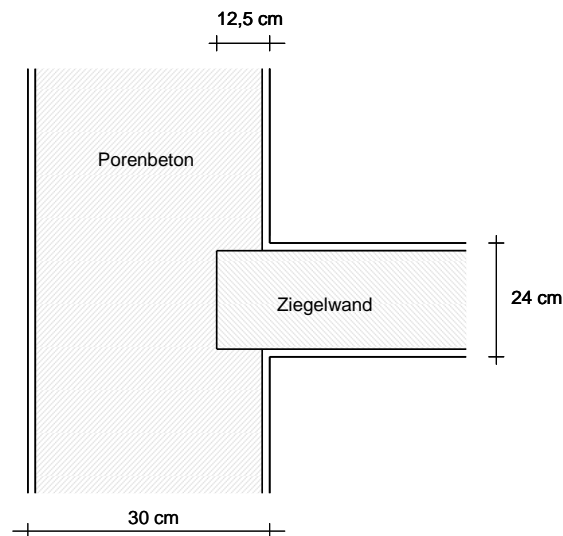


Simulation von 2D-Konstruktionsdetails mit DELPHIN

Diese Anleitung demonstriert, wie sich mit DELPHIN 2D-Konstruktionsdetails modellieren und berechnen lassen. Dabei werden die grundlegende Herangehensweise zur Modellierung einer 2D-Konstruktion und die Definition aller Randbedingungen und Ausgabengrößen beschrieben. Es wird ein einfaches Wärmebrückendetail modelliert und rein thermisch berechnet, um die grundlegende Herangehensweise zu beschreiben.

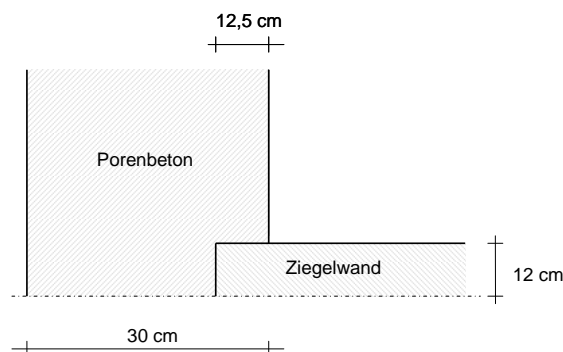
2D-Wärmebrückendetail

Das abgebildete Detail einer einbindenden Wand in eine monolithische Außenwand soll mit DELPHIN modelliert werden.



Vereinfachung der Konstruktion

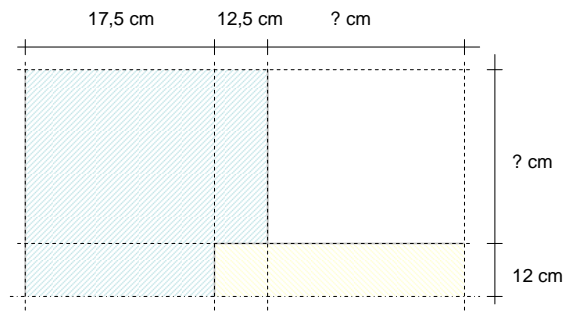
Vor der Eingabe in DELPHIN sollte jede Konstruktion zunächst vereinfacht werden. In diesem rein thermischen Beispiel kann z.B. der Putz vernachlässigt werden. Außerdem lässt sich die Symmetrie der Konstruktion ausnutzen. Unten ist die zu modellierende, vereinfachte Konstruktion dargestellt.



Konstruktionsraster erstellen

Konstruktionen in DELPHIN werden innerhalb eines rechteckigen Rasters definiert. Dabei muss die Konstruktion zunächst in Konstruktionslinien unterteilt werden. Die entstehenden Rechtecke werden dann mit den entsprechenden Materialien gefüllt, oder, im Falle von Aussparungen, freigelassen.

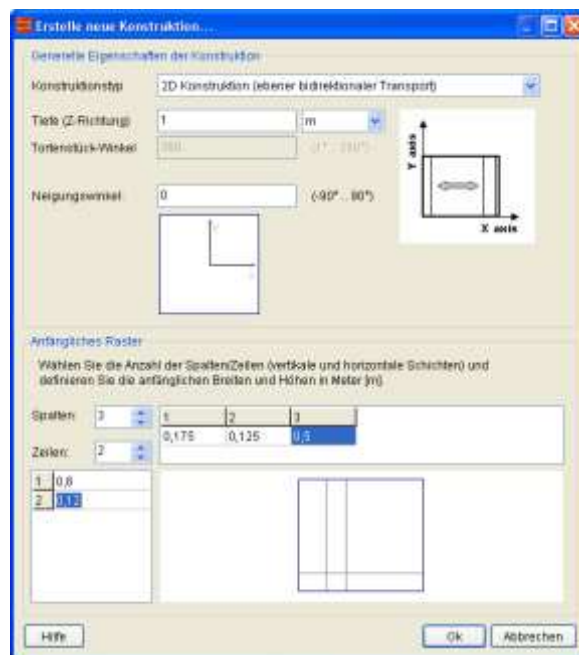
Für das Konstruktionsmodell soll nun folgendes Gitter definiert werden.



Für die ? gilt es noch eine Länge bzw. Breite zu definieren. Dabei ist zu bedenken, dass die Länge der einbindenden Wand, sowie die Länge der Außenwand groß genug gewählt werden, damit an den Schnitten eindimensionale Bedingungen vorherrschen, d.h. der Wärmebrückeneffekt ist dort abgeklungen. Der Einfluss der Wärmebrücke reicht meistens etwas über die Querschnittsbreite hinaus. Als grobe Abschätzung sollte die 2-fache Dicke der Konstruktion verwendet werden. Hier sollen im Gitter 60 cm für die Länge der Außenwand und 50 cm (aufgerundet $24 \text{ cm} \cdot 2$) für die Länge der einbindenden Wand verwendet werden.

Eingabe des Modells in DELPHIN

Nun erfolgt wie in der 1. Anleitung beschrieben die Eingabe der Konstruktion in DELPHIN. Nach dem Erstellen eines neuen Projektes unter Verwendung der Standard-Projektvorlage, wird im Konstruktionsdefinitionsfenster eine 2D-Konstruktion ausgewählt und das Gitter eingegeben. Wie später gezeigt wird, kann das Raster auch nach der anfänglichen Erstellung verändert und angepasst werden, sodass Variantenstudien leicht möglich sind.



Bei der Eingabe der Geometrie ist zu beachten, dass **Gitterbreiten und -höhen in m** angegeben werden.


Nun erfolgen der Import der Materialien und das Zuweisen der Materialien zu den jeweiligen Bereichen. Die angegebenen Wärmeleitfähigkeiten entsprechen in etwa einer Porenbetonaußenwand und einer einbindenden Ziegelwand. Es wird empfohlen für dieses Beispiel den **Autoclaved Aerated Concrete** (Porenbeton, ID 1) und **Brick Joens** (Ziegel, ID 34) zu verwenden.

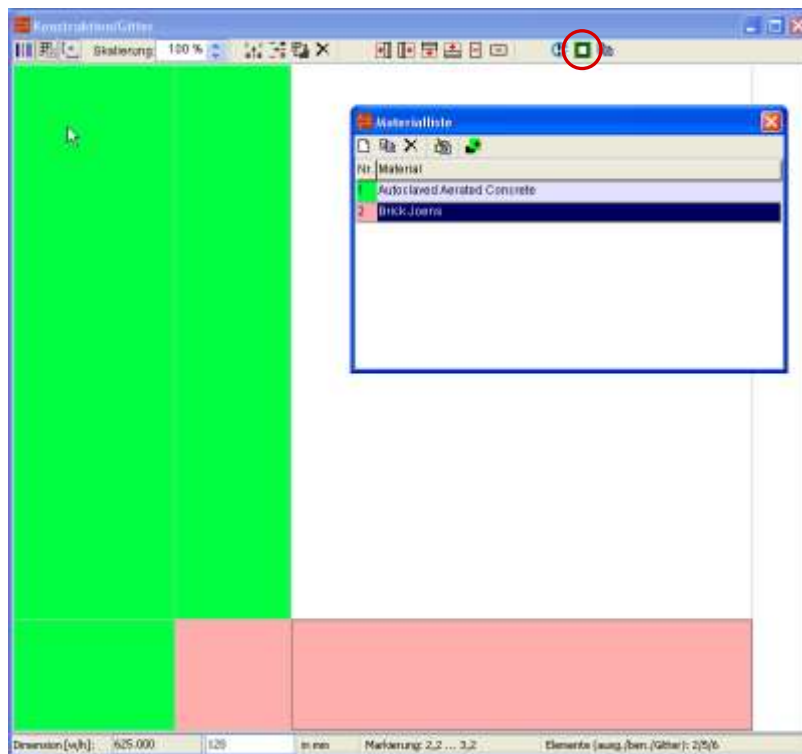
Im Folgenden wird von Zuweisungsbereichen gesprochen. Das sind rechteckige Bereiche der Konstruktion, welche mithilfe der Maus oder Tastatur im Konstruktionsgitter markiert werden können. In der Fußzeile des Konstruktionsfensters wird eine solche Markierung z.B. als 1,1 ... 3,2 angezeigt:



Bei 2D-Konstruktionen gibt es mehrere Möglichkeiten, Materialien über entsprechende Markierungen anzuzeigen:

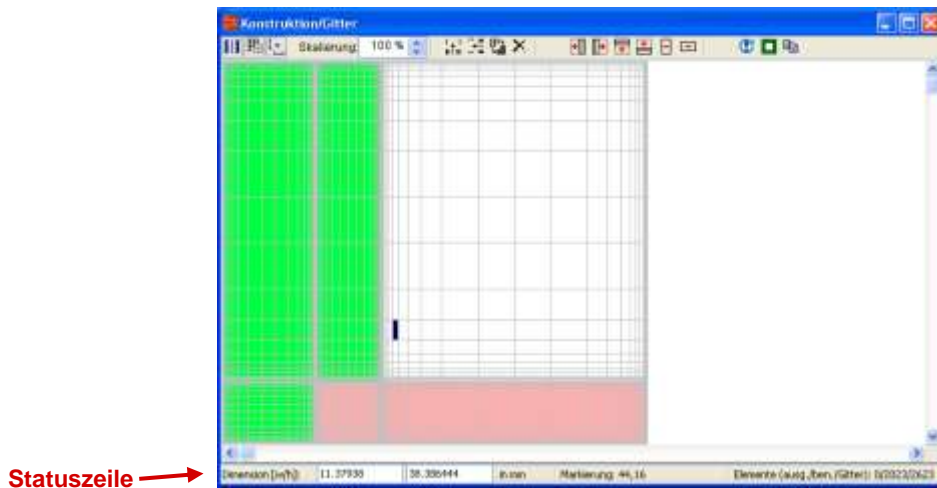
1. Markierung von Rechteckbereichen mit Elemente eines Materials und Zuweisung bis alle Elemente zugewiesen wurden (kann bei komplexen 2D-Details etwas aufwändig sein)
2. Markierung von sich überschneidenden Rechteckbereichen und Überschreiben vormalig zugewiesener Bereiche durch spätere Zuweisungen. In diesem Beispiel kann also zunächst der Bereich 1,1...2,2 markiert werden und einen Außenwandziegel zuweisen. Dann kann 2,2...3,2 ausgewählt und die Betonwand zugewiesen werden. Dadurch wird das Ziegelmaterial in Element 2,2 durch den Beton überschrieben.

Die Variante 2 erlaubt meist ein schnelleres Erstellen der Konstruktion. Dabei gibt es noch eine Sonderform einer Zuweisung, die insbesondere für Hohlräume oder Ecken die Arbeit vereinfacht. In der Schaltflächenleiste des Konstruktionsfensters bewirkt das Symbol  das Zuweisen eines leeren Bereichs. Damit können vorherige Materialzuweisungen teilweise entfernt werden. Soll jedoch eine komplette Zuweisung entfernt werden, ist es empfehlenswert im Zuweisungslistenfenster die entsprechende Materialzuweisung zu löschen.




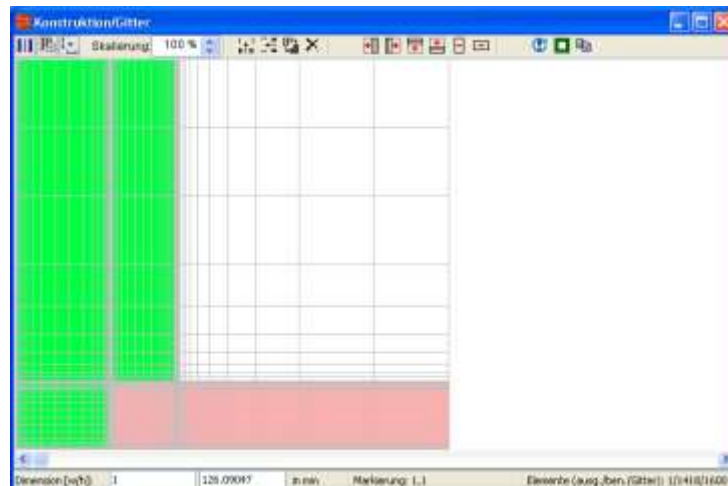
Gittergenerierung


Nachdem nun das Konstruktionsraster erstellt und die Materialien zugewiesen wurden, soll das Simulationsgitter erzeugt werden. Das geschieht am Einfachsten durch Verwendung des Dialogs für automatische Diskretisierung. In diesem Dialog müssen beide Diskretisierungsrichtungen eingeschaltet sein (standardmäßig für 2D-Konstruktionen), wahlweise kann noch eine minimale Elementdicke festgelegt werden. In diesem Tutorial sollen die Standardeinstellungen verwendet und erstellt folgendes Gitter werden.



An dieser Stelle sollten noch einige Funktionen des Konstruktionsfensters erläutert werden. In der Statuszeile werden neben Breite und Höhe des aktuell gewählten Elements auch die aktuelle Markierung sowie die Anzahl der markierten und benutzten Elemente angezeigt. Die letzte Zahl ist die Gesamtgröße des Gitters, jedoch ist eher die zweite Elementzahl entscheidend für die Berechnungsgeschwindigkeit und die Größe der Ausgabedateien. Ein Wert < 6000 ist generell empfehlenswert für schnellere Berechnungen. Für rein thermische Berechnungen sind Elementzahlen bis max. 30000 empfohlen.

Durch die automatische Diskretisierung wird bei diesem Beispiel am oberen, unteren und am rechten Rand der Konstruktion das Gitter zu fein gewählt. So sind z.B. im oberen Bereich keine Gradienten in vertikaler Richtung zu erwarten (am oberen Rand sollten die Isolines vertikal verlaufen) und das Gitter muss daher nach oben nicht feiner werden. Und auch am rechten Rand und an der Symmetrielinie könnte ein gröberes Gitter verwendet werden. Dies kann mithilfe der manuellen Diskretisierung erfolgen, erreichbar durch die Schaltflächen . Die Einsparung von Gitterelementen kann bei komplexeren Details und hygrothermischer Berechnung eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung bewirken. In diesem Beispiel ist das jedoch nicht notwendig.



Die ersten Schaltflächen des Konstruktionsfensters oben links  dienen der Darstellung des Simulationsmodells und Berechnungsgitters: proportionale oder gleichförmige Darstellung, zeigen oder verstecken der Gitterlinien, beibehalten des Seitenverhältnisses oder gestreckte Darstellung.

Zuweisung der Randbedingungen

Den einzelnen Rändern der Konstruktion müssen nun Randbedingungen (BC = Boundary Conditions) zugewiesen werden. Die folgende Skizze zeigt die notwendigen Randbedingungen und die dazugehörigen Klimakomponenten.

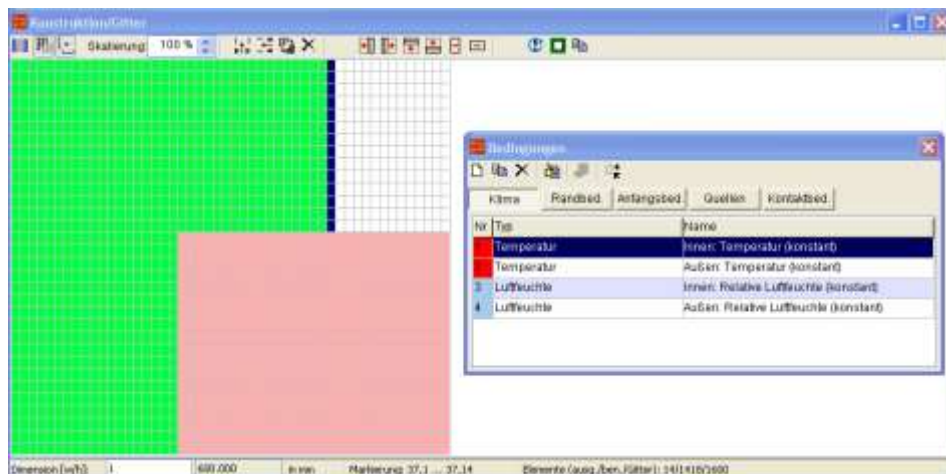



An der Symmetrielinie und an den Bereichsgrenzen, in denen 1D-Bedingungen erwartet werden, müssen keine Randbedingungen angelegt werden. Für dieses Beispiel sind ausschließlich Wärmeleitungsrandbedingungen mit den dazugehörigen Temperaturen notwendig. Die Übergangsbedingungen sollten überprüft und gfls. Verändert werden.

Das Standard-Projekt enthält bereits Klima- und Randbedingungsdefinitionen, welche hier einfach verwendet werden. Das Zuweisen erfolgt wie im Tutorial 1 beschrieben:

1. Auswählen des Bereichs von Elementen, denen Randbedingungen zugewiesen werden sollen
2. Auswählen der Randbedingungsdefinition
3. Zuweisen der Randbedingung

Der folgende Screenshot zeigt, wie die Randbedingung an der Innenseite zugewiesen wird. Es empfiehlt sich hierbei, den gleichförmigen Darstellungsmodus zu wählen, damit die Elementauswahl am Rand leichter fällt. Es sind nur Elemente zu markieren, die eine Berührungsfläche mit der Randbedingung haben, Ecken genügen nicht.

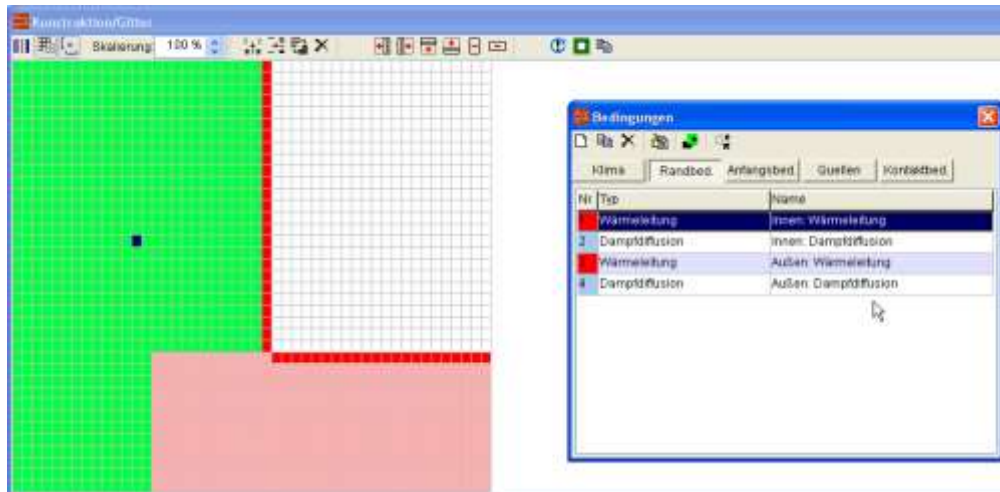


Nach Klicken des Zuweisungsknopfes  öffnet sich ein Dialog mit Auswahl der Seite der Zuordnung.



Hier ist der jeweilige Rand des Elements für Verknüpfung mit einer Randbedingung auszuwählen. **Randbedingungen im Innern einer Konstruktion zwischen zwei Materialien werden bei der Berechnung nicht verwendet!**

Sind alle Randbedingungen zugewiesen, können die Zuweisungen durch Klick auf den jeweiligen Randbedingungstyp überprüft werden. Wird also z.B. die Wärmeleitungsrandbedingung an der Innenseite ausgewählt, erscheint im Konstruktionsfenster eine farbliche Hervorhebung aller Elemente, denen die RB zugewiesen wurde.



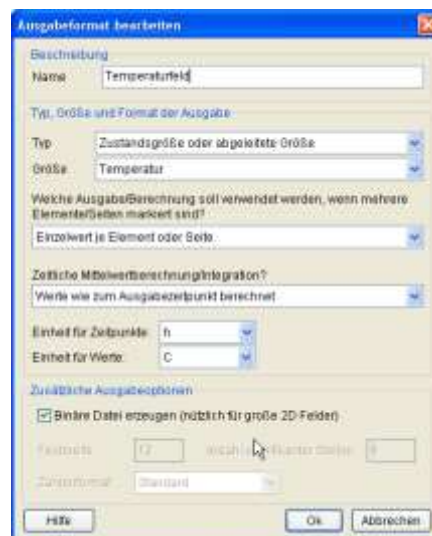
Im Zuweisungsfenster können zudem alle Zuweisungen einzeln überprüft werden. Es sollten insgesamt 3 Randbedingungs-zuweisungen aufgelistet sein: eine für die außenseitige Wärmeleitung und zwei für die innenseitigen Wärmeleitungsrandbedingungen, die wie im Screenshot oben zugewiesen wurden.

Ausgaben

Bei einer Wärmebrückendetailberechnung ist im Allgemeinen das Temperaturfeld für die rein visuelle Analyse interessant, z.B. zum Bestimmen des Punktes mit der tiefsten Temperatur bei komplexen Geometrien. Entscheidend für die Bewertung sind die lokalen Temperaturen in den kritischen Bereichen. Außerdem sind Wärmestromdichten über die Innenoberfläche interessant, um den tatsächlichen Wärmeverlust infolge der Wärmebrücke zu quantifizieren.

Aus dem Temperaturfeld der Gesamtkonstruktion lassen sich im Post-Processing alle weiteren punktuellen Temperaturen sowie Temperaturverläufe in Vertikal- oder Horizontalschnitten entnehmen. Daher wird zunächst der gesamten Konstruktion eine Temperaturfeldausgabe zugeordnet.

Die Standard-Projektvorlage liefert bereits vordefinierte Ausgabeformate. Im Ausgabenfenster können jedoch auch jederzeit eigene Ausgabeformate definiert werden. Der folgende Screenshot zeigt eine mögliche Definition eines Formats für eine Temperaturfeldausgabe.



Die Zuweisung einer Temperaturfeldausgabe erfolgt, wie gewohnt, in 3 Schritten:

1. Auswählen des Bereichs von Elementen für die Ausgabe.
2. Auswählen des Ausgabeformats (oder einer Ausgabedatei, falls mehrere Bereiche mit dem gleichen Format in einer Datei erfasst werden sollen).
3. Zuweisen des Ausgabeformats bzw. der Ausgabedatei.

Wenn ein Ausgabeformat zugewiesen wird, erscheint der Dialog zum Anlegen einer neuen Ausgabedatei. Diese Ausgabedatei wird mit dem gewählten Format, dem Zeitraster für die Ausgaben sowie den markierten Elementen erstellt. Für dieses Beispiel soll das gesamte Temperaturfeld ausgegeben werden, d.h. mittels Tastenkürzel Strg+A können im Konstruktionsfenster alle Elemente markiert werden und das Temperaturfeld-Ausgabeformat kann zugewiesen werden. Es empfiehlt sich nur bei kurzer Simulationsdauer bei Feldern das Stunden-Ausgaberraster zu wählen.



Wenn z.B. nur das Temperaturfeld des Porenbetons ausgegeben werden soll, bedingt das zwei Elementzuweisungen für die Porenbeton-Temperaturfeld-Ausgabedatei. Dabei wird folgende Vorgehensweise empfohlen.

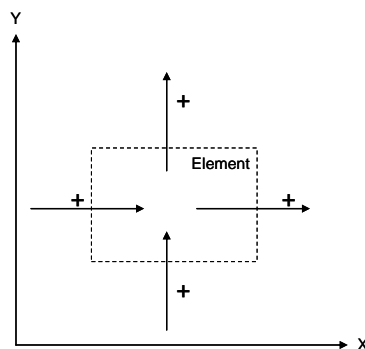
1. Im Ausgabefenster die Registerkarte „Ausgabedateien“ wählen.
2. Neue Ausgabedatei erstellen (auf „Neu“ Schaltfläche klicken) und dabei das Temperaturfeld-Ausgabeformat, Zeitraster und Dateiname, z.B. „Temperaturfeld_Porenbeton.out“ wählen und Dialog bestätigen.
3. Nun in 2 Schritten die Rechteckbereiche auswählen, welche den Porenbeton definieren und jeweils der Ausgabedatei zuweisen. Durch einen Klick auf die Ausgabedatei werden im Konstruktionsfenster nun alle zugewiesenen Elemente dieser Ausgabedatei angezeigt.

Dieses Verfahren ist besonders dann nützlich, wenn integrale Ausgaben, wie z.B. die Gesamtwassermasse einer Dämmung, mit nicht-rechteckigem Querschnitt erhalten werden sollen.

Wollen Sie sich für einen bestimmten Bereich der Konstruktion eine Durchschnittstemperatur ausgeben lassen, wie z. B. in der Innenecke, müssen Sie ein weiteres Ausgabenformat definieren, welches von den Angaben auf der vorigen Seite abweicht: wählen Sie statt ‚Einzelwert je Element/Seite‘ das Format ‚Gewichteter Durchschnittswert ...‘ aus. Dieses Ausgabeformat können Sie dann einem oder mehreren Elementen zuordnen.

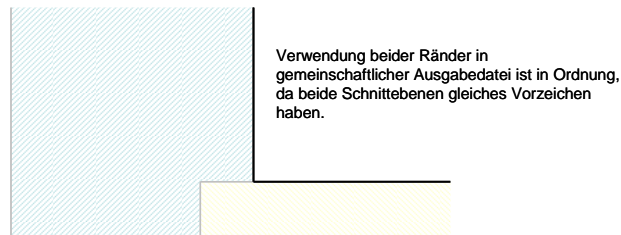
Bei der Ausgabe von Wärmeströmen bzw. anderen Stromdichten ist die **Vorzeichendefinition** in DELPHIN zu beachten, da es bei falscher Kombination von Zuweisungen dazu führen kann, dass sich eigentlich gleich gerichtete Ströme (also z.B. Wärmeströme von innen nach außen) durch unterschiedliche Vorzeichen gegenseitig aufheben.

Folgendes Diagramm illustriert die Vorzeichendefinition in DELPHIN.

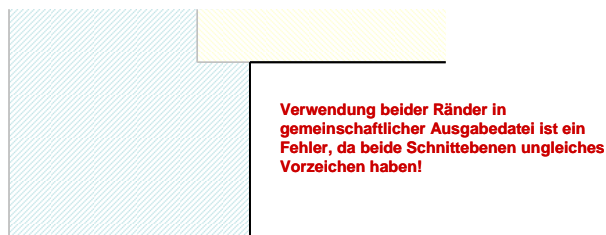


Unabhängig davon, ob es sich um einen Rand des Bauteils oder um die Grenze zwischen zwei Materialien handelt: Flüsse in Richtung der Koordinatenachsen sind stets positiv. Das bedeutet, dass beliebige Schnitte für die

Bestimmung von Wärmeströmen durch die Konstruktion gelegt werden können, solange die gleiche Flussrichtung verwendet wird. Das soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.



Beide Ränder haben die gleiche Vorzeichendefinition, deshalb können im obigen Beispiel die beiden Schnittflächen für ein räumliches Wärmestromintegral in einer Ausgabedatei zusammengefasst werden.



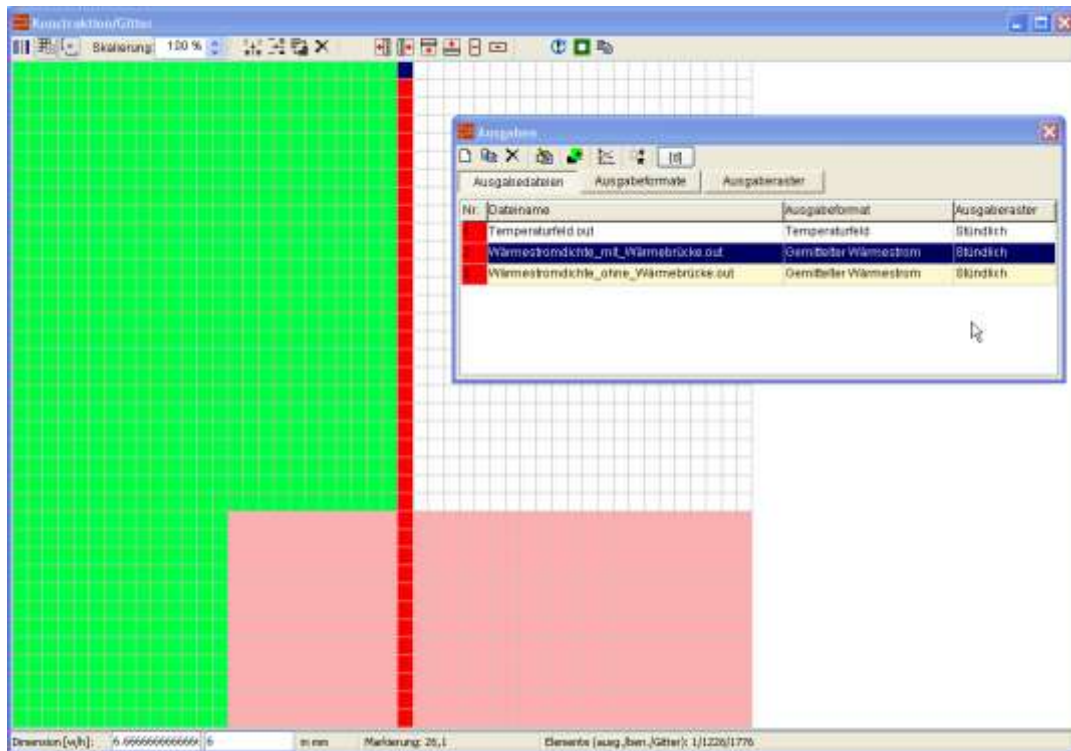
In der zweiten Variante handelt es sich um einen Fehler. Ein Wärmestrom von innen nach außen wird in der oberen Fläche positiv (mit der Koordinatenrichtung), jedoch in der vertikalen Schicht negativ ausgegeben. In der vertikalen Ausgabebene ist der Wärmestrom entgegen der Koordinatenrichtung gerichtet und wird dadurch negativ. Um hier den Gesamtwärmestrom zu bestimmen, sind zunächst zwei getrennte Ausgabedateien anzulegen. Die Vorzeichenkorrektur und Summierung erfolgt dann im Post-Processing.

Vorteilhafterweise kann durch diese strenge Vorzeichendefinition die Ermittlung des Wärmeverlustes infolge der Wärmebrücke viel einfacher erfolgen. Dazu kann als Ausgabeformat eine gemittelte Wärmestromdichte verwendet werden.



Wichtig sind bei der Definition die Einstellung der „Flussgröße“ als Ausgabetypp, und der „Gewichtete Durchschnittswert“ als räumliche Berechnungsvorschrift.

Nach Definition des Ausgabeformats kann eine Ausgabe wie ein Vertikalschnitt durch die Konstruktion gelegt werden. Der folgende Screenshot verdeutlicht dieses:



Zum Vergleich kann eine weitere Ausgabe gleichen Formats nur für den inneren Rand des obersten Elements definiert werden. Da sich dieses Element außerhalb des Wärmebrückeneinflussbereichs befindet, sollten hier 1D-Verhältnisse vorliegen, sodass auf diese Weise ein Referenzwert für die ungestörte Konstruktion erhalten wird.

Simulationseinstellungen und Durchführen der Berechnung

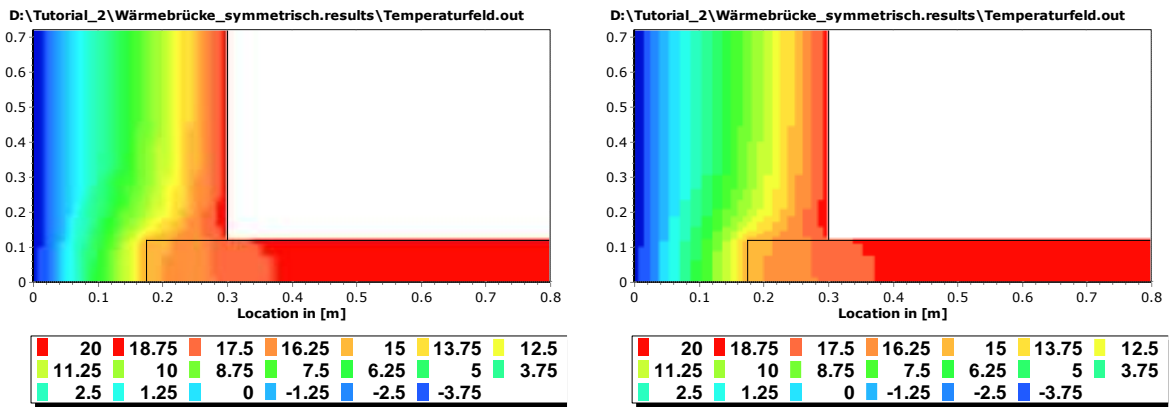
Nach dem Modellieren der Konstruktion und der Zuweisung von Randbedingungen und Ausgaben müssen nun lediglich die Simulationsbedingungen eingestellt werden. Im Simulationseinstellungsdialog (>> Simulation >> Modellierungs- und Simulationseinstellungen) und muss die Feuchtemassenbilanzgleichung deaktiviert werden und die Simulationszeit auf ca. 2 Tage eingestellt werden. Innerhalb dieses Zeitraumes könnte der stationäre Zustand erreicht werden.

Danach kann die Simulation gestartet werden und sollte in wenigen Sekunden abgeschlossen sein.

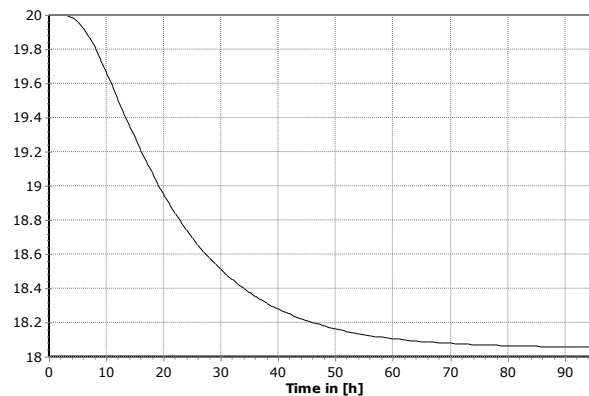
Auswertung

Für die Auswertung steht das DELPHIN – Post-Processing oder wahlweise ein anderes Analysewerkzeug wie z.B. TecPlot zur Verfügung. wird in einer anderen Anleitung detailliert beschrieben. Hier sollen nur kurz die Ergebnisse dargestellt werden.

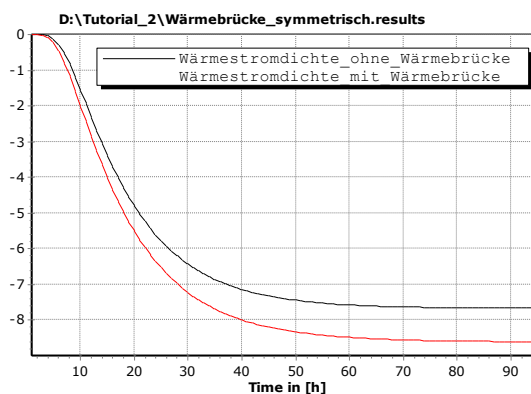
Das berechnete stationäre Temperaturfeld ist nachfolgend im interpolierten und diskreten Modus dargestellt. Letzterer (rechts) lässt deutlich das darunterliegende Gitter erkennen. In Bereichen starker Krümmung sowie am Rand kann das Gitter verfeinert werden, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Weiterhin ist zu erkennen, dass am oberen Rand der ungestörte Bereich gerade beginnt, bzw. sogar noch leicht der Einfluss der Wärmebrücke zu erkennen ist. Dahingegen könnte die einbindende Wand noch gekürzt werden, um so bei komplexeren Geometrien Gitterelemente und damit Rechenzeit zu sparen.



Wird der Zeitverlauf der Temperatur am kritischen Punkt (Innenecke) betrachtet, so erkennt man, dass der stationäre Zustand auch nach 2 Tagen noch nicht ganz erreicht ist. Es ist jedoch kein nennenswerter weiterer Abfall der Temperatur zu erwarten. Für die folgende Ausgabe wurde die Simulationszeit im Simulationseinstellungsdialog um 2 Tage verlängert und die Simulation fortgesetzt (>>Sim... >> Schaltfläche „Berechnung fortsetzen“).



Bei der Betrachtung der Wärmestromausgaben wird aus dem Vorzeichen zunächst die Flussrichtung ersichtlich: Wärmestrom entgegen der Koordinatenrichtung, also wie zu erwarten, von innen nach außen.



Ebenso erkennt man, dass die Wärmebrücke den mittleren Wärmestrom aus den bewohnten Räumen nach außen im stationären Zustand um ca. 12 % vergrößert.

Zusammenfassung

In dieser Schritt-für-Schritt-Anleitung wurde das prinzipielle Vorgehen zur Modellierung einer 2D-Konstruktion gezeigt und erläutert. Analog können hygrothermische Simulationen mit weitaus komplexeren Geometrien eingegeben und berechnet werden.

Aufgaben

1. Modellierte obige Konstruktion ohne Berücksichtigung der Symmetrie und vergleiche die Ergebnisse!
2. Verfeinere das Gitter durch Anpassen der Diskretisierungsoptionen und vergleiche die stationären Temperaturen in der Wandinnenecke (nach einer Diskretisierung mit zugewiesenen Flussausgaben müssen gegebenenfalls die Ausgabebereiche angepasst werden)!
3. Füge eine Innendämmung hinzu und vergleiche den Einfluss der Wärmebrücke auf Temperatur und Wärmeströme!
4. Führe die Simulation ohne und mit Innendämmung als hygrothermische Simulation durch. Dabei müssen zusätzlich zu den Wärmeleitungsrandbedingungen noch die Dampfdiffusionsrandbedingungen zugewiesen werden!

... Ende des 2. Tutorials ...