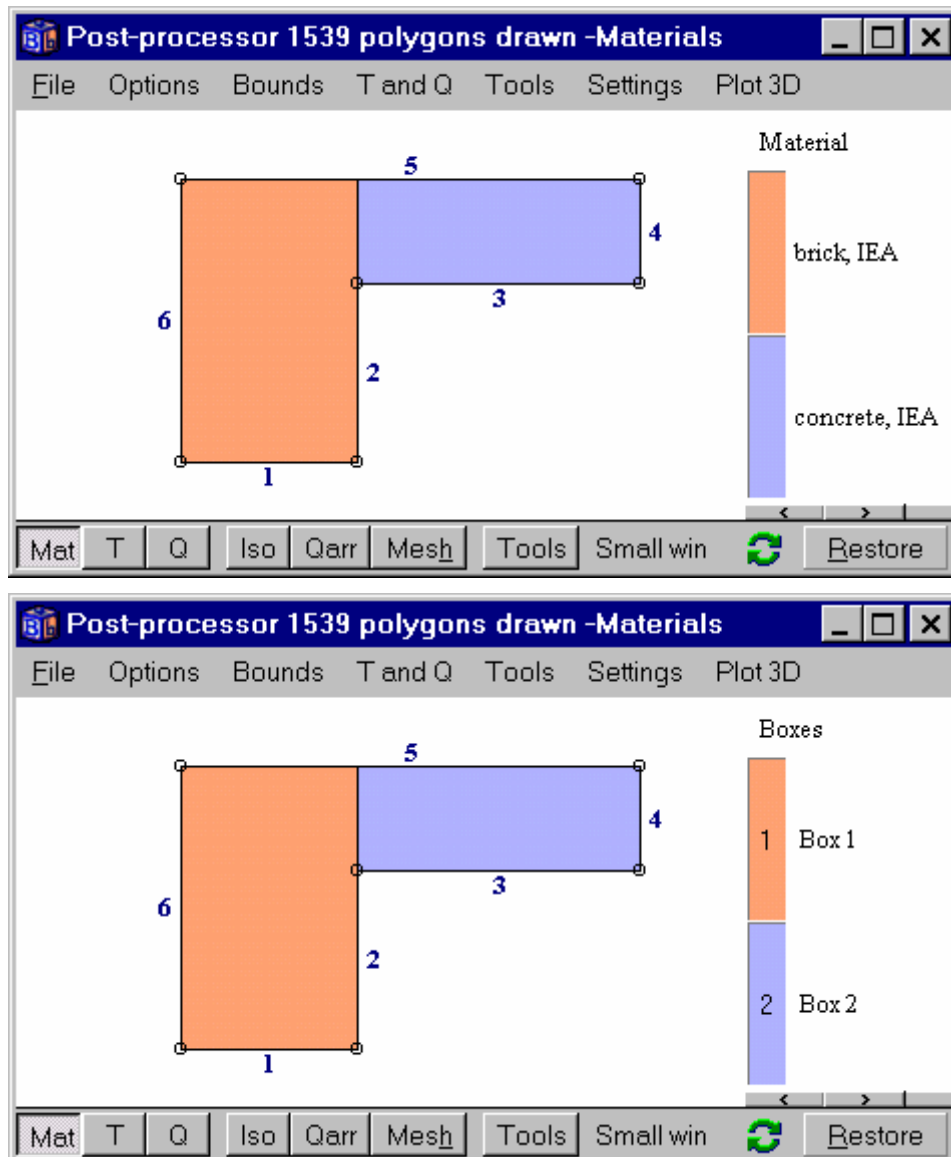


Bild 5.64: Mit unterschiedlichen Farben werden Materialbezeichnungen (oben), Boxen (unten) oder Materialkennwerte visualisiert.

5.18.4.2 Umrisse der Materialrechtecke

Bild 5.65 zeigt die eingegebenen Materialrechtecke (Boxen) mit allen Begrenzungslinien (Menüpunkt *Options/boxes*). In Bild 5.66 sind lediglich die Grenzlinien zwischen unterschiedlichen Materialien mit einer schwarzen Linie dargestellt (Menüpunkt *Options/Outline materials*).

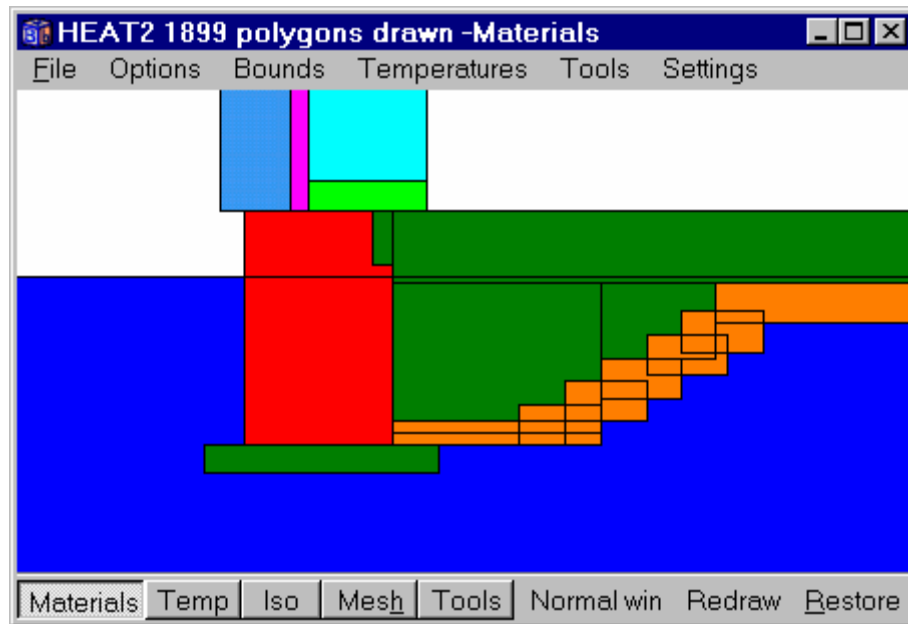


Bild 5.65: Darstellung aller Materialboxen über *Options/boxes*.

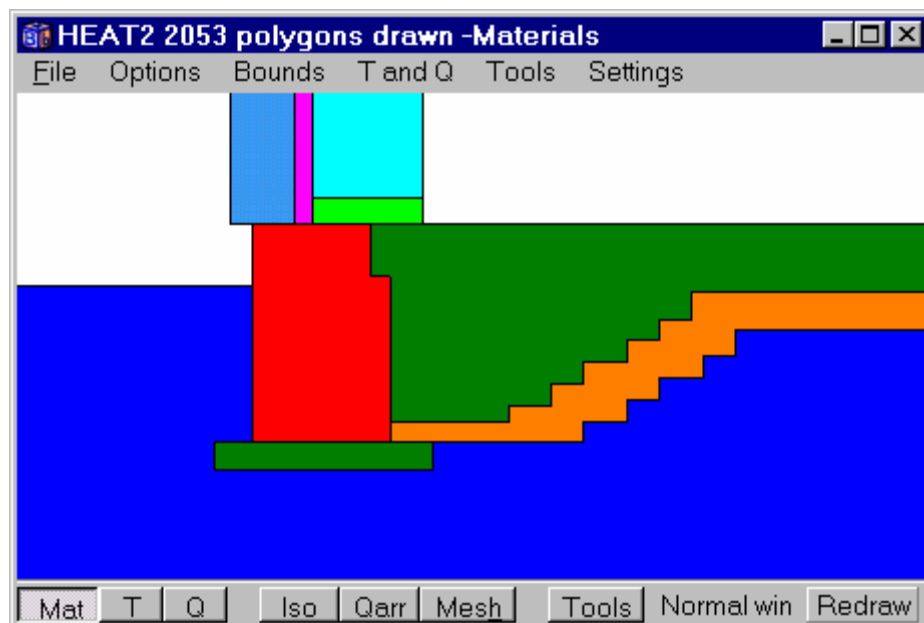


Bild 5.66: Darstellung der Grenzlinien zwischen unterschiedlichen Materialien über *Options/Outline materials*.

5.18.4.3 Absolute Längenangaben

Bild 5.67 (links) zeigt die Längen der einzelnen Segmente des Eingabernetzes (bzw. Abstände der Netzachsen) in x- und y-Richtung. Es ist jedoch auch möglich, die absoluten Koordinaten der Achsen anzuzeigen (Menüpunkt *Options/Absolute lengths*), siehe Bild 5.67 (rechts).

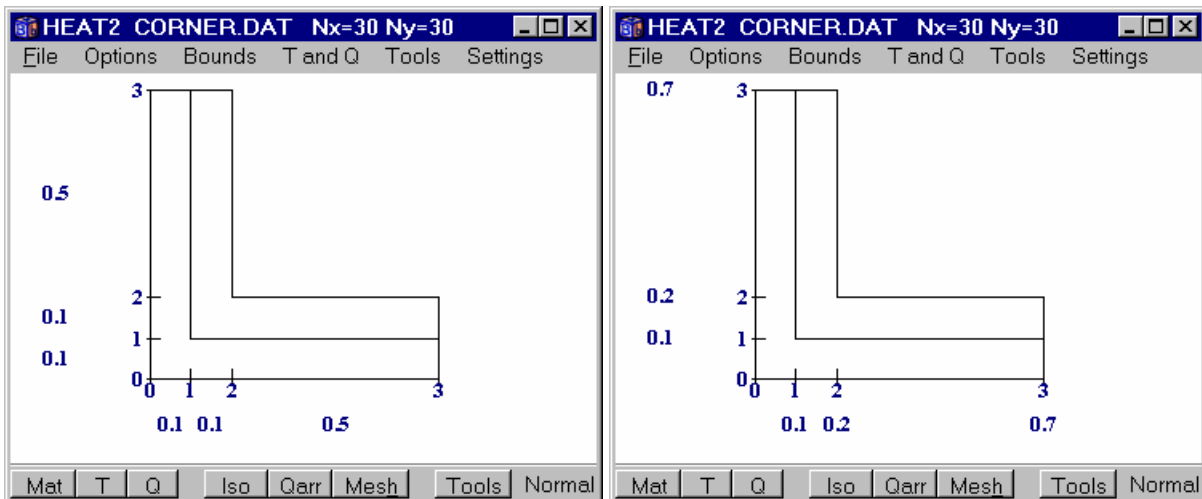


Bild 5.67: Links: Segmentlängen bzw. Abstände zwischen den Netzachsen
Rechts: Absolute Entfernungsangaben für die Netzachsen (bezogen auf die Koordinate 0,0).

5.18.4.4 Widerstandslinien

Linien mit thermischen Widerständen können im Postprozessor über den Menüpunkt *Options/Resistance lines* angezeigt werden. Bild 5.68 zeigt eine Widerstandslinie zwischen den Eingabeneckkoordinaten (0,1) und (1,1) als rote gestrichelte Linie.

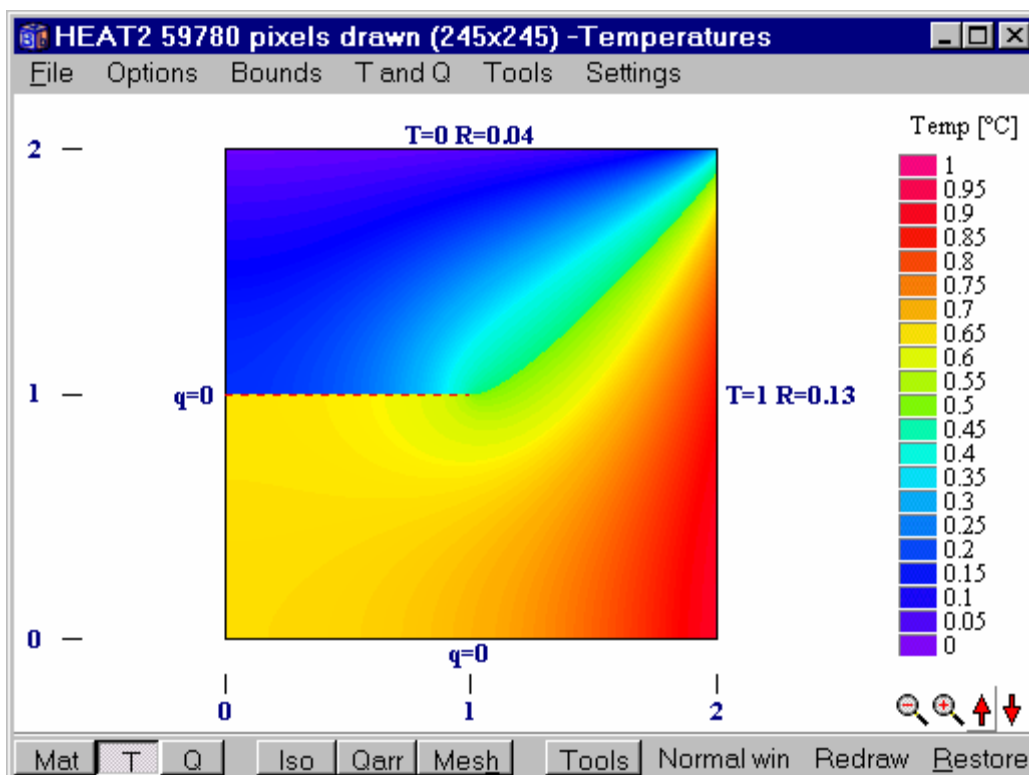


Bild 5.68: Interne Widerstandslinie zwischen den Koordinaten (0,1) and (1,1), dargestellt als rote gestrichelte Linie.

5.18.5 Menüpunkt *Bounds (Ränder)*

Bild 5.69 zeigt das Menü *Bounds*. Bei Aktivierung der ersten beiden Menüpunkte werden die äußeren Detailgrenzen schwarz umrandet sowie die laufenden Nummern der Randsegmente angezeigt. Es ist auch eine Anzeige der konkreten Randbedingungen bzw. Temperaturen oder der berechneten Wärmeströme in $[W/m^2]$ oder $[W/m]$ möglich.

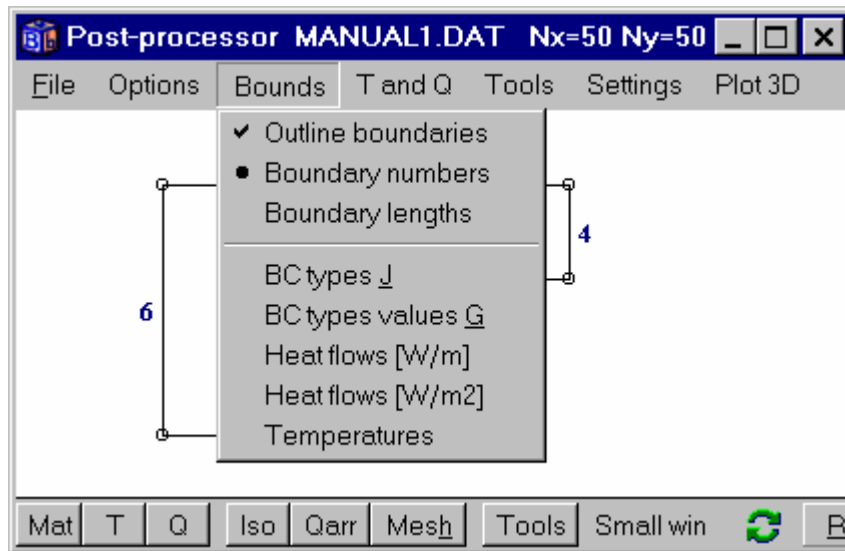


Bild 5.69: Menüpunkt *Bounds* (Ränder).

5.18.6 Menüpunkt *T and Q*

Bild 5.70 zeigt das Menü *T and Q* (Temperaturen und Wärmeströme). Während einer Simulation wird die Grafik in dem unter *Solve/Screen update* angegebenen Intervall aktualisiert (sofern nicht *Temperatures/Update figure on solve* deaktiviert wurde).

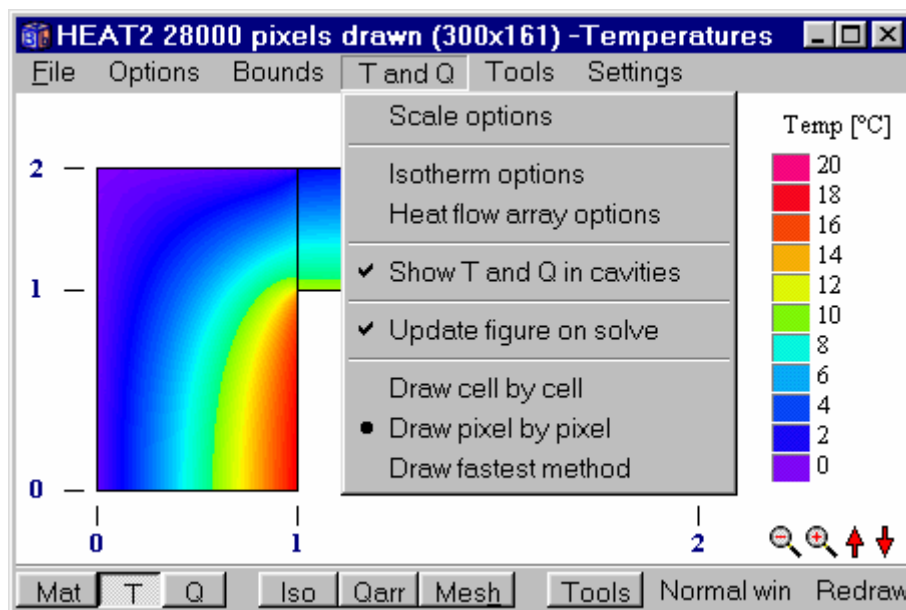


Bild 5.70: Temperaturen. Beachten Sie, daß die Anzahl der Skalenbalken an die Fenstergröße angepaßt wird. Im dargestellten Fall ist das Fenster zu klein um alle Balken aufzunehmen und die Anzahl der Balken wird automatisch von 21 auf 11 reduziert.

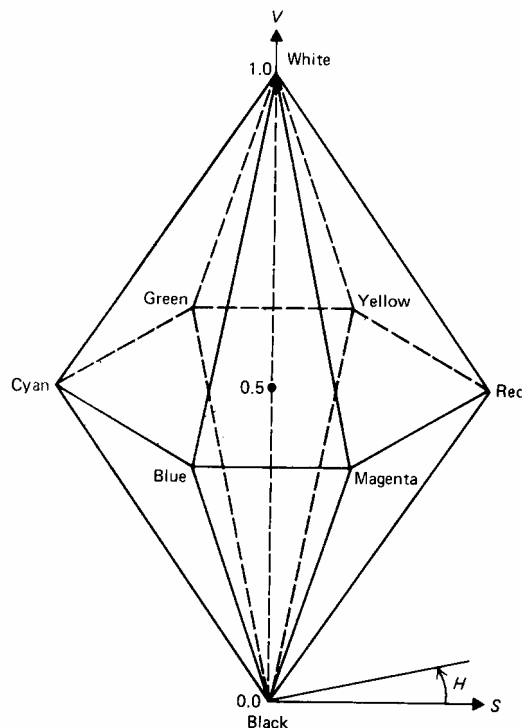
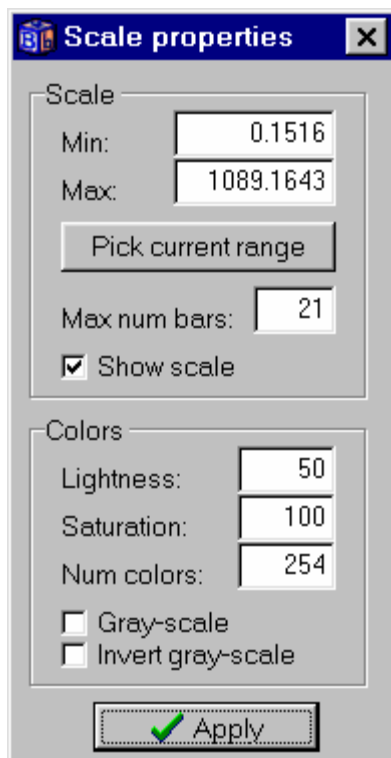


Bild 5.71: Links: Optionen für die Temperatur- bzw. Wärmestromskala. Rechts: Verwendetes Farbton/Helligkeits/Sättigungs-Farbmodell.

An der Temperatur- bzw. Wärmestromskala können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, siehe Bild 5.71 (links). Das Fenster *Scale properties* wird durch Klicken in den rechten Bereich der Temperaturskala bzw. über Menüpunkt *T and Q/Scale options* geöffnet. Es können die minimalen und maximalen Skalenwerte festgelegt werden. Mit der Schaltfläche *Pick current range* wird der Wertebereich exakt an die im Berechnungsgebiet ermittelten Temperaturen bzw. Wärmeströme angepaßt.

Die Balkenanzahl der Skala kann verändert werden. Die Werte werden farbig oder in Grautönen angezeigt. Die Berechnung der Farben erfolgt auf der Grundlage des von Tektronix verwendeten Farbton/Helligkeits/Sättigungs-Modells, welches auf dem Farbsystem von Ostwald basiert, siehe Bild 5.71 (rechts). Der Farbton ergibt sich aus dem Winkel um die doppelte sechsseitige Pyramide. Die Sättigung wird radial von der vertikalen Achse gemessen, von 0 auf der Achse bis 1 auf der Oberfläche. Die Helligkeit ist 0 für Schwarz (an der unteren Spitze) und 1 für Weiß (an der oberen Spitze).

Die Farbtöne werden unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anzahl von Farben (*Num colors*) von Magentarot nach Blau berechnet.

Im Postprozessor kann ein bestimmter Wertebereich durch Klick auf den Skalenbalken deaktiviert (ausgeblendet) bzw. wieder aktiviert werden. Bild 5.72 zeigt eine Temperaturgrafik mit 21 Balken in 1 K-Schritten, in der zwei Temperaturen, $T = 11\text{ °C}$ und $T = 16\text{ °C}$, deaktiviert wurden. Werte von 10,5 - 11,5 bzw. 15,5 - 16,5 werden somit nicht angezeigt. Durch Klicken mit der *linken* Maustaste auf einen Skalenabschnitt wird das entsprechende Intervall deaktiviert/aktiviert. Durch Klicken mit der *rechten* Maustaste auf den Skalenbalken werden alle Intervalle deaktiviert/aktiviert.

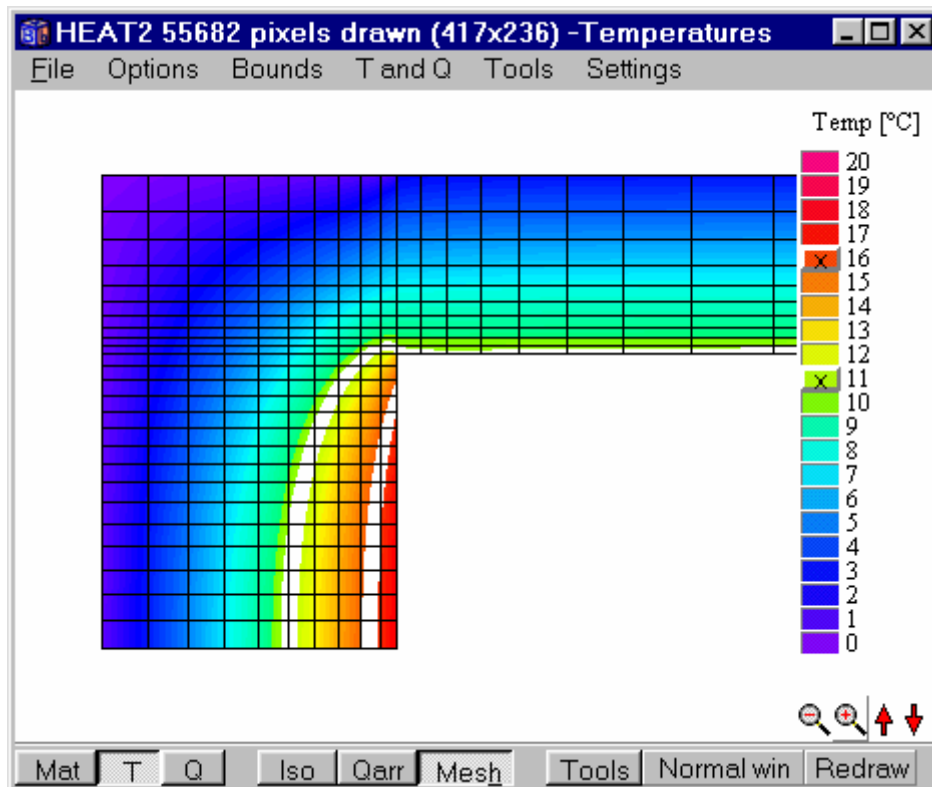


Bild 5.72: Wertebereiche können durch Anklicken der entsprechenden Skalenabschnitte ausgeblendet werden, in diesem Fall die Temperaturen $T = 16\text{ °C}$ und $T = 11\text{ °C}$.

5.18.6.1 Bessere Bildqualität durch Option Zeichnen Pixel für Pixel

Es gibt zwei Wege zum Erstellen von Temperatur- und Wärmestromgrafiken. Der erste Weg ist die Benutzung der Option "Draw cell by cell" (Zeichnen Zelle für Zelle), siehe Bild 5.73. Hierbei wird jede Berechnungszelle gleichmäßig mit der durch die Zelltemperatur gegebenen Farbe gefüllt. Im Falle einer Wärmestromgrafik ergibt sich die Farbe aus dem gemittelten Wärmestrom über die vier Ränder der Zelle. Der zweite Weg "Draw pixel by pixel" (Zeichnen Pixel für Pixel) ist das Zeichnen jedes einzelnen Bildschirmpixels auf der Grundlage interpolierter Zwischenwerte, siehe Bild 5.74.

Die Zeit für den Grafikaufbau bei den beiden Optionen hängt von der Anzahl der Zellen und von der Bildgröße ab. Die Option "Draw cell by cell" ist normalerweise schneller, wenn die Anzahl der Pixel größer ist als die Anzahl der Zellen. Für eine kleine Darstellung (typischerweise mit mehr numerischen Zellen als Pixel) ist in der Regel die Option "Draw pixel by pixel" schneller. Standardmäßig zeichnet HEAT2 mit der jeweils schnellsten Methode (Menüoption "Draw fastest method"). Für Präsentationen empfiehlt sich die Verwendung der Option "Draw pixel by pixel", da diese die beste Qualität ergibt.

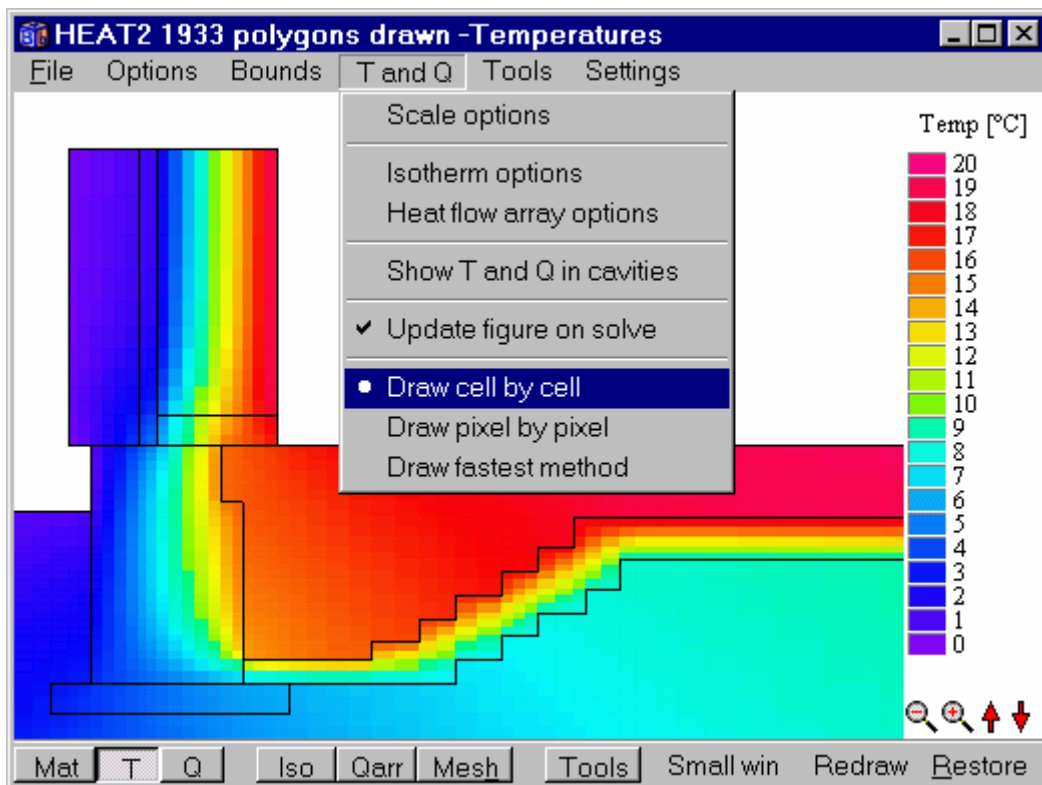


Bild 5.73 Temperaturgrafik, gezeichnet Zelle für Zelle. Diese Methode ist meist schneller; es können aber die einzelnen Zellen erkennbar sein.

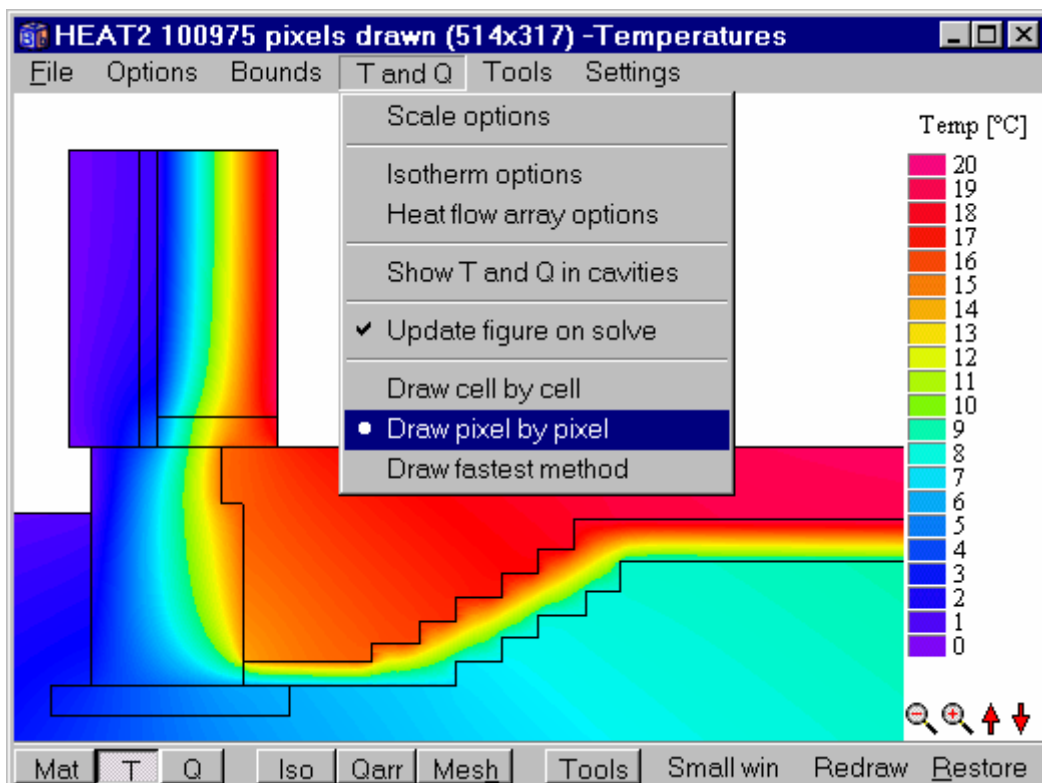


Bild 5.74: Temperaturgrafik, gezeichnet Pixel für Pixel. Die Darstellung hat fließende Farbübergänge, der Grafikaufbau dauert jedoch in der Regel länger.

5.18.6.2 Wärmestromdichte

Durch Klicken des Symbols **Q** in der unteren Symbolleiste wird eine Grafik der Wärmestromdichte [W/m²] angezeigt. Bild 5.75 und Bild 5.76 zeigen Grafiken, die mit den Zeichenoptionen "Draw cell by cell" bzw. "Draw pixel by pixel" gezeichnet wurden. Die grafische Darstellung der Wärmeströme erleichtert das visuelle Erkennen von Wärmebrücken und ermöglicht somit eine gezielte Optimierung der Wärmedämmung in Gebieten mit hohen Wärmeströmen.

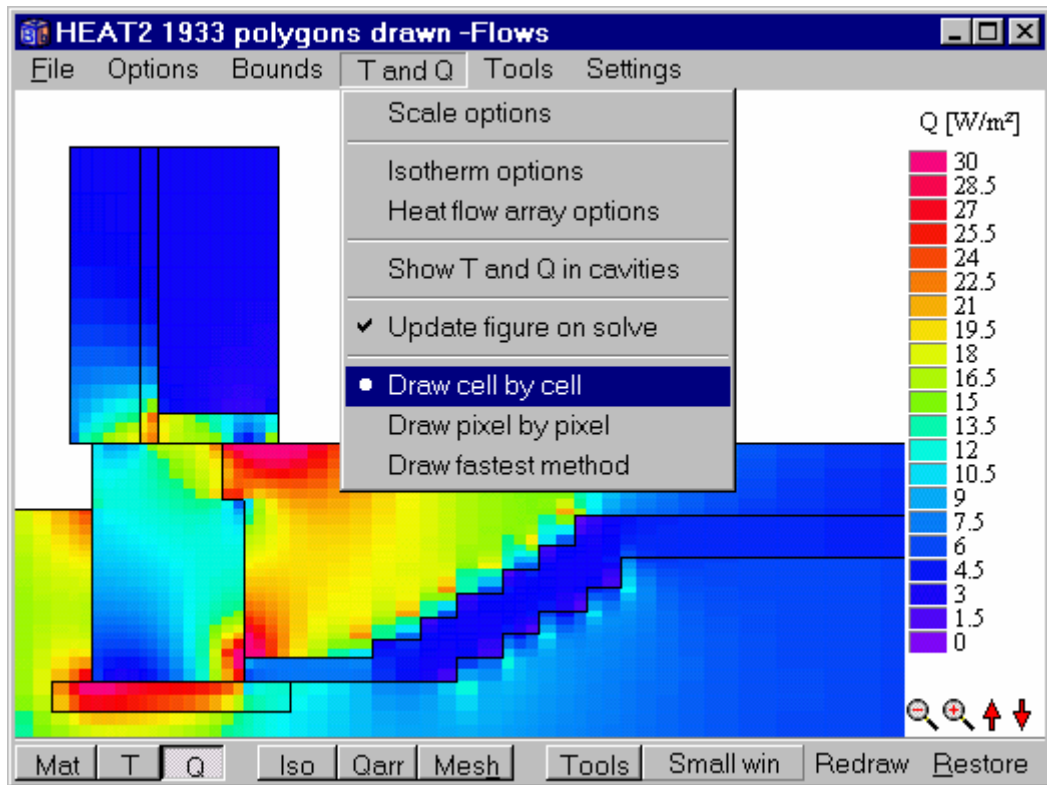


Bild 5.75: Wärmestromdichte [W/m²], gezeichnet Zelle für Zelle.

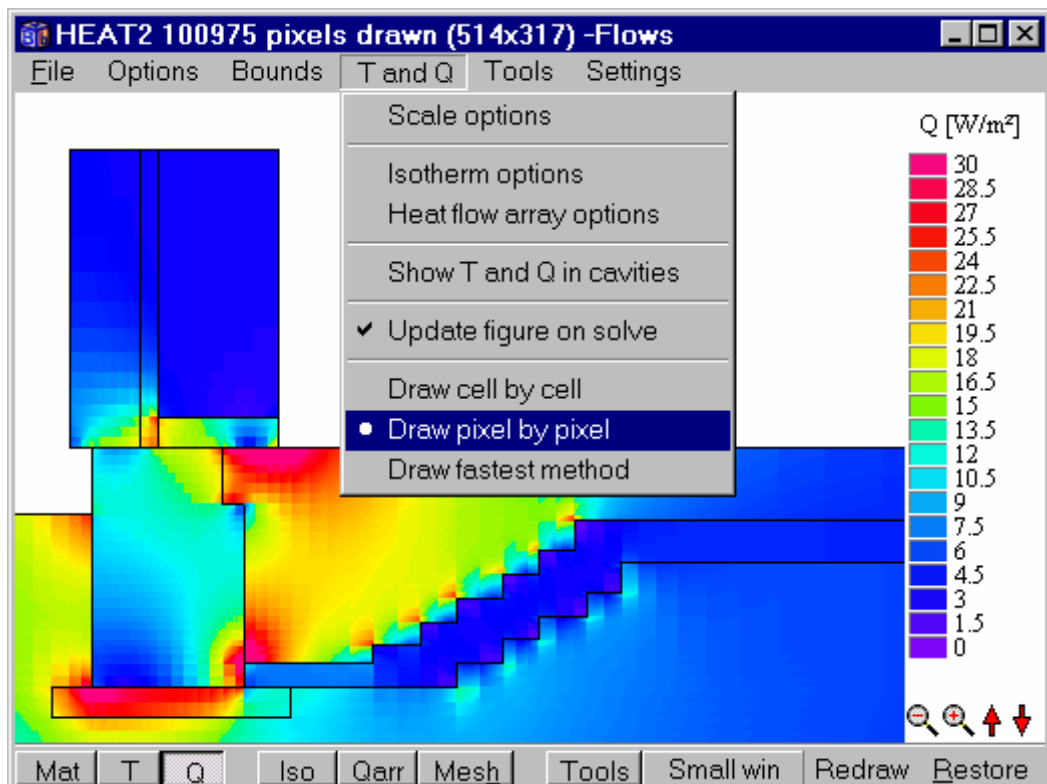


Bild 5.76: Wärmestromdichte [W/m²], gezeichnet Pixel für Pixel.

5.18.6.3 Wärmestromvektoren

5.18.6.3.1 Optionen für die Wärmestromvektoren

Durch Drücken der Schaltfläche **Qarr** in der Werkzeugleiste werden Vektoren (Pfeile) erzeugt, welche die Höhe und die Richtung der Wärmeströme angeben. Die Vektoren können entweder separat oder gemeinsam mit einer Darstellung der Materialien, Temperaturen, Wärmeströme oder Isothermen angezeigt werden. Bild 5.77 zeigt schwarze Vektoren in einer Farbgrafik der Wärmestromdichte.

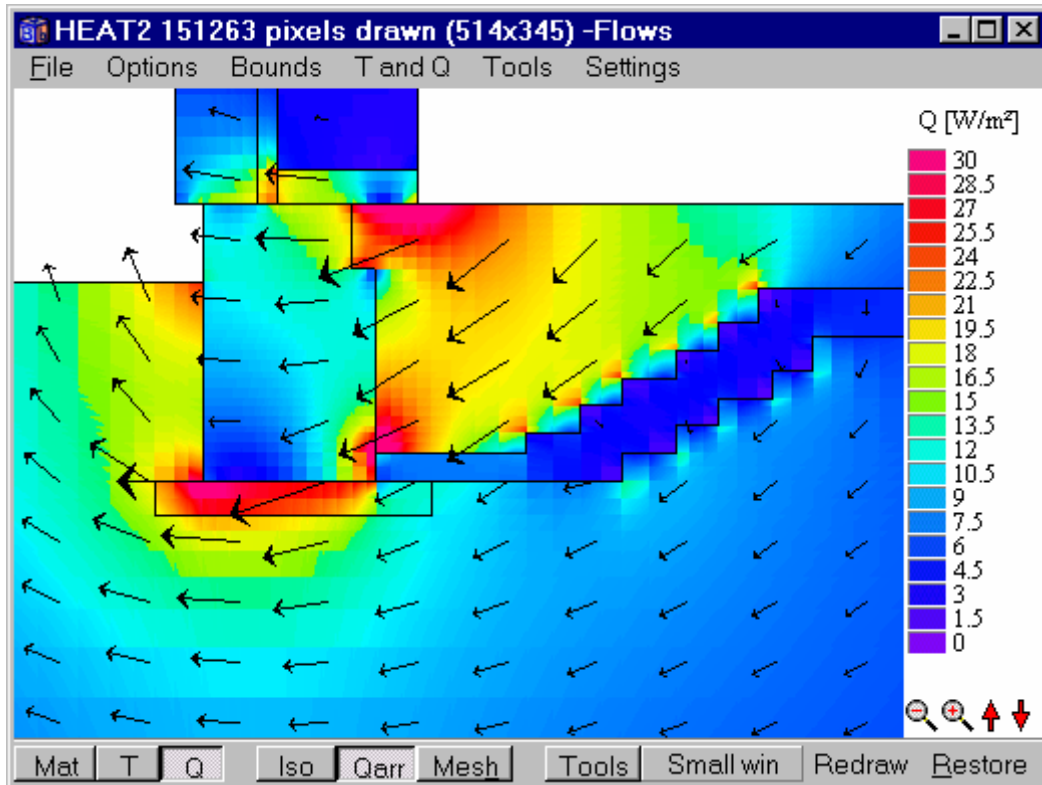


Bild 5.77: Wärmestromvektoren in einer Farbgrafik der Wärmestromdichte.

Bild 5.78 (links) zeigt mögliche Einstellungen für die Wärmestromvektoren (Anzeige des Fensters: rechter Mausklick auf **Qarr** in der unteren Werkzeugleiste bzw. Menüpunkt *T and Q/Heat flow array options*). Die Pfeillänge gibt die Höhe der Wärmestromdichte an. Die Längen werden so skaliert, daß der maximale Wärmestrom mit einem etwa 1 cm langen Pfeil entspricht. Im Fenster *Heat flow arrays* können die Längen mit der Option *Length* auch speziell angepaßt werden.

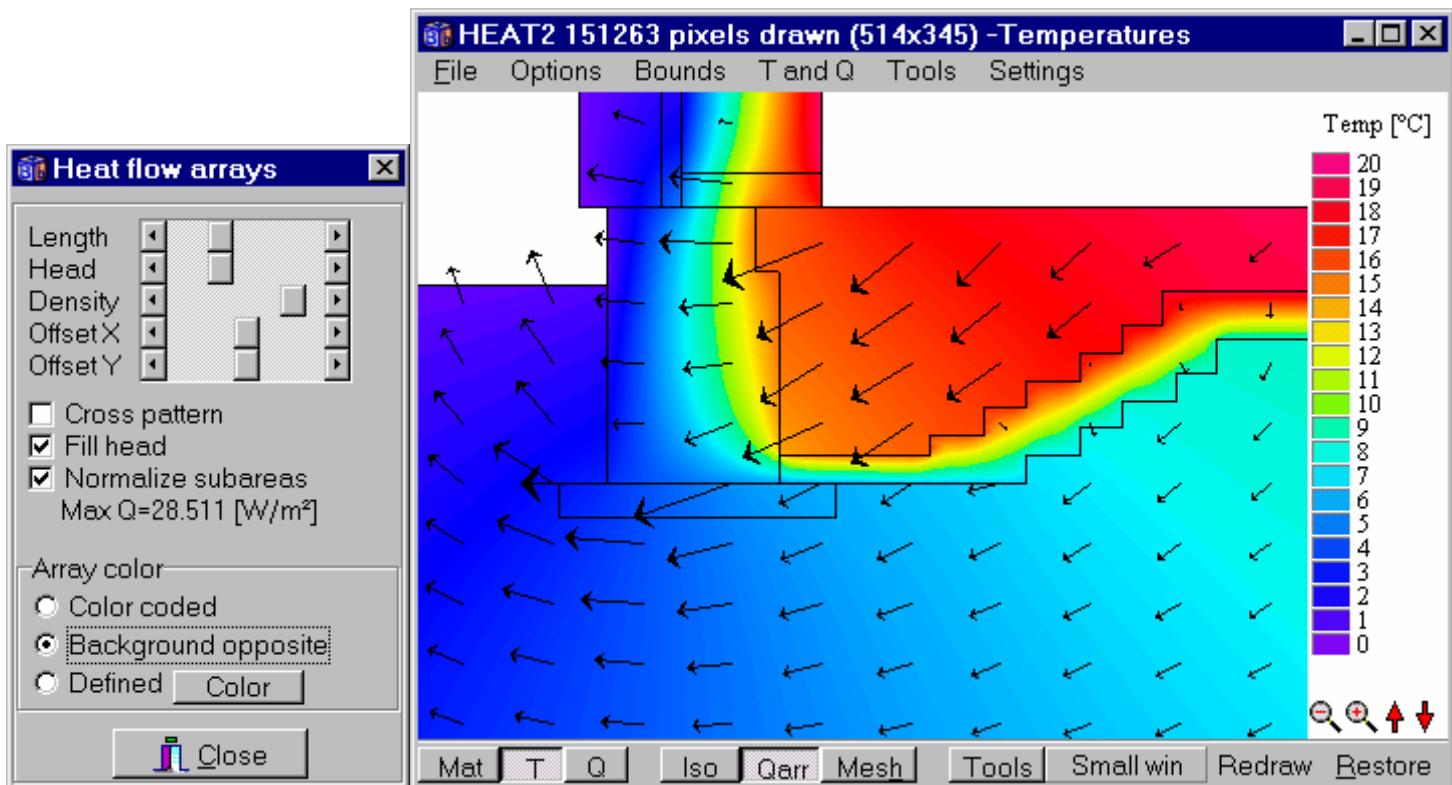


Bild 5.78: Verfügbare Optionen für die Wärmestromvektoren (rechter Mausklick auf Schaltfläche **Qarr** in der unteren Werkzeugleiste).

Der Ausgangspunkt eines jeden Vektors ist ein Knoten eines frei wählbaren Gitternetzes. Die Größe des Gitters kann über die Option *Density* (Dichte) verändert werden. Mit den Optionen *Offset X* und *Offset Y* kann das Gitter horizontal bzw. vertikal verschoben werden. Normalerweise sind alle Knoten regelmäßig angeordnet, es kann aber auch mit *Cross pattern* (Kreuzmuster) ein Teil der Knoten deaktiviert werden, so daß die Knoten zeilenweise versetzt bzw. diagonal angeordnet erscheinen. Dabei werden nur die Knoten verwendet, bei denen die Summe $i + j$ eine gerade Zahl ergibt, siehe Bild 5.79. Die Größe der Pfeilspitze wird mit *Head* gewählt und die Strichdicke/Dicke der Pfeilspitze kann mit *Fill head* erhöht werden, siehe Bild 5.80.

Die Option *Normalize sub-areas* ermöglicht die im aktuellen Fenster sichtbaren Vektoren zueinander ins Verhältnis zu setzen, wobei der längste Pfeil mit etwa 1 cm dargestellt wird (Anpassung der Länge ist mit der Option *Length* möglich). Ist *Normalize sub-areas* aktiviert, wird die maximale Wärmestromdichte angegeben ($Max Q$), siehe Bild 5.81. Ist *Normalize sub-areas* nicht aktiviert, werden alle Pfeillängen in Abhängigkeit vom maximalen Wärmestrom der gesamten Rechenfläche ermittelt, siehe Bild 5.82

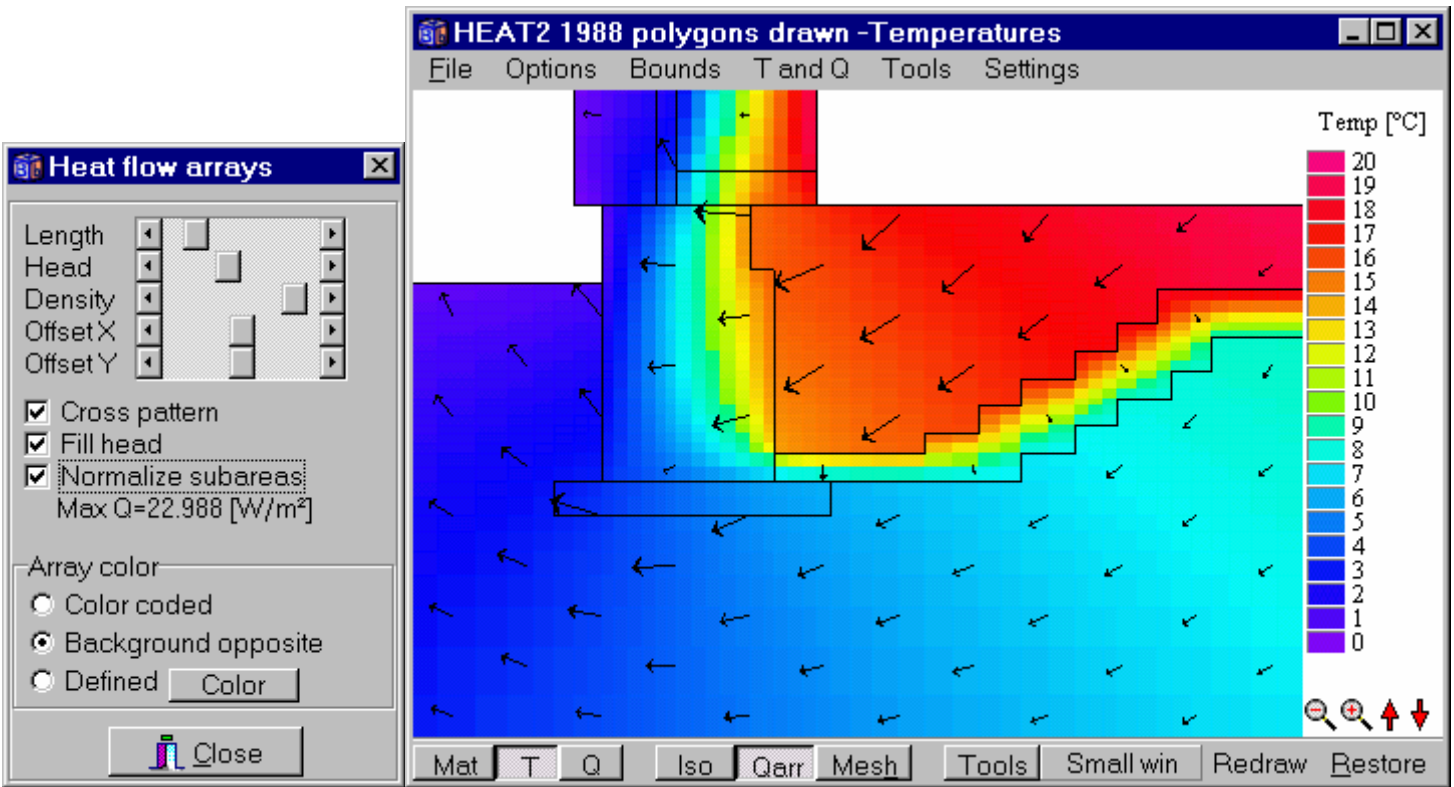


Bild 5.79: Wärmestromvektoren, gezeichnet im Kreuzmuster.

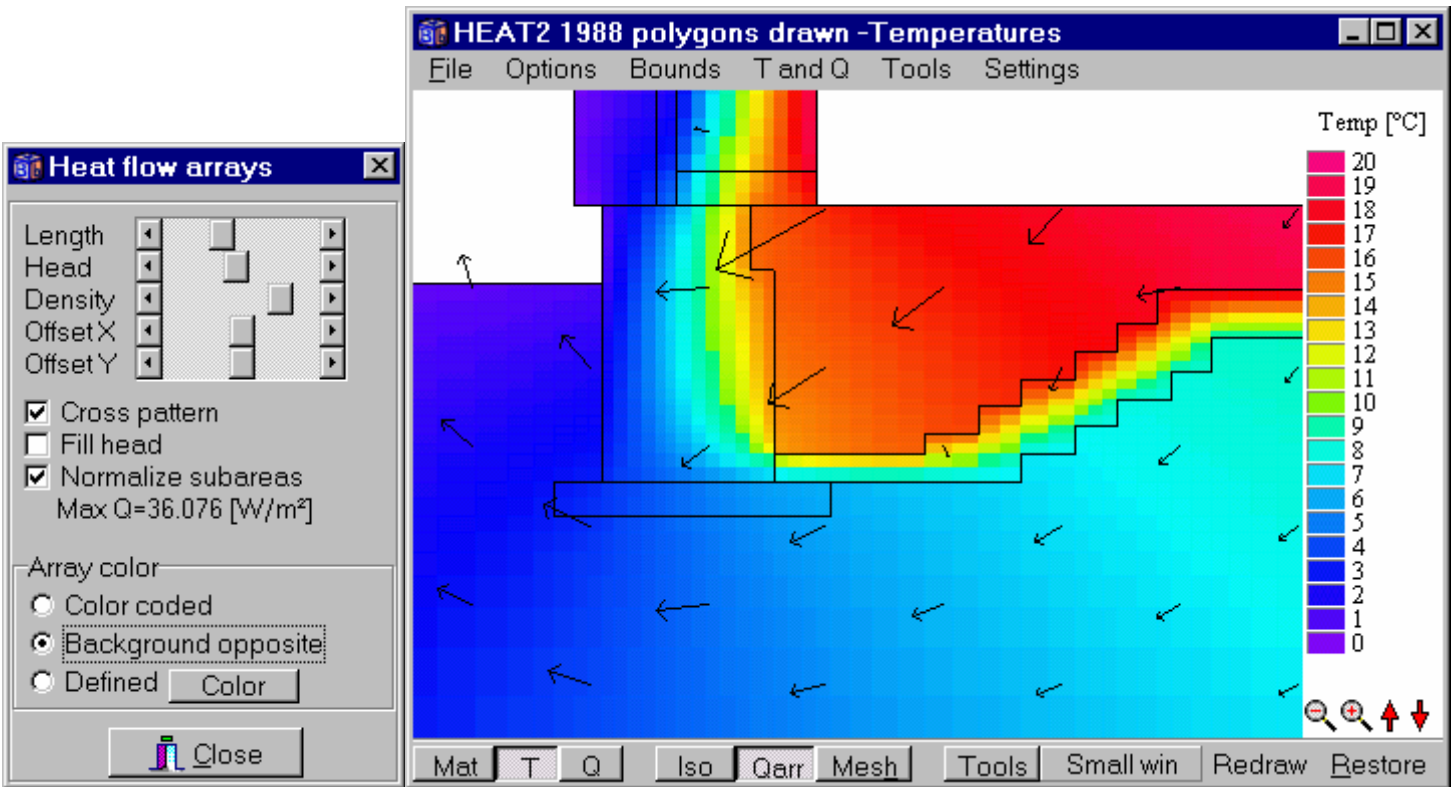


Bild 5.80: Wärmestromvektoren im Kreuzmuster mit geringerer Dichte, *Fill head* nicht aktiviert.

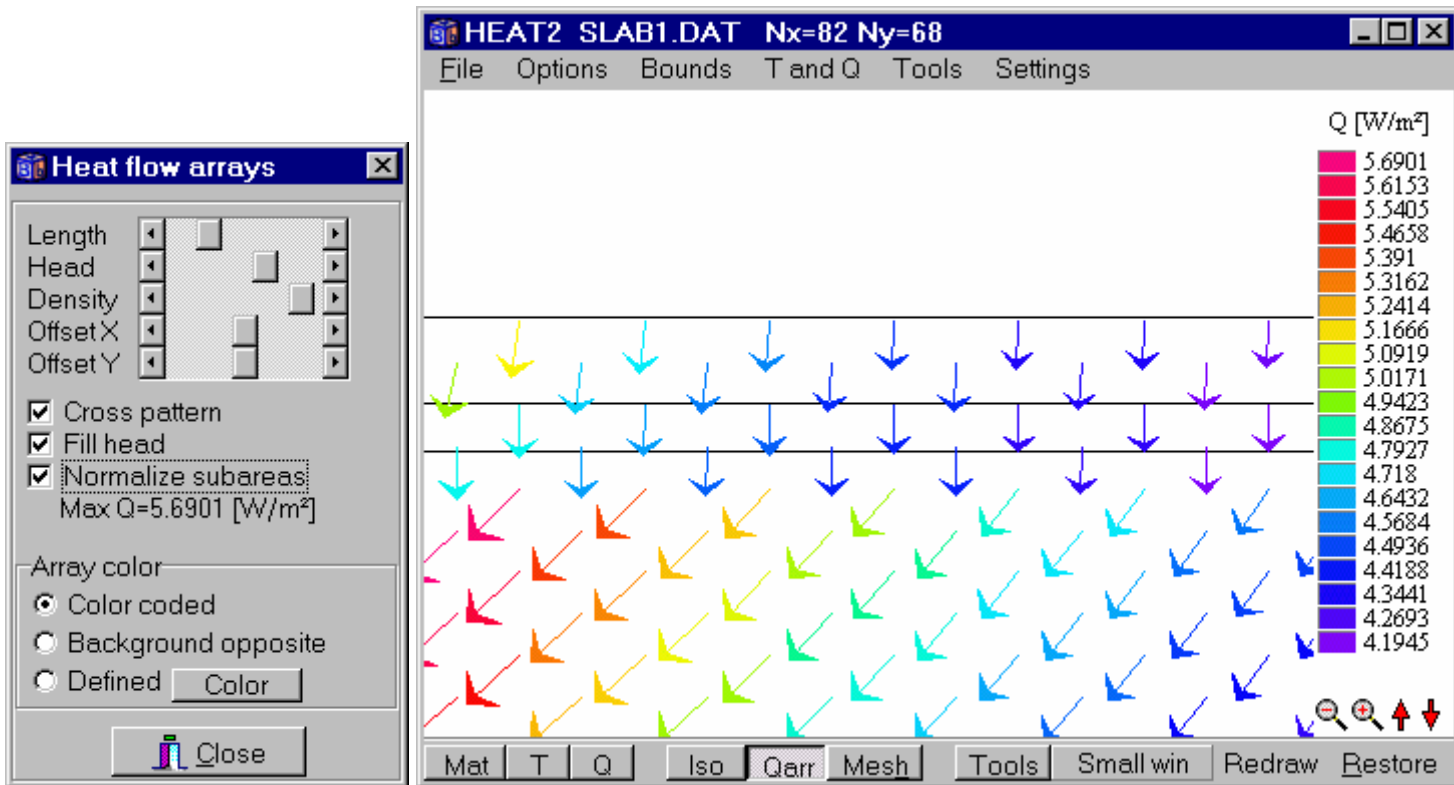


Bild 5.81: Die Option *Normalize subareas* bedeutet, daß die Pfeillängen an die Wärmestromdichten im aktuellen Fenster angepaßt werden, wobei der längste Pfeil (hier bei ca. 6 W/m²) etwa 1 cm beträgt. Die Länge kann mit der Option *Length* verändert werden.

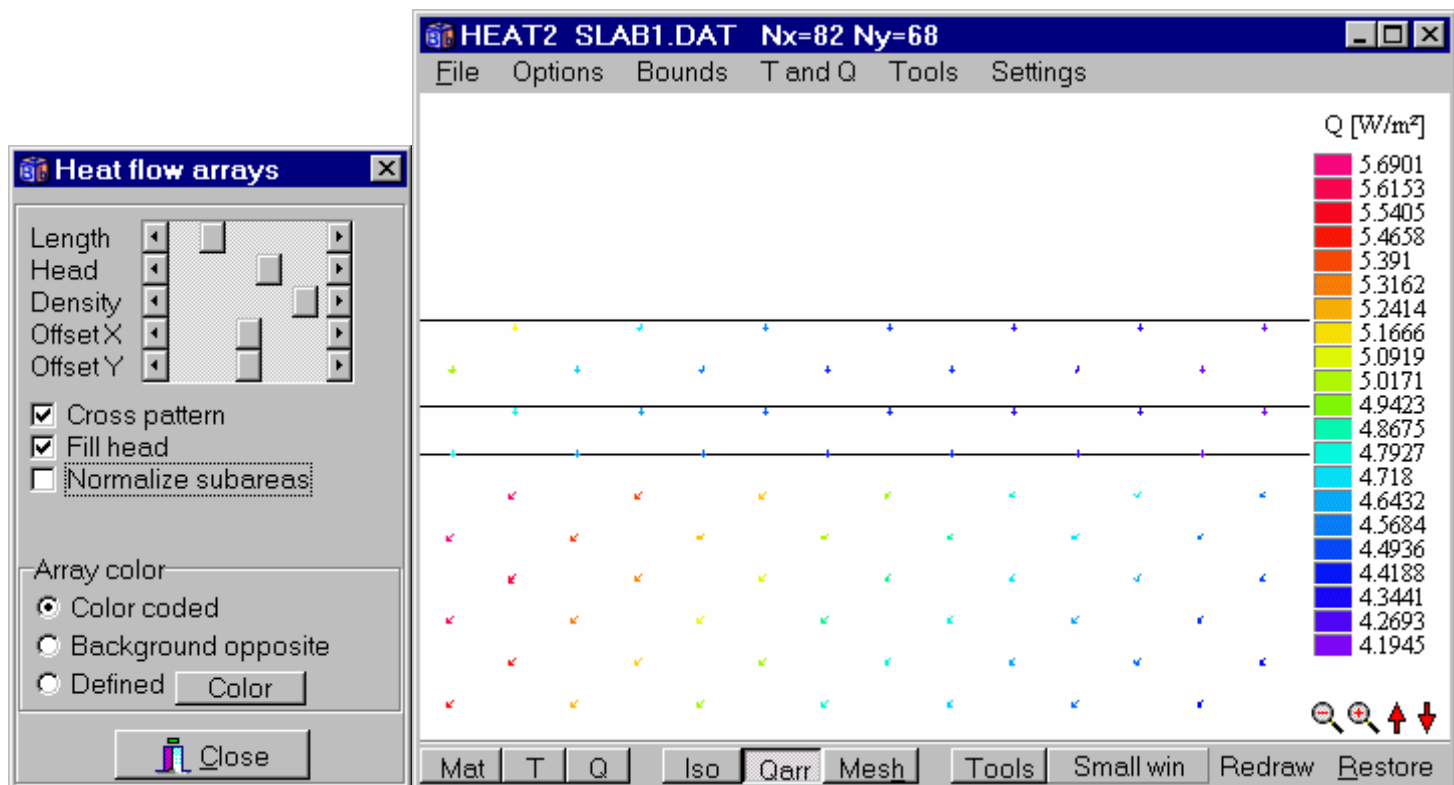


Bild 5.82: Die Option *Normalize subareas* ist hier nicht aktiviert. Die Pfeillängen werden in diesem Fall an die maximale Wärmestromdichte der gesamten Rechenfläche angepaßt (hier etwa 30 W/m²), wobei der längste Pfeil etwa 1 cm lang ist. Die Pfeile im hier dargestellten Fenster sind nur kurz, da der größte Wärmestrom im Ausschnitt nur etwa 6 W/m² beträgt.

Die Vektoren können entsprechend der Skala des Wärmestroms auch farbig dargestellt werden (Option *Color coded*), siehe Bild 5.83. Beachten Sie, daß in einer Temperaturgrafik mit gleichzeitiger Anzeige von farbigen Wärmestrompfeilen nur die Temperaturskala angegeben wird. Die Farbe der Pfeile kann bei Bedarf auch entgegengesetzt zum Hintergrund (*Background opposite*) eingestellt werden, d.h. schwarze Pfeile bei weißem Hintergrund und umgekehrt. Es ist auch möglich, die Farbe der Pfeile frei zu wählen. Durch Klicken der entsprechenden Skalenbalken kann man farbkodierte Pfeile ausblenden. Bild 5.84 zeigt eine Grafik, in der nur in den Intervallen 4,5-5,5 bzw. 9,5-10,5 Pfeile angezeigt werden.

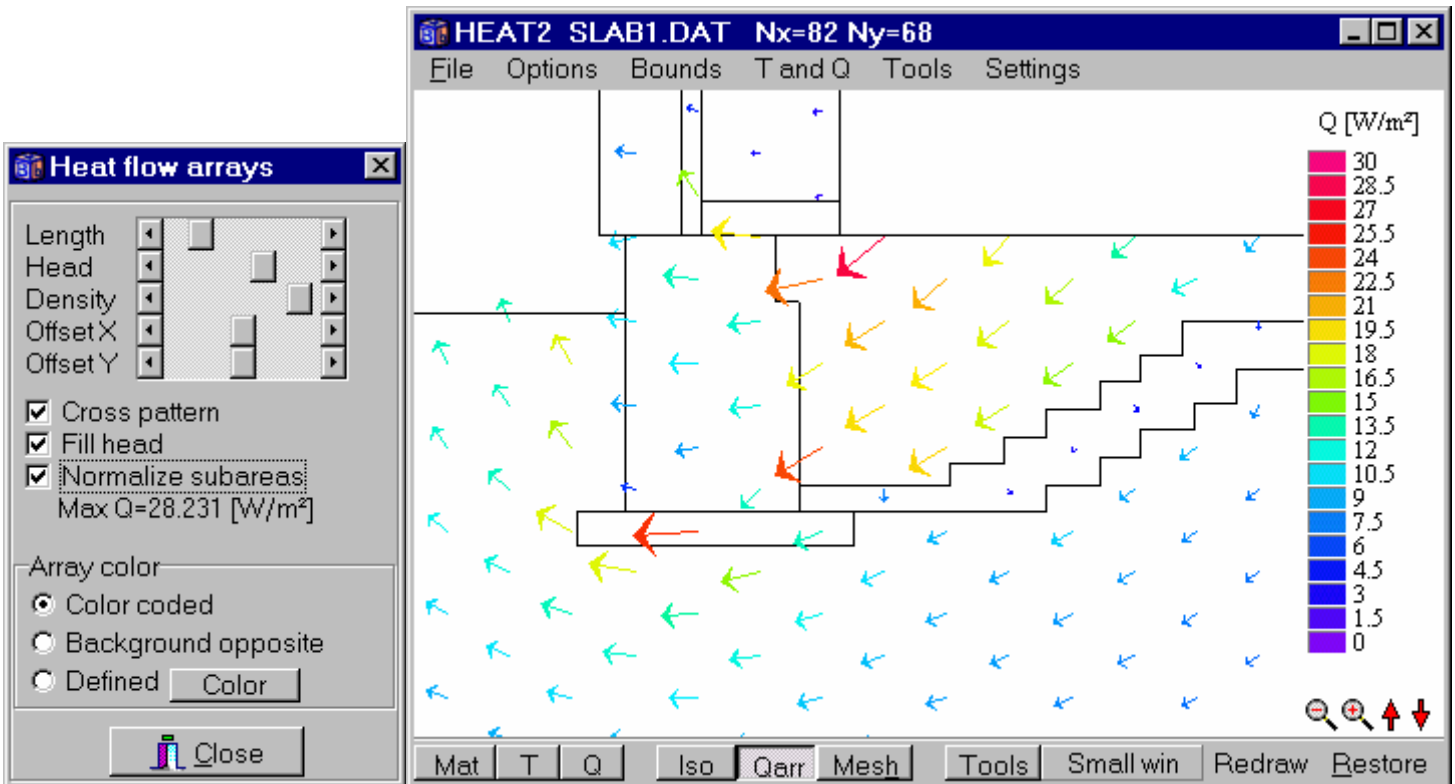


Bild 5.83: Farbkodierte Pfeile. Die Farbskala kann durch Klick in das weiße Feld rechts neben der Skala angepaßt werden (oder im Menüpunkt *T and Q/Scale options* bzw. durch Rechtsklick auf *Q* in der unteren Werkzeugleiste).

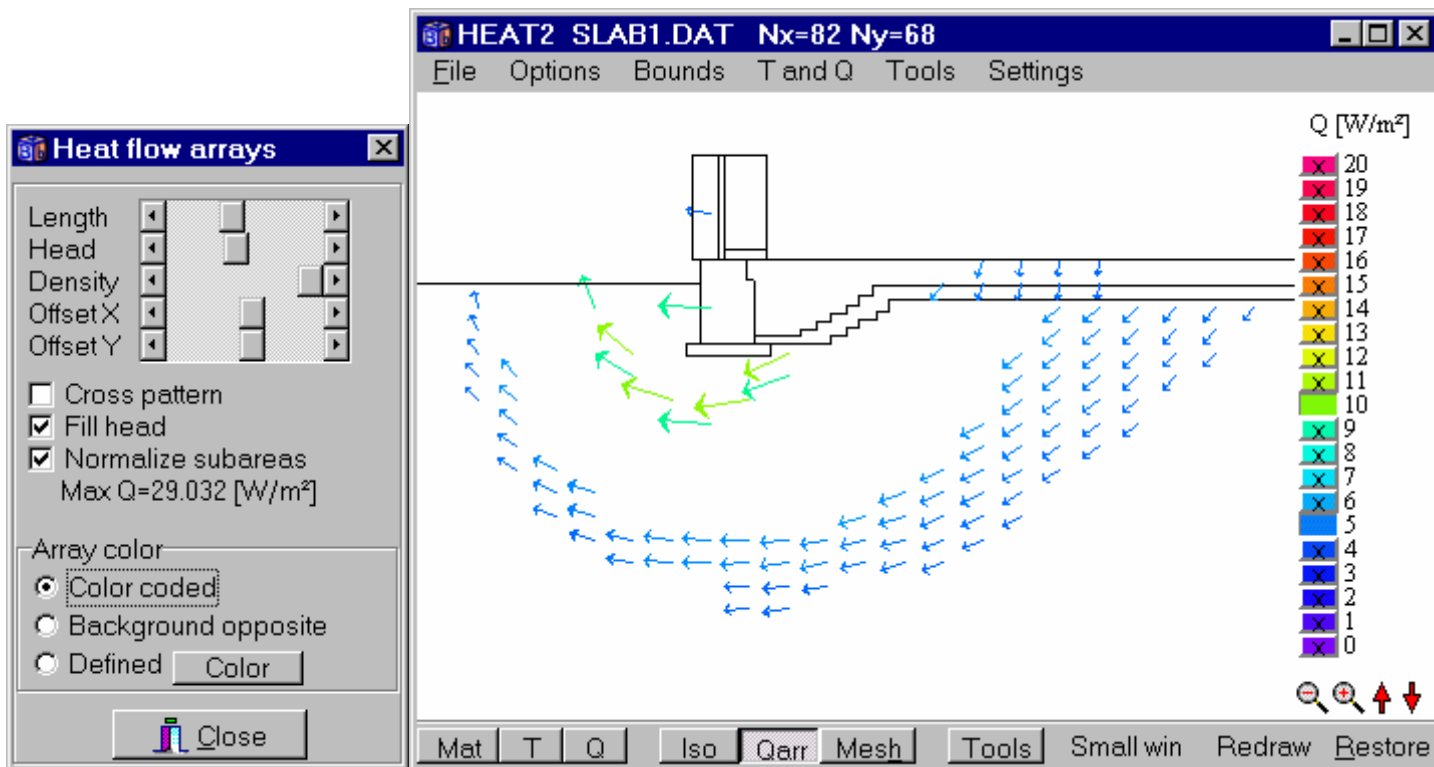


Bild 5.84: Durch Anklicken der Skalenbalken werden farbkodierte Pfeile ausgeblendet. Im vorliegenden Fall werden nur Wärmestromvektoren in den Intervallen 4,5-5,5 bzw. 9,5-10,5 angezeigt.

5.18.6.3.2 Ausdruck der Wärmestromvektoren

Beim Direktausdruck einer Grafik mit Wärmestromvektoren über *File/Print* wird die aktuelle Drucker- auflösung verwendet, z.B. 600 dpi. Im Dialogfeld für Druckoptionen, siehe Bild 5.85, kann die Pfeildicke (*Q array thickness*) angegeben werden.

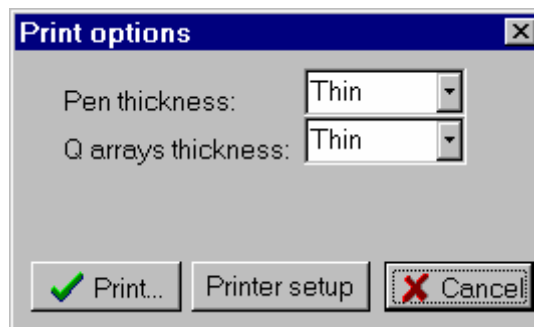


Bild 5.85: Festlegung der Pfeildicke im Dialogfeld für Druckoptionen.

5.18.6.4 Darstellung von Isothermen

Bild 5.86 zeigt das Dialogfeld mit den Optionen für die Darstellung der Isothermen (*Temperatures/Options for isotherms* oder Rechtsklick auf den Punkt **Iso** in der Menüleiste). Ein Anwendungsbeispiel ist in Bild 5.87 dargestellt.

Der Wertebereich kann entweder bei jedem Bildschirmupdate automatisch an die minimale und maximale Temperatur angepaßt werden oder fest definiert sein. Mit *Temperature step* wird die Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Isothermen in Kelvin festgelegt.

Die Berechnung der Isothermen erfolgt auf der Grundlage einer frei in Pixelabständen (*pixel step*) wählbaren Diskretisierung. Eine kleine Pixelanzahl führt zu einem dichteren Gitternetz und somit zu sanfteren Isothermenkurven. Dadurch erhöht sich aber auch die Zeit für das Zeichnen. Der kleinste

zulässige Wert für *pixel step* ist 1. Bei Aktivierung von *Show pixel step* wird das verwendete Gitternetz angezeigt.

Die Isothermen können mit den zugehörigen Temperaturwerten beschriftet werden (*Show labels*). Die Beschriftungen erfolgen nur, wenn *Show labels* aktiviert ist. Um zu vermeiden, daß sich die Beschriftungen an einer Stelle konzentrieren, wurde eine Möglichkeit vorgesehen, die Werte entlang der Kurven zu verteilen. Jede Isotherme besteht aus einer Anzahl aneinandergrenzender kurzer Linien. Unter *Configuration* kann mit einer Zahl eingegeben werden, an welcher der einzelnen Linien die Beschriftung erfolgen soll. Beachte Sie, daß das mit *Pixel step* gewählte Gitternetz die Lage der Beschriftung beeinflusst. Übliche Werte für *Configuration* liegen im Bereich von etwa 10 – 150. Klar und deutlich beschriftete Isothermen erhalten Sie auch, wenn Sie die Anzahl der Isothermen minimieren.

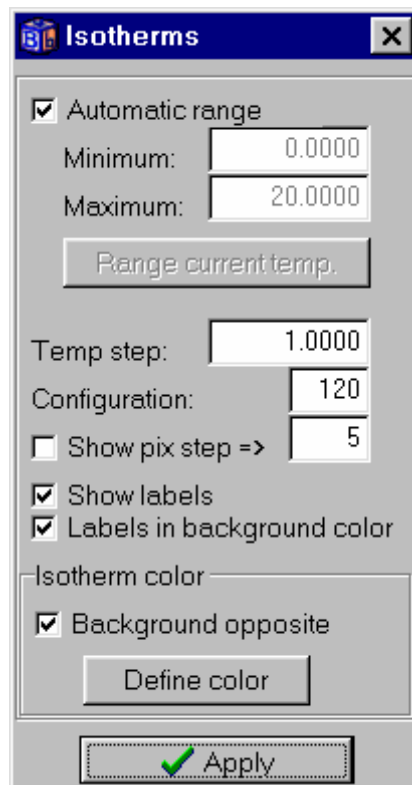


Bild 5.86: Einstellungen für Isothermen.

Die Farbe der Isothermen kann unter *Define color* geändert werden. Das Feld *Background opposite* bezieht sich auf die Hintergrundfarbe Weiß bzw. Schwarz und ermöglicht die Isothermen in der jeweils entgegengesetzten Farbe darzustellen (z.B. weiße Isothermen bei schwarzem Hintergrund bzw. umgekehrt). Die Strichdicke der Isothermen (sowie der anderen Linien) kann im Menüpunkt *Settings/Thick pen* erhöht werden.

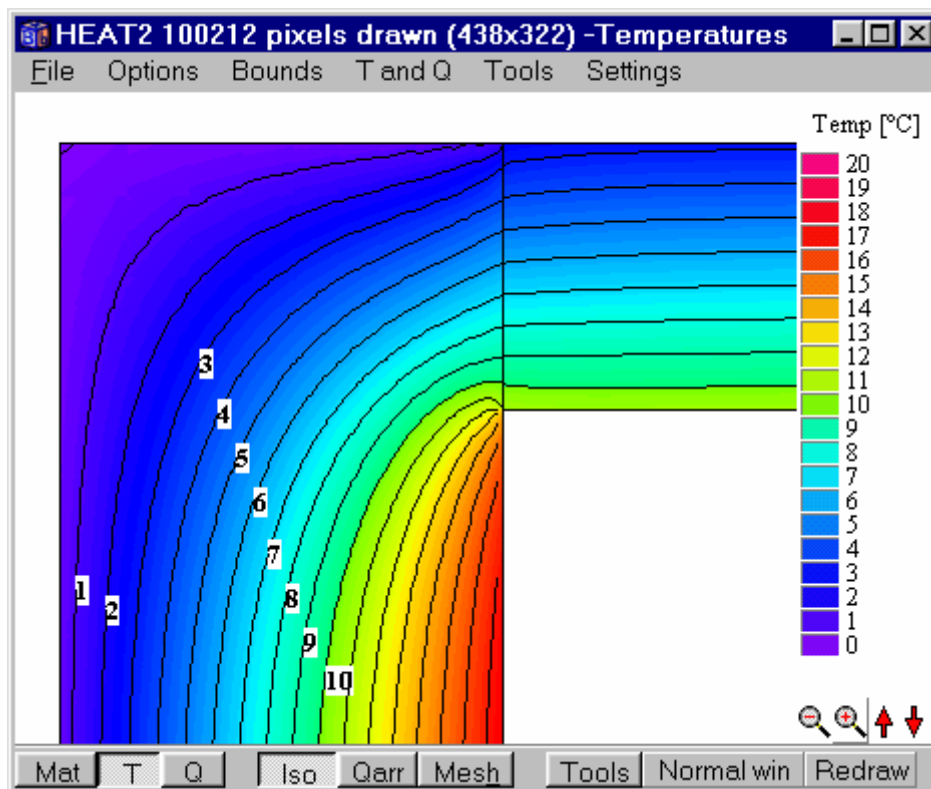


Bild 5.87: Isothermendarstellung mit Abstand 1 °C, Beschriftung unterlegt in Hintergrundfarbe.

5.18.6.5 Umgekehrte Grautonskala

Neben der normalen Grautonskala kann über das Menü *T and Q/Scale options* (bzw. Rechtsklick auf Schaltfläche **T** bzw. **Q** in der unteren Werkzeugleiste) auch eine umgekehrte (invertierte) Grautonskala eingestellt werden, siehe Bild 5.88.

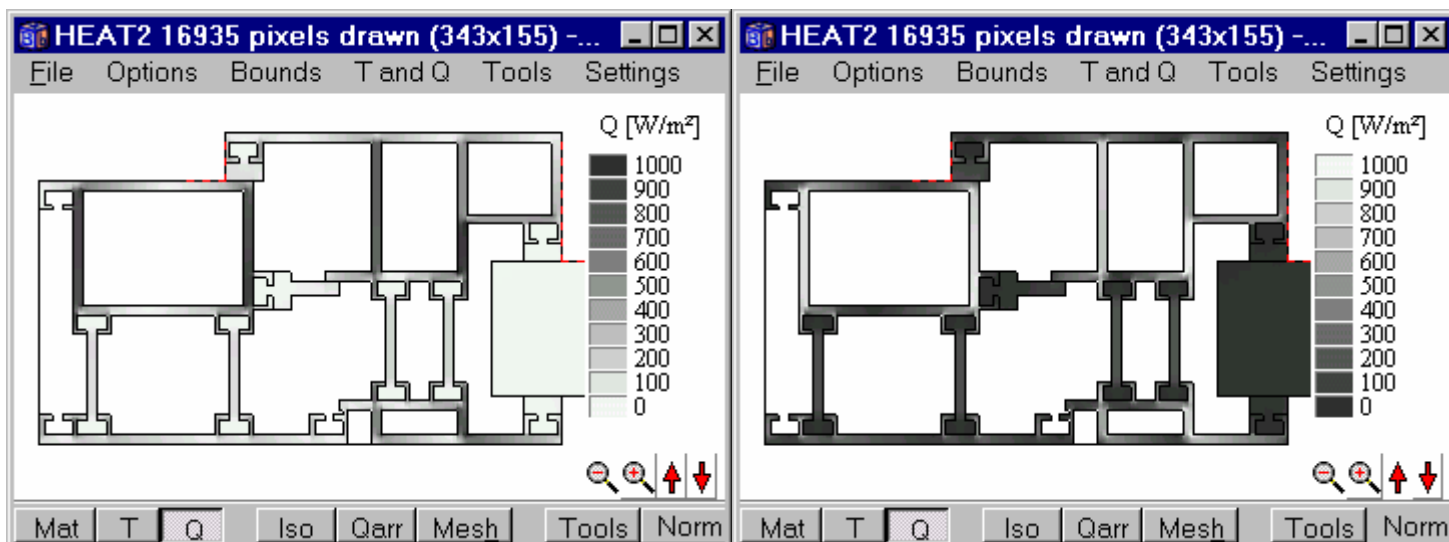


Bild 5.88: Links: Wärmestromdichte mit normaler Grautonskala. Rechts: Invertierte Skala.

5.18.6.6 Anzeige von Temperaturen und Wärmeströmen in Hohlräumen

Temperaturen und Wärmeströme in Hohlräumen können angezeigt werden, indem man im Postprozessor den Menüpunkt *T and Q/Show T and Q in cavities* aktiviert, siehe Bild 5.89. Dies gilt für folgende Arten von Hohlräumen:

- Hohlraum mit Luft (interne Modifikation E)
- Hohlraum mit Flüssigkeit unter Berücksichtigung der Wärmekapazität (interne Modifikation F)

- Hohlraum mit Luft unter Berücksichtigung von Strahlungswärmeaustausch und Belüftung (interne Modifikation G)
- Hohlräume in Fensterrahmen

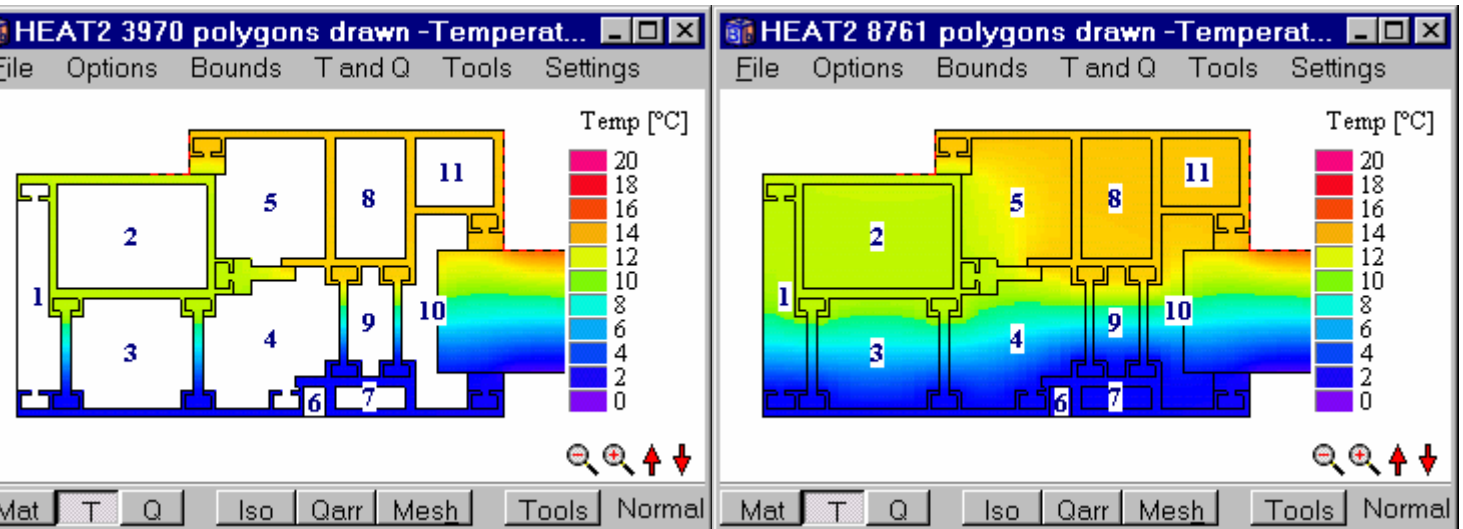


Bild 5.89: Darstellung der Temperaturen in Hohlräumen (rechte Abbildung).

5.18.7 Menüpunkt *Tools*

Mit Hilfe des Menüpunkts *Tools/maximize scale* kann die Grafik im Postprozessor-Fenster in maximaler Größe dargestellt werden. Dabei wird die Grafik in beiden Richtungen bis zur maximal möglichen Länge gedehnt, siehe Bild 5.90. In der Regel ergeben sich dabei unterschiedliche Maßstäbe in x- bzw. y-Richtung, d.h. das Seitenverhältnis wird nicht gewahrt. In einigen Fällen erleichtert diese Funktion das Erkennen von Details, ohne daß die Fläche gezoomt werden muß (siehe Beispiel in Kapitel 8.3 sowie Eingabedatei *cenex1.dat*). Ist *maximize scale* nicht aktiviert (Standardeinstellung), wird die Grafikgröße an die größere der Längen beider Richtungen angepaßt. Der Maßstab ist in diesem Fall in beiden Richtungen gleich, d.h. das Seitenverhältnis ist stimmig.

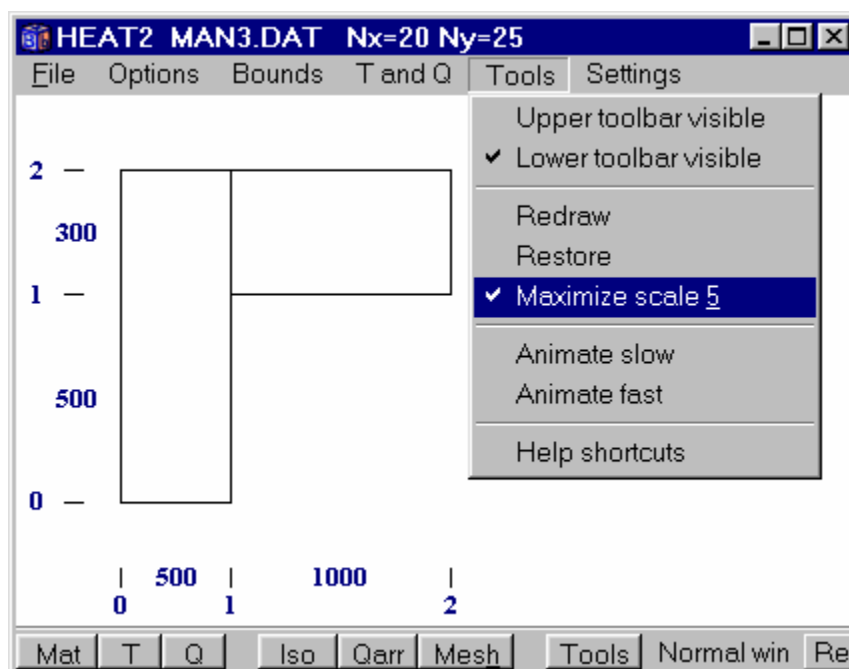


Bild 5.90: Mit *Maximize scale* wird die Grafik in beiden Richtungen auf die maximale Länge gedehnt.

5.18.8 Menüpunkt *Einstellungen* (*Settings*)

Unter *Settings* können Schriften und Farben verändert werden, siehe Bild 5.91.

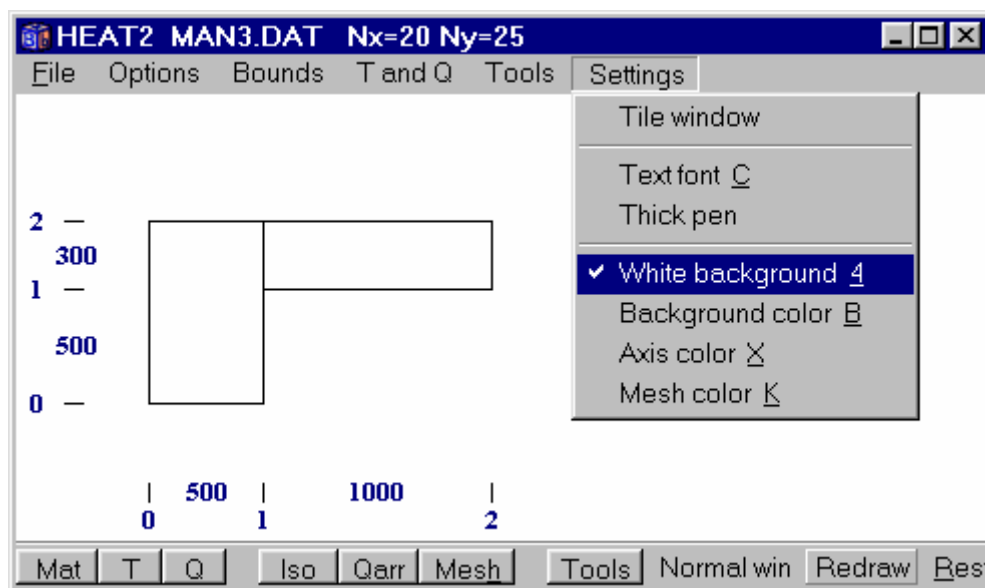


Bild 5.91: Schriftarten und Farben können im Menü *Settings* geändert werden.

5.18.9 Menüpunkt *Plot3D*

Mit Hilfe dieses Menüpunktes können 3D-Oberflächendiagramme von Temperaturen und Wärmeströmen gezeichnet werden, siehe Bild 5.92. Das Diagramm kann verschoben, gedreht und gezoomt werden.

Bild 5.93 zeigt das Menü *Options* und eine Darstellung mit Gitternetzlinien.

Ist *Automatic scale range* aktiviert, wird die Temperatur- (bzw. Wärmestrom-) Skala an die minimalen und maximalen Werte angepaßt. Ist *Use defined scale range* aktiviert, werden die minimalen und maximalen Skalenwerte aus dem Postprozessor übernommen.

Die Gitternetzlinien sind äquidistant verteilt, d.h. haben gleichen Abstände, und entsprechen nicht dem Berechnungsnetz. Die Anzahl der Gitternetzlinien kann unter *Options* eingestellt werden (z.B. 50 x 50). Bei Aktivierung von *Automatic matrix* wird die Anzahl der Gitternetzlinien automatisch entsprechend der Zellenanzahl im Berechnungsnetz gewählt, höchstens jedoch 30 x 30. Gitter mit einer großen Anzahl von Netzlinien erfordern evtl. eine längere Zeit zum Grafikaufbau.

Das Diagramm kann in die Zwischenablage kopiert oder als EMF-Datei (enhanced meta file) abgespeichert werden.

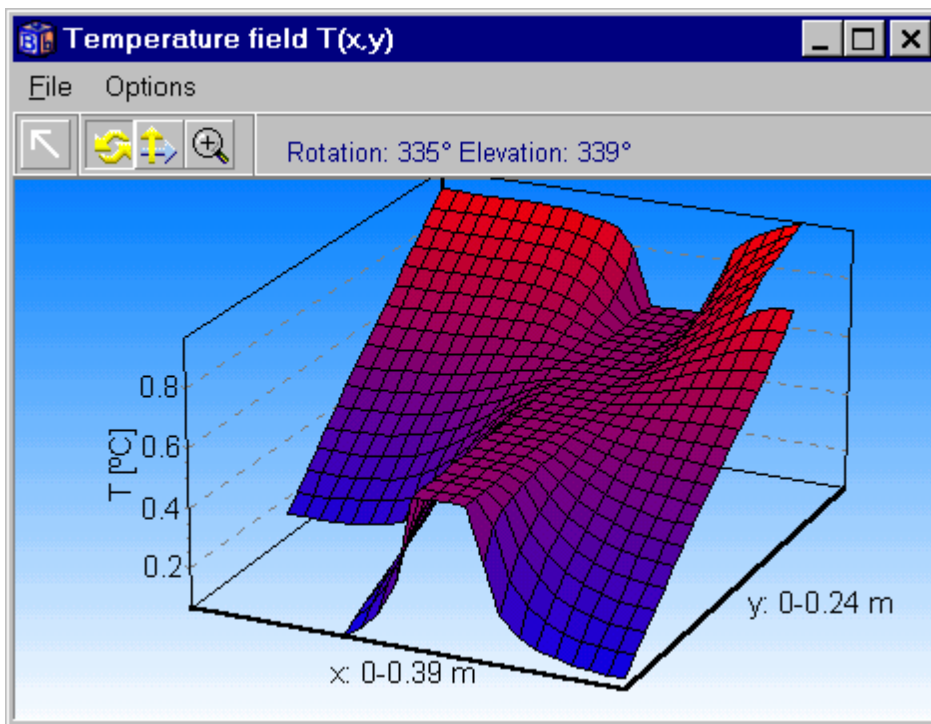


Bild 5.92: Oberflächendiagramm einer Temperaturverteilung.

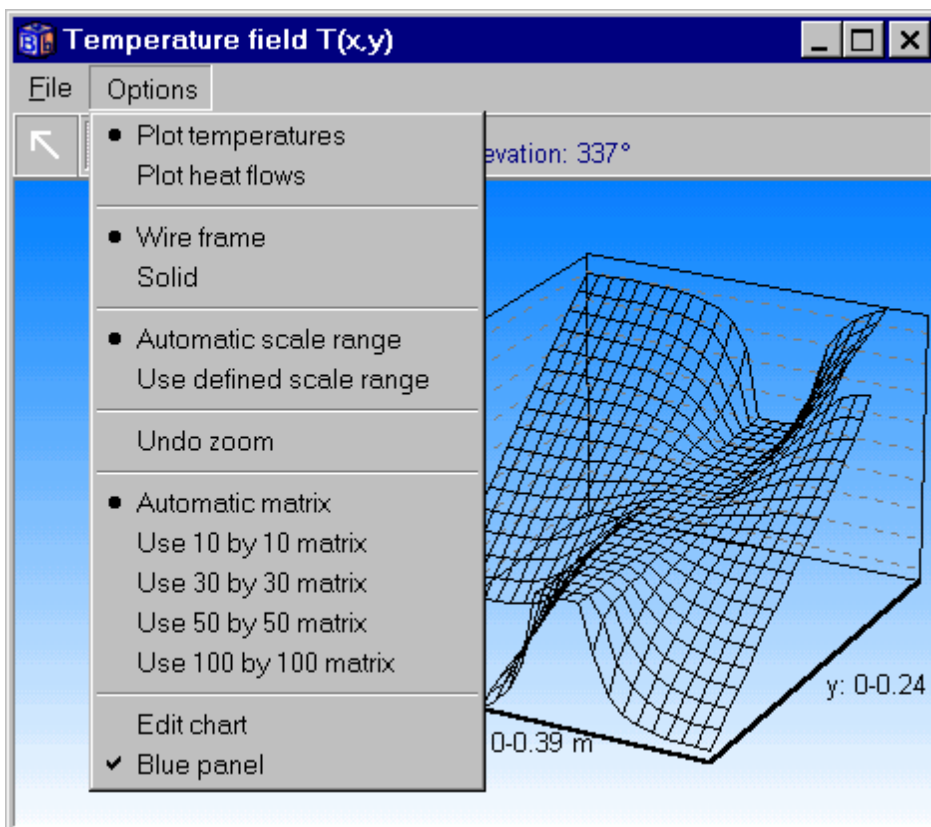


Bild 5.93: Option mit Gitternetzlinien.

6. Berechnungen mit Rohren

6.1 Rohr mit vorgegebenem Wärmestrom

6.1.1 Rohr, Idealisierung als Quadrat

Ein Rohr kann durch ein Quadrat gleicher Fläche idealisiert werden. Die Länge der vier Seiten ergibt sich aus $D = \sqrt{\pi} \cdot r \approx 1,77 \cdot r$, wobei r der Rohrradius ist. Der Wärmestrom des Rohrs [W/m] wird gleichmäßig auf die Fläche verteilt. Benutzen Sie die interne Modifikation *A Heat source - Constant* bei einer konstanten bzw. *B Heat source - Function* bei einer zeitabhängigen Wärmequelle, siehe Abschnitt 5.8.

6.1.2 Rohr, Idealisierung mit Abstufungen

Wenn der Rand des Rohres durch Abtreppungen idealisiert werden soll, können die *Pipe*-Modifikationen verwendet werden, siehe auch Abschnitt 5.8. Betrachten Sie Bild 6.1. In ein Eingaberaster wurde eine quadratförmige interne *Pipe*-Modifikation mit den Koordinaten 1,1 (unten links) und 2,2 (oben rechts) eingefügt. In dem Quadrat wird vom Programm automatisch ein Kreis erzeugt (bei Eingabe eines Rechtecks eine Ellipse). Der Wärmestrom [W/m] wird gleichmäßig auf alle Berechnungszellen verteilt, deren Mitte innerhalb des Kreises liegt, siehe weiße Fläche in Bild 6.1 (rechts). Die Anzahl der Zellen bzw. Abtreppungen ist abhängig vom definierten Berechnungsnetz (Einstellung unter *Settings/Numerical mesh* im Preprozessor bzw. *Input/Mesh in x/y-direction* im Hauptmenü). Im vorliegenden Fall wurden $8 \cdot 8 = 64$ Zellen verwendet, von denen 52 innerhalb des idealisierten Rohrquerschnitt liegen.

Diese Methode führt bei runden Rohrquerschnitten zu genaueren Ergebnissen als die oben beschriebene Idealisierung als Quadrat. Der Nachteil ist, daß mehr Berechnungszellen benötigt werden. In den meisten Fällen ist eine Idealisierung als Quadrat ausreichend.

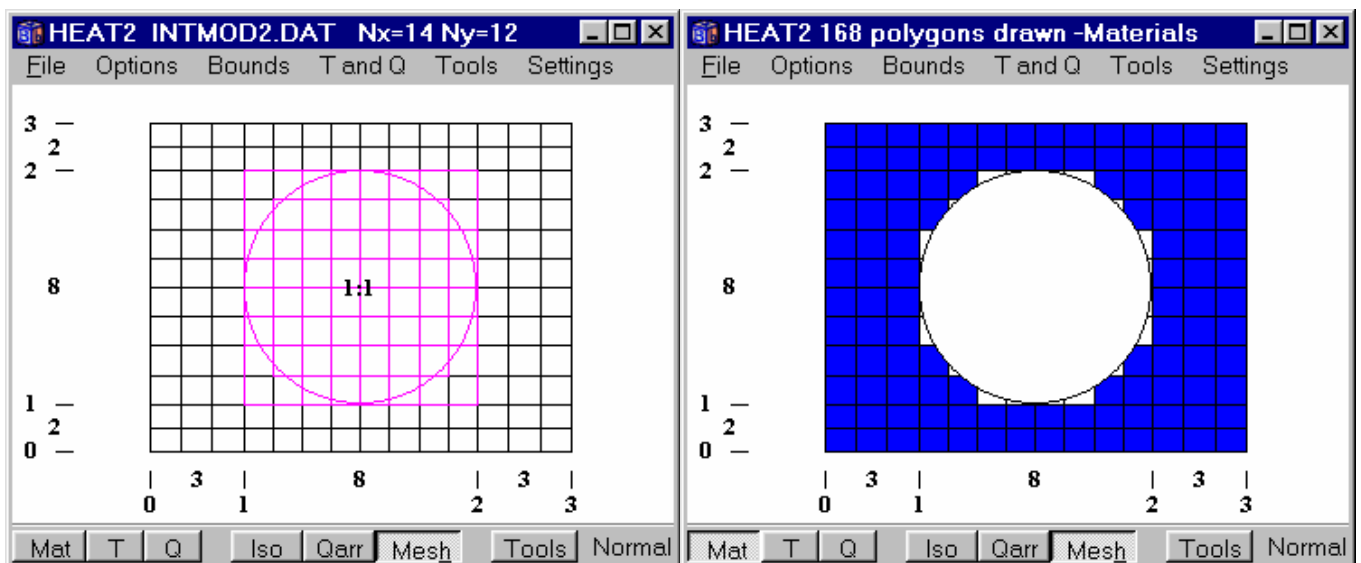


Bild 6.1: Bei der Modifikation *Pipes* kann der Rand von Rohren durch Abtreppungen idealisiert werden, wenn ein entsprechend dichtes Berechnungsnetz gewählt wird.

6.2 Rohr mit einer vorgegebenen Temperatur

Dieser Fall ist schwieriger zu modellieren. Der Wärmestrom aus dem Rohr bzw. in das Rohr hängt vom Wärmedurchgangswiderstand des Rohres ab (Summe von Wärmedurchlaßwiderstand des Rohrmaterials und Wärmeübergangswiderständen an der Rohrinnen- bzw. -außenseite).

6.2.1 Berücksichtigung des Rohrwiderstandes

Ist das Rohr wärmedämmend (oder kann der Wärmedurchlaßwiderstand des Rohres nicht vernachlässigt werden), ist eine Idealisierung des Rohres als Quadrat möglich [Claesson et al, 1983], siehe Bild 6.2.

$$D = \sqrt{\pi} \cdot r \approx 1,77 \cdot r \quad (8.1)$$

Man berechnet den Wärmedurchlaßwiderstand R_c nach der Gleichung (8.2). R_c wird für alle vier Seiten des Quadrates berücksichtigt. Die Eingabe erfolgt im Menüpunkt *Input/Resistances*, siehe Kapitel 5.10.

$$R_c = \frac{2 \cdot D \cdot \ln(r/(r - d_i))}{\pi \cdot \lambda_i} \quad (8.2)$$

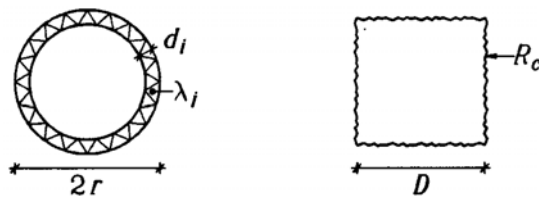


Bild 6.2: Wärmedämmte (wärmedämmende) Rohre können als Quadrat mit vorgegebener Temperatur und einem Widerstand angenähert werden.

Die Rohrfläche wird bei konstanter Temperatur mit Hilfe der internen Modifikation *C Area with given temp - Constant* bzw. bei zeitabhängiger Temperatur mit *D Area with given temp - Function* eingegeben, siehe Abschnitt 5.8.

6.2.2 Vernachlässigung des Rohrwiderstandes

Ist der Wärmedurchgangswiderstand des Rohres vernachlässigbar gering, kann die Eingabe mit Hilfe der Modifikationen des Typs *Pipes (given temp)* erfolgen. Verwenden Sie bei konstanter Temperatur die Modifikation *J Pipe (given temp) - Constant* bzw. bei zeitabhängiger Temperatur *K Pipe (given temp) - Function*, siehe Abschnitt 5.8. Der Rand des Rohres wird dabei in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsnetz entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 6.1.2 durch Abtreppungen idealisiert. Die gewählte Temperatur gilt dann in allen Zellen, deren Mitte innerhalb des Kreises liegt.

Alternativ kann auch ein Quadrat mit der gleichen Fläche verwendet werden. Verwenden Sie hierfür die internen Modifikation *C Area with given temp - Constant* bzw. *D Area with given temp - Function*. Die Rechenungenauigkeit ist bei einer Idealisierung als Quadrat etwas höher.

7. Rechenleistung

7.1 Richtwerte

Bei den HEAT2-Versionen 4 und 5 wurde eine Code-Optimierung zur Erhöhung der Rechengeschwindigkeit durchgeführt. Der Geschwindigkeitszuwachs ist bei Prozessoren des Typs Pentium II und III größer als bei Pentiumprozessoren der ersten Generation. Tabelle 7:1 und Tabelle 7:2 zeigen Richtwerte für das Beispiel Bodenplatte auf Erdreich (siehe Eingabedatei slab1.dat) und das Beispiel Ecke (corner.dat) bei Benutzung von Rechnern mit Pentiumprozessoren des Typs MMX, II und III.

Im Vergleich zur HEAT2-Version 3 sind die Versionen 4 und 5 bei diesen beiden Beispielen bei stationären Berechnungen 11 - 23 % und bei instationären Analysen 14 - 36 % schneller. Die angegebenen Rechenzeiten zeigen bei Prozessoren des Typs Pentium II und III einen höheren Geschwindigkeitszuwachs, besonders bei stationären Berechnungen.

Ein Pentium III 450 ist bei den angegebenen Beispielen etwa 3 - 4 mal schneller als der MMX 266, aber nur 10 - 30 % schneller als der Pentium II 400.

Tabelle 7:1: Rechenzeit-Richtwerte für das Beispiel Bodenplatte auf Erdreich (slab1.dat).

Slab1.dat, N=4555	HEAT2 3.0	HEAT2 4.0 & 5.0	Verbesserung
	CPU-Zeit (Sek.)	CPU-Zeit (Sek.)	3.0 => 4.0 & 5.0
Stationär, 50 000 Iterationen:			
Pentium III 450 MHz	75	61	23% schneller
Pentium II 400 MHz	85	69	23% schneller
Pentium MMX 266 MHz	208	188	11% schneller
Instationär, 1 Monat (97 032 Iter.):			
Pentium III 450 MHz	103	76	36% schneller
Pentium II 400 MHz	124	91	36% schneller
Pentium MMX 266 MHz	272	236	15% schneller

Tabelle 7:2: Rechenzeit-Richtwerte für das Beispiel Ecke (corner.dat).

Corner.dat, N=675	HEAT2 3.0	HEAT2 4.0	Verbesserung
	CPU-Zeit (Sek.)	CPU-Zeit (Sek.)	3.0 => 4.0 & 5.0
Stationär, 200 000 Iterationen:			
Pentium III 450 MHz	47	40	18% schneller
Pentium II 400 MHz	55	46	20% schneller
Pentium MMX 266 MHz	136	120	13% schneller
Instationär, 3 Monat (291 095 Iter.):			
Pentium III 450 MHz	46	36	28% schneller
Pentium II 400 MHz	59	46	28% schneller
Pentium MMX 266 MHz	168	148	14% schneller

8. Beispiele

8.1 Beispiel 1 – Wand mit Wärmebrücke

8.1.1 Einführung

Bild 8.1 zeigt eine innengedämmte Außenwand mit einer einbindenden Betonkonstruktion. Es soll der Wärmeverlust [W/m], der längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ [W/m·K] und die minimale Oberflächentemperatur [°C] am Anschluß der Betonkonstruktion berechnet werden. Die Innentemperatur beträgt 20 °C und die Außentemperatur 0 °C. Der innere und äußere Wärmeübergangswiderstand beträgt $R_{si} = 0,13$ bzw. $R_{se} = 0,04$ m²·K/W. Die Wärmeleitfähigkeiten [W/m·K] und die Wärmekapazitäten [MJ/(m³·K)] sind im Bild angegeben.

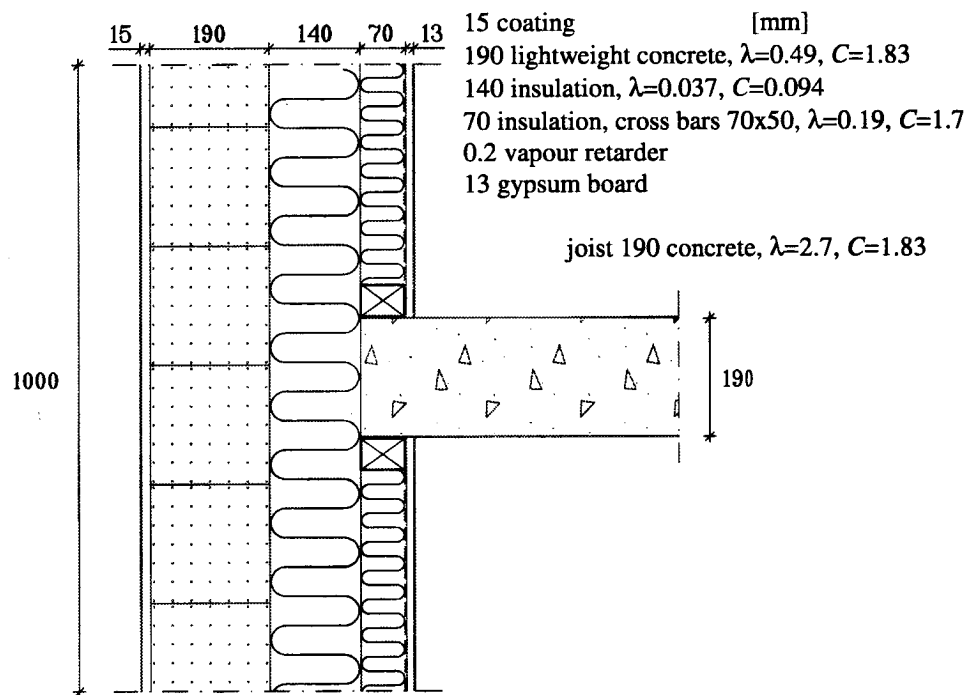


Bild 8.1: Nichttragende Außenwand mit einer Wärmebrücke.

8.1.2 Eingabe mit dem Preprozessor

Die nachfolgenden Anweisungen beschreiben den Eingabevorgang in der grafischen Eingabeoberfläche, siehe Bild 8.2. Sollten Sie bei der Eingabe Probleme haben, können Sie Ihre Eingaben mit der Datei *Example 1.dat* vergleichen. Verwenden Sie für das Beispiel die englischsprachige Materialdatenbank *Default.mtl*. Der Wärmedurchlaßwiderstand der äußeren Beschichtung und der Gipskartonplatten werden in diesem Beispiel aufgrund ihres geringen Einflusses vernachlässigt.

1. Wählen Sie "Example 1, concrete lightweight" (Leichtbeton) in der Materialliste aus. Zeichnen Sie ein beliebiges Rechteck.
2. Wählen Sie *Select* (Pfeil, Schaltfläche links in der Werkzeugleiste). Klicken Sie auf das Rechteck, welches nun in den Ecken markiert wird. Das Rechteck kann jetzt verschoben oder in der Größe verändert werden. Breite und Höhe wird in der Statuszeile unten angezeigt. Die Abmessungen sollten $dx = 0,19$ m und $dy = 1$ m sein.
3. Klicken Sie auf *Draw*, die zweite Schaltfläche von links in der Werkzeugleiste (es kann auch mit einem Rechtsklick zwischen *Select* und *Draw* umgeschaltet werden). Wählen Sie in der Materialliste das Dämm-Material "Example 1, insulation" aus. Zeichnen Sie neben dem ersten Rechteck ein weiteres und ändern Sie dessen Größe auf $dx = 0,14$ m und $dy = 1$ m. Zeichnen Sie dann den nächsten Dämmstoffstreifen ($dx = 0,07$ and $dy = 1$).

4. Zeichnen Sie ein weiteres Rechteck, das die Betonkonstruktion darstellen soll und geben Sie die Maße ein (Material "Example 1, concrete" in der Materialliste). Ordnen Sie dieses Rechteck so an, wie im Bild gezeigt. Die vertikale Plazierung muß nicht exakt sein, da der horizontale Wärmestrom durch die Wand bereits in einigen Dezimeter Entfernung von der Betonkonstruktion eindimensional ist.
5. Zeichnen Sie die erste Querlattung (Material "Example 1, cross bars"). Geben Sie die Maße ein ($0,07 \cdot 0,05$ m). Kopieren Sie den markierten Balken durch Drücken von Strg-V (oder Taste Einfg). Verschieben Sie die Latten an die richtige Orte.
6. Klicken nach der Eingabe der Geometrie auf den Menüpunkt *<Update not made >*, um die eingaben für die Berechnung aufzubereiten.

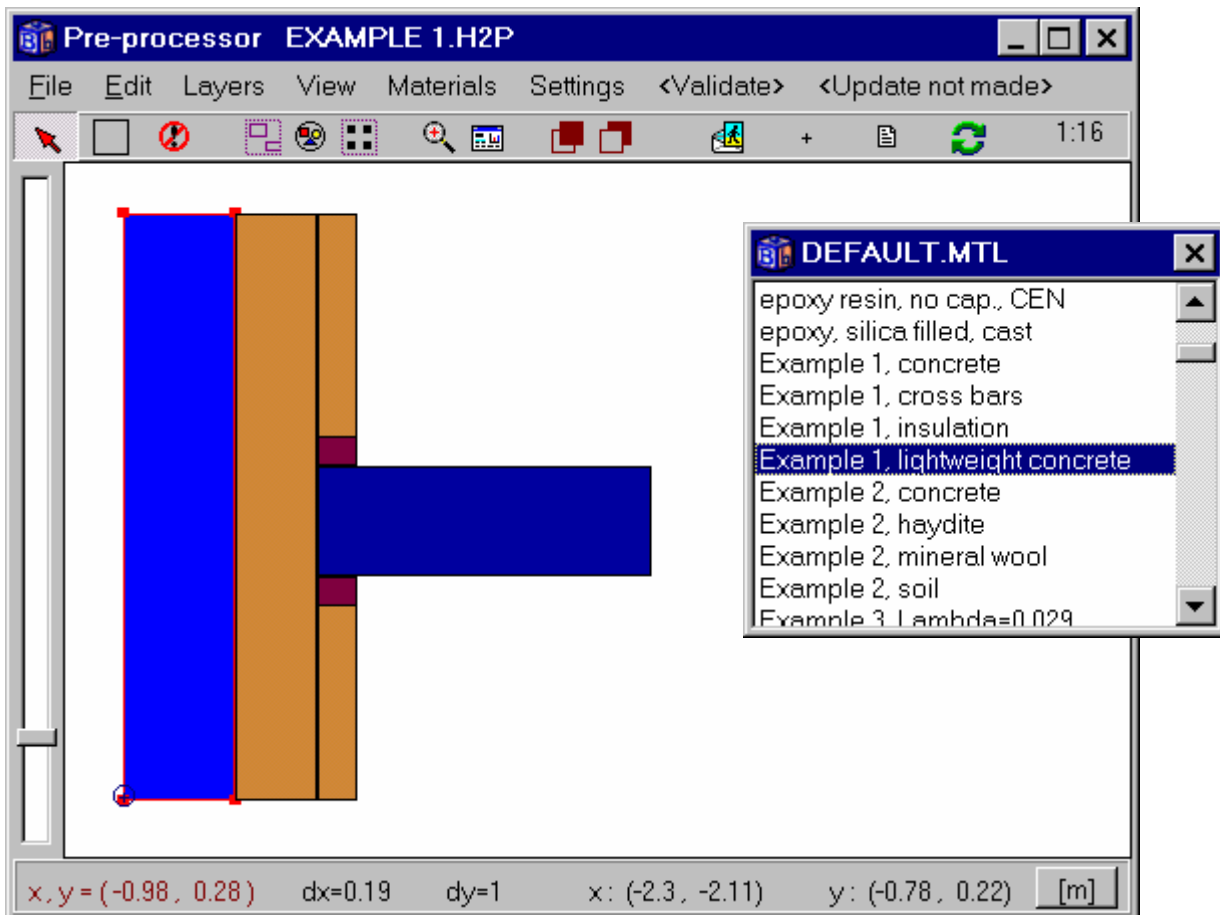


Bild 8.2: Mit dem Preprozessor gezeichnete Konstruktion.

8.1.3 Randbedingungen

Hinweise zur Eingabe der Randbedingungen:

1. Bild 8.3 zeigt das Eingabennetz im Postprozessor (unter *Options* muß *Input mesh coordinates* aktiviert sein), die Längen (*Options/Lengths mm*), die Nummern der Randsegmente und die Materialnamen. Klicken Sie in der unteren Auswahlleiste auf **Mesh**, um das erzeugte Berechnungsnetz anzuzeigen.
2. Jetzt werden die Randbedingungen definiert. Bild 8.4 zeigt die Daten (Menüpunkt *Input/Boundary conditions*). Es werden drei Randbedingungen (*types*) eingegeben. Der zweiten Randbedingung (Innen) sind die Ränder 2, 3, 5 und 6 zugeordnet, siehe Bild 8.3. Der dritten Randbedingung (Außen) wird das Randsegment 8 zugeordnet. Für die übrigen Randsegmente (1, 4 und 7) gilt automatisch die erste Randbedingung (*Default*), welche hier adiabatisch ist.

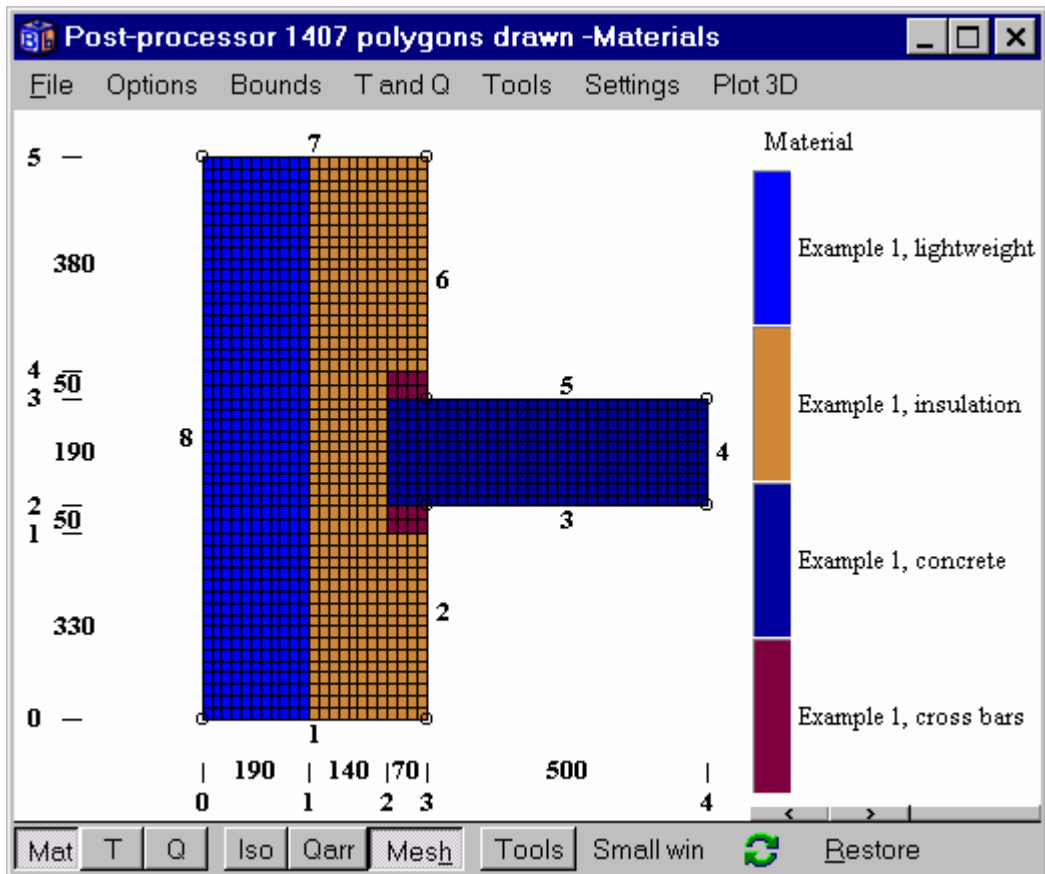


Bild 8.3: Materialien, Eingaberaster, Längen, Randsegmente und Berechnungsnetz im Postprozessor.

n	type	Bounds	function	Q [W/m2]	Temp [C]	Res. [m2K/W]
1	Q=const	Default		0		
2	T=const	2 3 5 6			20	0.130000
3	T=const	8			0	0.040000

Bild 8.4: Eingabe von drei Randbedingungen unter *Input/Boundary conditions*. Die zweite Randbedingung ist den Rändern 2, 3, 5 und 6 zugeordnet, die dritte dem Randsegment 8 (siehe Bild 8.3). Für die übrigen Ränder 1, 4 und 7 gilt die erste Zeile (*Default*).

Starten Sie die stationäre Berechnung mit *Solve/Start steady-state calculation* in der Menüleiste. Das Beispiel hat den stationären Zustand erreicht, wenn die Summe der Wärmeströme Null ist, siehe Bild 8.5. Die Berechnung dauert auf einem Pentium-PC ca. eine Sekunde.

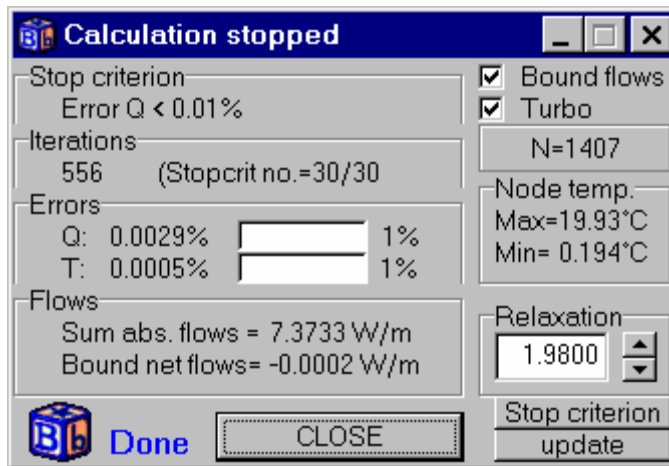


Bild 8.5: Simulationsfenster. Stop der Berechnung bei Erreichen des stationären Zustands.

Wenn Sie *Bound flows* im Simulationsfenster (bzw. Menüpunkt *Output/Boundary flows*) aktivieren, wird eine Liste mit den Wärmeströmen durch die 8 Randsegmente angezeigt, siehe Bild 8.6. Der Wärmestrom für das Randsegment 8 beträgt $Q = -3,69 \text{ W/m}$ (negatives Vorzeichen bedeutet aus dem Material heraus). Ein Vergleich zwischen Segment 2 und 6 zeigt einen etwas größeren Wärmestrom durch das Segment 6 (wegen des längeren Randes).

Der längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ ist nach EN ISO 10211-1 wie folgt definiert:

$$\psi = L^{2D} - \sum_{j=1}^J U_j \cdot l_j \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}] \quad (8.1)$$

mit $L^{2D} = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}] \quad (8.2)$

- Q - Wärmestrom [W/m]
- ΔT - Temperaturdifferenz [K]
- U_j - Wärmedurchgangskoeffizient aus eindimensionaler Berechnung nach EN ISO 6946 [W/(m²·K)]
- l_j - Länge, für die U_j gilt [m]

Ohne den Einfluß des Betonbauteils beträgt der Wärmestrom durch die Wand $Q = 3,2 \text{ W/m}$ und der Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\text{Wand}} = 0,1604 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Der längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient ergibt sich damit nach Gleichung (8.1) und (8.2) zu:

$$\psi = 3,69 / 20 - 0,1604 \cdot 1 = 0,024 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

In Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsnetz können sich Rechenungenauigkeiten ergeben. Im vorliegenden Fall wurden 1407 Berechnungszellen verwendet. Werden statt dessen nur etwa 200 Zellen verwendet, ergibt sich ein Wärmestrom von $3,67 \text{ W/m}$, d.h. der relative Fehler beträgt weniger als 1%, $(3,69 - 3,67) / 3,69 = 0,005$.

Bild 8.7 zeigt das berechnete Temperaturfeld im Postprozessor. Um die Temperatur an einem bestimmten Punkt abzulesen, klickt man auf **Tools** in der unteren Auswahlleiste und bewegt den Cursor an den gewünschten Ort. In der unteren rechten Ecke werden dann Temperatur und Koordinaten angezeigt. Für das Beispiel beträgt die Temperatur am Bauteilanschluß $T_{\text{si}} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Was passiert, wenn die Betonkonstruktion weiter nach außen, direkt neben den Leichtbeton verschoben wird? Testen Sie es selbst. Der Wärmestrom erhöht sich auf $Q = 12,4 \text{ W/m}$ und damit auch der längenbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizient ($\psi = 0,460 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Die Temperatur am Bauteilanschluß beträgt jetzt $T_{\text{si}} = 16,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

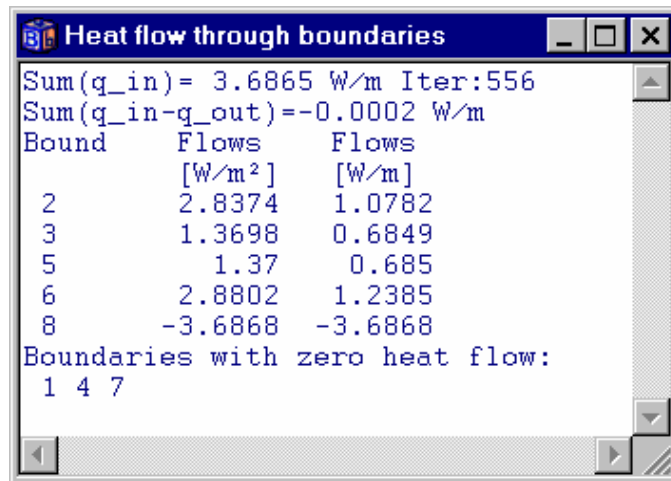


Bild 8.6: Berechnete Wärmeströme durch die Randsegmente.

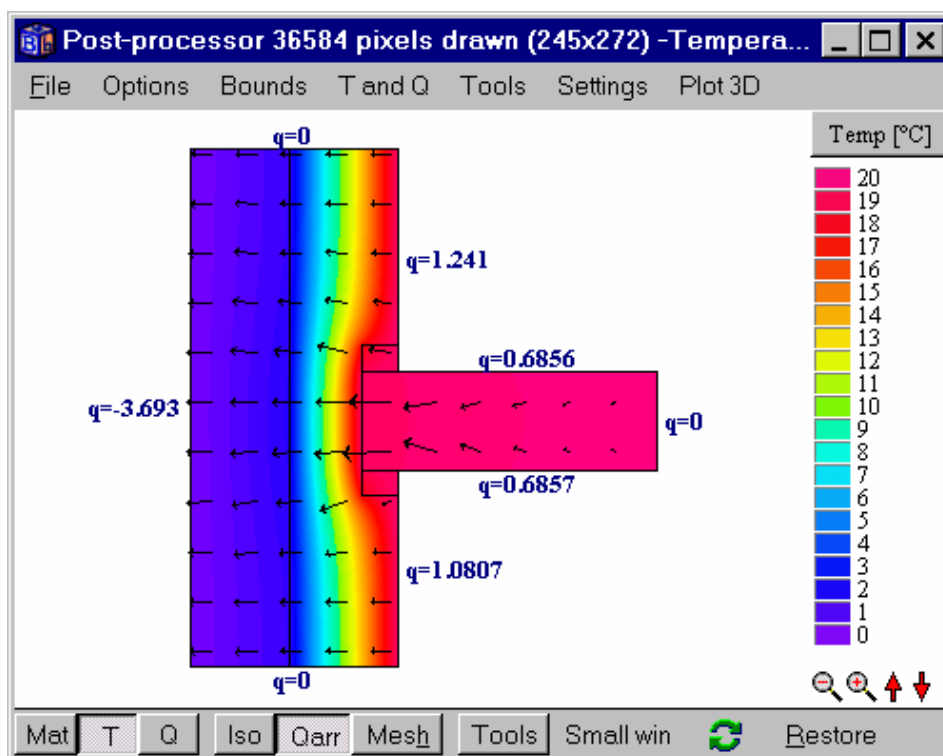


Bild 8.7: Berechnetes Temperaturfeld.

8.1.4 Eingabe ohne Benutzung des Preprozessors

Alle Eingaben sind auch in Textform möglich. Bild 8.3 zeigt das Eingabennetz, die Randsegmente, das Berechnungsnetz und die Materialnamen des aktuellen Beispiels. Bei einer Texteingabe dieser Daten gehen Sie bitte wie folgt vor:

1. Gehen Sie zum Menüpunkt *Input/Input mesh*. Geben Sie die erforderliche Anzahl der Netzpunkte in x- und y-Richtung mit "4" bzw. "5" sowie die Anzahl der Randsegmente mit "8" ein. Siehe Bild 8.8 (links).
2. Gehen Sie zu *Description of boundaries* und geben Sie die Koordinaten der Randsegmente (Nummern der Netzpunkte) ein, siehe Bild 8.8 (rechts).
3. Gehen Sie zu *Mesh in x-direction* und geben Sie die Daten entsprechend Bild 8.9 (links) ein.
4. Gehen Sie zu *Mesh in y-direction* und geben Sie die Daten entsprechend Bild 8.9 (rechts) ein.
5. Gehen Sie zu *Thermal properties* und geben Sie die Daten entsprechend Bild 8.10 ein.
6. Setzen Sie die Eingabe nach Abschnitt 8.1.3 fort.

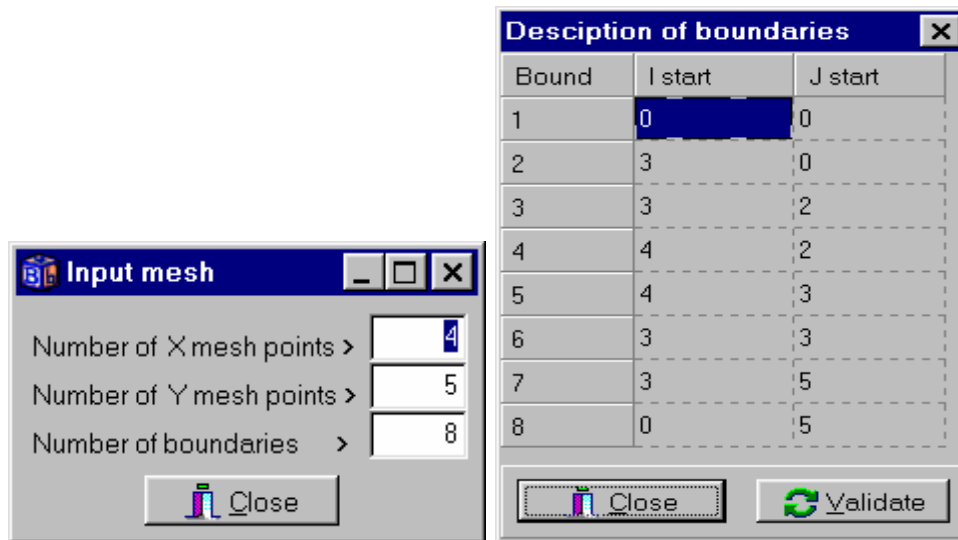


Bild 8.8: Daten für das Eingabernetz und die Randsegmente.

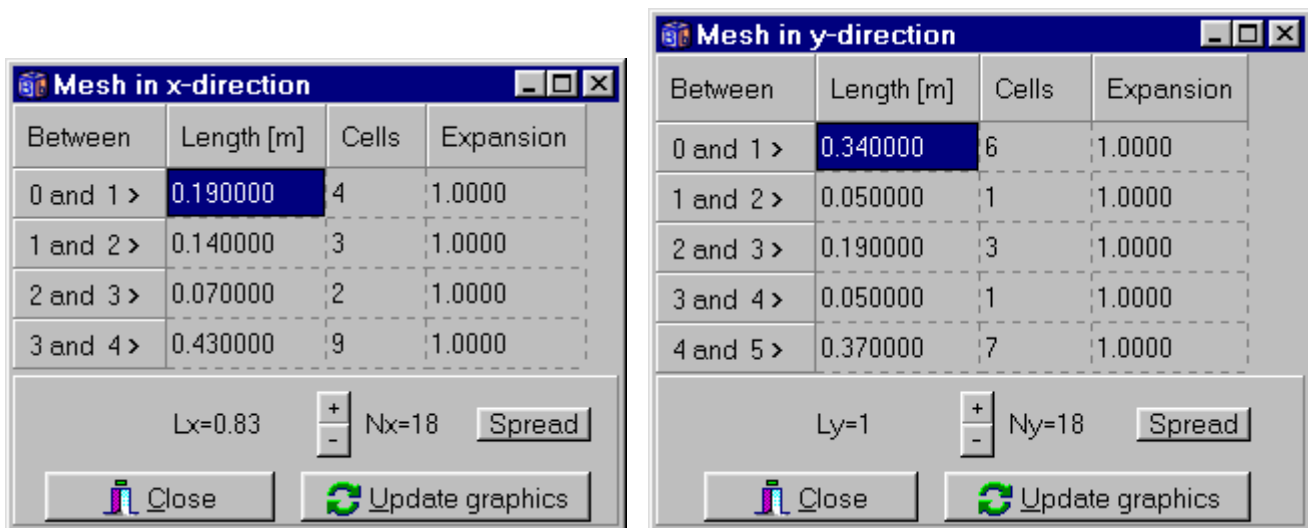


Bild 8.9: Längenangaben zu den einzelnen Segmenten des Eingabernetzes und Definition des Berechnungernetzes (Zellenanzahl, Expansion) in x- und y-Richtung.

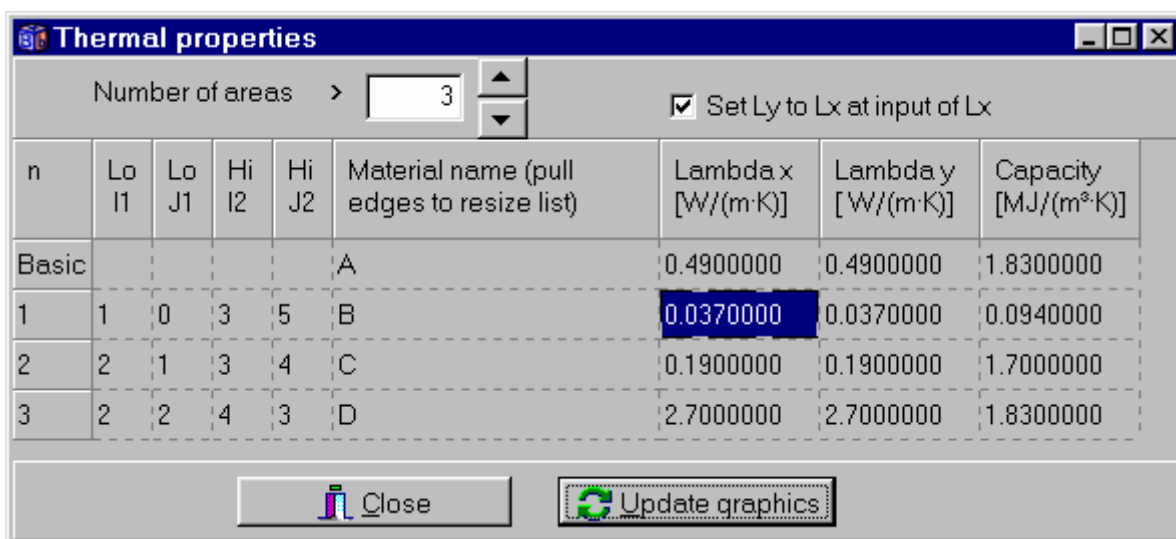


Bild 8.10: Zuordnung der Materialrechtecke und ihrer thermischen Eigenschaften.

8.2 Beispiel 2 – Wärmeverluste erdberührter Bauteile

8.2.1 Einführung

Bild 8.11 zeigt einen Schnitt durch ein Kellergeschoß. Die Bodenplatte besteht aus 120 mm Beton mit 100 mm Perimeterdämmung und die Wand aus 300 mm "Haydite"-Mauerwerk mit 100 mm Außendämmung. Die Bodenplatte hat eine Größe von $10 \cdot 10$ m (Innenmaße). Die Wärmeleitfähigkeiten sind im Bild angegeben. Die Wärmeübergangswiderstände betragen innen $R_{si} = 0,13$ und außen $R_{se} = 0,04$ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ bzw. 0 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (zum Erdreich).

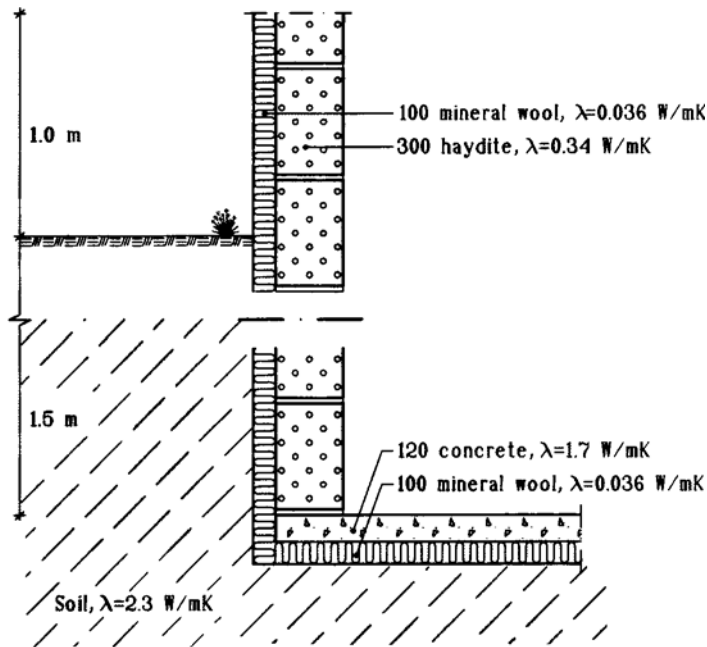


Bild 8.11: Kellerfußboden und Kelleraußenwand mit Wärmedämmung.

Es soll der Wärmeverlust des Gebäudes zum Erdreich und die Fußbodentemperatur bei stationären Randbedingungen ermittelt werden. Die Innentemperatur beträgt 20 $^{\circ}\text{C}$ und die Außentemperatur 0°C . Siehe Eingabedatei *cellar.dat*.

8.2.2 Eingabenetz

Bild 8.12 zeigt die Achsen des verwendeten Eingabenetzes. Da es sich um eine symmetrische Konstruktion handelt ist es ausreichend, nur die Hälfte des Gebäudes zu betrachten.

Alle Eingaben erfolgen zunächst ohne den Preprozessor. Der Eingabevorgang wird mit den nachfolgenden Anweisungen beschrieben.

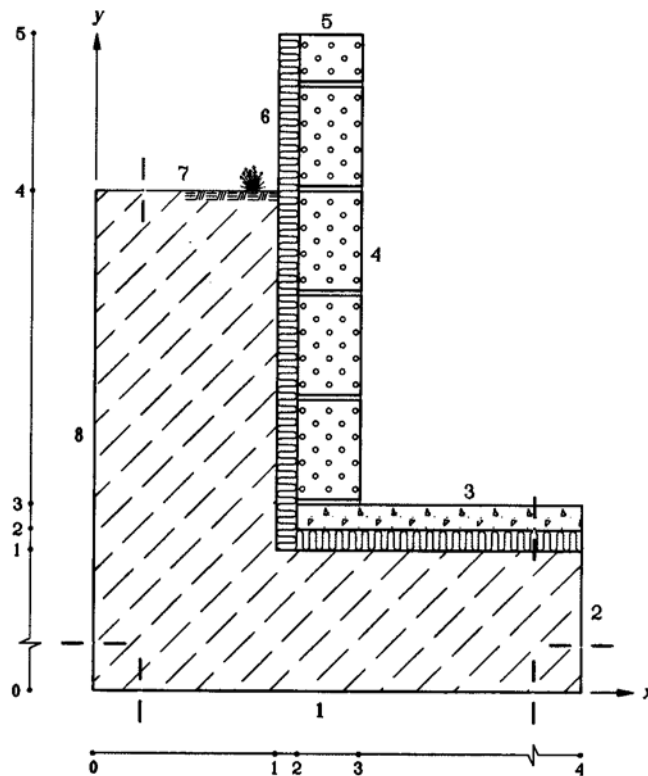


Bild 8.12: Eingabernetz mit Numerierung der Randsegmente.

1. Gehen Sie zum Menüpunkt *Input/Input mesh*. Geben Sie die Anzahl der Segmente des Eingabernetzes in x - und y -Richtung ("4" bzw. "5") sowie die Anzahl der Randsegmente ("8") ein. Siehe Bild 8.13 (links).
2. Gehen Sie zu *Description of boundaries*. Die Randsegmente werden durch die Koordinatennummern des Eingabernetzes in der Reihenfolge entgegen dem Uhrzeigersinn definiert. Das erste Randsegment beginnt bei $0,0$. Verwenden Sie die in Bild 8.13 (rechts) gezeigten Werte.
3. Der nächste Schritt ist die Eingabe der Segmentlängen des Eingabernetzes und die Definition des Berechnungsnetzes (Zellenanzahl, Expansion) in x - und y -Richtung, siehe Bild 8.14. Im Beispiel soll das Erdreich bis 20 m unter der Bodenplatte und 20 m horizontal von der Außenwand in das Modell einbezogen werden. Die Auswahl eines geeigneten Berechnungsnetzes erfordert einige Vorüberlegungen. Eine zu geringe Zellenanzahl kann zu ungenauen Ergebnissen führen; auf der anderen Seite führen zu viele Zellen zu einer längeren Rechenzeit. In der Nähe des Gebäudes sollte das Berechnungsnetz dichter sein, da hier die größten Temperaturgradienten auftreten. Ein Berechnungsnetz mit zu- bzw. abnehmendem Achsabstand nennen wir "expansiv". Bild 8.15 zeigt das Berechnungsnetz sowie die Längen der Randsegmente im Postprozessor (im Menü *Bounds* muß *Bound length* aktiviert sein). Bild 8.16 zeigt das expansive Berechnungsnetz in unmittelbaren Umgebung des Kellers.

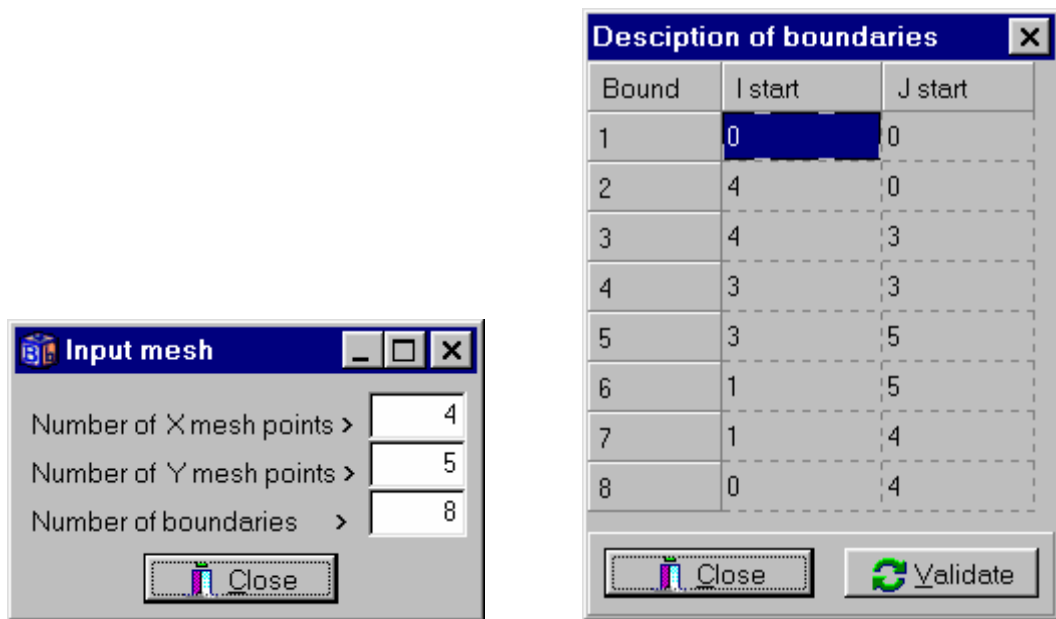


Bild 8.13: Daten für das Eingabernetz und die Randsegmente.

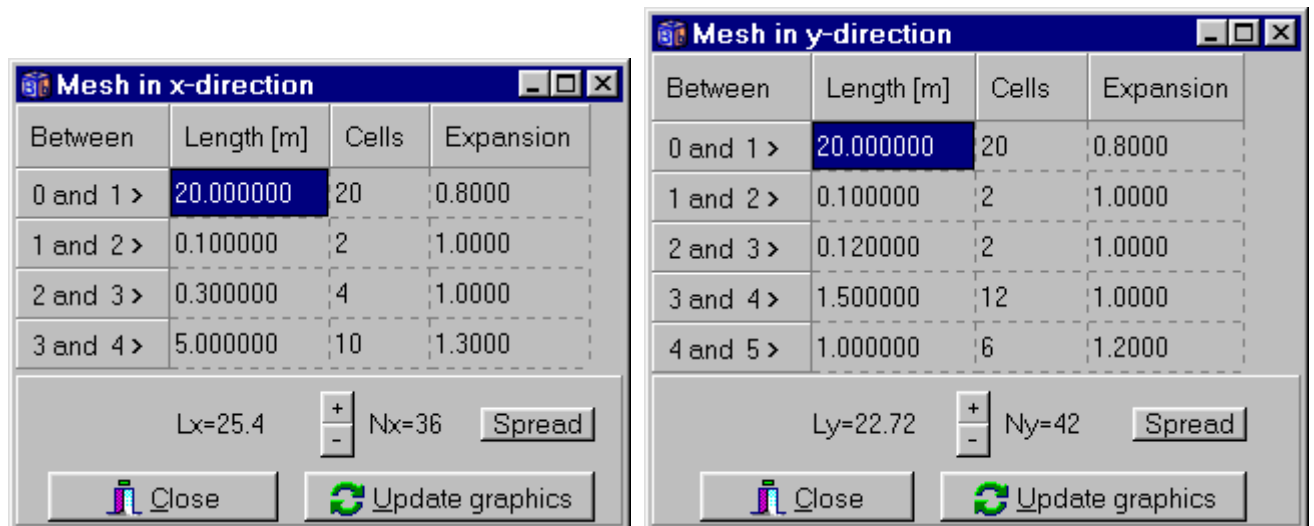


Bild 8.14: Längenangaben zu den einzelnen Segmenten des Eingabernetzes und Definition des Berechnungnetzes (Zellenanzahl, Expansion) in x- und y-Richtung.

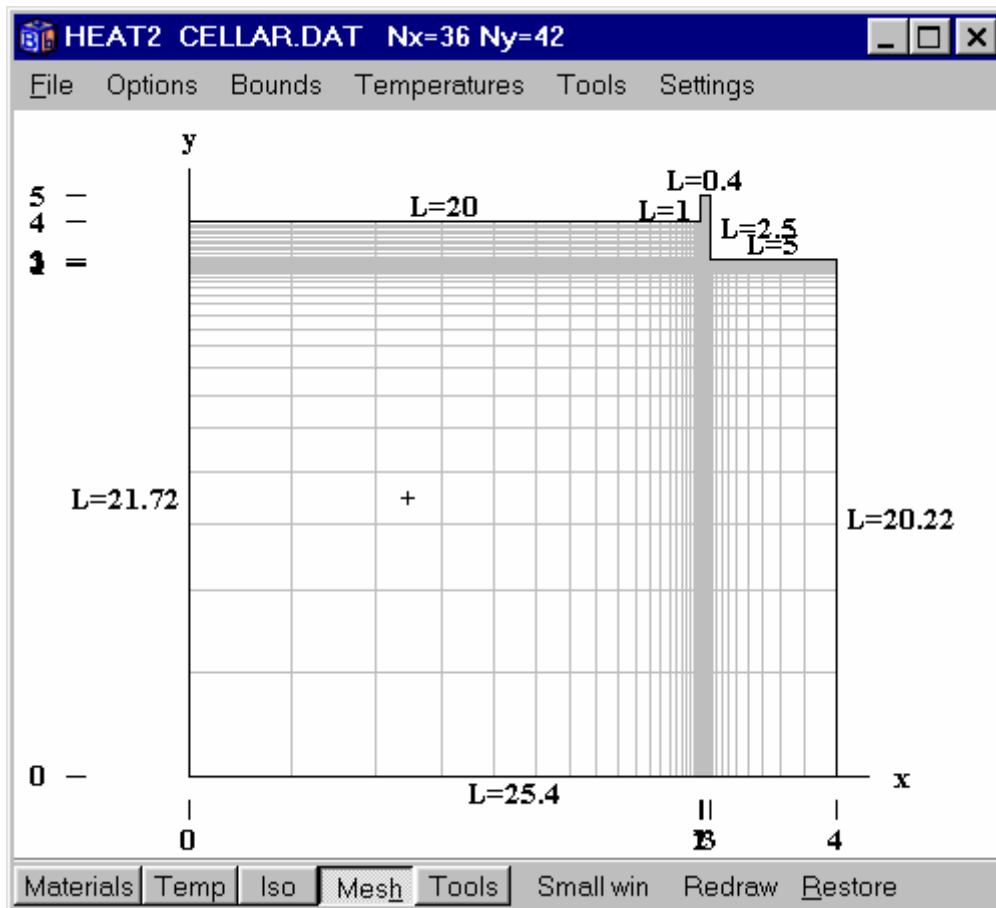


Bild 8.15: Berechnungsnetz und Längen der Randsegmente.

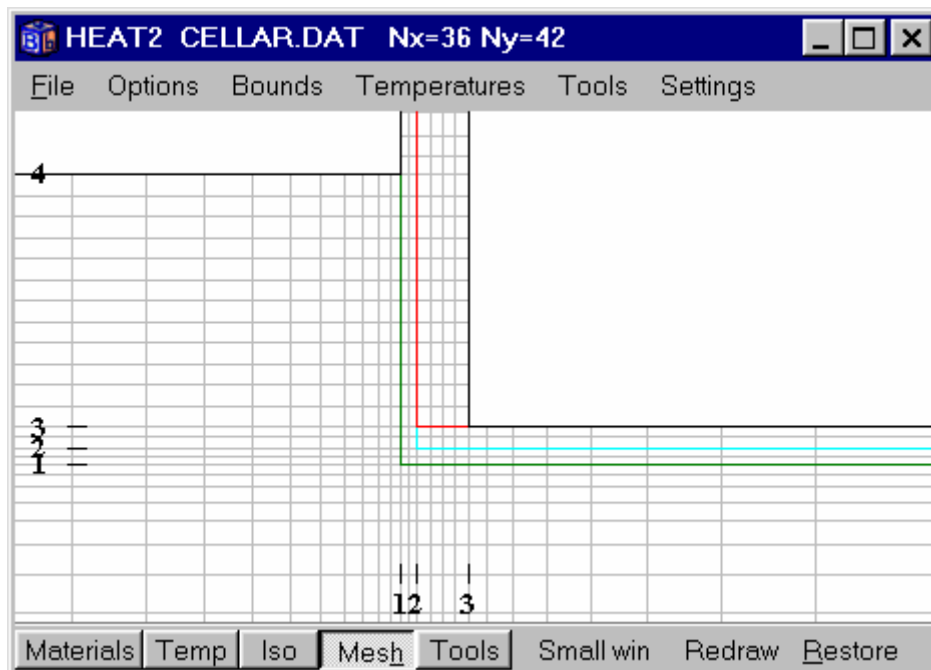


Bild 8.16: Berechnungsnetz in unmittelbarer Umgebung des Kellers.

8.2.3 Materialkennwerte

Jetzt müssen für die einzelnen Flächen (Rechtecke) die thermischen Eigenschaften eingegeben werden. Die Lage und Größe der Flächen wird durch die Koordinatennummern des Eingabernetzes "unten links" und "oben rechts" bestimmt. Zunächst werden Basis-Materialdaten eingegeben, die für die gesamte Rechenfläche gelten. Sofern sich Materialrechtecke überlappen, gelten jeweils die zuletzt eingegebenen

Werte. Die Wärmeleitfähigkeiten können in der x - und y -Richtung unterschiedlich sein. In unserem Beispiel haben sie jedoch den gleichen Wert, da nur isotrope Materialien verwendet werden. Beachten Sie, daß bei einer stationären Berechnung die Wärmekapazität nicht benötigt wird. Demzufolge muß bei Materialien ohne genaue Angaben der Wärmekapazität (in der Materialdatenbank gekennzeichnet mit *no cap.*) der Standardwert 1,0 nicht geändert werden.

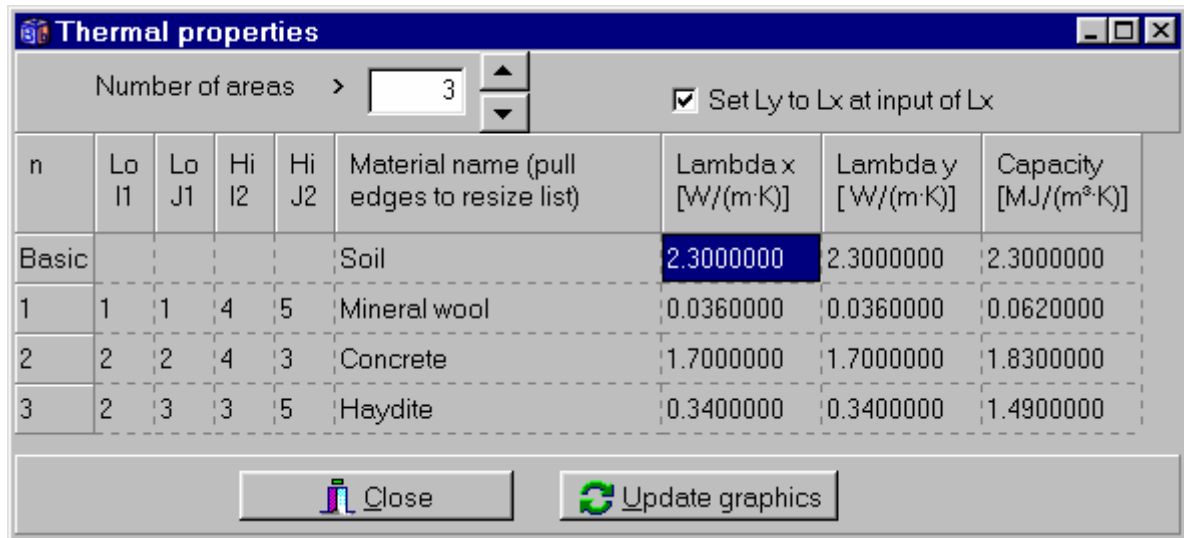


Bild 8.17: Eingabe der Materialrechtecke und Zuordnung der thermischen Eigenschaften.

8.2.4 Randbedingungen

Im betrachteten Beispiel gibt es 3 Arten von Randbedingungen:

- Adiabate Oberfläche bei den Randsegmenten 1, 2, 5 und 8, siehe Bild 8.12
- $T_i = 20 \text{ °C} / R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ bei den Randsegmenten 3 und 4
- $T_e = 0 \text{ °C} / R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ bei den Randsegmenten 6 und 7

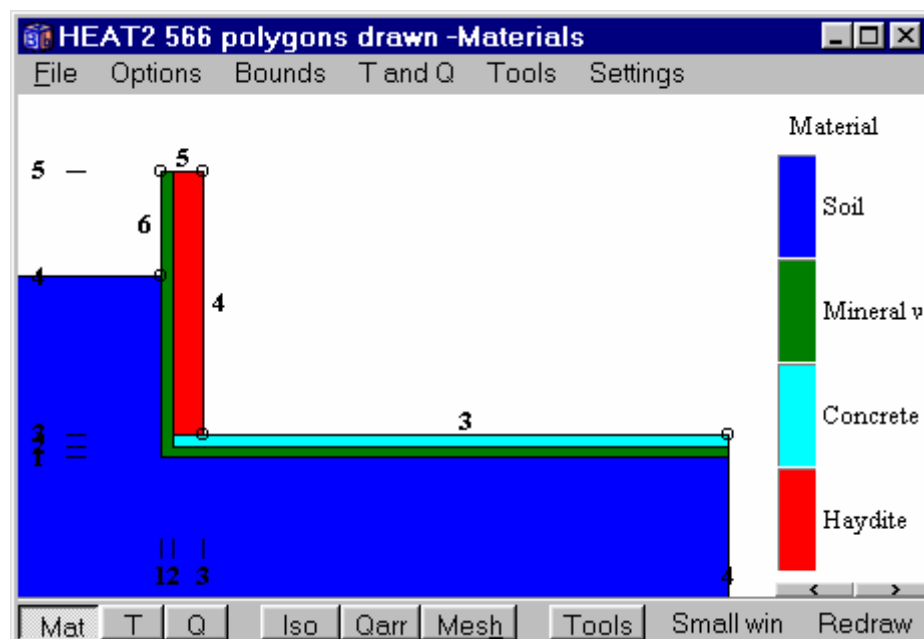


Bild 8.18: Materialbezeichnungen.

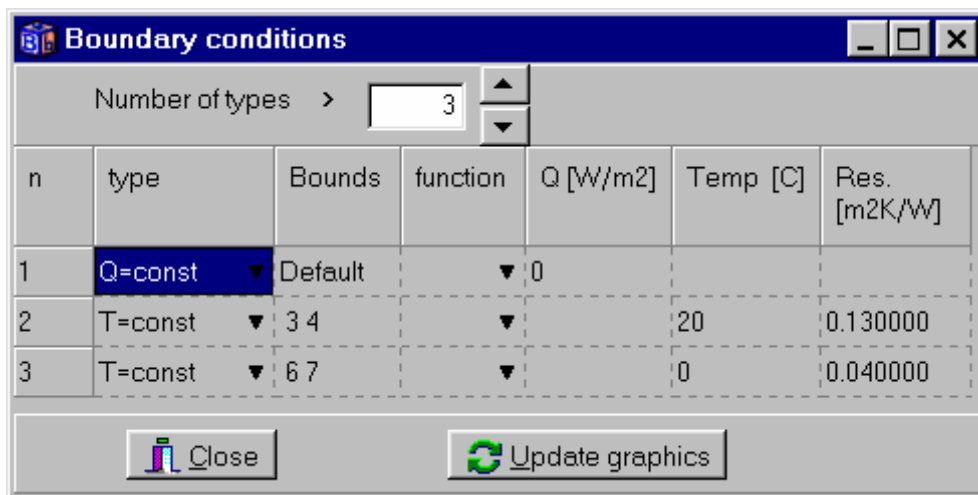


Bild 8.19: Definition von drei Randbedingungen. Die zweite Randbedingung ist den Randsegmenten 3 und 4 zugeordnet, die dritte den Randsegmenten 6 und 7, siehe Bild 8.20. Für die übrigen Ränder (1, 2, 5 und 8) gilt die erste Zeile (*Default*), hier $Q = 0$ (adiabat).

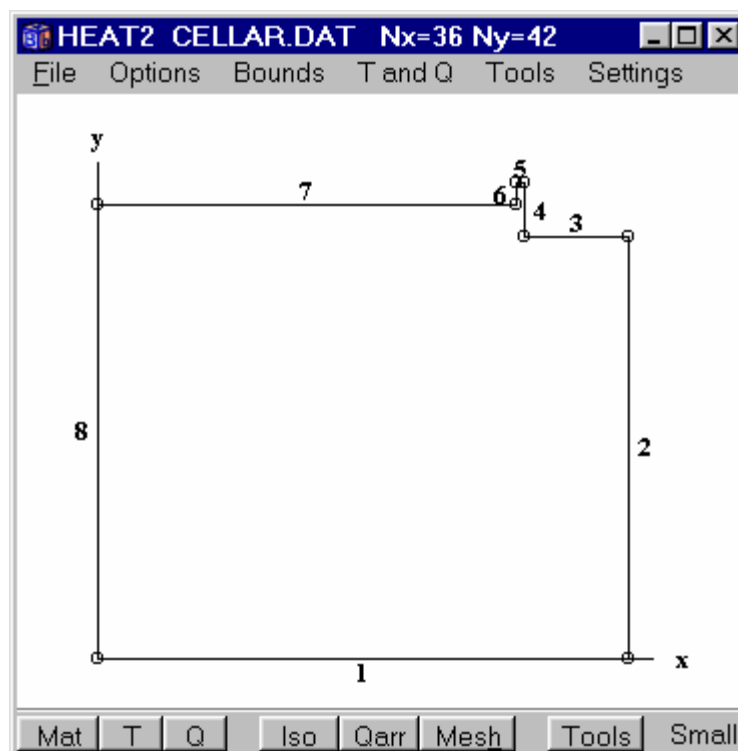


Bild 8.20: Den Randsegmenten 1 bis.8 wurden Randbedingungen zugeordnet.

8.2.5 Berechnung

Durch Betätigen der Funktionstaste F9 kann jetzt eine stationäre Berechnung gestartet werden, siehe auch Kapitel 5.11. Die Simulation benötigt auf einem PC mit Pentiumprozessor nur wenige Sekunden. Um die Wärmeströme über die Detailgrenzen (Randsegmente) anzuzeigen, ist *Bound flows* im Simulationsfenster zu aktivieren (bzw. Menüpunkt *Output/Boundary flows*). Der Netto-Wärmestrom durch die Randsegmente in das Berechnungsgebiet (siehe *Bound Net flows* im Simulationsfenster) zeigt, ob die Berechnung einen stationären Zustand erreicht hat oder nicht.

Der Wärmestrom aus der betrachteten Gebäudehälfte in das Erdreich entspricht dem Wärmestrom durch das Randsegment 7. Dieser beträgt 31,3 W/m, siehe Bild 8.22. Das Temperaturfeld, der Isothermenverlauf und die Wärmeströme über die Randsegmente sind in Bild 8.23 dargestellt.

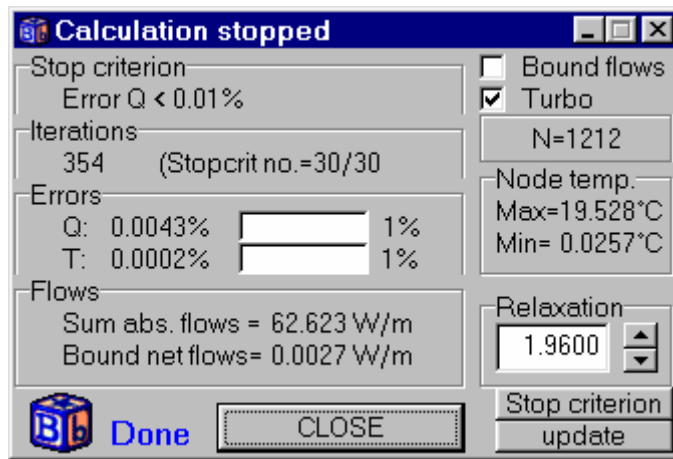


Bild 8.21: Simulationsfenster.

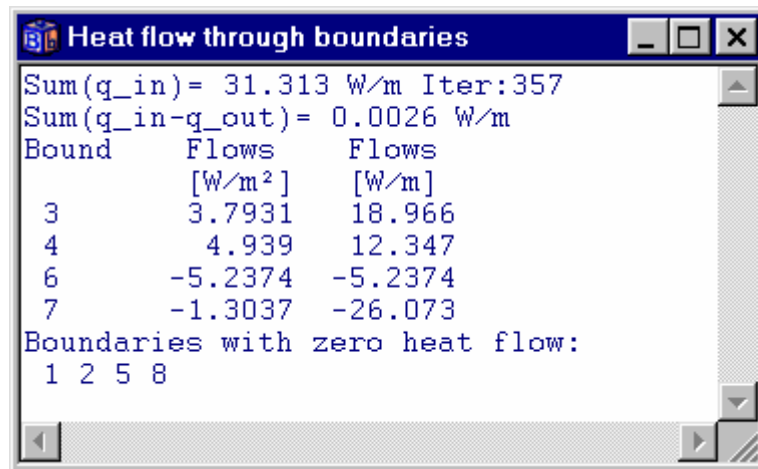
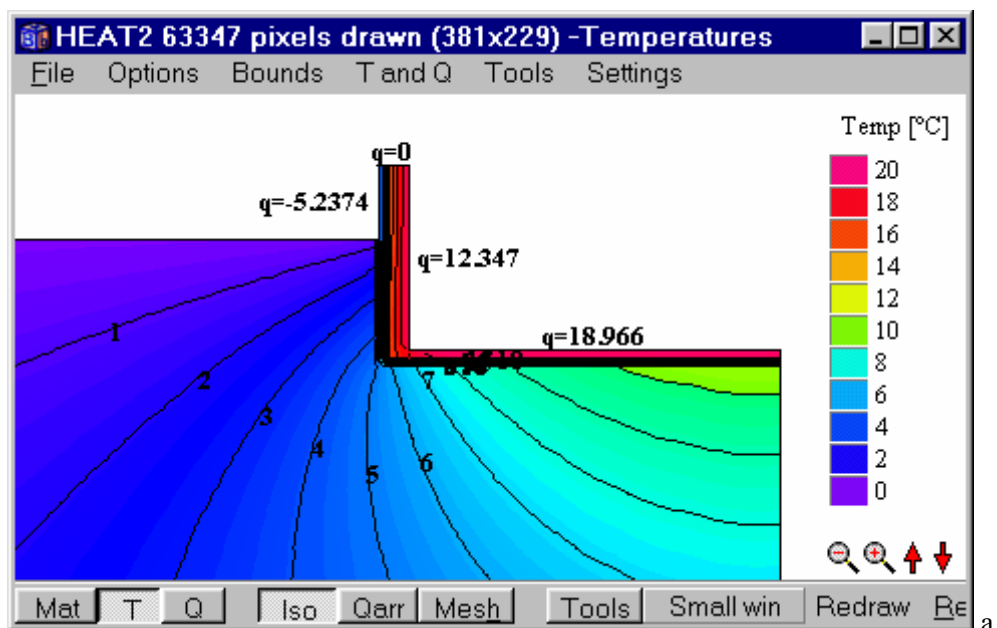


Bild 8.22: Berechnete Wärmeströme durch die Randsegmente.



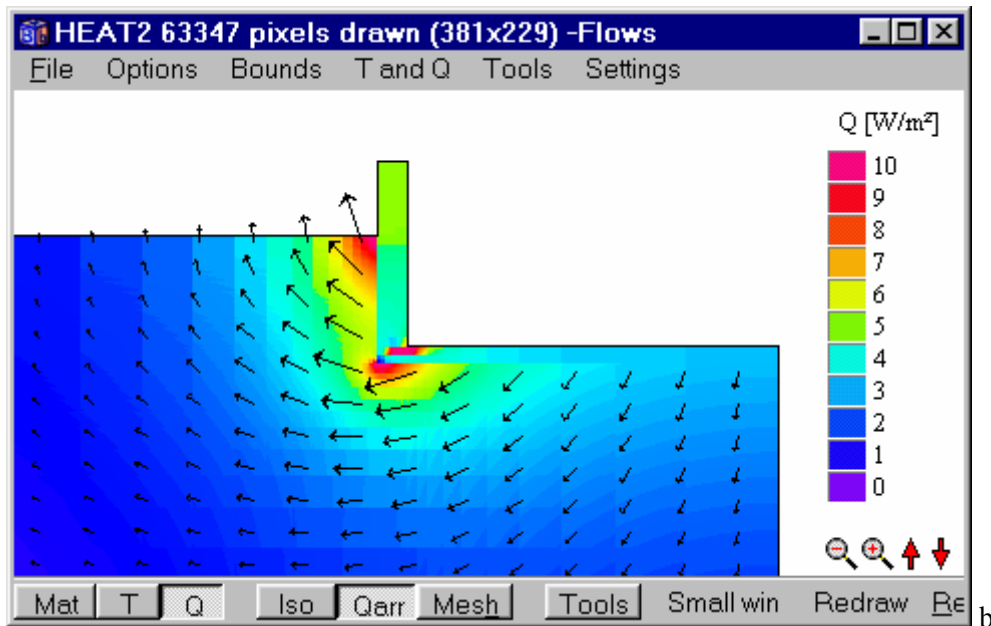


Bild 8.23: Berechnetes Temperaturfeld, Isothermen und Wärmeströme über die Randsegmente (a) sowie die Wärmestromdichten (b).

8.2.6 Instationäre (transiente) Berechnung

Im folgenden Beispiel wird eine instationäre Simulation durchgeführt. Dabei wird eine sinusförmige Änderung der Außentemperatur angenommen. Hierfür wird zunächst über den Menüpunkt *Input/Functions/Function 1* eine Sinusfunktion mit einem jährlichen Schwankungsbereich von -10 bis +20 °C und einem Maximum in Jahresmitte definiert, siehe Bild 8.24. Geben Sie dann unter *Input/Initial temperatures* eine Anfangstemperatur von +5° C ein (als Jahresmitteltemperatur des Erdreichs in mehreren Metern Tiefe), siehe Bild 8.25.

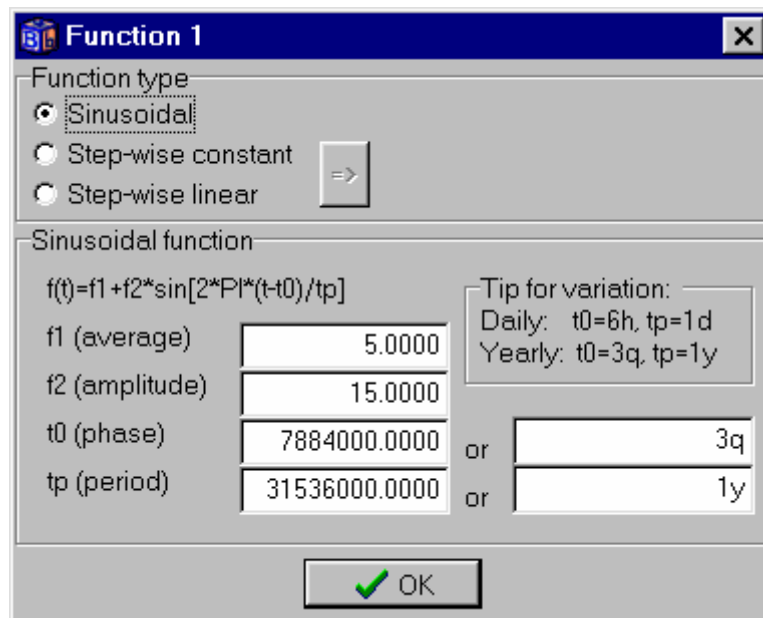


Bild 8.24: Sinusfunktion mit einer jährlichen Schwankung zwischen -10 und +20 °C mit dem Maximum in Jahresmitte. Die Zeit für die Phasenverschiebung (3 Monate) und die Periodenlänge (1 Jahr) kann entweder in Sekunden oder als Zeitstring eingegeben werden.

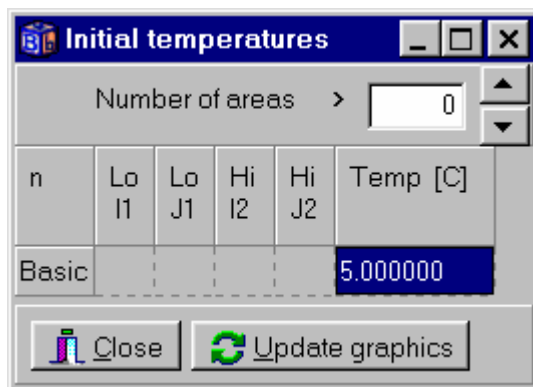


Bild 8.25: Ausgangstemperaturen.

Der nächste Schritt ist die Kopplung der Funktion an eine Randbedingung (*Input/Boundary conditions*), siehe Bild 8.26. Wählen Sie als Stop-Zeit eine Zeitspanne von 10 Jahren (*Solve/Options for transient*), siehe Bild 8.27.

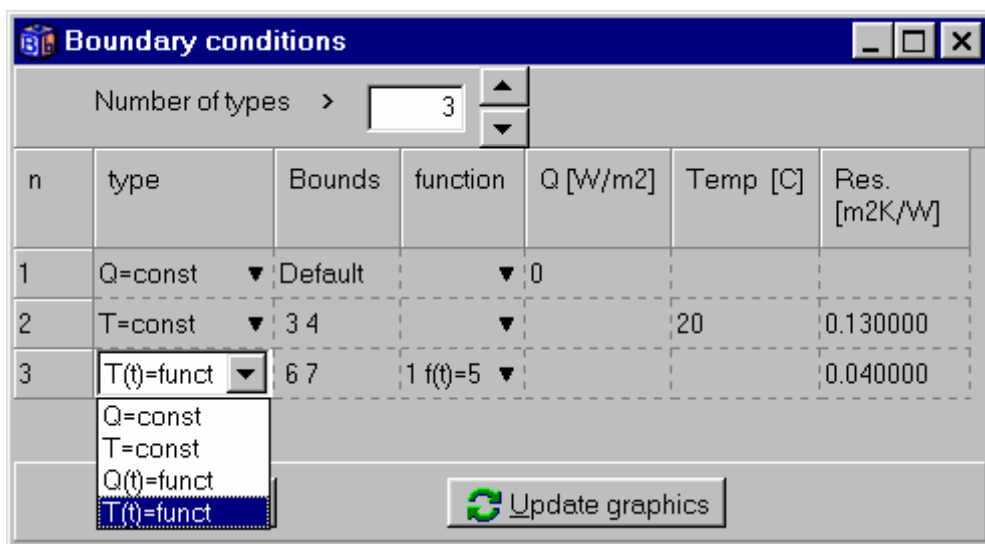


Bild 8.26: Aus der Liste der Arten von Randbedingungen (*type*) wird eine Temperaturfunktion ausgewählt. Die Nummer der Funktion wird aus der Funktionsliste ausgewählt (Standard ist 1).

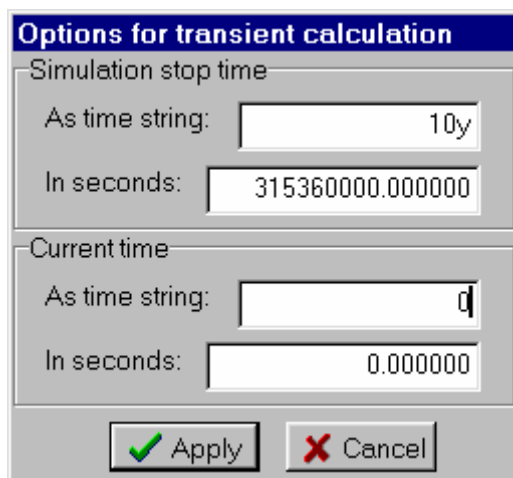


Bild 8.27: Die Stop-Zeit (Simulationsdauer) beträgt 10 Jahre.

In diesem Beispiel werden wir auch die Wärmeströme über die raumseitigen Randsegmente an jeden Tag betrachten. Aktivieren Sie die Aufzeichnung der Ergebnisse (*Output/Recorder*) durch einen Klick auf *Record enabled* und wählen Sie aus der in Bild 8.28 (oben) gezeigten Auswahlliste den zweiten Punkt.

Klicken Sie auf das Eingabefeld *Data* und schreiben Sie für die raumseitigen Randsegmente die Zahlen 3 und 4 ein, siehe Bild 8.28 (unten). Unter *Solve/Updates* wird eingestellt, daß Summe der Wärmeströme der beiden Ränder einmal pro Tag aufgezeichnet wird, siehe Bild 8.29. Klicken Sie nun auf *Graphics* im *Record*-Fenster, um ein Diagramm zu öffnen (dies ist noch leer, da noch keine Daten aufgezeichnet wurden).

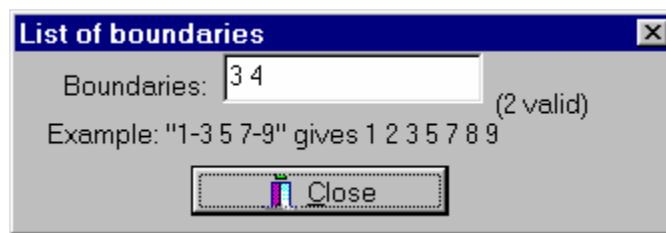
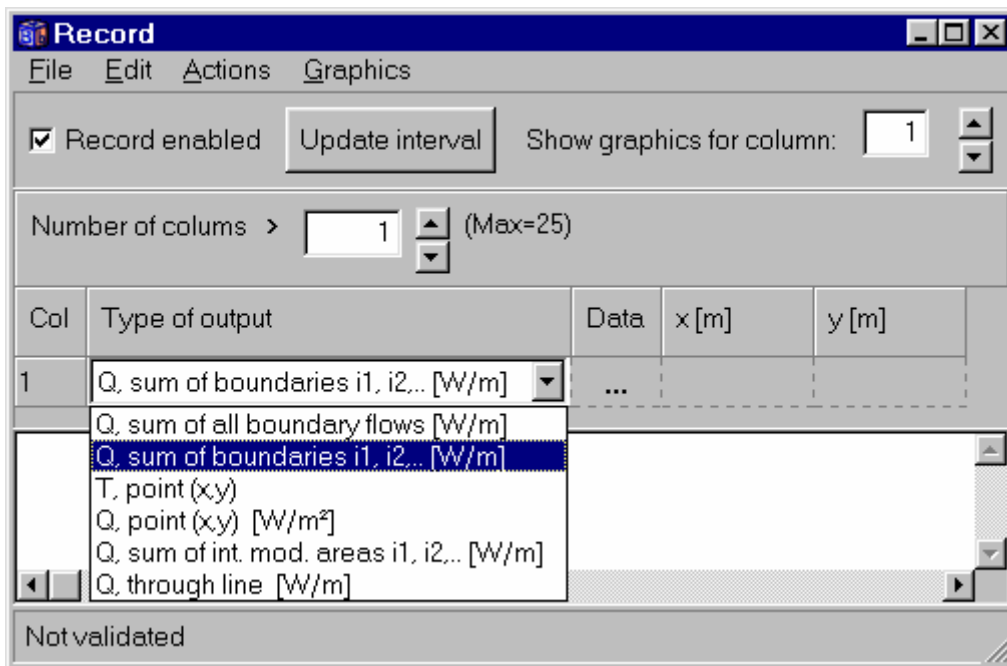


Bild 8.28: Wärmeströme und Temperaturen können während einer Simulation in einer Liste gespeichert werden. In diesem Fall wird die Summe der Wärmeströme der Ränder 3 und 4 aufgezeichnet.

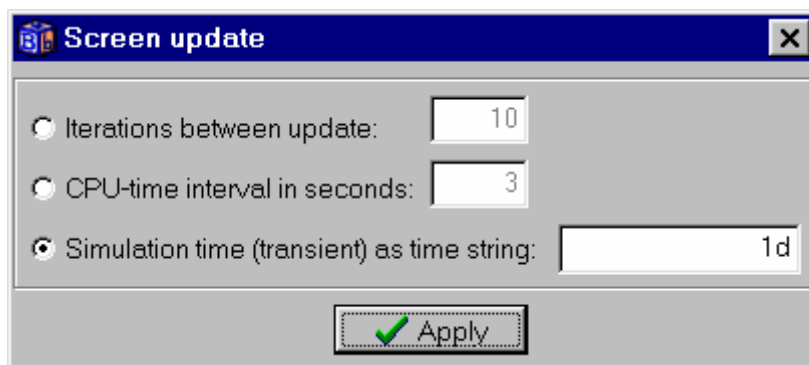


Bild 8.29: Eingabe des Zeitintervalls für die Aufzeichnung von Daten unter *Solve/Update*.

Zum Start einer instationären Simulation klicken Sie *Solve/Start transient calculation*. Betrachten Sie Bild 8.30. Im Simulationsfenster (oben links) werden Informationen wie das gewählte Stop-Kriterium, die Anzahl der Iterationen und Fehlerbetrachtungen für die Temperatur und den Wärmestrom angezeigt. Im *Record*-(Aufzeichnungs-)Fenster (unten links) und im Diagrammfenster (unten

rechts) sehen wir den Verlauf des Gesamtwärmestroms über die raumseitigen Oberflächen an den einzelnen Tagen.

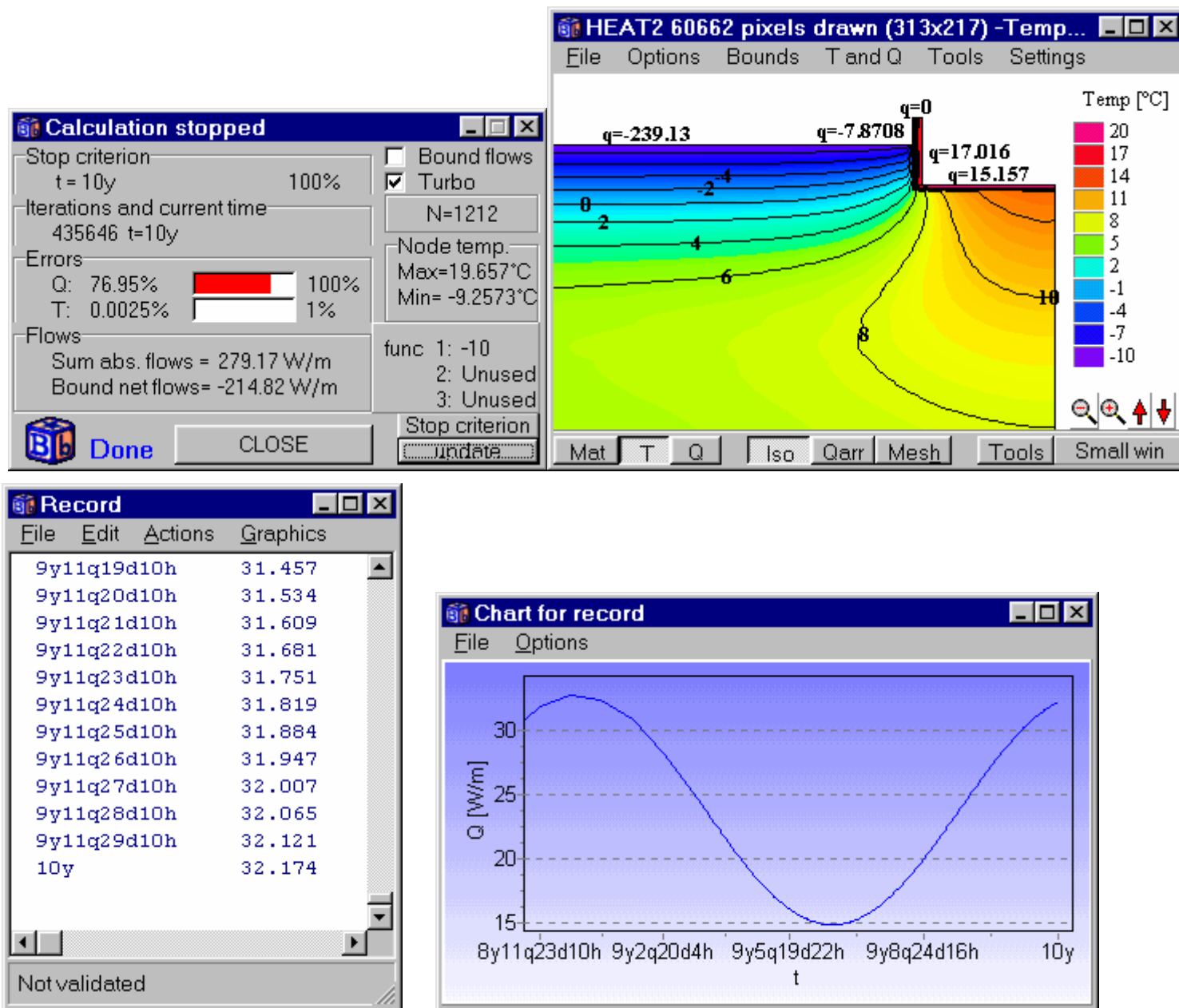


Bild 8.30: Das Simulationsfenster (oben links) zeigt Informationen wie das gewählte Stop-Kriterium, die aktuelle Anzahl der Iterationen sowie Fehlerbetrachtungen für die Temperatur und den Wärmestrom. Das Record-Fenster (unten links) und das Grafikenfenster (unten rechts) zeigen die Wärmeströme über die raumseitigen Oberflächen während eines jeden Tages. Der geringste Wärmestrom ergibt sich Ende Juli (6q20d). Betrachten Sie auch Bild 8.31. Die Rechenzeit für die Simulation von 10 Jahren beträgt bei einem PC mit Pentium-II-Prozessor wenige Minuten bzw. bei schnellerem Prozessor unter Umständen nur Sekunden (bei Aktivierung des Diagramms mit Graphics dauert es länger).

Beachten Sie, daß im aufgezeichneten Wärmestrom auch die Wärmeverluste durch die Außenwand oberhalb der Geländeoberfläche (bis einen Meter über dem Erdboden) enthalten sind. Wie hoch ist der Wärmestrom durch den Fußboden (ohne die Wand)? Versuchen Sie die Simulationszeit auf 11 Jahre zu ändern und löschen Sie das Randsegment 4 im Rekorder, siehe Bild 8.28 (rechts). Setzen Sie die Simulation für das 11. Jahr fort, siehe Bild 8.32.

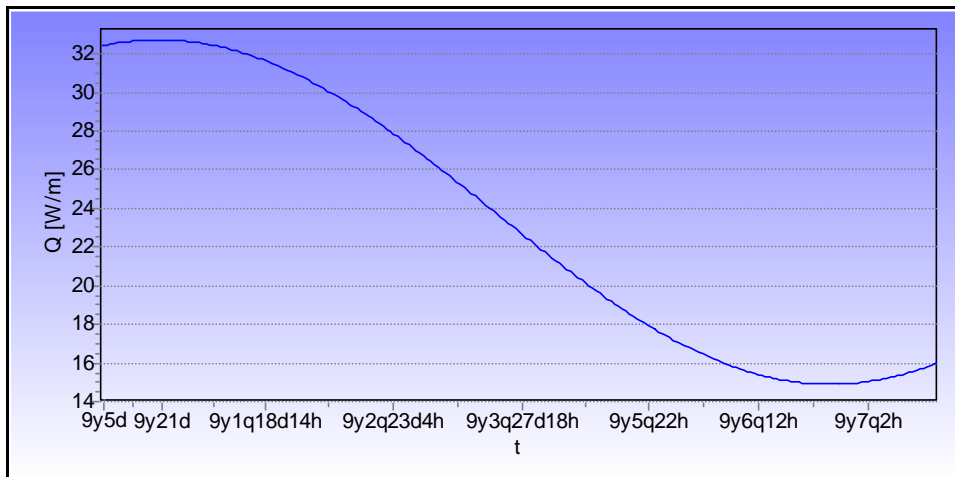


Bild 8.31: Der höchste und der niedrigste Wärmestrom durch die raumseitigen Randsegmente treten Mitte Januar "9y20d" (32,7 W/m) bzw. Mitte Juli "9y6q20d" (14,9 W/m) auf. Beachten Sie, daß die Zeitspanne "9y6q20d" bedeutet, daß 9 Jahre 6 Monate und 20 Tage verstrichen sind und es Mitte Juli ist. Die minimalen bzw. maximalen Außentemperaturen treten bei $t = 0$ (1. Januar) bzw. $t = "6q"$ (1. Juli) auf.³

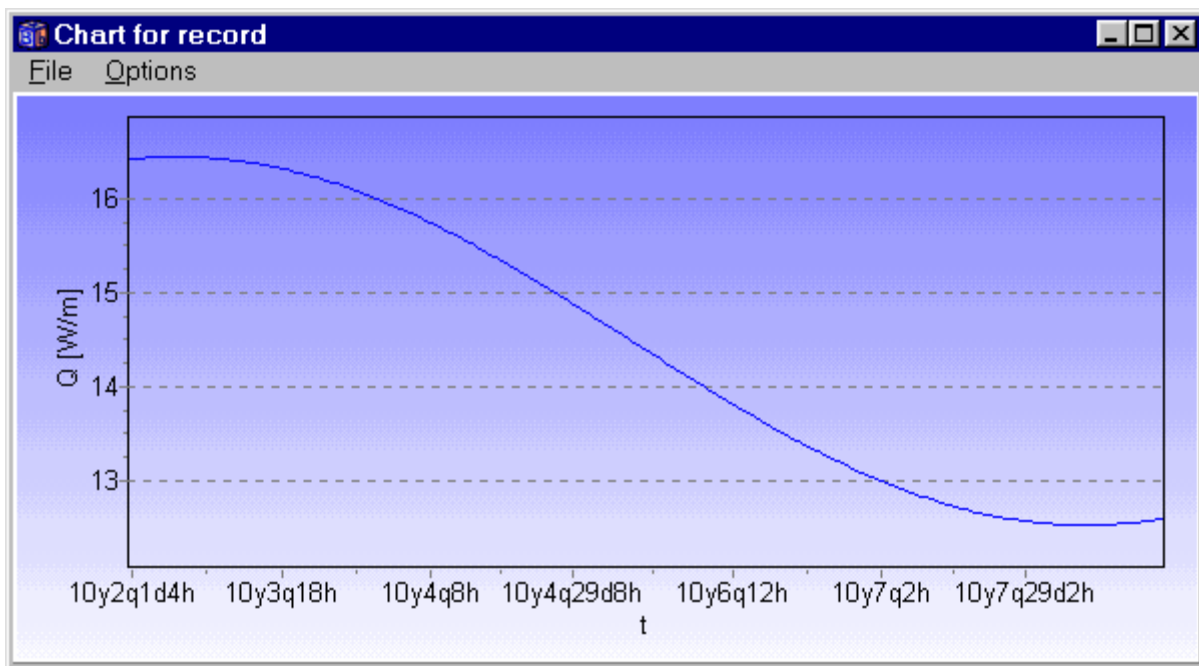


Bild 8.32: Der höchste und der niedrigste Wärmestrom durch den Fußboden treten Mitte März "10y2q10d" (16,5 W/m) bzw. Mitte September "10y8q10d" (12,5 W/m) auf. Beachten Sie die Zeitverschiebung zwischen den minimalen bzw. maximalen Außentemperaturen und den höchsten bzw. niedrigsten Wärmeströmen von etwa 2,5 Monaten.

8.2.7 Eingabe mit dem Preprozessor

8.2.7.1 Zeichnen der Geometrie

Bild 8.33 zeigt das mit Hilfe des Preprozessors eingegebene geometrische Modell (siehe Eingabedatei *Example 2 pre 1.dat*). Bei den oben genannten stationären Randbedingungen beträgt der Wärmestrom nun 31,1 W/m bei 2473 Zellen in einem vom Preprozessor erzeugten äquidistanten Netz mit $50 \cdot 50$ Zellen, Bild 8.34. Im Vergleich zum Ergebnis mit dem expansiven Berechnungsnetz von 31,3 W/m beträgt die Differenz weniger als 1 Prozent, siehe Bild 8.16.

³ Das Diagramm in Bild 8.31 wurde im EMF-Format (Enhanced Metafile) in die Zwischenablage kopiert. Das Diagramm in Bild 8.32 wurde mit Alt-Print Screen [Druck] im Bitmap-Format in die Zwischenablage kopiert, siehe Abschnitt 5.18.3.1.

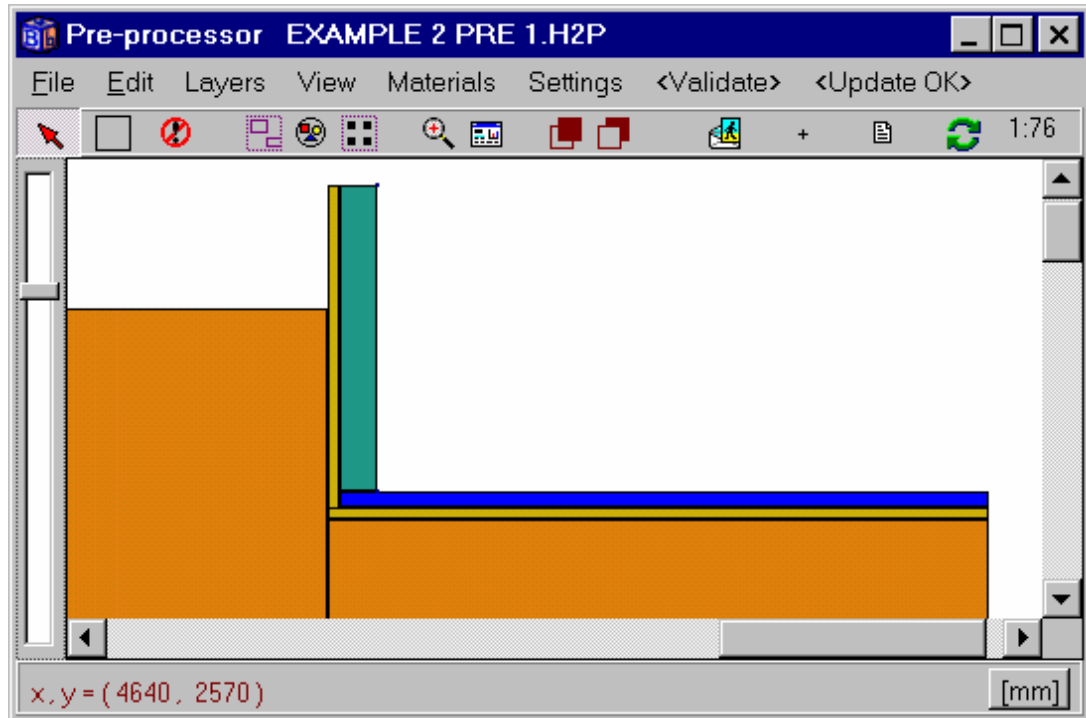
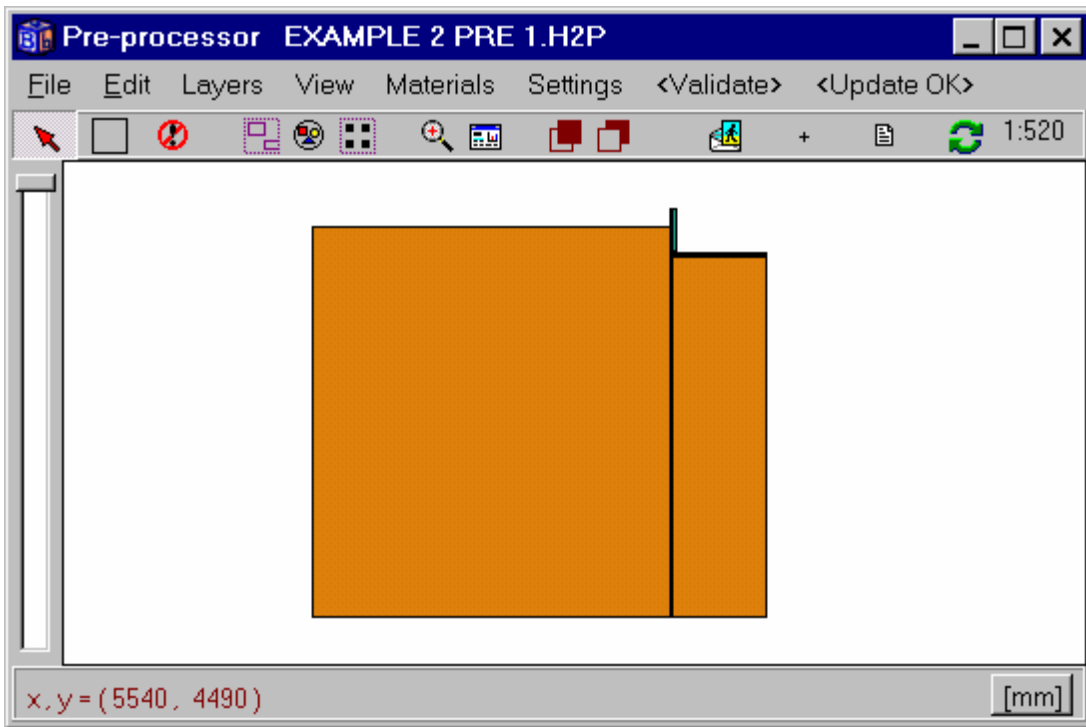


Bild 8.33: Preprozessor. Darstellung des Gesamtmodells (oben) und eines vergrößerten Ausschnitts (unten).

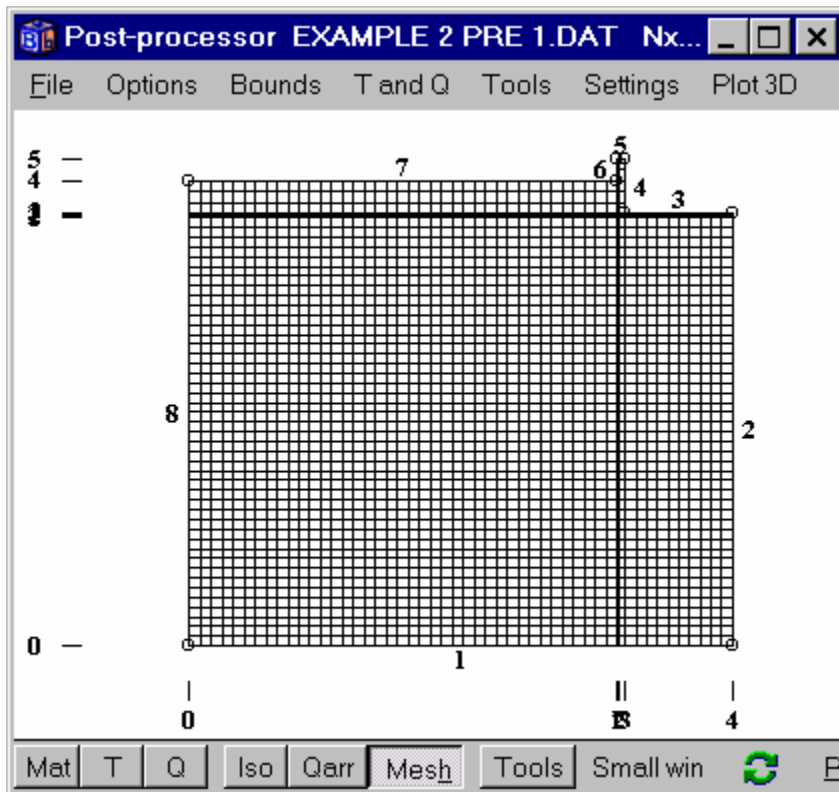


Bild 8.34: Bei 2473 Zellen in einem von der Eingabeoberfläche erzeugten äquidistanten Raster (50 · 50 Zellen, gleiche Abstände) beträgt der berechnete Wärmestrom 31,1 W/m.

8.2.7.2 Zeichnen von Teilen des geometrischen Modells

Die Eingabe kann vereinfacht und beschleunigt werden, indem man im Preprozessor nur Teile des Erdreichs zeichnet, siehe Bild 8.35, und danach die Größe des Erdreichs durch numerische Eingaben im Menüpunkt *Input/Mesh in x-dir* und *Input/Mesh in y-dir* ändert, siehe Bild 8.36.

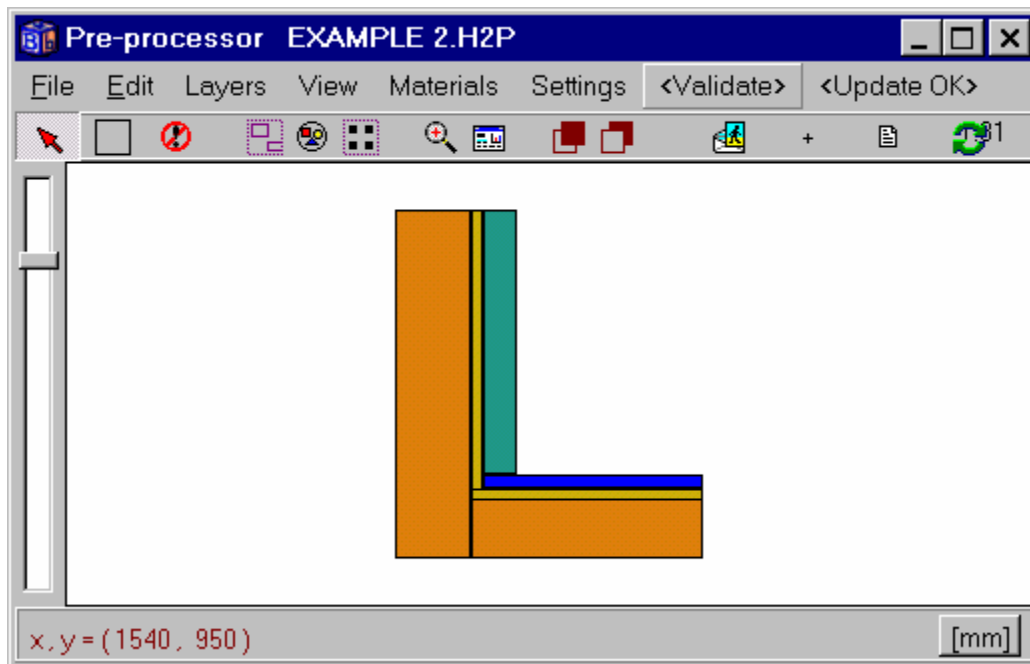


Bild 8.35: Gezeichneter Ausschnitt des geometrischen Modells.

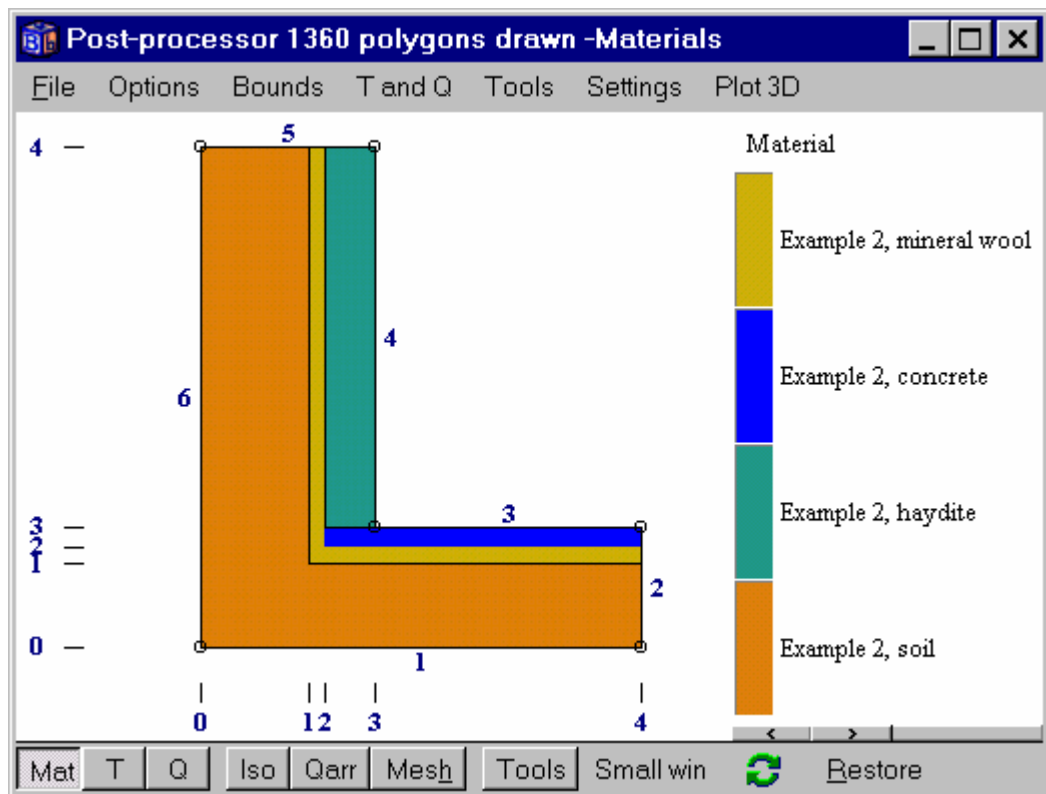


Bild 8.36: Abmessungen und Berechnungsnetz können nach dem Update angepaßt werden.

8.3 Beispiel 3 – Bauteil mit Wärmebrücken aus Metall

8.3.1 Einführung

Die Berechnung der Wärmeleitung von Dämmschichten, die Wärmebrücken aus Metall enthalten, kann wegen des großen Unterschieds der Wärmeleitfähigkeiten besondere Probleme bereiten.

Im folgenden Beispiel wird der Prüferferenzfall 2 der europäischen Norm EN ISO 10211-1: 1995 bei zweidimensionalem Wärmedurchgang untersucht. Die Prüferferenzfälle dienen der Validierung von genauen Verfahren für die Berechnung von Wärmebrücken.

Bild 8.37 zeigt den Bauteilquerschnitt mit einer Länge von 0,5 m und einer Breite von 0,0475 m. Es werden vier verschiedene Materialien mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,029 W/(m·K) und 230 W/(m·K) verwendet. Aufgrund der extrem unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich Berechnungsprobleme. Das Verhältnis zwischen λ_{max} und λ_{min} beträgt im vorliegenden Fall fast 1 : 8000.

Als Randbedingungen werden angenommen:

- oben Temperatur $T = 0 \text{ °C}$ mit Wärmeübergangswiderstand $R_s = 0,063 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$
- unten Temperatur $T = 20 \text{ °C}$ mit Wärmeübergangswiderstand $R_s = 0,11 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$

Seitlich befinden sich Symmetrieachsen, entlang derer der Wärmestrom gleich Null ist (adiabater Abschluß).

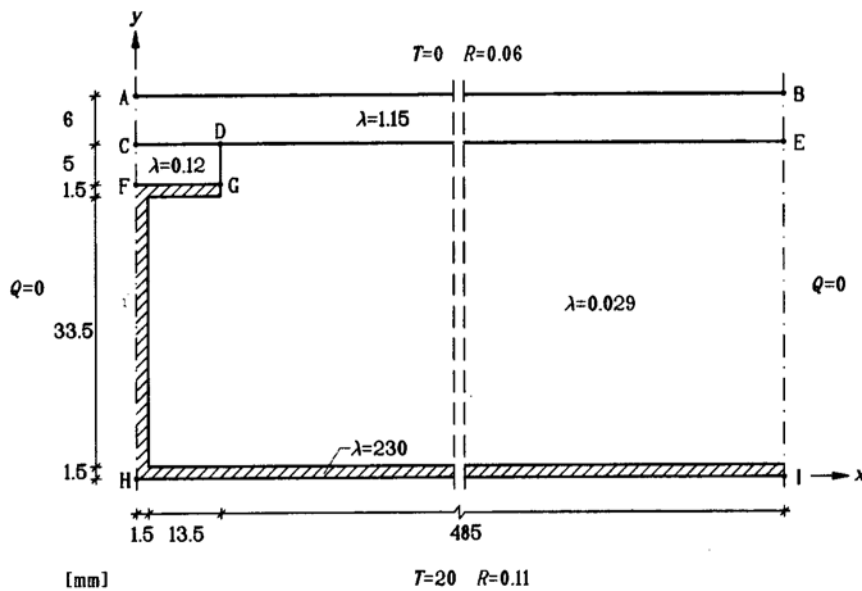


Bild 8.37: Testreferenzfall 2 nach EN ISO 10211-1.

8.3.2 Eingabe mit dem Preprozessor

Das Beispiel ist als Datei *Example 3.dat* abgespeichert. Bild 8.38 und Bild 8.39 zeigen das geometrische Modell nach der Eingabe mit dem Preprozessor. Die Materialien werden aus der Materialliste ausgewählt. Da die kleinste Länge 1,5 mm beträgt, ist es günstig einen Skalierungsfaktor von 0,5 zu verwenden (siehe Menüpunkt *Settings/Scale factor*). Damit ist es möglich, Längen von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm usw. zu zeichnen. Bild 8.40 zeigt das automatisch erstellte Berechnungsnetz mit $50 \cdot 50$ Zellen (Menüpunkt *Settings/Numerical mesh*). Es ist nur der linke Teil des Modells dargestellt. Bild 8.41 zeigt die Randbedingungen (Funktionstaste F6).

Der Wärmestrom ergibt sich bei dem verwendeten äquidistanten Berechnungsnetz zu 9,38 W/m, siehe Bild 8.42. Die Berechnung dauert etwa ein bis zwei Sekunden.

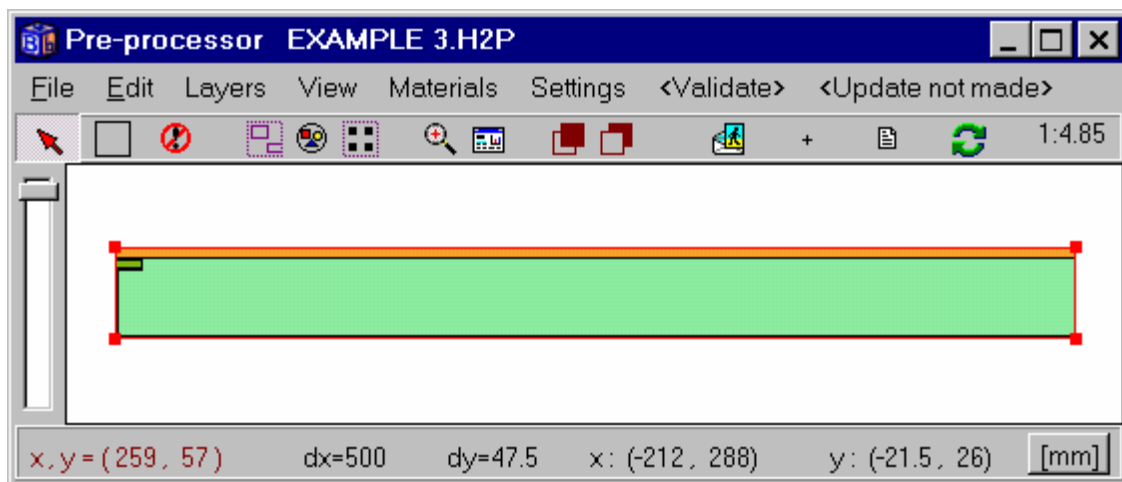


Bild 8.38: Preprozessor mit eingegebenem Beispiel.

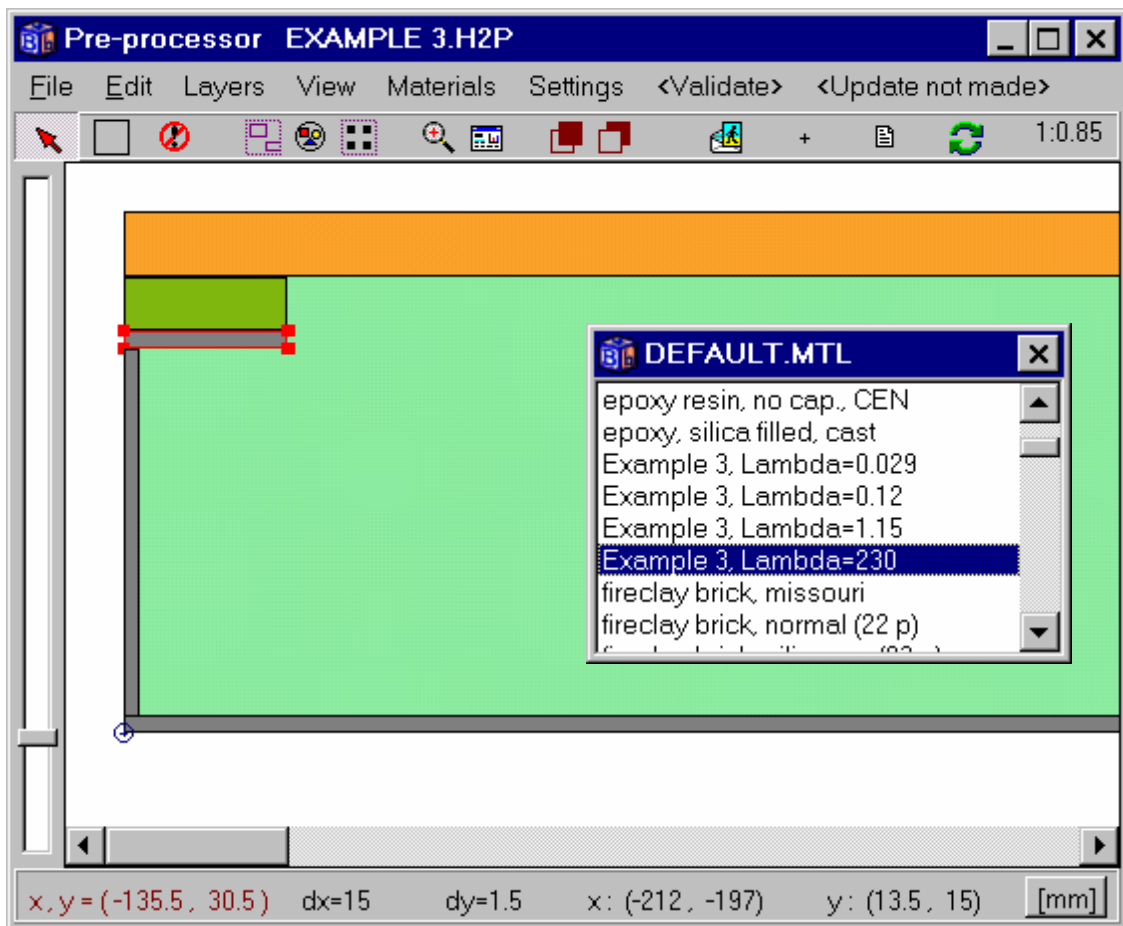


Bild 8.39: Preprozessor mit Vergrößerung des linken Teils. Die Materialliste (rechts) zeigt die verwendeten Wärmeleitfähigkeiten.

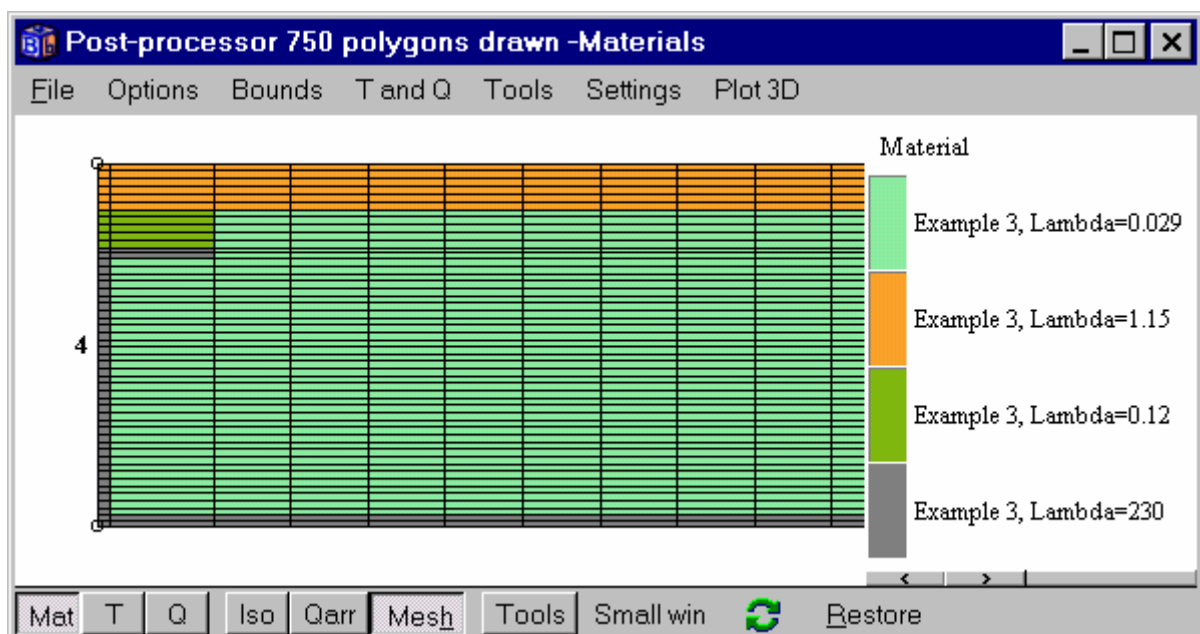


Bild 8.40: Postprozessor mit automatisch generiertem Berechnungsnetz mit $50 \cdot 50$ Zellen. Darstellung des linken Teils.

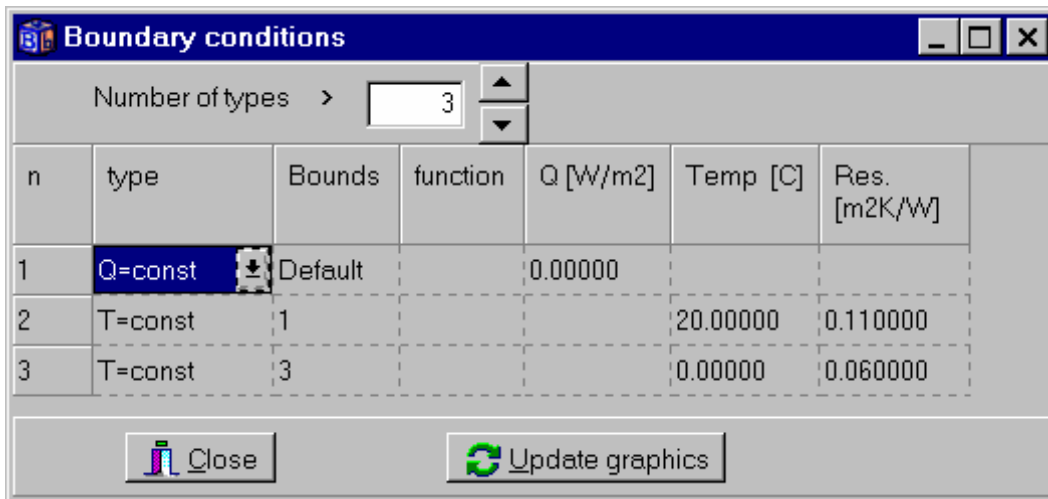


Bild 8.41: Randbedingungen.

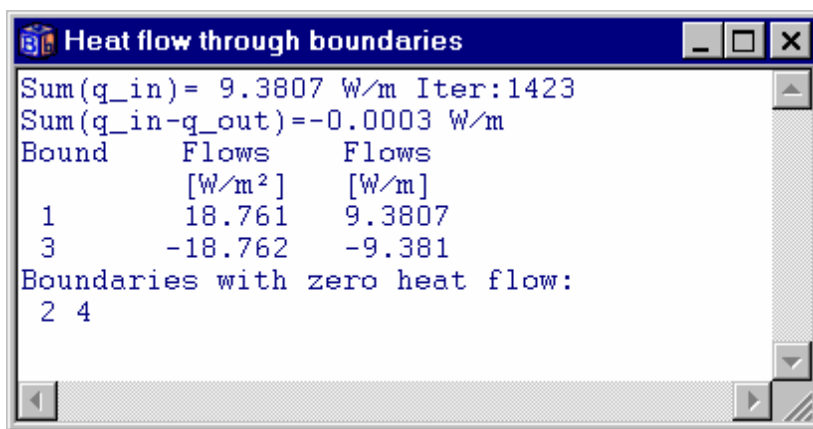


Bild 8.42: Bei Verwendung eines äquidistanten Berechnungsnetzes (50 · 50 Zellen) ergibt sich der Wärmestrom zu 9,38 W/m.

In Bild 8.43 wird das Berechnungsnetz in x-Richtung in ein expansives Raster geändert (Menüpunkt *Input/Mesh in x-dir*). Der Bereich zwischen den Koordinaten 1 und 2 wird in 15 Berechnungszellen unterteilt; zwischen den Koordinaten 2 und 3 wird ein Expansionskoeffizient von 1,08 vorgesehen. Die Änderungen führen zu kleineren Zellen in den Bereichen mit hohen Temperaturgradienten. Der Wärmestrom ergibt sich jetzt zu 9,48 W/m. Bild 8.45 zeigt das berechnete Temperaturfeld und den Isothermenverlauf. In Bild 8.46 sind die Wärmeströme dargestellt.



Bild 8.43: Änderung des automatisch generierten äquidistanten Berechnungsnetzes in ein expansives Raster (x-Richtung).

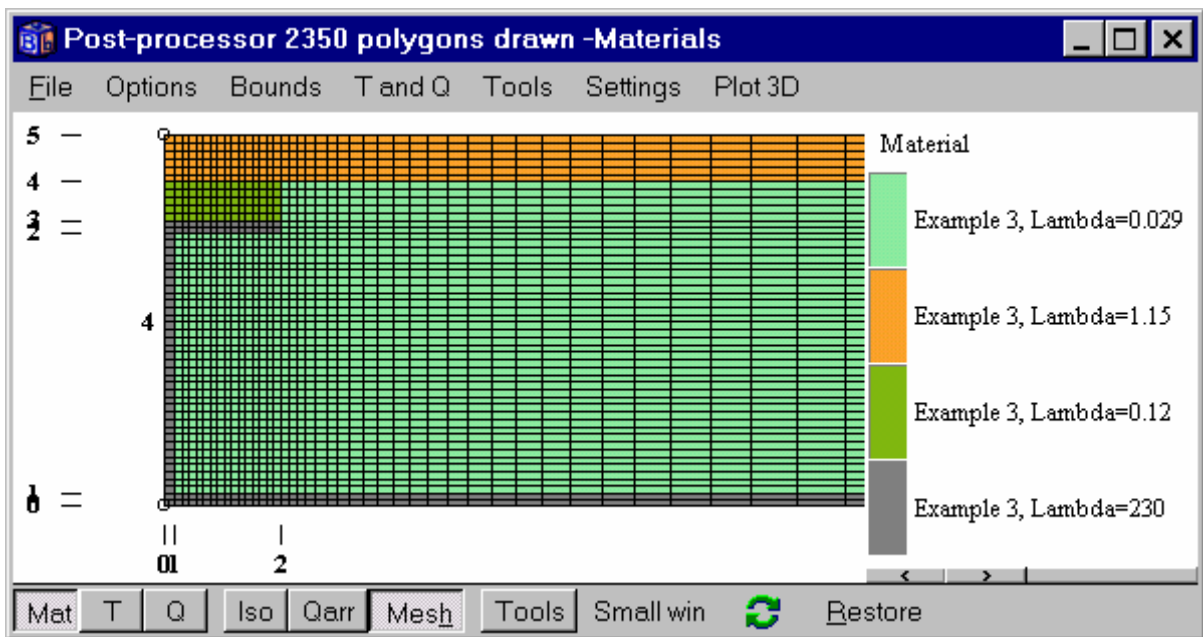


Bild 8.44: Expansives Berechnungsnetz mit kleinen Zellen in Bereichen mit hohem Temperaturgradienten. Der Wärmestrom ergibt sich zu 9,483 W/m.

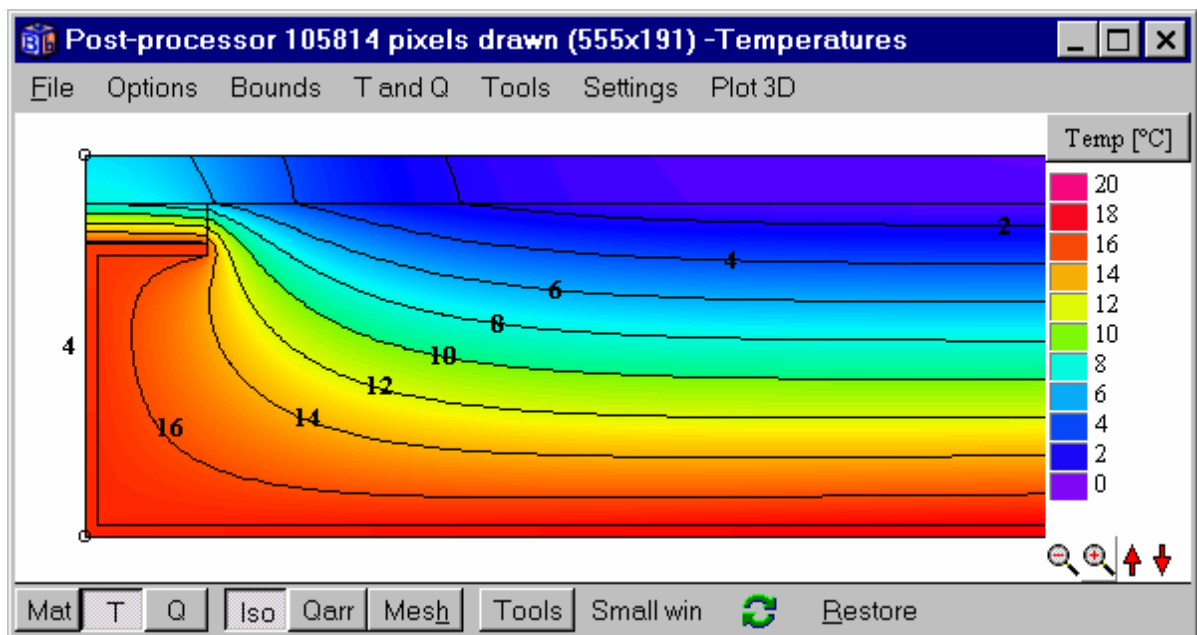


Bild 8.45: Berechnetes Temperaturfeld und Isothermenverlauf im linken Teil.

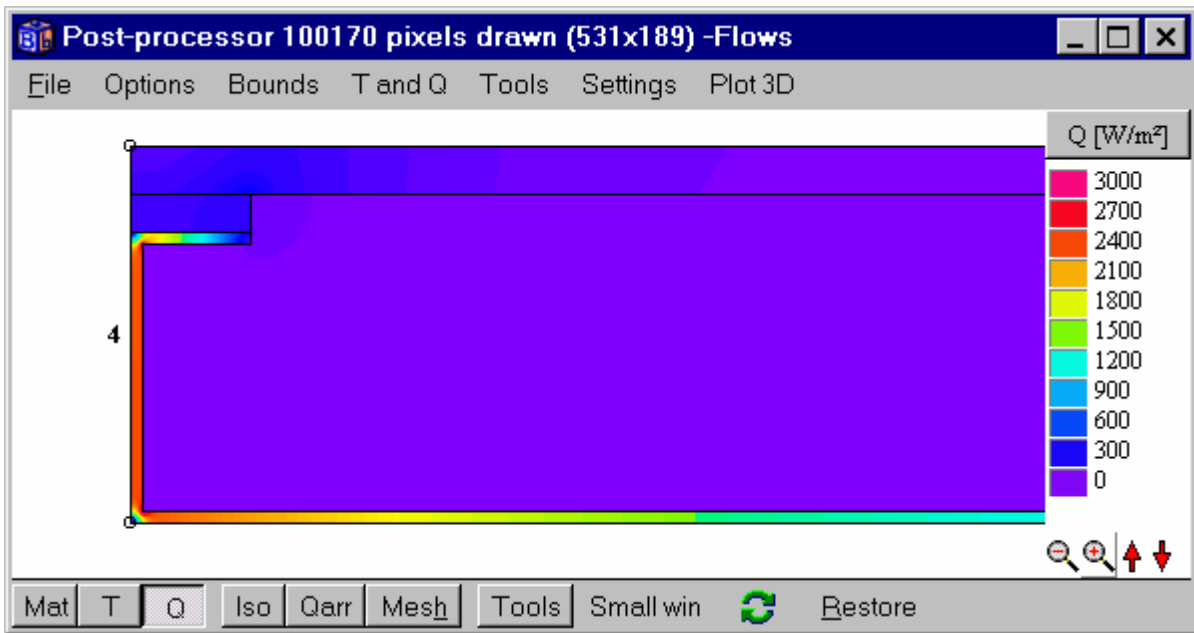


Bild 8.46: Berechnete Wärmeströme im linken Teil.

Bei Nutzung von etwa 60 000 Zellen in einem expansiven Raster ergibt sich ein Wärmestrom von 9,492 W/m. Nach EN ISO 10211-1 beträgt der Wärmestrom für den Testreferenzfall 9,5 W/m. Der Wärmestrom, der mit dem zu validierenden Berechnungsverfahren (in diesem Fall HEAT2) ermittelt wird, darf nicht um mehr als 0,1 W/m abweichen. Bei HEAT2 sind in einem expansiven Berechnungsnetz etwa 400 Zellen ausreichend, um diese Forderung zu erfüllen.

8.3.3 Alternatives Eingabenetz

Bild 8.47 zeigt ein Beispiel für ein anderes mögliches Eingabenetz. Betrachten wir das Netz in x-Richtung. Zwischen den Koordinaten 1 und 3 wurde eine zusätzliche Netzkoordinate eingefügt. Dadurch wird es möglich, in den Gebieten mit hohen Temperaturgradienten ein expansives Raster mit kleineren Zellen zu definieren, d.h. besonders um den Punkt G sowie an den Stahlteilen. In y-Richtung wurden aus dem gleichem Grund drei Koordinaten eingefügt (Koordinaten 2, 5 und 7).

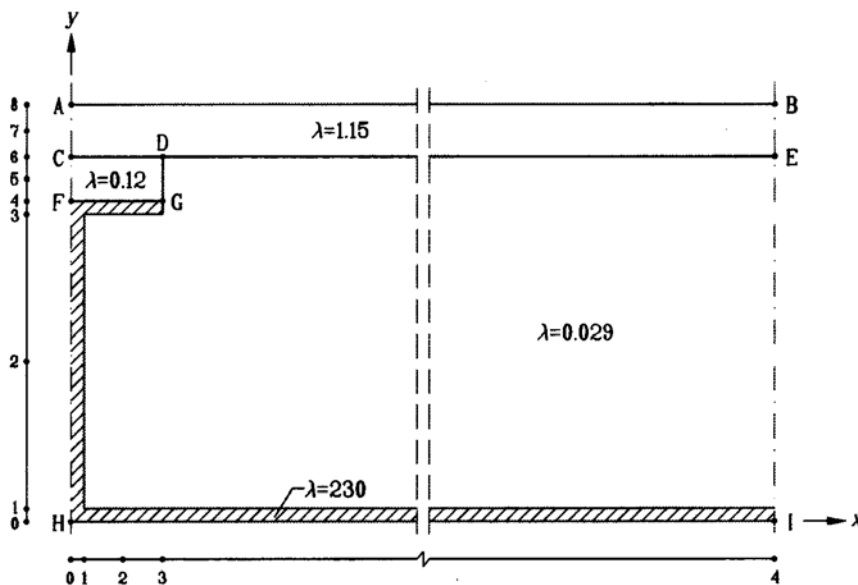


Bild 8.47: Beispiel für ein günstiges Eingaberaster mit zusätzlichen Koordinaten.

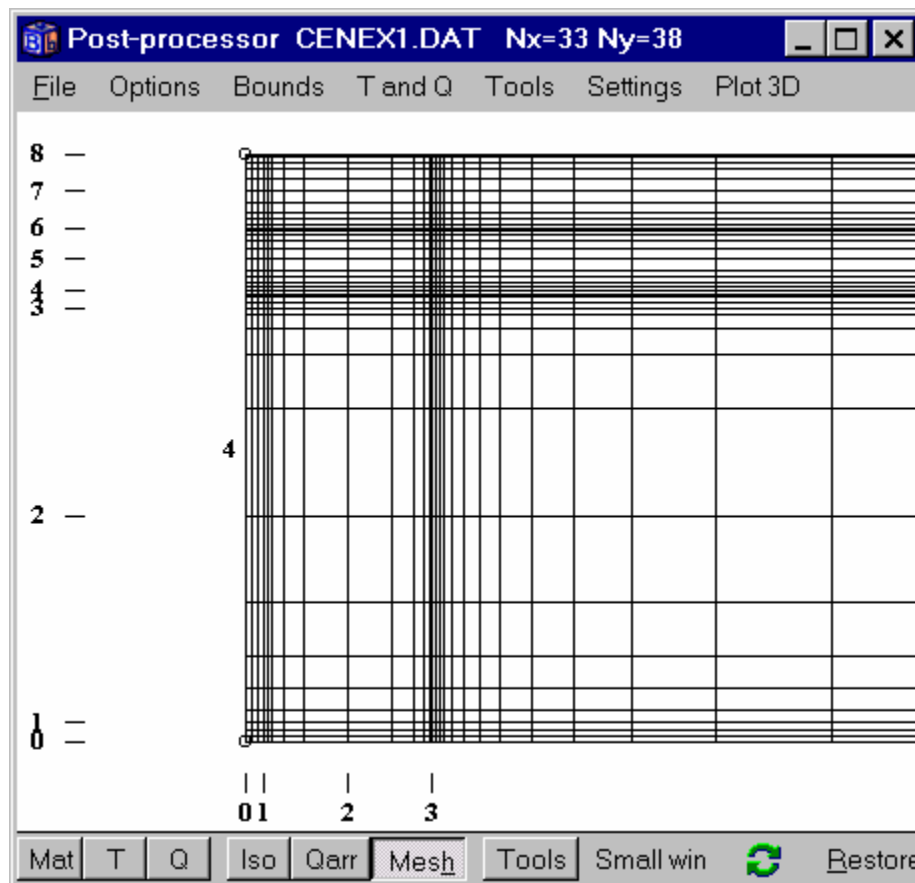


Bild 8.48: Darstellung des expansiven Netzes (linker Teil) im Postprozessor (insgesamt 1254 Zellen).

8.3.4 Berechnung für verschiedene Raster

Tabelle 8:1 zeigt die berechneten Wärmeströme für sechs unterschiedliche expansive Berechnungsraster sowie die erforderliche Rechenzeit auf einem PC mit Pentium II-Prozessor (450 MHz). Der angegebene Fehler des Wärmestroms ε ist auf den letzten Berechnungsfall bezogen. Ein ausreichend geringer Fehler von 0,1% wird ab etwa 1200 Zellen erreicht. Die Berechnungszeit beträgt für diesen Fall ca. 2 Sekunden (etwa 5000 Iterationen). Im letzten Fall mit 56880 Zellen ist die Berechnungszeit wegen der geringen Zellengröße (kleinsten Zellen nur etwa 10^{-5} m) bzw. der hohen Zellenanzahl bereits relativ lang.

Die letzte Spalte der Tabelle zeigt die empfohlenen Relaxationskoeffizienten ω . Die Rechenzeit ist bei diesem Beispiel stark von den Relaxationskoeffizienten abhängig. Betrachten wir den Fall mit 1254 Zellen, siehe Bild 8.48. Bei $\omega=1,995$ ergibt sich eine Rechenzeit von 2 Sekunden. Bei $\omega=1,95$ (Standardwert) erhöht sich die Berechnungszeit auf etwa 20 Sekunden. Ein günstiger Relaxationskoeffizient kann folgendermaßen ausgewählt werden: Betrachten Sie die Veränderungen des Wärmestroms über die Oberflächen nach einigen hundert Iterationen für verschiedene Werte von ω . Wählen Sie den Koeffizienten aus, bei dem der Wert am schnellsten konvergiert. Beachten Sie, daß der optimale ω -Wert normalerweise bei einem engeren Raster ansteigt. Bei Berechnungsfällen mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, wie im betrachteten Beispiel, nähert sich der Wert 2 an.

Zellen	Q [W/m]	ε [%]	CPU-Zeit	Iterationen	ω_{optimal}
32	8,541	11	1 Sek.	1900	-
72	9,382	1,2	1 Sek.	-	-
374	9,456	0,4	1 Sek.	-	-
1254	9,479	0,1	2 Sek.	4600	1,995
5016	9,490	0,02	8 Sek.	5000	2,0
56880	9,492	-	45 Min.	100000	2,0

Tabelle 8:1: Ermittelte Wärmeströme bei verschiedene Berechnungsrastern.

Tabelle 8:2 zeigt die mit HEAT2 berechneten Oberflächentemperaturen an ausgewählten Punkten für Fälle mit 1254 bzw. 5016 Zellen. Gemäß EN ISO 10211-1 darf der Unterschied zwischen den Ergebnissen des zu validierenden Berechnungsverfahrens und den in der letzten Spalte aufgelisteten Werten 0,1 °C nicht überschreiten. Bei 1254 Zellen werden die angegebenen Werte mit Ausnahme von Punkt G bei allen Punkten exakt erreicht, siehe Bild 8.37. Bei Punkt G sind die Temperaturgradienten sehr hoch und erschweren die Interpolation. Um die Anforderungen nach EN ISO 10211-1 zu erfüllen, werden etwa 4000 Zellen benötigt. Bild 8.49 zeigt den berechneten Isothermenverlauf für den linken Teil des Beispiels.

Punkt	(x,y)	N=1254	N=5016	EN ISO
A	(0; 0,0475)	7,1	7,1	7,1
B	(0,5; 0,0475)	0,8	0,8	0,8
C	(0; 0,0415)	7,9	7,9	7,9
D	(0,015; 0,0415)	6,3	6,3	6,3
E	(0,5; 0,0415)	0,8	0,8	0,8
F	(0; 0,0365)	16,4	16,4	16,4
G	(0,015; 0,0365)	16,1	16,3	16,3
H	(0; 0)	16,8	16,8	16,8
I	(0,5; 0)	18,3	18,3	18,3

Tabelle 8:2: Berechnete Oberflächentemperaturen [°C].

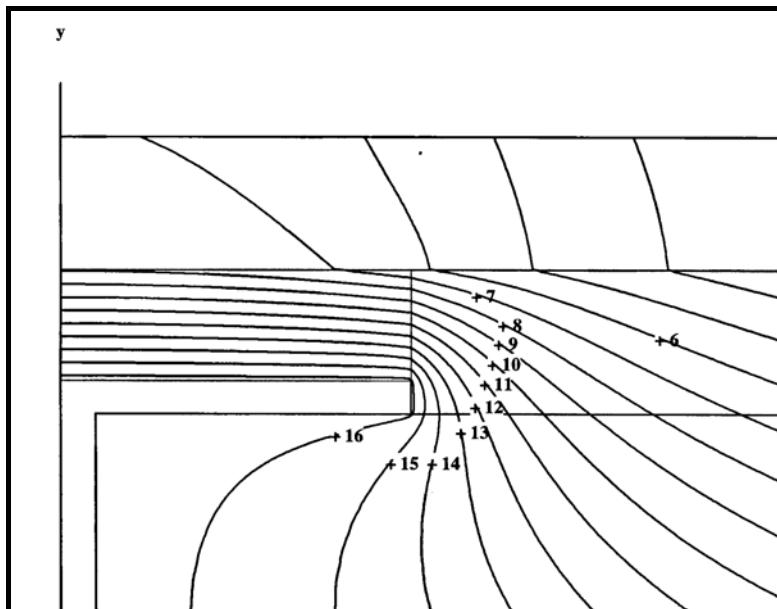


Bild 8.49: Isothermen im linken Teil des Beispiels.

8.3.5 Schlußfolgerungen

Der Testreferenzfall ist wegen der extrem unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten (Verhältnis 1 : 8000) ein relativ schwieriges Berechnungsproblem. Die Konvergenzrate für dieses Problem hängt stark vom gewählten Relaxationskoeffizienten ab.

Die großen Temperaturgradienten erschweren die Interpolation der Temperaturen, insbesondere am Punkt G. Es wird deshalb die Verwendung eines expansiven Berechnungsnetzes mit hoher Netzdichte in der Umgebung des Metalls empfohlen. HEAT2 benötigt etwa 4000 Zellen, um die Genauigkeitsanforderungen nach EN ISO 10211-1 für die Temperaturen zu erfüllen. Um die Anforderungen für die Wärmeströme zu erfüllen, sind nur etwa 400 Berechnungszellen erforderlich.

8.4 Beispiel - Dachsegment aus Hohlziegeln

8.4.1 Einführung

Am Beispiel eines gemauerten italienischen Ziegeldachs soll die Strahlung innerhalb von Hohlräumen veranschaulicht werden. Die Konstruktion besteht aus großen, gelochten Leichtziegeln. Jeder Stein hat 16 in einem rechtwinkligen Raster angeordnete Hohlräume. Bild 8.50 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Materialien. Es soll eine stationäre Berechnung durchgeführt werden.

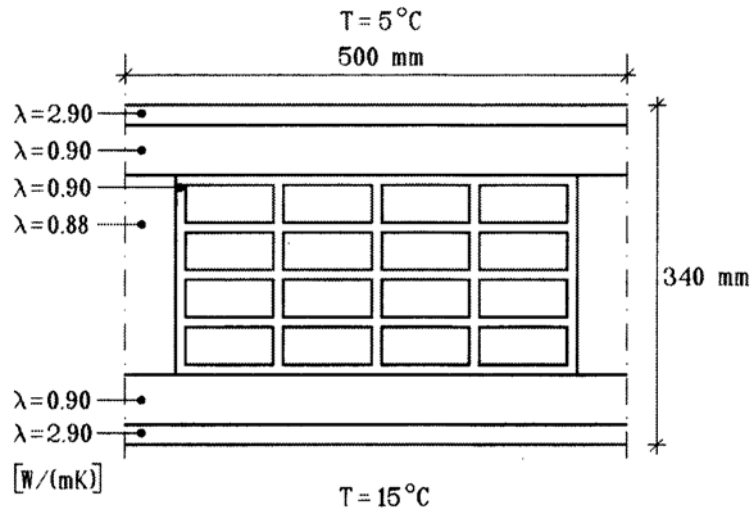


Bild 8.50: Betrachteter Ausschnitt des Hohlziegeldachs mit 16 Hohlräumen.

Die Außentemperatur beträgt 5 °C und die Temperatur unter dem Dach 15 °C . Die Wärmeübergangswiderstände werden sowohl außen als auch innen mit $R_s = 0,1\text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ angenommen. Die vertikalen Seitenflächen (Schnittebenen) sind adiabatisch.

Alle Hohlräume sind nicht belüftet ($K_v = 0$). Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c werden gleich $1,0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ gesetzt. Der Wert entspricht der nach empirischen Zusammenhängen (Kreith et al, 1986) zu erwartenden Größenordnung. Der Emissionsgrad ε beträgt für alle Oberflächen $0,9$. Die Temperaturen in den Hohlräumen liegen bei den gegebenen Randbedingungen zwischen 5 °C und 15 °C . Die Höhe der Temperatur T_{so} , siehe Kapitel 9, wird daher für alle 16 Hohlräume gleich 10 °C gesetzt.

8.4.2 Im Preprozessor gezeichnete Geometrie

Das Beispiel ist als Eingabedatei *Example 4.dat* abgespeichert, siehe Bild 8.51. Alle Hohlräume wurden als interne Modifikationen eingegeben. Sie werden automatisch fortlaufend nummeriert und mit einer weiteren Zahl als Verweis auf die Art der Modifikation gekennzeichnet (in diesem Fall 7 für Modifikation G), siehe Bild 8.52. Bild 8.53 zeigt die Eingabedaten für die Modifikation *G Hole with air (radiation+vent.)*.

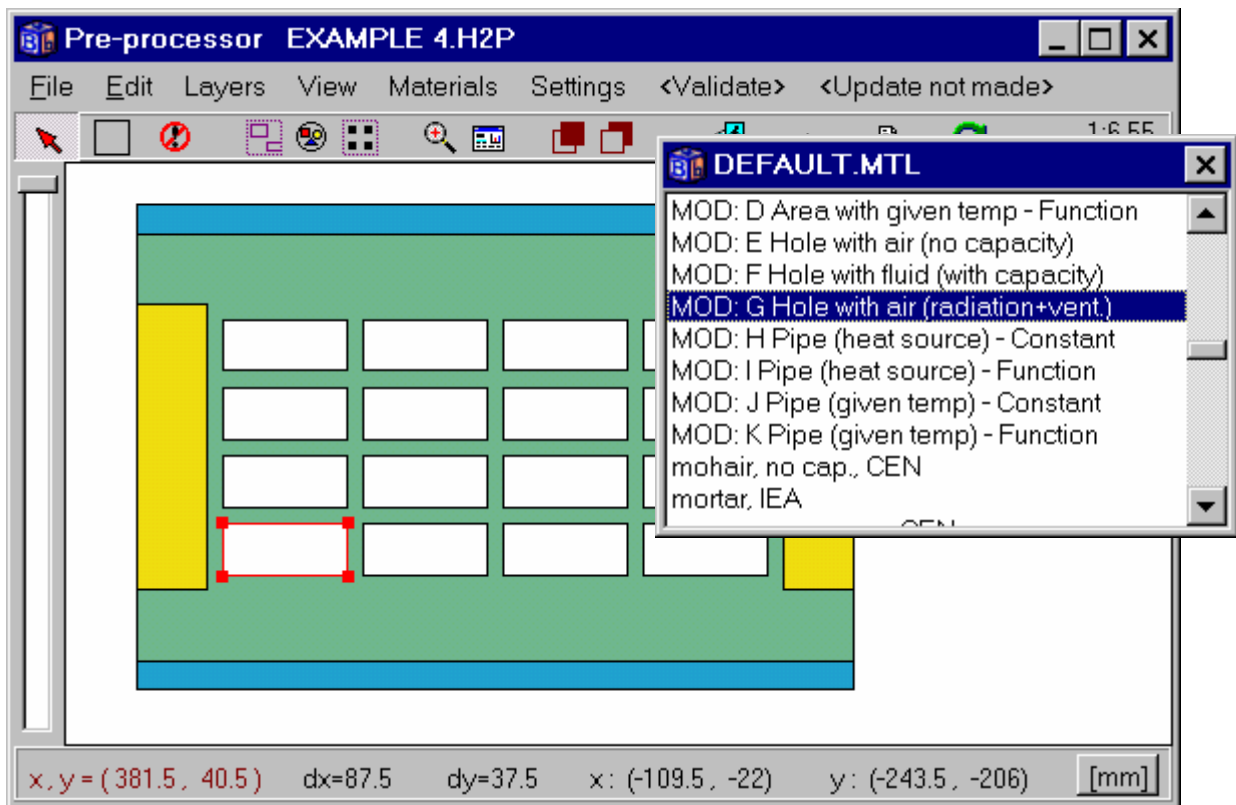


Bild 8.51: Im Preprozessor gezeichnetes geometrisches Modell.

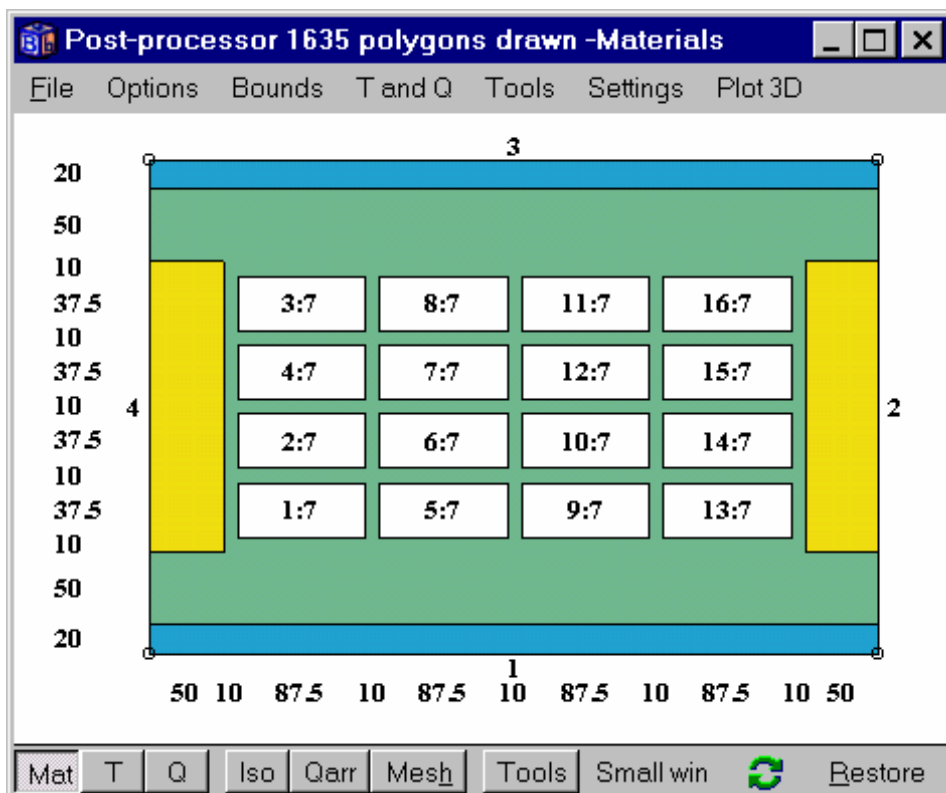


Bild 8.52: Jedes Modifikationsgebiet erhält neben der fortlaufenden Numerierung eine Zahl als Verweis auf die Art (Typ) der Modifikation.

Hole with air - radiation and ventilation [X]

Ventilation temperature:

Constant temperature [°C]:

Function T(t):

Temp at point x,y:

Gas heat capacity [kJ/(m³·K)]

Ventilation rate [h⁻¹]

Emissivity at lower side [-]

Emissivity at right side [-]

Emissivity at upper side [-]

Emissivity at left side [-]

Conv. coeff. lower side [W/(m²·K)]

Conv. coeff. right side [W/(m²·K)]

Conv. coeff. upper side [W/(m²·K)]

Conv. coeff. left side [W/(m²·K)]

Reference temperature °C

Order of approximation (1-5)
(this will be used for all areas with radiation)

Show matrices in info log


 Close

Bild 8.53: Eingabedaten für Modifikation G Hohlraum mit Luft (mit Strahlung und Belüftung).

8.4.3 Ergebnisse für verschiedene Berechnungsraster

Bei 1635 Berechnungszellen in einem äquidistanten Raster ergibt sich ein Wärmestrom von 5,936 W/m.

Um den Rechenfehler einschätzen zu können, wurde das Beispiel auch mit anderen Berechnungsrastern untersucht. Bild 8.54 zeigt eines der feineren Raster. Die Anzahl der Rechenzellen beträgt hier 3860. Jeder Hohlraum hat $N_R = 40$ Oberflächenelemente.

Tabelle 8:3 zeigt den berechneten Wärmestrom [W/m] durch das Mauerziegeldach für 5 unterschiedliche Berechnungsnetze. Bei der Berechnung des Strahlungswärmeaustausches wurde der zweite Approximationsgrad gewählt, siehe Abschnitt 9.4.1. Ein höherer Approximationsgrad würde bei dem betrachteten Beispiel zu den gleichen Ergebnissen führen und ist daher nicht erforderlich. Für den Berechnungsfall mit der feinsten Unterteilung und 15440 Zellen sowie 80 Strahlungselementen in jedem Hohlraum ist von einem sehr geringen Rechenfehler auszugehen. Die Abweichung des berechneten Wärmestroms vom Ergebnis dieser Variante beträgt bei 1412 Zellen 2,1 % und bei 3860 Zellen 0,3 %. Sogar im Fall von nur 127 Zellen und 4 Strahlungselementen (kleinstmögliches Raster ohne zusätzliche Unterteilung des Eingabernetzes) erweist sich der Fehler als relativ klein (2,6 %). Die letzte Tabellenspalte zeigt die ungefähre Berechnungszeit auf einem PC mit Pentium II-Prozessor (450 MHz).

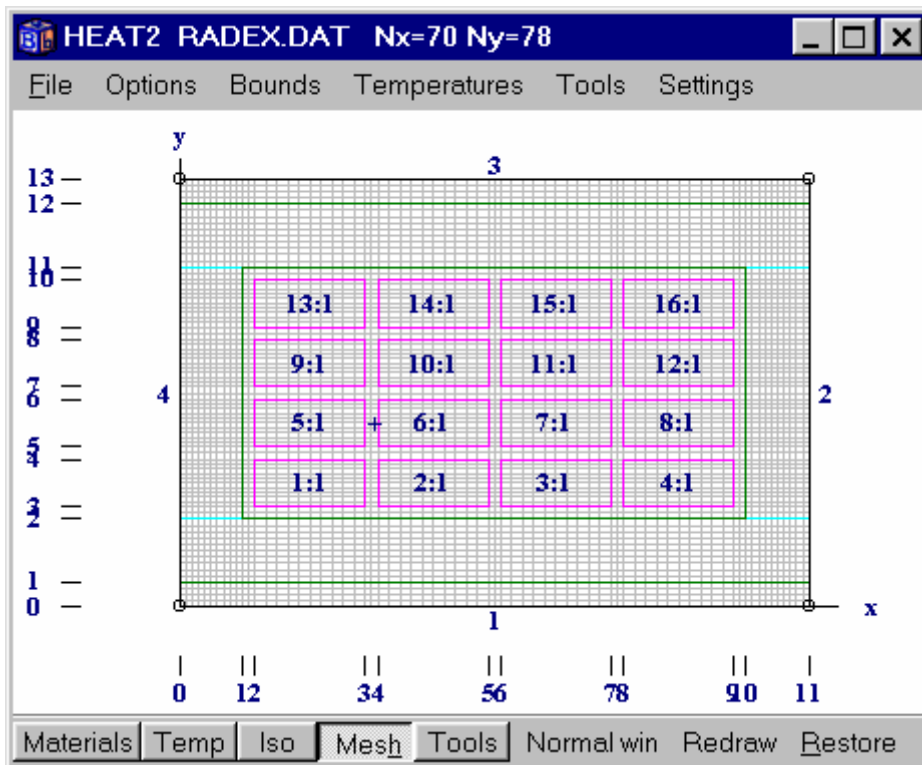


Bild 8.54: Berechnungsnetz mit 3860 Rechenzellen und 16 Hohlräumen mit Strahlungswärmeaustausch ($N_R = 40$).

Bild 8.55 zeigt das Berechnungsfenster und die ermittelten Wärmeströme an den Randsegmenten. In Bild 8.56 ist der berechneten Isothermenverlauf dargestellt. Die Bild 8.57 bis Bild 8.59 zeigen die Wärmestromdichte sowie die Lufttemperaturen und Wärmeströme im Bereich der 16 Hohlräume.

Zellen	N_R	Wärmestrom [W/m]	Fehler [%]	Iterationen	CPU-Zeit
127	4	5,822	2.6	900	1 Sek.
1412	4	5,849	2.1		
1684	8	5,915	1.0		
3860	40	5,960	0.3	1500	23 Sek.
15440	80	5,976	-	3300	3,5 Min.

Tabelle 8.3: Wärmestrom, Fehler, Iterationen und CPU-Zeit für vier verschiedene Raster.

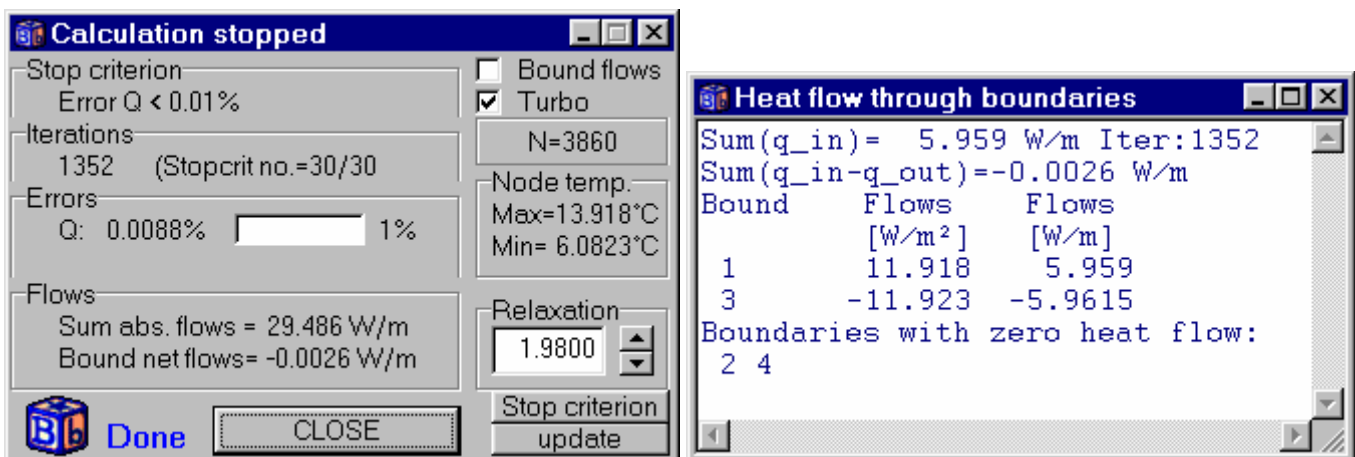


Bild 8.55: Berechnungsfenster (links) und ermittelte Wärmeströme über die Detailränder (rechts).

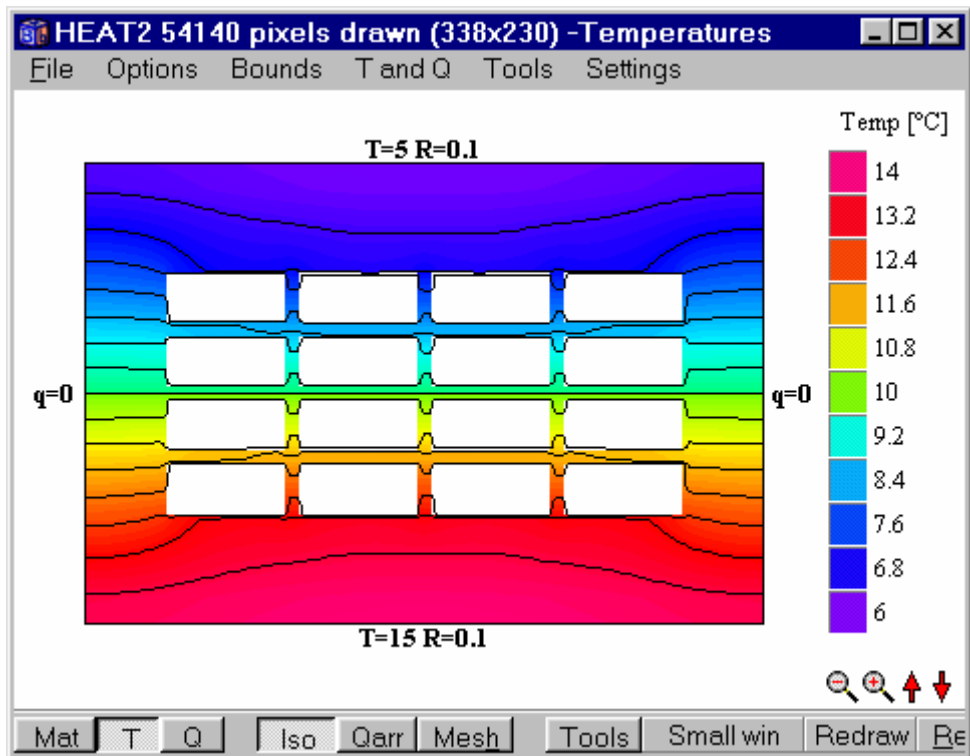


Bild 8.56: Berechneter Isothermenverlauf mit einem Abstand von 0,8 K.

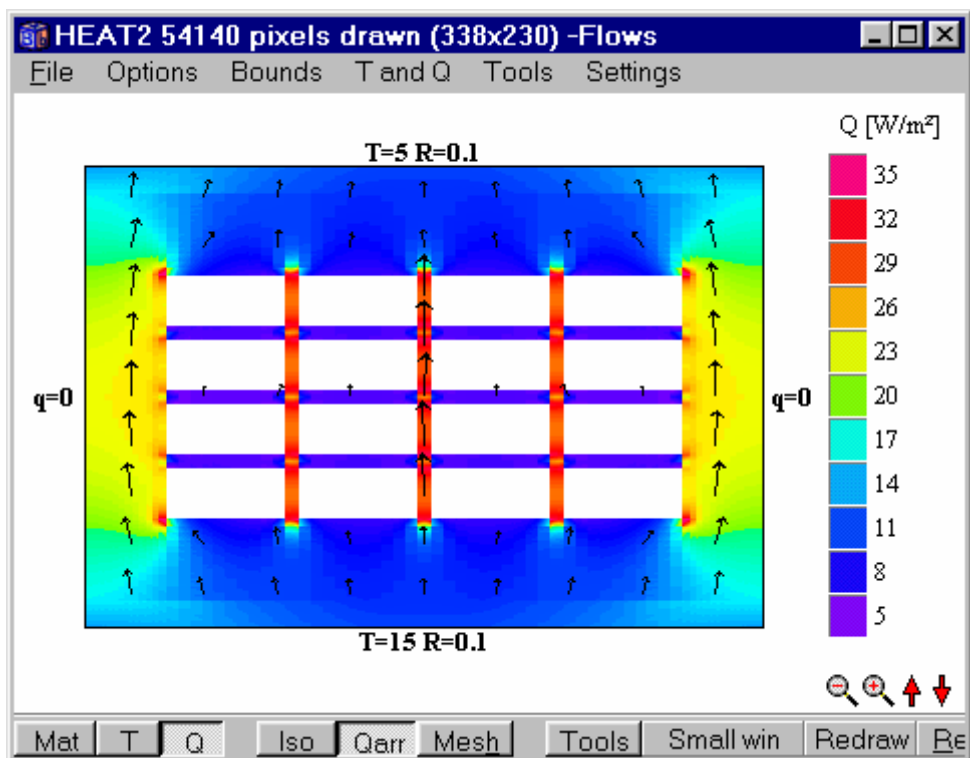


Bild 8.57: Berechnete Wärmestromdichten.

Areas with radiation

Summary Details for area:

Number of areas with radiation: 16

Area	Ta [°C]	Kv [W/K]	Vol [m³]	Nr
1	12.23	0	0.0033	40
2	12.408	0	0.0033	40
3	12.408	0	0.0033	40
4	12.23	0	0.0033	40
5	10.743	0	0.0033	40
6	10.813	0	0.0033	40
7	10.813	0	0.0033	40
8	10.743	0	0.0033	40
9	9.292	0	0.0033	40
10	9.2323	0	0.0033	40
11	9.2323	0	0.0033	40
12	9.292	0	0.0033	40
13	7.7856	0	0.0033	40
14	7.6102	0	0.0033	40
15	7.6102	0	0.0033	40
16	7.7856	0	0.0033	40

Bild 8.58: Lufttemperaturen in allen 16 Hohlräumen.

Heat flow for areas with internal modification

[W/m] [W/m²] (values positive out from area)

Area	lower, [W/m]	right, [W/m]	upper, [W/m]	left, [W/m]	total [W/m]
1	-0.5573	-0.0176	0.5237	0.0512	0
2	-0.5743	0.003	0.555	0.0163	0
3	-0.5743	0.0163	0.555	0.003	0
4	-0.5573	0.0512	0.5237	-0.0176	0
5	-0.4975	-0.0083	0.4928	0.0129	0
6	-0.5393	-0.0012	0.5364	0.0041	0
7	-0.5393	0.0041	0.5364	-0.0012	0
8	-0.4975	0.0129	0.4928	-0.0083	0
9	-0.4929	0.0082	0.4975	-0.0129	0
10	-0.5365	0.0012	0.5394	-0.0041	0
11	-0.5365	-0.0041	0.5394	0.0012	0
12	-0.4929	-0.0129	0.4975	0.0082	0
13	-0.5239	0.0176	0.5575	-0.0512	0
14	-0.5553	-0.003	0.5746	-0.0163	0
15	-0.5553	-0.0163	0.5746	-0.003	0
16	-0.5239	-0.0512	0.5575	0.0176	0

All areas: sum of positive flows= 8.7829 [W/m]
 All areas: sum of absolute flows= 17.566 [W/m]
 All areas: net flow= 0 [W/m]

Bild 8.59: Wärmeströme durch die Begrenzungsflächen der 16 Hohlräume.

8.4.4 Wahl der Referenztemperatur T_{so} und der Konvergenzrate

Die Höhe der Temperaturniveaus T_{so} (Referenztemperatur) für des Linearisierungsverfahren kann willkürlich gewählt werden. Die Auswahl hat jedoch Einfluß auf die Konvergenzrate des Iterationsprozesses. Tabelle 8:4 zeigt den berechneten Wärmestrom für mehrere Iterationsschritte (1. bis 4. Approximationsgrad) bei einem Berechnungsnetz mit 3860 Zellen und $N_R = 40$.

Iterations- schritt	$T_{so} [^{\circ}\text{C}]$					
	10	5	15	0	-80	100
1	5,959	5,897	5,898	5,836	5,030	7,192
2	5,960	5,960	5,960	5,960	5,970	5,996
3					5,959	5,961
4					5,960	5,960

Tabelle 8:4: Berechnete Wärmeströme [W/m] für ein Raster mit 3860 Rechenzellen und $N_R = 40$.

Tabelle 8:4 zeigt, daß die Wahl von T_{so} keinen großen Einfluß auf das Berechnungsergebnis hat. Dies gilt insbesondere bei höheren Approximationsgraden. Wird T_{so} auf den Wert der Umgebungstemperaturen gesetzt, hier 5 °C oder 15 °C, beträgt der Fehler im Falle einer linearen Näherung (erste Approximation) nur etwa ein Prozent. Selbst bei extremen Temperaturen wie $T_{so} = -80$ oder $T_{so} = 100$ °C sind nur drei Iterationen erforderlich, um eine dreistellige Genauigkeit zu erhalten.

Bei höheren Approximationsgraden dauern die Berechnungen etwas länger. Für die meisten bauphysikalischen Anwendungen dürfte eine lineare Näherung ausreichend sein. In Zweifelsfällen können zwei Iterationen durchgeführt werden.

Beachten Sie, daß es aufgrund der Symmetrie ausreichend gewesen wäre, nur die Hälfte des Problems zu betrachten (*vertikale* Symmetrieachse in der Mitte). In *y*-Richtung ist zwar die Geometrie ebenfalls symmetrisch, nicht jedoch die Randbedingungen. Aus diesem Grund kann keine *horizontale* Symmetrieachse berücksichtigt werden.

8.4.5 Schlußfolgerungen

Am Beispiel eines Daches aus Lochziegeln wurde das Berechnungsverfahren für Bauteile mit Hohlräumen dargestellt. Bei einem Modell mit etwa 1700 Knoten und 8 Teiloberflächen in jedem Hohlraum beträgt die Abweichung vom genauen Ergebnis etwa ein Prozent und die Berechnung dauert nur wenige Sekunden. Im vorliegenden Fall ist bei der Ermittlung des Strahlungswärmeaustauschs eine lineare Approximation (bzw. nur ein Iterationsschritt) ausreichend.

Die Wahl der Referenztemperatur in den Hohlräumen T_{so} hat nur Einfluß auf die erforderliche Anzahl der Iterationsschritte. Es wurde nachgewiesen, daß lediglich bei sehr extremen Temperaturannahmen mehr als eine Iteration erforderlich ist.

9. Strahlungswärmeaustausch und Belüftung in Hohlräumen

9.1 Einführung

Wärmeübertragung in festen Bauteilen gekoppelt mit langwelliger Wärmestrahlung in luftgefüllten Hohlräumen ist ein in der Bauphysik häufig auftretender und untersuchter Vorgang. Typische Beispiele sind z.B. Kriechgänge, Glaszwischenräume bei Fenstern, Lochungen in Mauerziegeln oder Lufträume in Wänden, Dächern oder Fußböden. Der Hohlraum kann auch belüftet sein.

In den letzten Jahren wurden schnelle und ausreichend genaue Algorithmen für die Berechnung des Strahlungswärmeaustauschs (bei grauer, diffuser Strahlung) in rechteckigen Hohlräumen entwickelt. Die Theorie für die in diesem Abschnitt beschriebene Methode ist in (Blomberg, 1996) dargestellt.

9.2 Eingabedaten

Bild 9.1 zeigt einen Hohlraum. Die vier Randflächen sind durch ihren Emissionsgrad ε und den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c gekennzeichnet. Das Gas im Hohlraum (z.B. Luft oder Krypton) hat eine volumenbezogene Wärmekapazität C [$J/(m^3 \cdot K)$], die sich aus dem Produkt von Dichte und spezifischer Wärmekapazität ($C = \rho \cdot c_p$) ergibt. Der Hohlraum kann belüftet sein. Als Eingabedaten bei belüfteten Hohlräumen sind die Einlaßtemperatur T_v und die Luftwechselrate n (h^{-1}) erforderlich. In den meisten Fällen wird der Hohlraum nicht belüftet sein ($n = 0$).

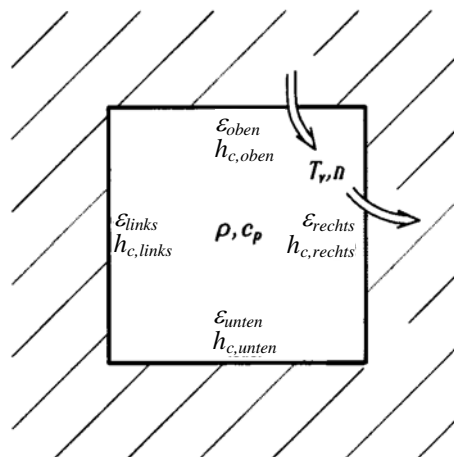


Bild 9.1: Eingabeparameter für die Berücksichtigung von Strahlungswärmeaustausch und Belüftung innerhalb von Hohlräumen.

Jeder Hohlraum wird im Preprozessor als interne Modifikation [*MOD: G Hole with air (radiation+vent.)*] definiert. Die Anzahl der Oberflächenelemente N_R , für die der Strahlungswärmeaustausch berechnet wird, ergibt sich aus dem verwendeten Berechnungsnetz. Bild 9.2 zeigt die "Minimalvariante" mit einem Oberflächenelement an jeder Seite. Der Hohlraum besteht aus einer Zelle. Die vier Oberflächenelemente haben die Temperaturen T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} und T_{s4} . Bild 9.3 zeigt zwei weitere Beispiele: links einen Hohlraum mit $2 \cdot 3$ Zellen ($N_R = 10$) und rechts mit $10 \cdot 10$ Zellen ($N_R = 40$). Die höchstzulässige Anzahl von Oberflächenelementen beträgt $N_R = 250$. Vor einer Berechnung wird von HEAT2 automatisch geprüft, ob dieses Limit eingehalten wurde.

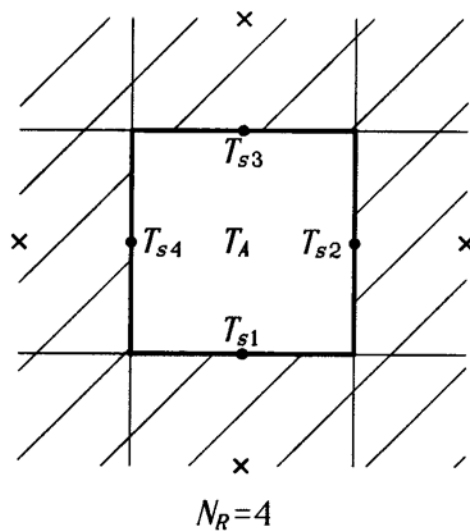


Bild 9.2: Vier Oberflächenelemente (Strahlungselemente) in einem Hohlraum.

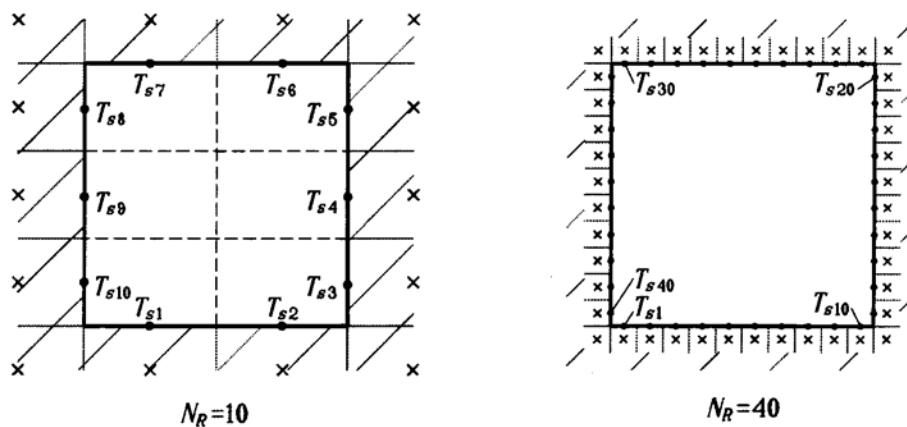


Bild 9.3: Die Anzahl der Strahlungselemente N_R ergibt sich durch das Berechnungsnetz.

Das Programm kann bis zu 20 Hohlräume mit Strahlungswärmeaustausch berücksichtigen. Jeder Hohlraum hat einen eigenen Datensatz (mit ε und h_c an den vier Seiten, T_v , n und C). Weitere Informationen zur Eingabe finden Sie in Abschnitt 5.8.2.

9.3 Ausgabedaten

Über den Menüpunkt *Output/Areas with radiation* können für jeden Hohlraum folgende Ergebnisse ausgegeben werden: berechnete Oberflächentemperaturen T_{sj} [°C] für alle Strahlungselemente $j = 1 \dots N_R$ (siehe Bild 9.4), Temperaturen T_{bj} [°C] der an den Hohlraum angrenzenden Materialzellen, Wärmeleitwerte K_{bj} [W/K] zwischen der Mitte des Hohlräume und den Oberflächen der angrenzenden Zellen, Wärmeströme q_{bj} [W/m] und die Luft- bzw. Gastemperatur T_a [°C]. Weiterhin werden das Volumen des Hohlräume pro laufenden Meter [m³/m], die Anzahl der Strahlungselemente N_R und der Belüftungsleitwert (Konvektanz) K_v [W/K] dargestellt. Für nähere Informationen siehe (Blomberg, 1996).

Über den Menüpunkt *Output/Internal flows* werden die internen Wärmeströme durch die vier Seiten der einzelnen Hohlräume in [W/m] und [W/m²] ausgegeben.

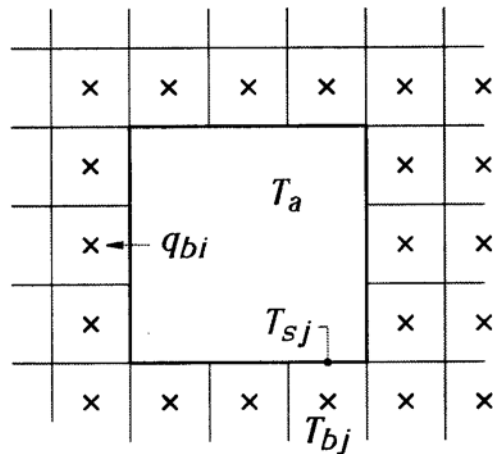


Bild 9.4: Berechnungsergebnisse für Hohlräume mit Strahlungswärmeaustausch.

9.4 Numerische Berechnung für den Hohlraum

Die Methode zur Lösung der Wärmebilanzgleichungen des Hohlraums ist in (Blomberg, 1996) dargestellt. Es müssen mehrere Gleichungssysteme berücksichtigt werden. Das erste Gleichungssystem ist die Wärmebilanzgleichung für das Gas im Hohlraum. Das zweite Gleichungssystem betrifft die Bilanz der Oberflächentemperaturen und das dritte die Strahlungswärmebilanz [siehe auch (Holman, 1986)]:

$$\frac{\varepsilon_i A_i}{1 - \varepsilon_i} \cdot (\sigma \tilde{T}_{si}^4 - J_i) = \sum_{j=1}^N A_j F_{ij} (J_j - J_i) \quad i = 1, \dots, N_R \quad (5.1)$$

J_i [W/m²] bezeichnet die Strahlungswärmestromdichte des Oberflächenelements i , d.h. die Gesamtstrahlung, die die Oberfläche i pro Flächeneinheit und Zeiteinheit emittiert. Der Emissionsgrad der grauen, diffusen Oberfläche i wird mit ε_i bezeichnet, σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante. Das Tilde-Zeichen \sim über der Oberflächentemperatur T_{si} steht für eine Temperaturangabe in Kelvin. Die Einstrahlzahlen werden mit F_{ij} bezeichnet.

9.4.1 Strahlungsgleichungen in Temperaturform

Um eine alleinige Temperaturabhängigkeit zu erreichen, werden die Strahlungsbilanzgleichungen umformuliert. Die Temperaturen werden auf ein passendes Temperaturniveau \tilde{T}_{so} linearisiert, siehe (Blomberg, 1996). Bei bauphysikalischen Anwendungen (mit Ausnahme von Brandsimulationen) variieren die Oberflächentemperaturen T_{si} nur in einem vergleichsweise kleinen Bereich. Die Unterschiede $T_{si} - T_{so}$ (und $T_{sj} - T_{so}$) sind im Vergleich zu \tilde{T}_{so} klein. Die Linearisierung führt in diesem Fall nur zu einem relativ geringen Fehler.

HEAT2 kann die Berechnungen unter Verwendung einer lineare Approximation (Näherung) oder eines höheren Approximationsgrades durchführen. Die Einstellung erfolgt im Menüpunkt *Input/Modifikations-types* unter *Data*, Modifikation *Hole with air (radiation+vent.)*, *Order of approximation*. Die Einstellung "1" steht für lineare Approximation, "2" für zweiten Approximationsgrad u.s.w. Der höchste mögliche Approximationsgrad ist "5". Bei höheren Approximationsgraden dauert die Berechnung länger. Für die meisten "normalen" bauphysikalischen Anwendungen dürfte eine lineare Approximation ausreichend sein.

Für jeden Hohlraum wird ein passendes Niveau von T_{so} [°C] festgelegt. Der Wert von T_{so} sollte der etwa zu erwartenden Hohlraumtemperatur entsprechen. Betrachten wir zum Beispiel ein Fenster mit einer Außentemperatur von 5 °C und einer Innentemperatur von 15 °C. T_{so} sollte hier auf 10 °C gesetzt werden. Es ist noch anzumerken, daß die Auswahl von T_{so} keinen großen Einfluß auf die Rechengenauigkeit hat, besonders bei höheren Approximationsgraden. Selbst im Fall der linearen Approximation ist der Fehler i.d.R. relativ klein.

10. Analyse von Fensterrahmen

10.1 Einführung

HEAT2 beinhaltet die Rechenalgorithmen für numerische Analysen von Rahmenprofilen gemäß dem Europäischen Norm-Entwurf **prEN ISO 10077-2: 02.2000** (bzw. Entwurf DIN EN ISO 10077-2: 02.1999) Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen. Beachten Sie, daß es sich um einen Norm-Entwurf handelt. Informieren Sie sich bei Änderungen des Norm-Entwurfs über diesbezügliche Software-Updates für HEAT2.

Ein besonderes Problem der Wärmeübertragung bei Fensterrahmen ist die Behandlung von Hohlräumen innerhalb der Rahmen. Der Wärmestrom in den Hohlraum wird gemäß Norm durch eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} dargestellt. Diese äquivalente Wärmeleitfähigkeit umfaßt den Wärmestrom durch Leitung, Konvektion und Strahlung und hängt von den geometrischen und Werkstoffeigenschaften des Hohlraums sowie von der Temperaturverteilung innerhalb des Hohlraums ab.

Die maximale Hohlraumanzahl ist auf 250 beschränkt.

10.2 Optionen bei der Berechnung der Rahmenhohlräume

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit in rechteckigen und nicht rechteckigen Hohlräumen ist von den gegebenen Temperaturbedingungen abhängig. In HEAT2 gibt es vier Möglichkeiten die Temperaturen festzulegen, siehe Bild 10.1. In den entsprechenden Normen wird vorgeschlagen in jedem Hohlraum die iterativ berechneten minimalen und maximalen Temperaturen zu verwenden (Option 4). Die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten werden nach einer willkürlich gewählten Anzahl von Iterationsschritten aktualisiert (Standardwert für das Updaten ist 100 Iterationen). Als Alternative dazu können die gegebenen Umgebungstemperaturen als minimale und maximale Temperaturen für alle Hohlräume verwendet werden (Option 1) oder man setzt die Temperaturen auf $T_{min} = 5 \text{ °C}$ und $T_{max} = 15 \text{ °C}$, d.h. $\Delta T = 10 \text{ K}$ (Option 2). Außerdem gibt es in HEAT2 noch die Möglichkeit, die Temperaturen frei zu wählen (Option 3).

Beachten Sie, daß alle Rahmenberechnungen mit stationären oder instationären Randbedingungen durchgeführt werden können. Ist eine detaillierte instationäre Simulation erforderlich, ist gegebenenfalls eine häufigere Aktualisierung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten sinnvoll. Im Idealfall werden die Werte bei jedem Iterationsschritt neu berechnet, wodurch sich jedoch die Rechenzeit erhöht. Der Nutzer kann bei Bedarf die Auswirkungen verschiedener Updateintervalle vergleichen. In den meisten Fällen dürfte eine Aktualisierung nach jeweils 100 Iterationsschritten ausreichend sein.

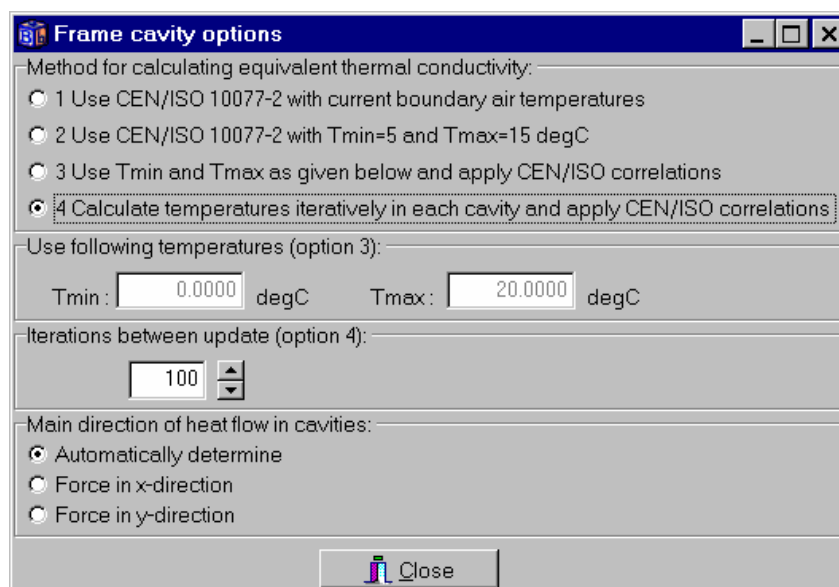


Bild 10.1: Optionen für Rahmenhohlräume.

10.3 Definition von Rahmenhohlräumen

HEAT2 identifiziert automatisch die internen Hohlräume und berechnet die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten nach den in der Norm festgelegten Gleichungen. Rahmenhohlräume werden definiert, indem man die Materialrechtecke mit dem reservierten Namen "*Frame cavity*" benutzt, siehe Bild 10.2. Wenn sich zwei oder mehr Rechtecke überlappen, werden sie als ein Hohlraum betrachtet. Die Gesamtzahl der verwendeten Hohlräume wird im HEAT2-Hauptfenster in der Statuszeile (unten) angezeigt.

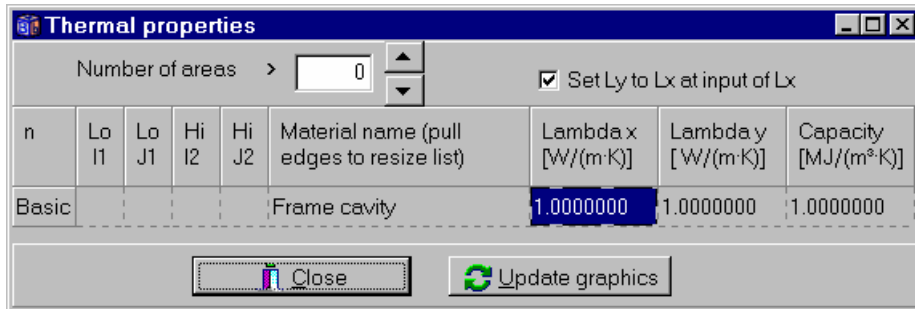


Bild 10.2: Hohlräume werden als Material mit dem Namen "*Frame cavity*" eingegeben (kann als Text eingegeben oder aus der Materialliste entnommen werden).

Im Preprozessor wird jede leere, von Material umgebene Fläche als Rahmenhohlraum erkannt (sofern das Basismaterial nicht von *Frame cavity* auf ein anderes Material geändert wurde). Rahmenhohlräume können auch im Preprozessor direkt als Materialrechteck gezeichnet werden; in der Materialliste ist in diesem Fall "*Frame cavity*" auszuwählen. Bei Nutzung der deutschsprachigen Materialdatei *DIN no cap.mtl* können Sie das Material "*Luftraum*" zeichnen, müssen es aber anschließend im Menüpunkt *Input/Material properties* auf "*Frame cavity*" umbenennen.

In Bild 10.3 und Bild 10.4 ist die grafische Eingabe anhand eines Beispiel dargestellt.

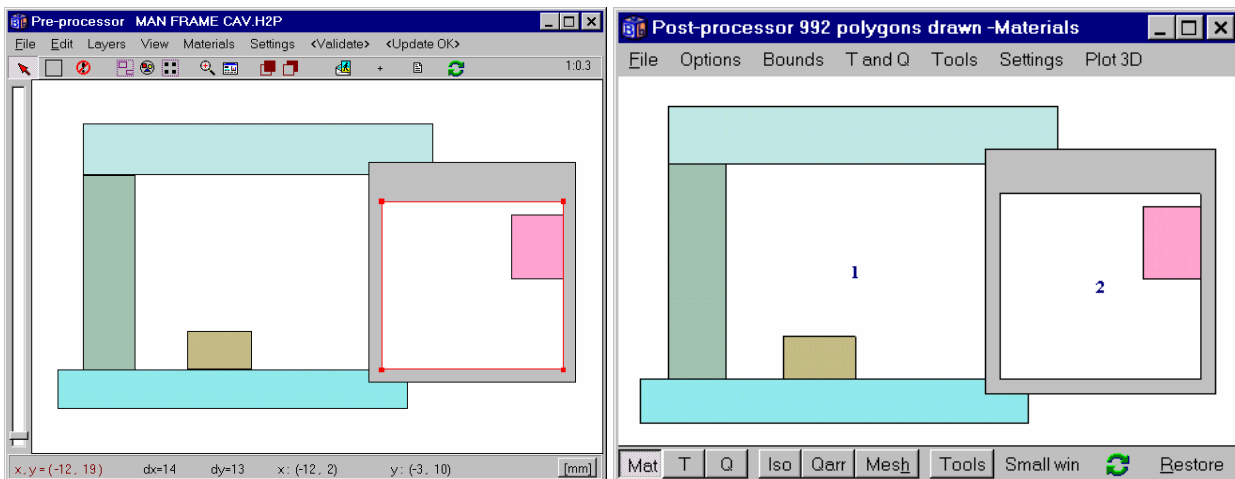


Bild 10.3: Links: Im Preprozessor gezeichnete Geometrie mit zwei nicht-rechteckigen Lufträumen. Rechts: Darstellung der beiden identifizierten Hohlräume im Postprozessor.

Der erste Hohlraum (1) wurde nicht direkt gezeichnet, wird aber als Hohlraum erkannt da er von Material umgeben ist. Der zweite Hohlraum (2) unter Verwendung des Materials "*Frame cavity*" (Materialliste *Default.mtl*) gezeichnet.

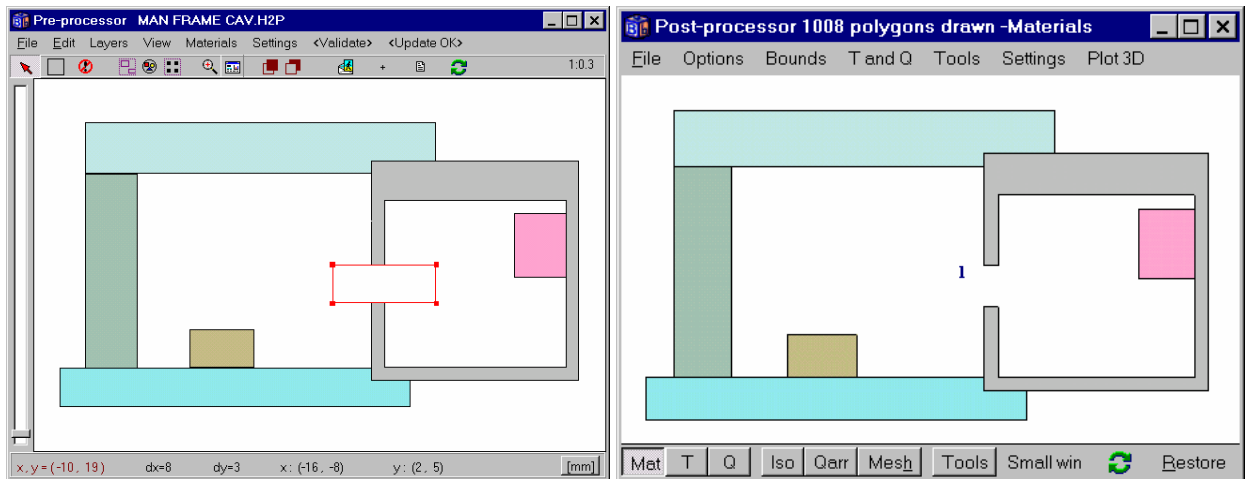


Bild 10.4: Die beiden Hohlräume wurden hier mit einem weiteren Materialrechteck "Frame cavity" verbunden. Bei der Identifizierung werden die verschiedenen Flächen als *ein* Hohlraum erkannt.

10.4 Beispiel 1 – PVC-Abschlußprofil mit fünf Hohlräumen

Bild 10.5 zeigt ein PVC-Abschlußprofil eines Rolladenkastens mit fünf Hohlräumen. Es handelt sich um das Berechnungsbeispiel D.6 aus dem Normentwurf. Die Eingabe erfolgt durch das Zeichnen von acht "Frame cavity"-Rechtecken auf einem Rechteck aus PVC, siehe Eingabedatei **Example Frame.dat**. Alternativ dazu könnte die Geometrie auch eingegeben werden, indem man das PVC-Material mit mehreren einzelnen Rechtecken zusammensetzt. Die eingeschlossenen Lufträume würden automatisch als Rahmen-Hohlräume identifiziert werden. Bild 10.6 zeigt die berechneten Wärmestromdichten für das Fensterladen-Profil mit fünf Hohlräumen. Beachten Sie, daß in den Hohlräumen keine Wärmeströme bzw. Temperaturen dargestellt werden. Eine grafische Darstellung erfolgt nur, wenn im Menü **T and Q/Show T and Q in cavities** aktiviert ist.

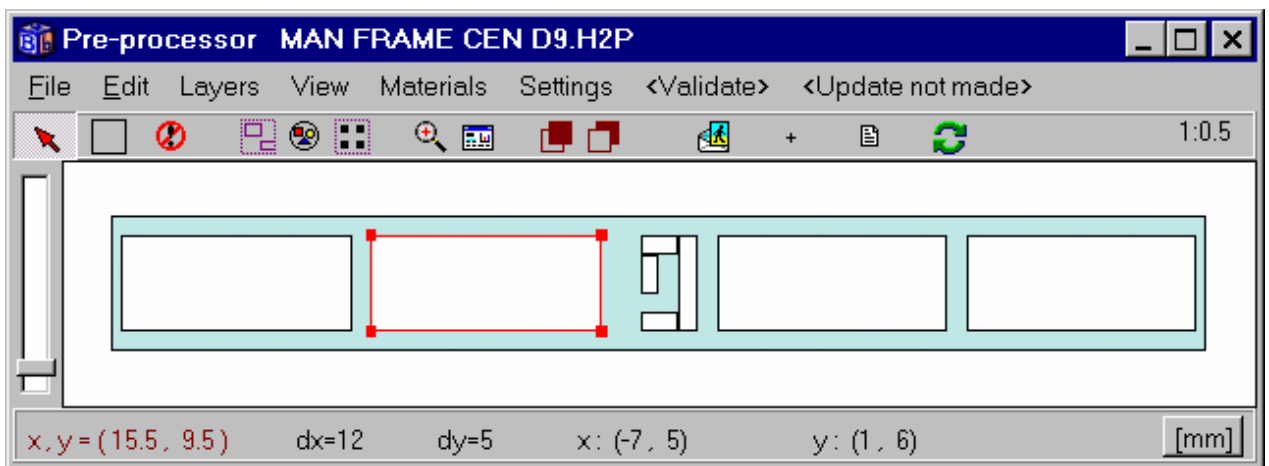


Bild 10.5: PVC-Abschlußprofil mit fünf Hohlräumen. Die Hohlräume werden mit acht Rechtecken unter Verwendung von "Frame cavity" aus der Materialliste eingegeben.

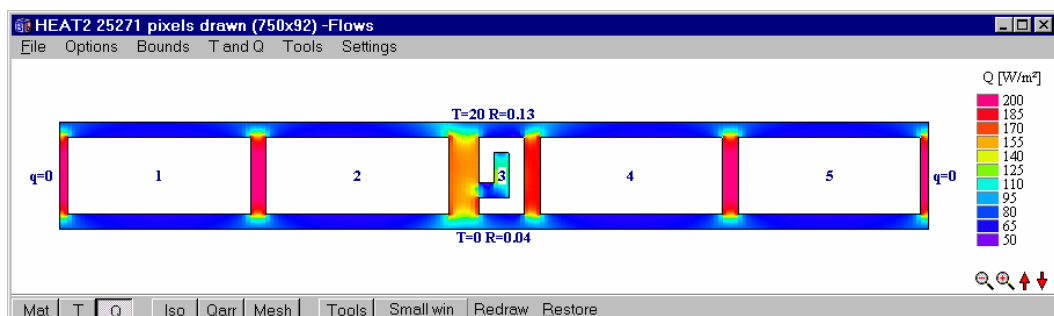


Bild 10.6: Berechnete Wärmestromdichten für das Fensterladen-Profil.

Das Info log-Fenster bei Verwendung der Option 1 (siehe Optionsliste in Bild 10.1) ist in Bild 10.7 dargestellt. Bild 10.8 zeigt das Fenster bei Option 4.

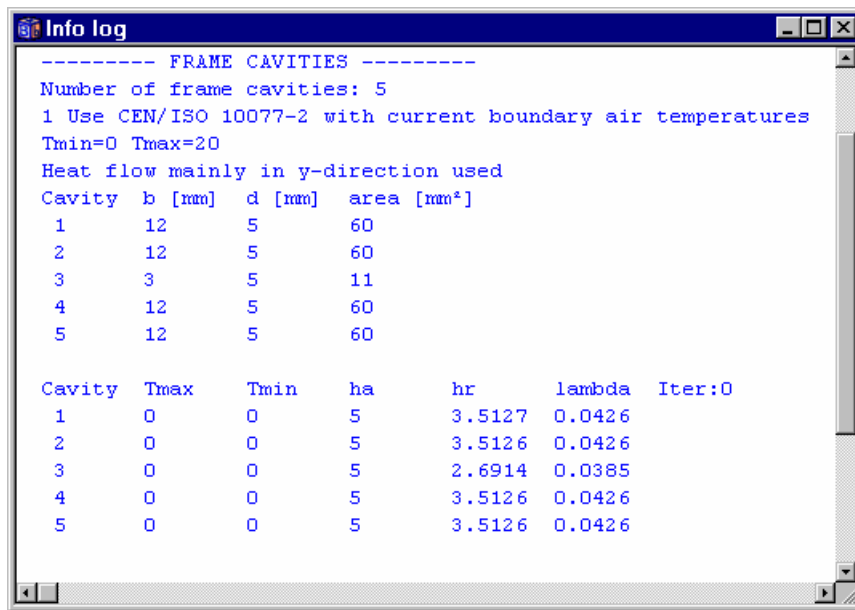


Bild 10.7: Das Info log-Fenster zeigt die Daten für die einzelnen Rahmenhöhlräume, z.B. die berechneten äquivalente Wärmeleitfähigkeiten λ_{eq} ($lambda$).

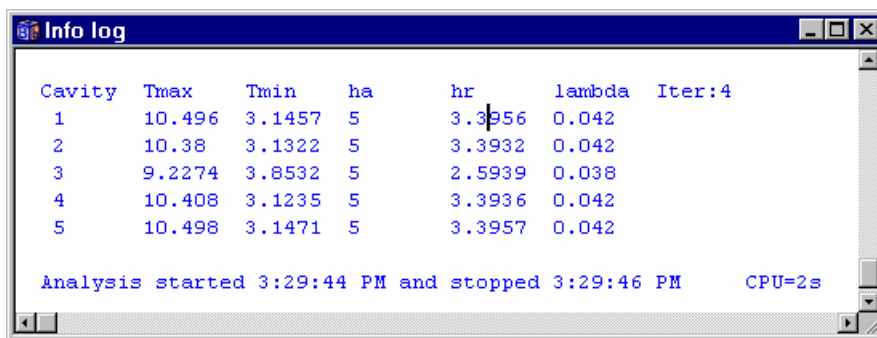


Bild 10.8: Bei Wahl der Option 4 zeigt das Info log-Fenster die iterativ berechneten Temperaturen. Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten erfolgte mit vier Updates (Angabe $Iter:4$). Vergleichen Sie die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten mit denen in der oberen Abbildung.

In Tabelle 10.1 sind die berechneten Wärmeströme durch die Randsegmente bei unterschiedlichen Berechnungsnetzen und Relaxationsfaktoren ω bei Wahl der Optionen 1 bzw. 4 angegeben. Die letzte Spalte zeigt die Rechenzeit auf einem PC mit Pentium II-Prozessor (400 MHz). Als Abbruchkriterium für die Wärmeströme wurde ein Fehler von weniger als 0,01 % verwendet, siehe Gleichung 5.1.

Tabelle 10.1: Berechnete Wärmeströme sowie Rechenzeiten (Pentium II 400 MHz).

Option	Zellen	q [W/m]	HEAT2 4.0/5.0 CPU-Zeit
1	11799	4,148	2 Sek.
1	62500	4,149	195 Sek. ($\omega = 1,95$)
			36 Sek. (optimiert mit $\omega = 1,99$)
4	11799	4,134	2 Sek.
4	62500	4,134	203 Sek. ($\omega = 1,95$)
			37 Sek. (optimiert mit $\omega = 1,99$)

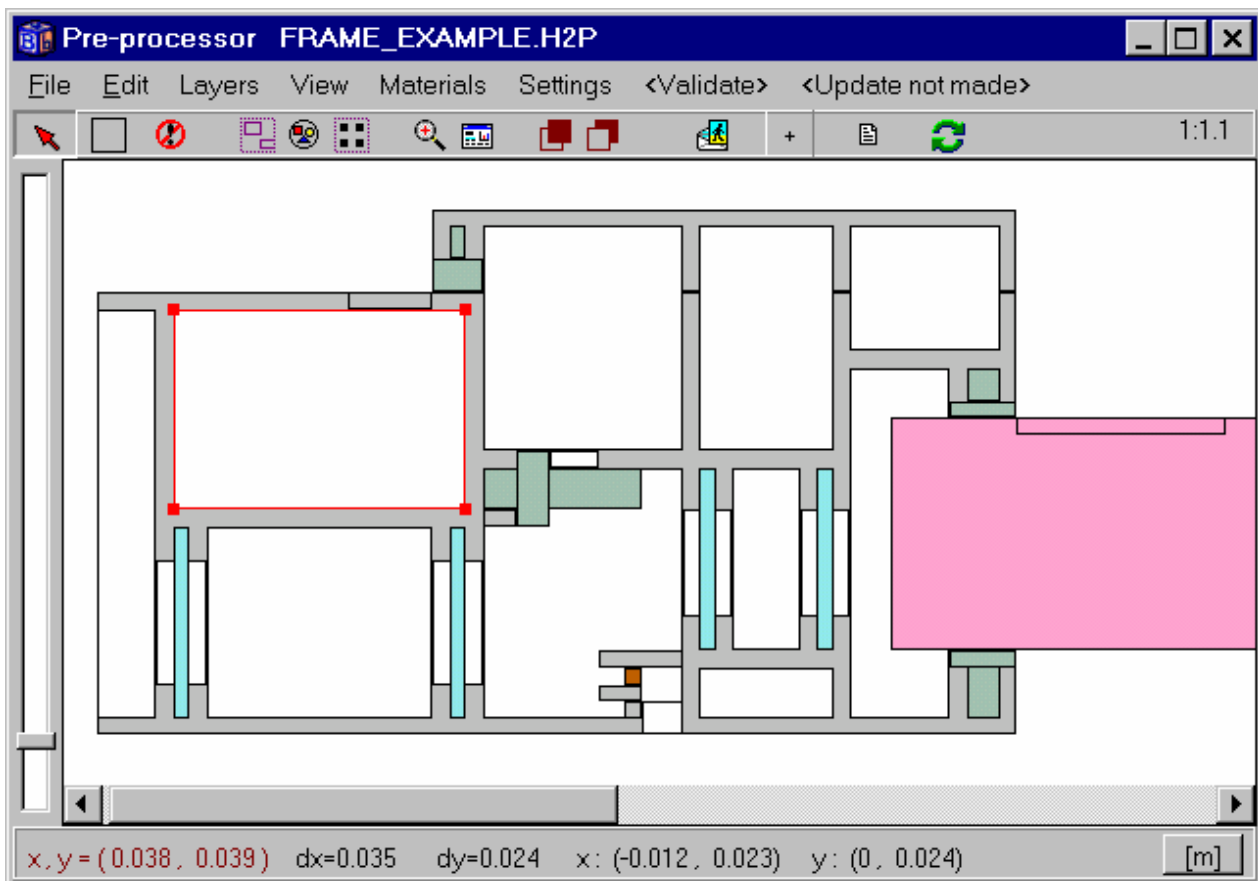


Bild 10.11: Vergrößerte Darstellung des Rahmenprofils. Bei den vier thermischen Trennungen (vertikale blaue Steifen) ist es ausreichend, ein Rechteck zu zeichnen und dann 3x zu kopieren.

In diesem Beispiel wurden die Rahmenhöhlräume im Preprozessor als Material "Frame cavity" eingegeben. Betrachten Sie Bild 10.11 und Bild 10.12. Der Hohlraum 2 wurde auf einem Materialrechteck (Aluminium) gezeichnet. Durch die Überlappung waren nur 2 Rechtecke erforderlich. Alternativ wäre es auch möglich gewesen nur das den Hohlraum umgebende Material zu zeichnen, der Hohlraum hätte sich automatisch ergeben (vier Rechtecke erforderlich).

Die Länge des Dämmpanels (Füllung) wurde nach den Festlegungen der Norm eingegeben.

Die Randbedingungen sind auf der Raumseite (oben) $T_i = 20 \text{ °C}$ und $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ auf der Außenseite (unten) $T_e = 0 \text{ °C}$ und $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; die vertikalen Schnittebenen sind adiabatisch.

In der Norm (Tabelle B.1) wird in Ecken oder Stoßfugen zwischen zwei Flächen von einem erhöhten raumseitigen Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 0,20 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ aufgrund "verringertes Strahlung" ausgegangen. In unserem Fall betrifft dies die Ränder 44 - 52 und 74 - 77. Diese Randsegmente werden nicht standardmäßig erzeugt. Benutzen Sie für die Eingabe sogenannte kurze Randsegmente (im Preprozessor muß unter *Settings* der Menüpunkt *Use long boundary segments* deaktiviert sein). Um die erforderlichen zusätzlichen Netzachsen zu erzeugen, sind in den beiden Bereichen zusätzliche Rechtecke aus dem gleichen Material einzuzichnen, welche das vorhandene Material überlappen, siehe Bild 10.11. Alternativ wäre es auch möglich, die entsprechenden Netzachsen numerisch einzufügen (Menüpunkt *Input/Insert mesh point*), die Längen der Segmente des Eingabernetzes anzupassen (*Input/Mesh in x-direction*) und vier Widerstandslinien mit $0,07 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ an den betreffenden Oberflächen festzulegen (*Input/Resistances*). Der Widerstand würde dann der Randbedingung $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ hinzugerechnet werden.

Bild 10.13 zeigt die gewählten Randbedingungen.

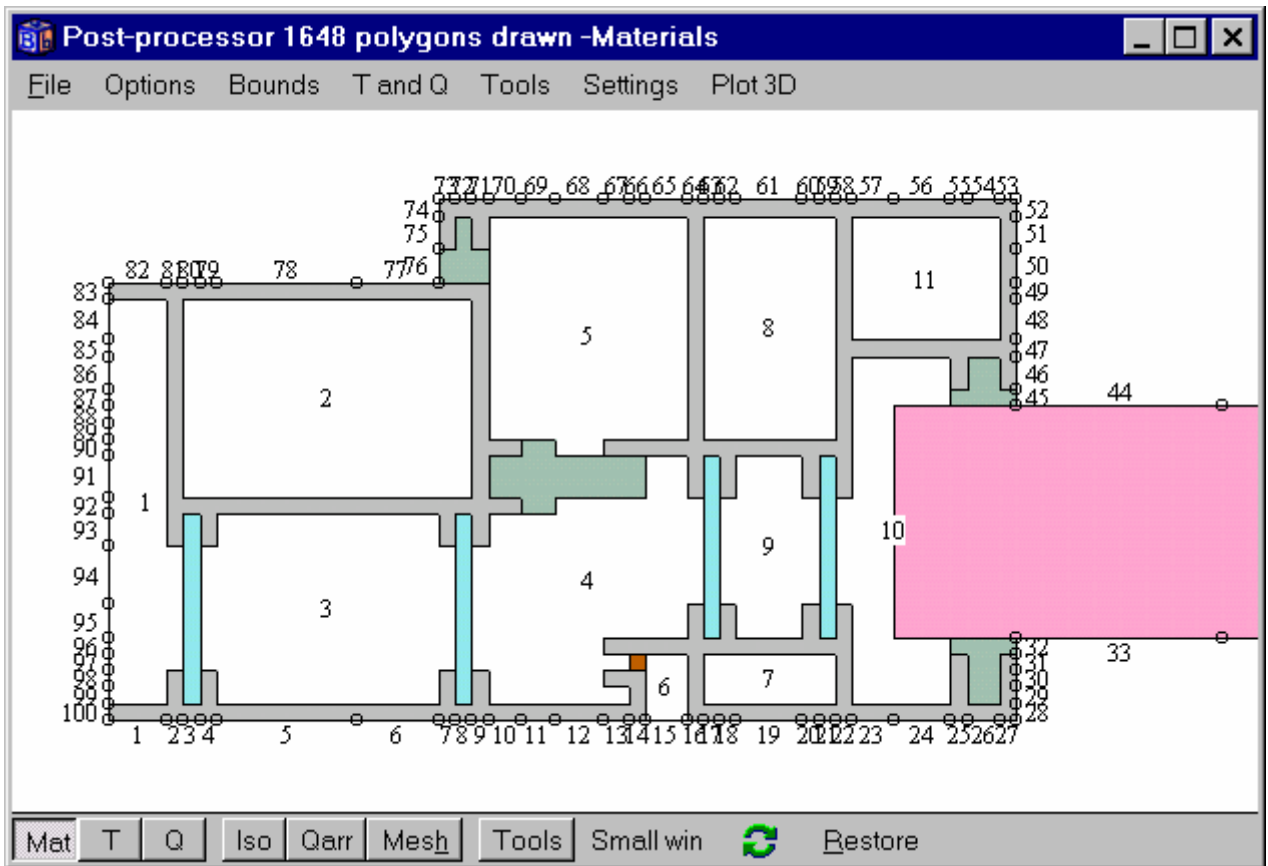


Bild 10.12: Numerierung der Randsegmente (1 - 100) und der identifizierten Hohlräume (1 - 10).

n	type	Bounds	function	Q [W/m2]	Temp [C]	Res. [m2K/W]
1	Q=const	Default		0.00000		
2	T=const	1-34			0.00000	0.040000
3	T=const	43 53-73 78-82			20.00000	0.130000
4	T=const	44-52 74-77			20.00000	0.200000

Bild 10.13: Randbedingungen.

Nach dem Start der Berechnung (*Solve*) wird in einem Fenster nachgefragt, ob bei den Hohlräumen an außen- bzw. raumseitigen Oberflächen die äquivalente Wärmeleitfähigkeit mit dem *zweifachen* Wert des unbelüfteten Hohlraums angesetzt werden soll (*Do you want to use twice the equivalent lambda?*). Im vorliegenden Fall betrifft das nur den Hohlraum 6. Bei diesen sogenannten belüfteten Hohlräumen oder Vertiefungen sollten Sie sich in der Norm über die speziellen Regelungen informieren. Hohlraum 1 wird als normaler Hohlraum behandelt, da die Randbedingung adiabatisch ist.

Die Info log-Fenster in Bild 10.14 und Bild 10.15 zeigen die Daten der Rahmenhohlräume, die verwendeten Temperaturen, Breite, Höhe und Fläche jedes Hohlraums, die berechneten maximalen und

minimalen Temperaturen, die Strahlungs- (h_r) und konvektiven (h_a) Wärmeübergangskoeffizienten sowie die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten.

In Bild 10.16 sind die Temperaturen und die berechneten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten bei Verwendung der Option 4 dargestellt. Bild 10.17 und Bild 10.18 zeigen die Wärmestromdichten [W/m^2].

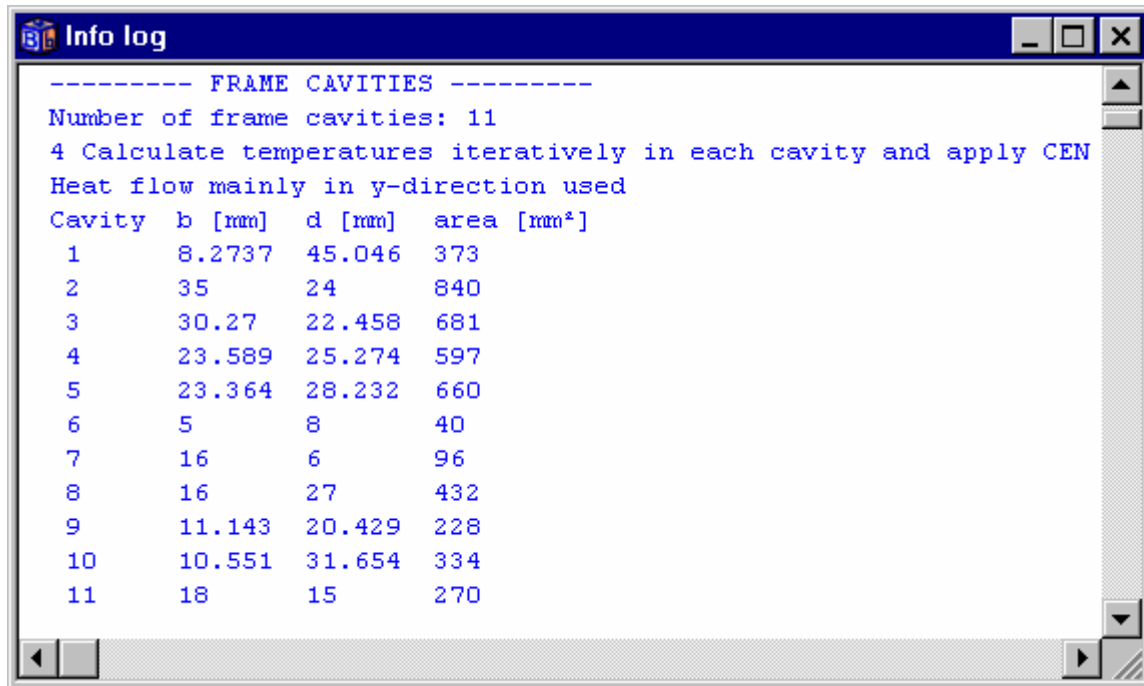


Bild 10.14: Das Info log-Fenster zeigt die Daten der Rahmenhohlräume. Zuerst werden die Abmessungen und Flächen aufgelistet.

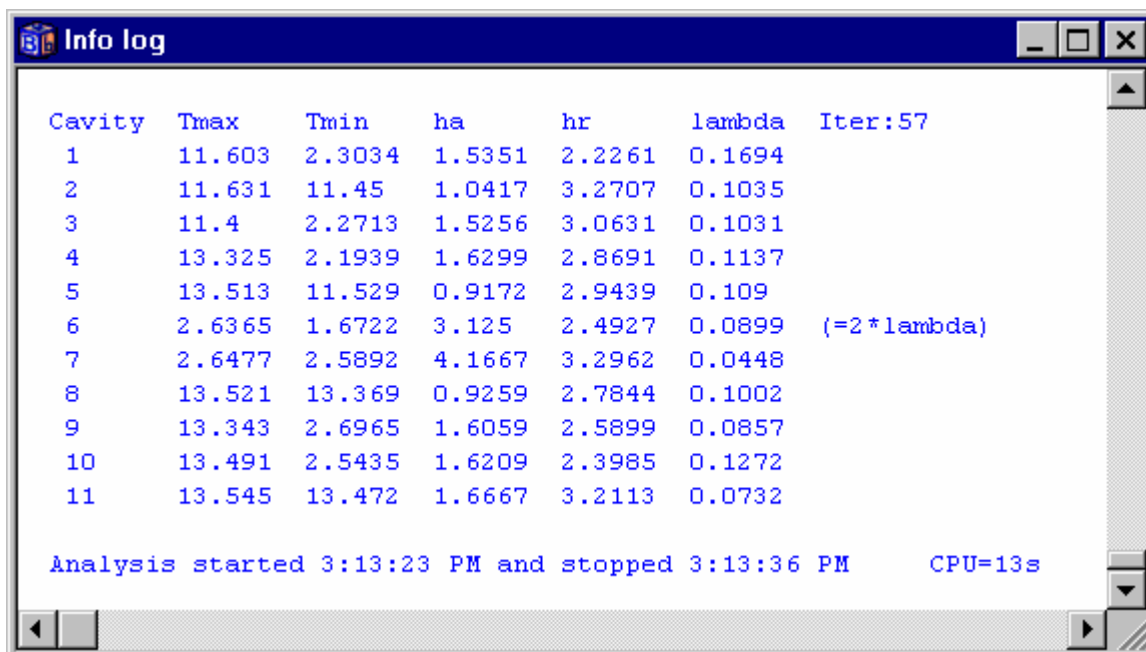


Bild 10.15: Das Info log-Fenster zeigt hier die iterativ berechneten Temperaturen sowie die Wärmeübergangskoeffizienten und äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten bei Verwendung der Option 4. Es erfolgten 57 Updates (Angabe *Iter:57*).

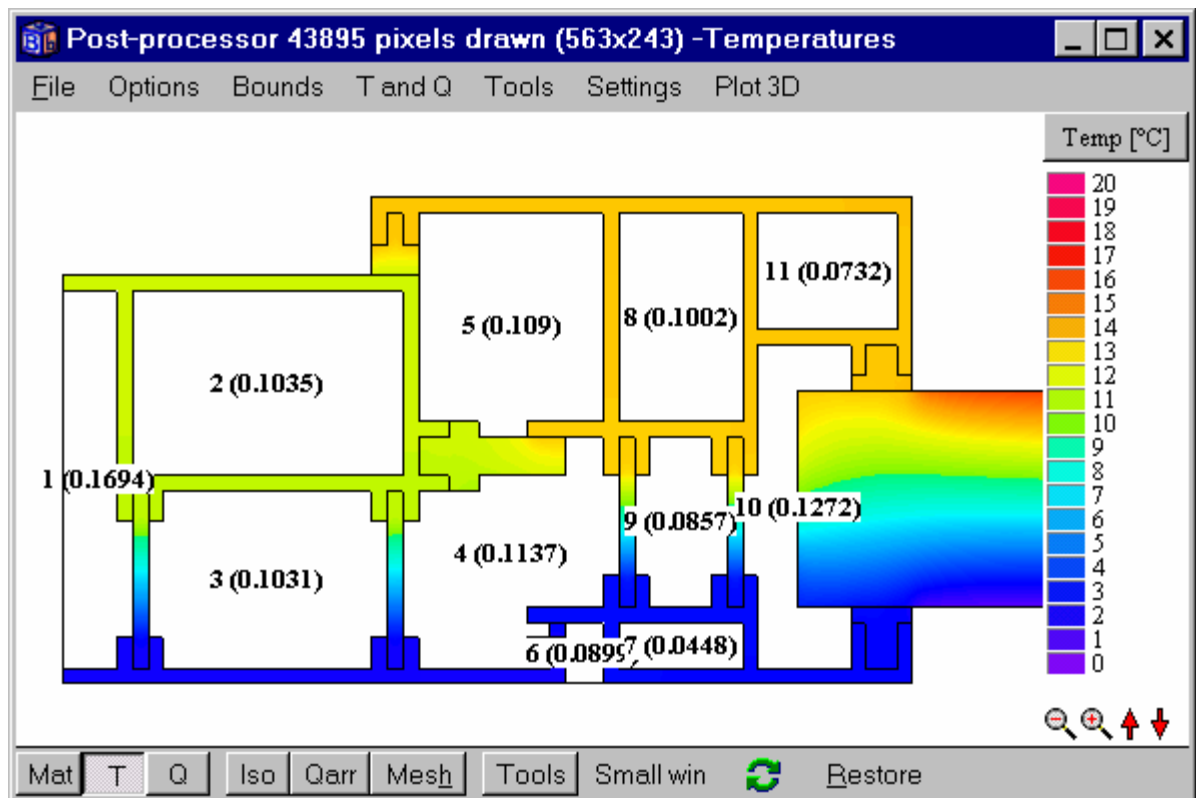


Bild 10.16: Berechnete Temperaturen und äquivalente Wärmeleitfähigkeiten.

Tabelle 10:2 zeigt die berechneten Wärmeströme durch die Randsegmente bei unterschiedlichen Berechnungsnetzen und Relaxationsfaktoren ω bei Wahl der Optionen 1 bzw. 4. In der letzten Spalte ist die Rechenzeit auf einem PC mit Pentium II-Prozessor (500 MHz) angegeben. Als Abbruchkriterium für den Wärmeströme wurde ein Fehler von weniger als 0,01 % verwendet, siehe Gleichung 5.1.

Tabelle 10:2: Berechnete Wärmeströme durch den Fensterrahmen sowie Rechenzeiten bei Verwendung eines Pentium III 500 MHz.

Option	Zellen	q [W/m]	HEAT2 4.0 CPU-Zeit
4	6435	10.90	81 Sek. ($\omega=1.95$)
			13 Sek. ($\omega=2.0$)
			6 Sek. (optimiert mit $\omega=1.998$)
4	39795	11.00	1,5 Stunden ($\omega=1.95$)
			149 Sek. (optimiert mit $\omega=2.0$)
1	6435	11.18	75 Sek. ($\omega=1.95$)
			12 Sek. ($\omega=2.0$)
			6 Sek. (optimiert mit $\omega=1.998$)
1	39795	11.28	1,5 Stunden ($\omega=1.95$)
			125 Sek. (optimiert mit $\omega=2.0$)

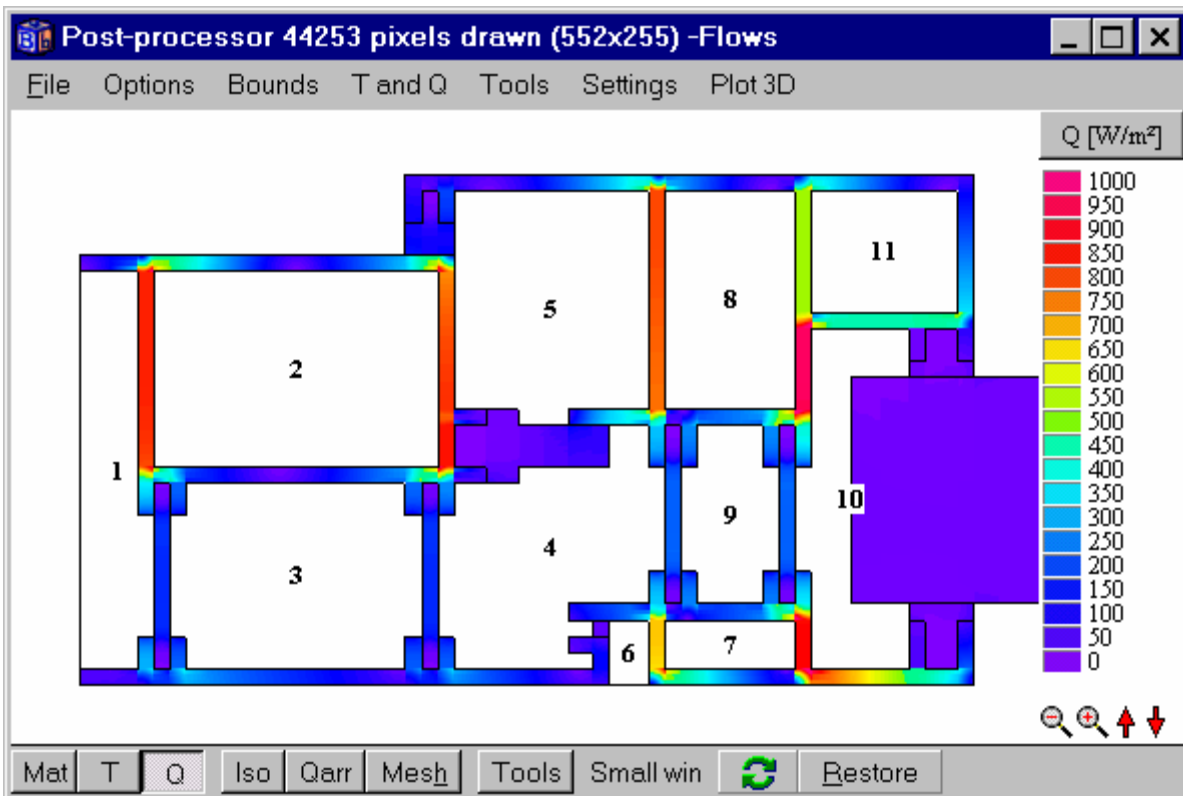


Bild 10.17: Wärmestromdichte [W/m^2].

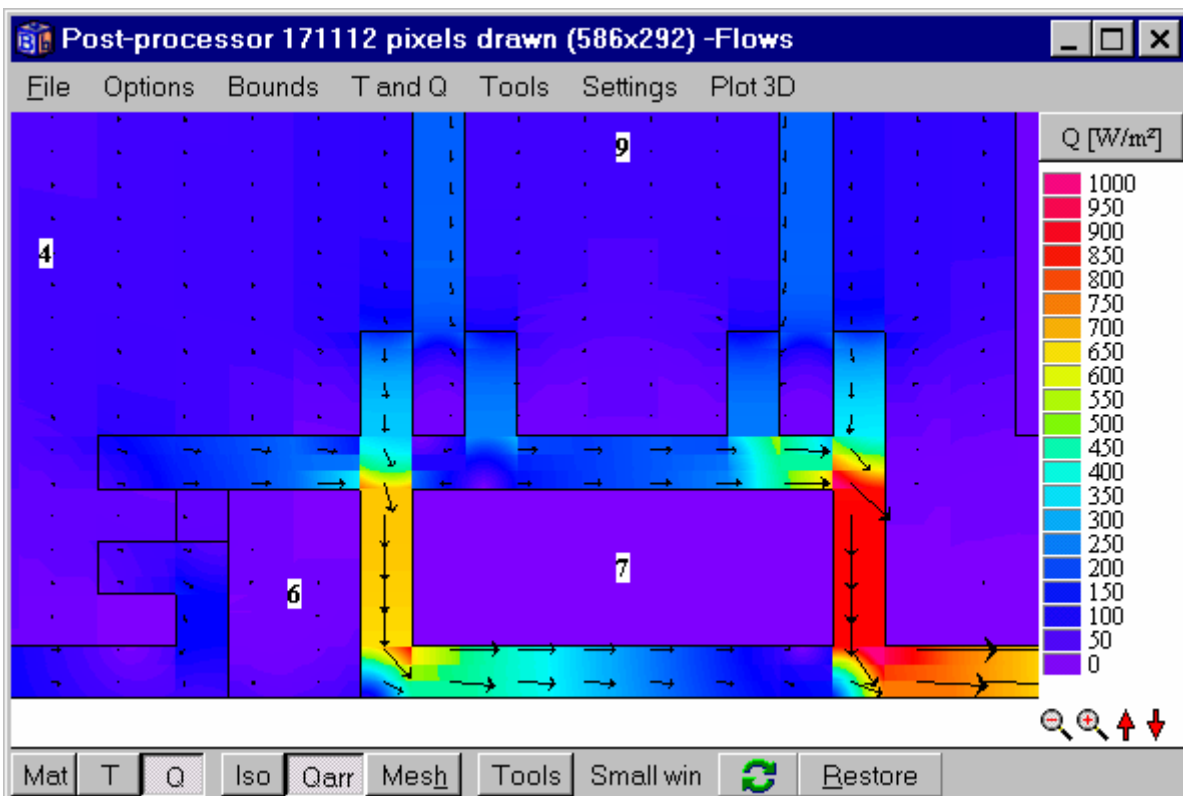


Bild 10.18: Vergrößerte Darstellung der Fläche um den Hohlraum 7 mit Wärmestromdichte und Richtung der Wärmeströme (um auch die Werte in den Hohlräumen anzuzeigen wurde der Menüpunkt **T and Q/Show T and Q in cavities** aktiviert).

11. Hinweise

11.1 Einführung

Bei der Eingabe und Simulation von Konstruktionen können verschiedene Fragen oder Probleme auftreten. Dieses Kapitel gibt Ihnen einige nützliche Hinweise.

11.2 Numerische Aspekte

11.2.1 Berechnungsnetz (*Numerical mesh*)

Die für eine ausreichende Berechnungsgenauigkeit erforderliche Zellenanzahl ist von vielen Parametern, z.B. von der Geometrie und den verwendeten Materialien, abhängig. Für die Wahl eines entsprechenden Berechnungsnetzes gibt die Norm EN ISO 10211-1 in Anhang A.2 folgende Empfehlung:

"Die Summe der Absolutwerte aller Wärmeströme, die in das Objekt eindringen, wird zweifach berechnet: für n - und für $2n$ -Unterteilungen. Die Differenz zwischen diesen beiden Ergebnissen darf 2 % nicht überschreiten. Anderenfalls sind weitere Unterteilungen vorzunehmen, bis dieses Kriterium erfüllt ist."

Hinweis: Nach prEN ISO 102011:2005 darf eine Differenz von 1 % nicht überschritten werden.

Eine Verdopplung der Unterteilung kann in HEAT2 sehr einfach im Menüpunkt *Input/Mesh in x(y)-direction* durch Klick auf die Schaltfläche "+" vorgenommen werden.

Dauert eine instationäre (transiente) Berechnung zu lange, ist es sinnvoll die Größe der Zellen zu erhöhen, die den stabilen Zeitschritt (siehe Kapitel 3.6) bestimmen. Im Info log-Fenster (Menüpunkt *Output/Info log*) wird der stabile Zeitschritt sowie die ihn bestimmende Zelle angezeigt, siehe Bild 5.55. Der stabile Zeitschritt wird in der Regel von den kleinen Zellen bestimmt, besonders solchen mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Die schwierigsten Fälle sind meist Konstruktionen mit sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, z.B. mit Metall in einer Dämmschicht. Die Rechenzeit kann erheblich reduziert werden, wenn die Metallschicht nicht oder nur in wenigen Zellen unterteilt wird.

11.2.2 Expansives Berechnungsnetz

Mit einem expansiv verteilten Berechnungsnetz, d.h. einer Erhöhung (bzw. Verringerung) der Abstände zusätzlicher Hilfsachsen, können Berechnungszellen in Gebieten mit hohen Temperaturgradienten konzentriert werden. Beachten Sie, daß ein expansives Raster zu kleinen Rechenzellen und damit zu einem sehr kurzen stabilen Zeitschritt führen kann. Ein ungünstig gewähltes Berechnungsnetz kann die Rechenzeit stark erhöhen, insbesondere bei instationären Simulationen. Benutzen Sie keine extrem hohen bzw. niedrigen Expansionskoeffizienten zusammen mit einer großen Zellenanzahl, da dies zu sehr kleinen Zellen führt. "Normale" Werte des Expansionskoeffizienten liegen in den meisten Fällen zwischen 0,8 und 1,25.

11.2.3 Stationäre Berechnungen

In EN ISO 10211-1 Anhang A.2 wird für stationäre Berechnungen die Einhaltung des folgenden Konvergenzkriteriums empfohlen:

"Wird das Gleichungssystem iterativ gelöst, ist die Iteration so lange fortzuführen, bis die Summe aller in das Objekt eindringenden (positiven oder negativen) Wärmeströme, dividiert durch die halbe Summe der Absolutwerte aller dieser Wärmeströme, kleiner als 0,001 ist."

Diese Anforderung entspricht dem Stop-Kriterium *Flow: 0,1 %* (Menüpunkt *Solve/Options for steady-state*).

11.2.4 Symmetrische Fälle

Um den Eingabeaufwand und die Rechenzeit zu reduzieren, sollten Sie eventuell vorhandene Symmetrien nutzen und das Modell auf die Hälfte bzw. bei Doppelsymmetrie auf ein Viertel reduzieren. Im Bereich der Symmetrieachsen sind adiabate Randbedingungen zu verwenden.

11.2.5 Modellgröße bei erdberührten Bauteilen

Berechnungen für erdberührte Bauteile (z.B. Gründungen, Fußböden auf Erdreich, Kellergeschosse) erfordern die Einbeziehung eines Teils des Erdreichs. Regeln zur Modellbildung bei stationären Berechnungen sind der Norm EN ISO 10211-1 zu entnehmen. Beachten Sie, daß in Abhängigkeit vom Berechnungszweck (Oberflächentemperaturen *oder* Wärmeströme) unterschiedliche Regeln gelten. Die Ermittlung von Wärmeströmen erfordert im allgemeinen eine deutlich größere Einbeziehung des Untergrundes (2,5-fache Gebäudebreite). Für die vertikalen Schnittebenen und die horizontale Schnittebene im Erdreich gelten adiabate Randbedingungen. Bei der Ermittlung von Oberflächentemperaturen kann das Modell kleiner sein. An der horizontalen Schnittebene im Erdreich wird der Jahresmittelwert der Außentemperatur (bzw. nach DIN 4108-2 eine Temperatur von 10 °C) angesetzt. Weitere Hinweise für Berechnungen von Bodenplatten auf Erdreich gibt (Hagentoft, 1988). Zur Berechnung der Wärmeübertragung über das Erdreich siehe auch EN ISO 13370.

11.2.6 Instationäre Berechnung des Wärmestromes über das Erdreich

Instationäre (transiente) Berechnungen der Wärmeverluste eines Gebäudes in das Erdreich können mehrere Stunden oder sogar Tage dauern. Eine geringere Unterteilung (weniger Zellen) führt zwar zu kürzeren Rechenzeiten, erhöht aber auch den Rechenfehler. Es kann sinnvoll sein, zuerst einige stationäre Berechnungen durchzuführen, um die zur Gewährleistung einer ausreichenden Rechengenauigkeit erforderliche minimale Unterteilung zu ermitteln, siehe Abschnitt 11.2.1. Dies dauert meist nur wenige Minuten. Eine für den stationären Fall ermittelte Berechnungsgenauigkeit gilt näherungsweise auch bei instationären Bedingungen. Ist beispielsweise bekannt, daß der für ein bestimmtes Raster berechnete stationäre Wärmeverlust 5 % unter dem genauen Berechnungsergebnis liegt, kann das Ergebnis der instationären Berechnung entsprechend korrigiert werden.

Ein weiteres Problem ist die hohe thermische Trägheit von Erdreich, welche lange Simulationszeiten erfordert. Die Simulation beginnt mit einer frei gewählten konstanten Temperaturverteilung (Ausgangstemperatur). Es müssen unter Umständen 10 bis 15 Jahre simuliert werden, bis die Erdreichtemperaturen einen quasi-stationären (eingeschwungenen) Zustand erreichen. Die Zeitdauer kann verringert werden, wenn zunächst eine stationäre Berechnung auf der Grundlage des Mittelwertes der Außenlufttemperatur durchgeführt wird und anschließend mit der ermittelten Temperaturverteilung die instationäre Berechnung gestartet wird. Der Vorgehensweise kann wie folgt beschrieben werden:

1. Geben Sie die Daten für das Problem ein. Vergessen Sie nicht die richtigen Wärmekapazitäten zu verwenden.
2. Führen Sie eine stationäre Simulation unter Verwendung des Jahresmittels der Außenlufttemperatur durch.
3. Ändern Sie die stationären Randbedingungen auf den gewünschten instationären Verlauf, z.B. Außentemperatur als Sinusfunktion.
4. Starten Sie die instationäre Berechnung. Der Berechnungszeitraum ist über mehrere Jahre auszudehnen, wobei erst die Ergebnisse für den eingeschwungenen Zustand (nach mehreren Jahren) zu verwenden sind. Ob der quasi-stationäre Zustand erreicht ist, kann durch den Vergleich der Ergebnisse mehrerer aufeinanderfolgender Jahre geprüft werden.
5. Plötzliche Kälteeinbrüche können jetzt durch Änderung der Außentemperatur simuliert werden, z.B. mit Hilfe von schrittweise konstanten oder linearen Werten.

Interessante Ergebnisse einer instationären Berechnung können z.B. der maximale Wärmeverlust, die minimale Fußbodentemperatur oder auch die frostfreie Tiefe sein.

11.2.7 Schräge Ränder bzw. Materialgrenzen

Geneigte oder gekrümmte Ränder können durch Abstufungen idealisiert werden. In vielen Fällen ist mit dem Preprozessor eine vergleichsweise einfache Eingabe möglich. Beachten Sie, daß die Randbedingungen, speziell der Wärmeübergangswiderstand, an die vergrößerte Oberfläche angepaßt werden müssen.

Literaturverzeichnis

Normen

EN ISO 10211-1, Ausgabe:1995-11. Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO 10211-1:1995)

EN ISO 10211-2, Ausgabe:2001-06. Wärmebrücken im Hochbau - Berechnung der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Teil 2: Linienförmige Wärmebrücken (ISO 10211-2:2001)

bzw. Norm-Entwurf prEN ISO 10211:2005

EN ISO 13370, Ausgabe:1998-12. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren (ISO 13370:1998)

EN ISO 10077-2, Ausgabe:2003-12. Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO/FDIS 10077-2:2003)

Rahmen (ISO/DIS 10077-2:1998); Deutsche Fassung prEN ISO 10077-2:1998

(Vornorm) DIN V 4108-4, Ausgabe:2004-07. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

EN ISO 6946, Ausgabe:2003-10. Bauteile - Wärmedurchlaßwiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:1996 + Amd. 1:2003)

Publikationen

Blomberg, T. 1994. *HEAT2R - A PC-program for heat conduction in cylindrical coordinates r and z*. Department of Building Physics, Lund University. P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden. CODEN:LUTVDG/(TVBH-7178).

Blomberg, T. 1998. *HEAT3 - A PC-program for transfer in three dimensions. Manual with brief theory and examples. Ver 3.0*. Department of Building Physics, Lund University. P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden. CODEN:LUTVDG/(TVBH-7206).

Blomberg, T. 1996. Doctoral thesis. *Heat conduction in two and three dimensions. Computer modelling of Building Physics applications*. Department of Building Physics, Lund University. P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden. Report TVBH-1008. ISRN LUTVDG/TVBH--96/1008--SE/1-188. ISBN 91-88722-05-8.

Claesson J., C-E Hagentoft. 1983. *Återvinning av värmeförluster från fjärrvärmekulvertar (Regain of heat losses from district heating culverts)*. LUTVDG (TVBH-7075).

Edwards, A.L. *A Compilation of Thermal Property Data for Computer Heat Conduction Calculations*, UCRL-50589, February 24, 1969

Eftring, B. 1990. *Numerisk beräkning av temperaturförlopp. (Numerical calculations of thermal processes)*. Byggforskningsrådet. The Swedish Council for Building Research. Report R81:1990.

Hagentoft, C-E. 1988. *Heat loss to the ground from a building*. Department of Building Physics, Lund University. P.O. Box 118, S-221 00 Lund, Sweden. CODEN:LUTVDG/ TVBH-1004.

Hirsch, C. 1992. *Numerical computation of internal and external flows*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0-471-92385-0.

Holman, J.P. 1986. *Heat transfer*. McGraw-Hill Book Company. New York.

Kreith, F.; M-S. Bohn. *Principles of heat transfer*. Fourth edition, revised edition. Harper & Row, Publishers, New York (1986).

Anhang A. Grenzen und Beschränkungen der Eingabedaten

Für HEAT2-Eingabedaten gelten folgende Beschränkungen:

Anzahl der Berechnungszellen	62500 (250-250)
Anzahl der Berechnungszellen in x-Richtung	250
Anzahl der Berechnungszellen in y-Richtung	250
Anzahl der Eingabenetzsegmente in x-Richtung	250
Anzahl der Eingabenetzsegmente in y-Richtung	250
Anzahl der Flächen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften	250
Anzahl der Flächen mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen	10
Anzahl der Ränder	250
Anzahl unterschiedlicher Randbedingungen	20
Anzahl unterschiedlicher interner Modifikationstypen	20
Anzahl interner Modifikationsflächen	100
Anzahl der Hohlräume mit Strahlung	20
Anzahl der Strahlungselemente in jedem Hohlraum	250
Anzahl der Funktionen	3
Anzahl der Schritte bei allen schrittweisen Funktionstypen	über 500.000
Anzahl der Widerstandslinien	50
Anzahl der EN ISO Rahmenhohlräume	250

Für die Eingabedaten von HEAT2 gelten folgende Beschränkungen (*ims* steht für input mesh segments, d.h. Eingabenetzsegmente):

Bezeichnung	Beschreibung	Beschränkung	Einheit
I_{\max}	Anzahl <i>ims</i> in x-Richtung	$1 \leq I_{\max} \leq 250$	
J_{\max}	Anzahl <i>ims</i> in y-Richtung	$1 \leq J_{\max} \leq 250$	
ΔX_I	Länge der <i>ims</i> in x-Richtung	>0	m
ΔY_J	Länge der <i>ims</i> in y-Richtung	>0	m
N_I	Anzahl Zellen jedes <i>ims</i> in x-Richtung	$1 \leq N_I \leq 250$	
N_J	Anzahl Zellen jedes <i>ims</i> in y-Richtung	$1 \leq N_J \leq 250$	
λ_x	Wärmeleitfähigkeit in x-Richtung	>0	W/(m·K)
λ_y	Wärmeleitfähigkeit in y-Richtung	>0	W/(m·K)
C	Volumenbezogene Wärmekapazität	>0	MJ/(m ³ ·K)
R	Wärmeübergangswiderstand	≥ 0	m ² ·K/W
R_x	Interne Widerstände in x-Richtung	≥ 0	m ² ·K/W
R_y	Interne Widerstände in y-Richtung	≥ 0	m ² ·K/W
T	Temperaturen	keine Einschränkung	°C
q	Wärmestrom über die Ränder	keine Einschränkung	W/m ²

Anhang B. Materialdaten

HEAT2 wird mit mehreren Materialdatenbanken ausgeliefert.

Wie Materialeigenschaften ergänzt oder editiert werden können, ist in Abschnitt 5.2 beschrieben.

In der englischsprachigen Standard-Materialdatenbank *Default.MTL* sind die nachfolgende Materialien verfügbar. Der Hinweis *no cap.* bzw. *keine Kap.* bedeutet, daß keine Angaben zur Wärmekapazität vorliegen (ersatzweise wird der Wert $C = 1$ angegeben). Die betreffenden Materialdaten sollten nicht für instationäre Berechnungen verwendet werden.

Material	C	λ_x	λ_y	(λ_y muß nicht angegeben werden, wenn $\lambda_x = \lambda_y$)
	MJ/(m ³ ·K)	m ² ·K/W	m ² ·K/W	Deutsche Übersetzung
IEA Report Annex XIV				
acrylic resin, no cap., CEN	1 0.2 0.2			Acrylharz, keine Kap., CEN
air	0.0013 0.0251 0.0251			Luft
aluminum	2.4835 225.94 225.94			Aluminium
brick, IEA	1.49 0.45 0.45			Ziegel, IEA
butyl (hot melt), no cap., CEN	1 0.24 0.24			Butyl (heiß geschmolzen), keine Kap., CEN
butyl rubber (solid), no cap., CEN	1 0.24 0.24			Butylgummi (fest), keine Kap., CEN
concrete, cellular, IEA	0.53 0.52 0.52			Beton, porös, IEA
concrete, cinder	1.051 0.3347 0.3347			Schlackenbeton
concrete, IEA	1.83 2.7 2.7			Beton, IEA
concrete, lightweight	0.6241 0.2092 0.2092			Leichtbeton
concrete, lightweight, IEA	1.83 0.49 0.49			Leichtbeton, IEA
copper	3.441 397.48 397.48			Kupfer
cork, ground	0.3012 0.0431 0.0431			Kork, gemahlen
cork, ground, regranulated	0.261 0.0448 0.0448			Kork, gemahlen, regranuliert
cork, IEA	0.21 0.042 0.042			Kork, IEA
epoxy fibre, no cap., CEN	1 0.23 0.23			Epoxid faserverstärkt, keine Kap., CEN
epoxy resin, no cap., CEN	1 0.2 0.2			Epoxidharz, keine Kap., CEN
epoxy, silica filled, cast	1.8072 0.6276 0.6276			Epoxid, gefüllt mit Silica, gegossen
Example 1, concrete	1.83 2.7 2.7			Beispiel 1, Beton
Example 1, cross bars	1.7 0.19 0.19			Beispiel 1, Lattung
Example 1, insulation	0.094 0.037 0.037			Beispiel 1, Dämmung
Example 1, lightweight concrete	1.83 0.49 0.49			Beispiel 1, Leichtbeton
Example 2, concrete	1 1.7 1.7			Beispiel 2, Beton
Example 2, haydite	1 0.34 0.34			Beispiel 2, Haydite-Mauerwerk
Example 2, mineral wool	1 0.036 0.036			Beispiel 2, Mineralwolle
Example 2, soil	1 2.3 2.3			Beispiel 2, Erdreich
Example 3, Lambda=0.029	1 0.029 0.029			Beispiel 3, Lambda=0,029
Example 3, Lambda=0.12	1 0.12 0.12			Beispiel 3, Lambda=0,12
Example 3, Lambda=1.15	1 1.15 1.15			Beispiel 3, Lambda=1,15
Example 3, Lambda=230	1 230 230			Beispiel 3, Lambda=230
Example 4, Lambda=0.88	1 0.88 0.88			Beispiel 4, Lambda=0,88
Example 4, Lambda=0.90	1 0.9 0.9			Beispiel 4, Lambda=0,90
Example 4, Lambda=2.90	1 2.9 2.9			Beispiel 4, Lambda=2,90
fireclay brick, missouri	1.5062 1.0042 1.0042			Schamotteziegel, Missouri
fireclay brick, normal (22 p)	1.4498 1.297 1.297			Schamotteziegel, normal (22 p)
fireclay brick, siliceous (23 p)	1.5062 1.0878 1.0878			Schamotteziegel, ? (23 p)
foam rubber, no cap., CEN	1 0.06 0.06			Schaumgummi, keine Kap., CEN
Frame cavity	1 1 1			Rahmenhohlraum
Frame ex. (a) Insulation panel	1 0.035 0.035			Rahmen ex (a), Dämmpaneel (Füllung)
Frame ex. (b) Soft wood	1 0.13 0.13			Rahmen ex (b), Weichholz
Frame ex. (c) PVC	1 0.17 0.17			Rahmen ex (c), PVC
Frame ex. (d) EPDM	1 0.25 0.25			Rahmen ex (d), EPDM
Frame ex. (e) Polyamid 6.6	1 0.3 0.3			Rahmen ex (e), Polyamid
Frame ex. (f) Glass	1 1 1			Rahmen ex (f), Glas
Frame ex. (g) Steel	1 50 50			Rahmen ex (g), Stahl
Frame ex. (h) Aluminium	1 160 160			Rahmen ex (h), Aluminium
Frame ex. (i) Mohair (polyester)	1 0.14 0.14			Rahmen ex (i), Mohair (Polyester)
Frame ex. (k) Polyamid Nylon	1 0.25 0.25			Rahmen ex (k), Polyamid Nylon
Frame ex. (l) PU (polyurethane), resin	1 0.25 0.25			Rahmen ex (l), PU-Harz (Polyurethan)
Frame ex. (m) Polysulfid	1 0.4 0.4			Rahmen ex (m), Polysulfid

Frame ex. (n) Silica gel (desiccant)	1 0.13 0.13	Rahmen ex (n), Silicagel (Trockenmittel)
Frame ex. (o) see D.10	1 0.034 0.034	Rahmen ex (o), siehe D.10
FRP Nylon, no cap., CEN	1 0.23 0.23	FRP Nylon, keine Kap., CEN
glass (avg prop)	1.9246 1.046 1.046	Glas (durchschnittl. Eigenschaften)
glass fibre resin, no cap., CEN	1 0.3 0.3	Glasfaserverstärktes (Polyester)Harz, keine Kap., CEN
glass fibre, no cap., CEN	1 0.23 0.23	Glasfaser, keine Kap., CEN
glass, borosilicate crown	1.6869 1.046 1.046	Glas, mit Borsilikat veredelt
glass, ceramic, pyroceram 9606	2.0342 3.9748 3.9748	Glas, Keramik, Pyroceram 9606
glass, ceramic, pyroceram 9608	2.0187 2.0502 2.0502	Glas, Keramik, Pyroceram 9608
glass, diabase (artificial)	1.8074 1.1715 1.1715	Glas, Diabas (künstlich)
glass, flint	1.205 0.7531 0.7531	Glas, Flint
glass, float glass, no cap., CEN	1 1 1	Glas, Floatglas, keine Kap., CEN
glass, foamed (d = 0.144)	0.1084 0.0347 0.0347	Glas, geschäumt (d=0,144)
glass, fused quartz (sio2)	1.6386 1.3807 1.3807	Glas, verschmolzen mit Quarz (SiO ₂)
glass, fused silica or vitrous silica	1.6386 1.3807 1.3807	Glas, verschmolzen mit Silicagel oder vitrous? Silica
glass, IEA	2.3 1 1	Glas, IEA
glass, lead	1.5264 1.1297 1.1297	Glas, Bleiglas
glass, lime window	1.8677 1.318 1.318	Glas, Kalk? Fenster
glass, obsidian	1.8074 1.3724 1.3724	Glas, Obsidian
glass, plexiglass, no cap., CEN	1 0.2 0.2	Glas, Plexiglas, keine Kap., CEN
glass, pyrex	1.6162 1.1297 1.1297	Glas, Pyrex
glass, soda plate	1.8827 1.2134 1.2134	Glas, Sodaafel
glass, soda-lime	1.7321 1.3389 1.3389	Glas, Soda-Kalk
glass, vycor	1.6311 1.3389 1.3389	Glas, Vycor
glass-wool, IEA	0.062 0.033 0.033	Glaswolle, IEA
gold	2.4704 317.98 317.98	Gold
granite (av prop) (see ref 51)	2.2175 2.5104 2.5104	Granit (durchschn. Eigensch.) (siehe Ref 51)
granite (high k)	2.2175 3.9748 3.9748	Granit (hohes k)
granite (low k)	2.2175 1.7154 1.7154	Granit (niedriges k)
gypsum (caso4.4h2o) (artificial)	2.2957 0.7531 0.7531	Gips (CaSO ₄ ·4H ₂ O) (künstlich)
gypsum (caso4.4h2o) (mineral)	2.5242 1.297 1.297	Gips (CaSO ₄ ·4H ₂ O) (Mineral)
gypsum board, IEA	0.88 0.1 0.1	Gipskartonplatte, IEA
ice (h2o) (solid)	3.867 2.092 2.092	Eis (H ₂ O) (fest)
iron (0 to 3000 deg c)	3.5234 71.965 71.965	Eisen (0 bis 3000 °C)
limestone (dense, dry)	2.3012 1.6736 1.6736	Kalkstein (dicht, trocken)
limestone (h2o 15.3)	1.5188 0.9205 0.9205	Kalkstein (H ₂ O 15,3)
masonry, IEA	0.88 0.1 0.1	Stein, IEA
mohair, no cap., CEN	1 0.14 0.14	Mohair, keine Kap., CEN
mortar, IEA	1.21 0.53 0.53	Mörtel, IEA
neoprene, no cap., CEN	1 0.25 0.25	Neoprene, keine Kap., CEN
nylon, no cap., CEN	1 0.25 0.25	Nylon, keine Kap., CEN
plaster, building (molded, dry)	1.36 0.431 0.431	Putz, Gebäude (geformt, trocken)
plastic laminate, various types	2.259 0.2092 0.2092	Kunststoff-Laminat, verschiedene Arten
plate glass	1.8827 1.2134 1.2134	Tafelglas
plywood, IEA	1.17 0.125 0.125	Sperrholz, IEA
polyamide, no cap., CEN	1 0.3 0.3	Polyamid, keine Kap., CEN
polycarbonate, no cap., CEN	1 0.23 0.23	Polykarbonat, keine Kap., CEN
polyester resin, no cap., CEN	1 0.3 0.3	Polyesterharz, keine Kap., CEN
polyethylene (high dens), no cap., CEN	1 0.52 0.52	HD-Polyethylen (hohe Dichte), keine Kap., CEN
polyethylene, no cap., CEN	1 0.4 0.4	Polyethylen, keine Kap., CEN
polyisobutylene, no cap., CEN	1 0.24 0.24	Polyisobutylen, keine Kap., CEN
polystyrene expanded, IEA	0.039 0.033 0.033	Polystyrol expandiert, IEA
polystyrene extruded, IEA	0.059 0.024 0.024	Polystyrol extrudiert, IEA
polystyrene foam (d = 0.038) (1 atm)	0.0429 0.0328 0.0328	Polystyrol-Hartschaum (d = 0.038) (1 atm)
polystyrene foam (d = 0.046) (1 atm)	0.052 0.0259 0.0259	Polystyrol-Hartschaum (d = 0.046) (1 atm)
polystyrene foam (d = 0.046) (vacuum)	0.052 0.0081 0.0081	Polystyrol-Hartschaum (d = 0.046) (Vakuum)
polystyrene, foamed-in-place, rigid	0.113 0.0347 0.0347	Polystyrol-Ortschaum, hart
polystyrene, general purpose	1.4941 0.1255 0.1255	Polystyrol, allgemein
polystyrene, modified	1.4461 0.0837 0.0837	Polystyrol, modifiziert
polystyrene, no cap., CEN	1 0.17 0.17	Polystyrol, keine Kap., CEN
polystyrene, prefoamed, rigid, dow	0.0452 0.0418 0.0418	Polystyrol, vorgeschäumt, hart, dow?
polysulfone	1.5688 0.2594 0.2594	Polysulfon
polysulphide, no cap., CEN	1 0.19 0.19	Polysulfid, keine Kap., CEN
polyurethane foam, flexible	0.1054 0.0418 0.0418	Polyurethan(PUR)-Schaum, elastisch
polyurethane foamed-in-place, rigid	0.067 0.0325 0.0325	Polyurethan(PUR)-Ortschaum, fest
polyurethane rubber 1-100	2.0925 0.2929 0.2929	Polyurethan(PUR)-Gummi 1-100

polyurethane, no cap., CEN	1 0.3 0.3	Polyurethan (PUR), keine Kap., CEN
polyvinyl, no cap., CEN	1 0.4 0.4	Polyvinylchlorid (PVC), keine Kap., CEN
porous wood fibre panel, no cap., CEN	1 0.08 0.08	Poröse Holzfaserplatte, keine Kap., CEN
PTFE, no cap., CEN	1 0.24 0.24	PTFE, keine Kap., CEN
PVC, no cap., CEN	1 0.17 0.17	PVC, keine Kap., CEN
PVC/Vinyl (rigid), no cap., CEN	1 0.17 0.17	PVC/Vinyl (Hart-PVC), keine Kap., CEN
pyrex glass	1.6162 1.1297 1.1297	Pyrex-Glas
quartz sand (dry) (av prop) (see ref)	1.205 0.3347 0.3347	Quarzsand (trocken) (durchschn. Eigensch.) (sh. Ref)
quartz sand (wet) (h2o 4-23) (av prop)	1.2803 1.6736 1.6736	Quarzsand (feucht) (H ₂ O 4-23) (siehe Ref)
rock or stone (average properties)	2.1757 1.7573 1.7573	Naturstein (durchschnittl. Eigenschaften)
rock-wool, IEA	0.094 0.037 0.037	Steinwolle, IEA
rubber, buna, with carbon black	1.757 0.2427 0.2427	Gummi, Buna, mit Kohlenstoff, schwarz
rubber, butyl	1.7694 0.0879 0.0879	Gummi, Butylkautschuk
rubber, dielectric mix	2.3012 0.2092 0.2092	Gummi, Nichtleiter Mix
rubber, high k	2.3012 0.2929 0.2929	Gummi, hohes k
rubber, natural	1.9456 0.1381 0.1381	Gummi, Naturkautschuk
rubber, natural, foam	0.2092 0.0418 0.0418	Gummi, Naturkautschuk, Schaum
rubber, neoprene	2.72 0.1925 0.1925	Gummi, Neopren
rubber, nitrile	1.966 0.2427 0.2427	Gummi, Nitril
rubber, polyurethane elastomer I-100	2.0925 0.2929 0.2929	Gummi, Polyurethan(PUR)-Elastomer I-100
sand (dry) (d = 1.36 to 1.84) (av prop)	1.205 0.3347 0.3347	Sand (trocken) (d=1,36 bis 1,84) (durchschn.Eigensch.)
sand, northway (h2o 4-10) (av prop)	1.4226 0.8368 0.8368	Sand, Northway (H ₂ O 4-10) (durchschn.Eigensch.)
sand, quartz (wet) (h2o 4-23) (av prop)	1.2803 1.6736 1.6736	Sand, Quarz (feucht) (H ₂ O 4-23) (durchschn.Eigensch.)
sandstone (av prop) (see ref 51)	2.2133 2.5104 2.5104	Sandstein (durchschn.Eigensch.) (siehe Ref 51)
sandstone (high density)	2.502 4.184 4.184	Sandstein (hohe Dichte)
sandstone (low density)	2.1171 1.841 1.841	Sandstein (geringe Dichte)
silica brick, hard fired (sio2 94-95)	1.3556 1.6736 1.6736	Kieselerdeziegel, hart gebrannt (SiO ₂ 94-95)
silica gel (desiccant), no cap., CEN	1 0.13 0.13	Silicagel (Trockenmittel), keine Kap., CEN
silica glass, fused or vitrous	1.6386 1.3807 1.3807	Kieselerdeglas, verschmolzen oder vitrous?
siliceous brick (sio2 89, al2o3 9)(25p)	1.4535 0.9372 0.9372	Kieselerde-Ziegel (SiO ₂ 89, Al ₂ O ₃ 9) (25p)
silicon	1.6378 125.52 125.52	Silizium
silicon boride (sib4)	2.5732 9.8324 9.8324	Siliziumborid (SiB ₄)
silicon carbide (sic) (brick al2o3 1.7)	1.7013 11.715 11.715	Siliziumkarbid (SiC) (Stein Al ₂ O ₃ 1,7)
silicone foam, no cap., CEN	1 0.12 0.12	Silikon-Schaum, keine Kap., CEN
silicone, no cap., CEN	1 0.35 0.35	Silikon, keine Kap., CEN
snow, fresh	0.2092 0.1046 0.1046	Schnee, frisch
snow, packed	1.1506 0.4686 0.4686	Schnee, gepresst
soda-lime glass	1.7321 1.3389 1.3389	Soda-Kalk?-Glas
soil (av props)	1.3598 0.8368 0.8368	Erdreich (durchschnittl. Eigenschaften)
soil, clay (wet)	4.3935 1.5062 1.5062	Erdreich, Lehm (feucht)
soil, fine quartz flour (dry)	0.6554 0.1674 0.1674	Erdreich, feines Quarzmehl (trocken)
soil, fine quartz flour (h2o 21 pc)	2.6645 2.2175 2.2175	Erdreich, feines Quarzmehl (H ₂ O 21 %)
soil, loam (dry) (av prop) (see refs)	1.0042 0.251 0.251	Erdreich, Ton (trocken) (durchschn.Eigensch.) (sh.Ref)
soil, loam (h2o 4-27 pc) (av, see refs)	1.6736 0.4184 0.4184	Erdreich, Ton (H ₂ O 4-27 %) (durchschn., sh. Ref)
soil, mars surface (see ucll-50309)	1.9246 0.0134 0.0134	Erdreich, Marsoberfläche (siehe ucll-50309)
soil, sandy (h2o 8)	1.757 0.5858 0.5858	Erdreich, sandig (H ₂ O 8 %)
soil, sandy dry	1.3117 0.2636 0.2636	Erdreich, sandig, trocken
steel, alloy and mild (4130, 4340)	3.8913 41.84 41.84	Stahl, Legierung, fein (4130, 4340)
steel, alloy, cast	3.6034 46.024 46.024	Stahl, Legierung, Guß
steel, IEA	3.7 60 60	Stahl, IEA
steel, stainless ca15, ca40 (cast)	3.5021 25.104 25.104	Stahl, rostfrei ca15, ca40 (Guß)
urethane (liquid), no cap., CEN	1 0.3 0.3	Urethan (flüssig), keine Kap., CEN
vinyl (flexible), no cap., CEN	1 0.12 0.12	Vinyl (elastisch), keine Kap., CEN
water (h2o) (gas) (1 atm)	0.0012 0.0234 0.0234	Wasser (H ₂ O) (gasförmig) (1 atm)
water (h2o) (gas) (satd)	0.0011 0.0178 0.0178	Wasser (H ₂ O) (gasförmig) (gesättigt)
water (h2o) (liquid)	4.184 0.6025 0.6025	Wasser (H ₂ O) (flüssig)
water (h2o) (solid) (ice)	3.867 2.092 2.092	Wasser (H ₂ O) (fest) (Eis)
water, heavy (h2o) (liquid)	4.6255 0.5607 0.5607	Wasser, schwer (H ₂ O) (flüssig)
window glass, lime	1.8677 1.318 1.318	Fensterglas, Kalk?
wood chip board, no cap., CEN	1 0.13 0.13	Holzspanplatte, keine Kap., CEN
wood, balsa (across grain)	0.7363 0.0837 0.0837	Holz, Balsa (quer zur Faser)
wood, cypress (across grain)	1.0585 0.0962 0.0962	Holz, Zypresse (quer zur Faser)
wood, hardwood, no cap., CEN	1 0.2 0.2	Holz, Hartholz, keine Kap., CEN
wood, mahogany (across grain)	1.2425 0.1297 0.1297	Holz, Mahogoni (quer zur Faser)
wood, maple (across grain)	1.6337 0.1757 0.1757	Holz, Ahorn (quer zur Faser)
wood, norway pine (across grain)	1.2656 0.1506 0.1506	Holz, norwegische Kiefer (quer zur Faser)

wood, oak	1.7	0.19	0.19
wood, oak, red, black (across grain)	1.4548	0.1464	0.1464
wood, oak, white, live (across grain)	1.9676	0.2092	0.2092
wood, oregon pine (across grain)	1.1735	0.113	0.113
wood, pine (with grain)	1.2656	0.3431	0.3431
wood, plywood, no cap., CEN	1	0.15	0.15
wood, redwood/cedar, no cap., CEN	1	0.11	0.11
wood, softwood, no cap., CEN	1	0.14	0.14
wood, spruce (across grain)	0.5146	0.1255	0.1255
wood, spruce (with grain)	0.5146	0.2301	0.2301
wood, teak (across grain)	1.4726	0.1715	0.1715
wood, virginia pine (across grain)	1.2425	0.1423	0.1423
wood, white fir (across grain)	1.0354	0.1088	0.1088
wood, white pine (across grain)	1.2195	0.1297	0.1297
woodwool cement	0.64	0.071	0.071
zinc	2.7782	111.71	111.71

Holz, Eiche
Holz, Eiche, rot, schwarz (quer zur Faser)
Holz, Eiche, weiß, lebend (quer zur Faser)
Holz, Oregon-Kiefer (quer zur Faser)
Holz, Kiefer (in Faserrichtung)
Holz, Sperrholz, keine Kap., CEN
Holz, Mammutbaum/Zeder, keine Kap., CEN
Holz, Weichholz, keine Kap., CEN
Holz, Fichte (quer zur Faser)
Holz, Fichte (in Faserrichtung)
Holz, Teak (quer zur Faser)
Holz, Virginia-Kiefer (quer zur Faser)
Holz, Weißtanne (quer zur Faser)
Holz, Weißkiefer (quer zur Faser)
Holzwohle-Leichtbauplatte
Zink

Anhang C. Beispiel einer Eingabedatei

```
*****
* HEAT2 version 5.00 - Input data file EXAMPLE 3.DAT
* Date: 5/5/00 Time: 11:59:34 AM
* Thomas Blomberg, Lund Group for Computational Building Physics
*****
-MEMORY NOTES FOR PROJECT-
```

```
* Following blocks are done:
  Geometrical Meshes
  Thermal Properties
  Functions
  Boundary Conditions
  Internal Modifications
  Internal Resistances
  Initial Temperatures
  Simulation and Printing
```

```
*****
* GEOMETRICAL MESHES BLOCK *
*****
```

```
* Number of input mesh intervals in X-direction: 3
* Number of input mesh intervals in Y-direction: 5
* Number of boundaries: 4
* Description of boundaries
  bound from I J
  1 :0 :0
  2 :3 :0
  3 :3 :5
  4 :0 :5
```

```
* Lengths, number of computation cells and expanding coefficient
  between the mesh points
* X-direction
  length [m] comp cells exp coeff
  0 and 1 : 0.001500 : 1 : 1
  1 and 2 : 0.013500 : 15 : 1
  2 and 3 : 0.485000 : 48 : 1.08
```

```
* Y-direction
  length [m] comp cells exp coeff
  0 and 1 : 0.001500 : 2 : 1
  1 and 2 : 0.033500 : 35 : 1
  2 and 3 : 0.001500 : 2 : 1
  3 and 4 : 0.005000 : 5 : 1
  4 and 5 : 0.006000 : 6 : 1
```

```
*****
* THERMAL PROPERTIES BLOCK *
*****
```

```
* Basic properties for whole area
```

```
Lambda(x) : 1 [W/(m·K)]
Lambda(y) : 1 [W/(m·K)]
Volumetric heat capacity : 1 [MJ/(m³·K)]
Frame cavity
```

```
* Number of partial areas :6
* Area and corresponding thermal properties
* Area lower left upper right Lambda(x) Lambda(y) C
* I J I J [W/(m·K)] [W/(m·K)] [MJ/(m³·K)]
  1 :0 :0 :3 :5 :0.029 :0.029 :1 Example 3, Lambda=0.029
  2 :0 :4 :3 :5 :1.15 :1.15 :1 Example 3, Lambda=1.15
  3 :0 :3 :2 :4 :0.12 :0.12 :1 Example 3, Lambda=0.12
  4 :0 :2 :2 :3 :230 :230 :1 Example 3, Lambda=230
  5 :0 :0 :1 :2 :230 :230 :1 Example 3, Lambda=230
  6 :0 :0 :3 :1 :230 :230 :1 Example 3, Lambda=230
```

* FUNCTIONS BLOCK *

* Combinations
* A Periodic $f(t)=f_1+f_2\sin(2\pi*(t-t_0)/t_p)$
* B Stepwise Constant
* C Stepwise Linear

* Number of Functions:3
* Typenumber/Combination
1/:A f1:1 f2:1 t0:0.000 tp:86400.000
2/:A f1:1 f2:1 t0:0.000 tp:86400.000
3/:A f1:1 f2:1 t0:0.000 tp:86400.000

* BOUNDARY CONDITIONS BLOCK *

* Combinations
* A Flow - Constant
* B Temp - Constant
* C Flow - Function
* D Temp - Function

* Number of Types:3
* Typenumber/Combination
1/:A Flow : 0 [W/m]
2/:B Temperature : 20 °C R : 0.11 [m²·K/W]
3/:B Temperature : 0 °C R : 0.06 [m²·K/W]

* Typenumber/Corresponding Boundaries (list ends with zero)
1/:2 :4 :0
2/:1 :0
3/:3 :0

* INTERNAL MODIFICATIONS BLOCK *

* Combinations
* A Heat source - Constant
* B Heat source - Function
* C Area with given temp - Constant
* D Area with given temp - Function
* E Hole with air (no capacity)
* F Hole with fluid (with capacity)
* G Hole with air (radiation+vent.)
* H Pipe (heat source) - Constant
* I Pipe (heat source) - Function
* J Pipe (given temp) - Constant
* K Pipe (given temp) - Function

* Number of Internal Modifications:1
* Typenumber/Combination
1/:A Flow : 1 [W/m]

* Number of Areas :0

* INTERNAL RESISTANCES BLOCK *

* Number of resistance lines :0

* INITIAL TEMPERATURES BLOCK *

* Basic temperature for whole area : 0 °C

* Number of partial areas :0

* SIMULATION/PRINTING BLOCK *

Start time: 0
Stop time: 31536000.000 s <=> 1y
Print start time: 0.000 s
Print Stop time: 31536000.000 s <=> 1y
Time interval: 31536000.000 s <=> 1y
Print Temperatures :Y
Print Boundary Flows :Y
Results To Screen :Y
Results To File :N

& 1.995 (Relaxation)
& 0 (Flow crit)
& 0.0001 (Flow crit.)
& 0.0001 (Temp crit.)
& 100000 (Max iter.)
& 1 (Update)
& 10 (Iter)
& 3 (CPU)
& 3600 (Time)
& 0 (record disabled)
& 1423 (Number of iterations)
& 1 (notify when solved enabled)
& 0 (beep when solved disabled)
& 1 (Order of approximation)
& 3 (Frame cavity option)
& 0 (Frame cavity Tmin)
& 20 (Frame cavity Tmax)
& 0 (Frame cavity direction of heat flows)
& 100 (Frame cavity iter between update)
& 1 (Column for graphics)
& 1 (Num Record columns)
& 2 (index)
& 0 (x)
& 0 (y)
Material file :DEFAULT.MTL
H2P file :EXAMPLE 3.H2P
& 50 (grid x)
& 50 (grid y)
& 0.5 (scale factor)
& 1 (long boundaries)
& 1 (Update made)