Abschlussbericht

Entwicklung einer Heizungs-/Solarthermie "Toolbox" für die Simulationsumgebung MATLAB®/SIMULINK®

Förderkennzeichen BMBF 1700698

FH Aachen, Abteilung Jülich

Juli 2000

**B. Hafner, K. Schwarzer, J. Plettner-Marliani,
C. Wemhöner, C. Faber, T. Wenzel**

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1
2 AUFGABENSTELLUNG 2
2.1 Anwendungsbereiche der Software 2
2.2 Stand der Technik: Verfügbare Simulationssoftware 2
2.3 Kurzbeschreibung des Programmpakets MATLAB/SIMULINK 4
2.4 Ziele des Vorhabens 5
3 ERGEBNISSE 6
3.1 Gesamtkonzept der Toolbox 6
3.1.1 Definition der Vektoren 8
3.1.2 Druckverlustberechnung 11
3.2 Modelle der Komponenten 12
3.2.1 Kollektoren 12
Standard Flachkollektor (collector_flat_plate) 16
Parabolrinnenkollektor (collector_parabolic_trough) 16
Röhrenkollektor (collector_optics_tube_collector) 16
3.2.2 Speicher 17
Brauchwasserspeicher mit externem Wärmetauscher (storage) 17
Brauchwasserspeicher mit internem Wärmetauscher, Multiport-Speicher (storage_multiport) 19
3.2.3 Konventionelle Wärmequelle (furnace) 25
Heizkörper (radiator) 26
3.2.5 Pumpen 28
Pumpe mit bekannter Kennlinie (pump) 28
Pumpe mit konstantem Massenstrom (pump_const) 29
Pumpen des Herstellers WILO (pump_WILO) 31
Wärmetauscher (heat_exchanger) 32
3.2.7 Sonstige Komponenten 34
Rohrleitung mit Wärmekapazität (pipe) 34
Zweipunkt-Regler (controller_bang_bang) 36
3.2.7.3 Verzweigung 36
3.2.7.4 Umrechnung der Strahlungsdaten von horizontaler auf geneigte Fläche 38
3.3 Vorlagen für neue Modelle 40
3.3.1 Einbindung neuer Komponenten/Modelle 40
3.3.2 Einbindung neuer Typen bestehender Modelle 41
3.4 Weitere Blöcke des Programmpakets "CARNOT" 42
3.4.1 Basics 42
3.4.2 Control 42
3.4.3 Heat Source 43
3.4.4 Hydraulics 43
3.4.5 Incidence Angle Modifier (IAM) 44
3.4.6 Loads 44

3.4.7 Materials 44
3.4.8 Misc 45
3.4.9 Outputs 45
3.4.10 Ports for storage construction 46
3.4.11 Pressure drop of collector 46
3.4.12 Pumps 46
3.4.13 Storage 46
3.4.14 Surface models for ground storage 47
3.4.15 Weather 47
3.5 Beispiele 48
3.5.1 Beispiel 1: solare Warmwasseranlage (Thermosiphon-Prinzip) 48
3.5.2 Beispiel 2: Hydraulische Verzweigung 49
4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 50
5 PUBLIKATIONEN 52
6 LITERATUR 53

1 Einleitung

Die zu Beginn des Projektes auf dem Markt befindlichen Simulations-Softwarepakete für die Auslegung und Planung solarthermischer Anlagen (Wärmeversorgung / Heizungsanbindung) waren und sind immer noch für viele Anwendungen unzureichend.

Die erhältlichen Simulationsprogramme sind zum einen Auslegungsprogramme mit nutzerfreundlicher Bedienungsstruktur, die jedoch den Nachteil aufweisen, dass sie infolge mangelnder Flexibilität nur auf Standard-Anlagenschemata anwendbar sind. Zum anderen werden Programme angeboten, die zwar flexibel für nahezu alle vorkommenden Anlagenkonzepte eingesetzt werden können (z.B. TRNSYS), wegen der mittlerweile veralteten Programmstruktur ist die Bedienung der Software jedoch äußerst kompliziert und erfordert eine lange Einarbeitungszeit.

Innerhalb dieses Vorhabens wurde eine sowohl flexible als auch benutzerfreundliche Simulationssoftware auf Basis des weit verbreiteten Softwarepakets MATLAB / SIMULINK erstellt. Die bekannten Fehler der bisher verfügbaren Simulations- und Auslegungstools wurden umgangen und eine solide, “professionelle” Softwarelösung erarbeitet. Der Planungsaufwand von Heizungs- und solarthermischen Anlagen kann mit dem vorliegenden Softwaretool reduziert werden und somit zu einer Kostensenkung in der Planungsphase führen. Dies gilt insbesondere für größere solarthermische Anlagen, die nicht mehr als Komplettsystem angeboten und installiert werden.

Die Kooperation mit dem Hersteller / Vertreiber, Scientific Computers in Aachen, der Basissoftware MATLAB / SIMULINK führte dazu, dass Ergebnisse dieses Projektes mit in den Aufbau der Toolbox "CARNOT (**C**onventional **A**nd **R**enewable e**N**ergy systems **O**ptimization **T**oolbox)" eingingen, die mittlerweile auf dem Markt zu erwerben ist.

2 Aufgabenstellung

2.1 Anwendungsbereiche der Software

Grundsätzlich kommt Simulationssoftware immer dann zum Einsatz, wenn ein System[i] zu komplex ist, um ad hoc eine quantitative Aussage über sein Verhalten und seine Leistungsfähigkeit zu machen. Im vorliegenden Fall bedeutet das: selbst bei einem einfachen System zur solarthermischen Brauchwassererzeugung, bestehend aus den Komponenten “Sonne”, Kollektor, Speicher, Pumpe, Regelung und “Verbraucher” kann z.B. der zu erwartende solare Ertrag nicht ohne weiteres abgeschätzt werden.

Die Vorhersage des solaren Ertrages und darauf aufbauend die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist ein Aspekt der Simulationsrechnung. Ein weiterer Aspekt ist die Auslegung der Anlagenkomponenten. Hier soll festgestellt werden, wie die einzelnen Anlagenkomponenten zu dimensionieren sind, um eine optimale Funktion der Anlage zu garantieren und um Kosten durch Fehlauslegung zu vermeiden. Für das hier angeführte Beispiel kann die Auslegung natürlich auch nach Daumenregeln erfolgen. Etwas komplexere Systeme, bei denen zum Beispiel mehrere Wärmequellen[ii] oder mehrere Warmwasserspeicher[iii] zum Einsatz kommen, lassen sich jedoch ohne Simulationssoftware nicht mehr auslegen.

2.2 Stand der Technik: Verfügbare Simulationssoftware

In verschiedenen Projekten wurde am Fachbereich für Energie- und Umwelttechnik der FH Aachen mit den folgenden, am Markt erhältlichen Simulationsumgebungen gearbeitet:

LESOSAI-X, EPASS, SUNCODE, TRNSYS, TSBI 3, TSOL, Luftikus, F-CHART, GETSOLAR, POLYSUN, ISFH, SOLARIS, INSEL.

Die o.g. Programme gliedern sich in zwei Gruppen, mit jeweils gruppenspezifischen Nachteilen.

Die erste Gruppe sind einfache Auslegungsprogramme mit relativ guter Benutzerführung. Diese Programme sind gut geeignet für die Auslegung von kleinen Standardanlagen. Die gute Benutzerführung wird jedoch erkauft durch mangelnde Flexibilität bei

[i] System: allg. Verschaltung von Komponenten

[ii] z.B. solar unterstützte Heizung

[iii] z.B. Warmwasserbereitung + Schwimmbadheizung

der Abbildung größerer oder komplexerer Anlagen, deren Verschaltung naturgemäß nicht mehr in ein Standardschema paßt. So lässt sich beispielsweise die Integration von Solartechnik in eine bereits bestehende Haustechnik mit diesen Programmen nicht behandeln. Außerdem ist das nachträgliche Einfügen von neu am Markt erhältlichen Komponenten (Kollektor, Speicher, etc.) nur mit Einschränkungen möglich, da die zugrunde liegende Programmstruktur fest vom Hersteller vorgegeben ist und in vielen Fällen keine Änderungen zulässt. Die Auslegung von nicht von vornherein einschätzbaren Anlagenverschaltungen, für die noch keine Daumen Regeln zur Auslegung vorhanden sind, ist mit solchen Programmen nicht möglich.

Die andere Gruppe vorhandener Simulationsprogramme ist flexibler und erheblich umfangreicher. Viele der o.g. Nachteile fallen hier weg. Allerdings resultiert der große Umfang in der Regel aus einem langwierigen Entwicklungsprozess, der dann zu einer mittlerweile hoffnungslos veralteten Programmstruktur führt. Solche Programme verfügen über eine Vielzahl von einsetzbaren Anlagenkomponenten, die aber z.B. für eine Simulation der Regelung (mit hoher zeitlicher Auflösung) nicht nutzbar sind, da die implementierten numerischen Verfahren dafür zu ungenau oder allgemein nicht geeignet sind. Neuere numerische Verfahren sind hier leider nicht verfügbar und schon gar nicht vom Benutzer nachrüstbar. Das Hinzufügen neuer Anlagenkomponenten ist zwar im Prinzip möglich, wird aber vom Programmhersteller in keiner Weise unterstützt. So sind in der Regel keine numerischen Bibliotheken zur Unterstützung vorhanden. Ist die Benutzung der Software schon äußerst kompliziert und erfordert eine lange Einarbeitungszeit, so gilt das insbesondere für die Erstellung eigener Anlagekomponenten. Diese Tätigkeit erfordert vom Benutzer nicht nur umfangreiche Kenntnisse der Thermodynamik und Numerik, sondern darüber hinaus auch ein detailliertes Wissen über die interne Struktur des Programms.

Die am häufigsten auftretenden Probleme bei der Anwendung der bisherigen Simulationssoftware (maßgeblich TRNSYS) auf Systeme, die nicht mehr ein einfaches Standardsystem darstellen, sind:

- Die verwendeten Differenzialgleichungslöser führen oft nicht zu einer konvergierenden Lösung.
- Algebraische Schleifen können bei komplizierteren Problemen nicht mehr gelöst werden.
- Energetische und hydraulische Simulationen sind nicht kombiniert durchführbar.
- Die Auslegung von Reglern ist aufgrund fixer und großer Zeitschrittweite (z. B. 1 h) oft nicht möglich, viele "neuere" Regler wie Fuzzy-Regler oder neuronale Netze sind nicht vorhanden.
- Eigene Komponenten können nur unter großem Aufwand programmiert und mit eingebunden werden.

2.3 Kurzbeschreibung des Programmpakets MATLAB/SIMULINK

MATLAB ist eine Programmierumgebung, die die Bearbeitung und Darstellung komplizierter numerischer Probleme erlaubt. Aufbauend auf einer Numerik-Bibliothek für FORTRAN wurde MATLAB (MATrix LABoratory) zunächst als interaktives Werkzeug zur Matrizenrechnung entwickelt. Mit der Zeit wurde eine immer größere Sammlung von Funktionen aus den Bereichen lineare Algebra, nichtlineare numerische Verfahren, Signalverarbeitung und Visualisierung hinzugefügt.

Auf der Basis von MATLAB wurde dann SIMULINK als graphisch orientierte Umgebung zur Simulation nichtlinearer Systeme entwickelt. SIMULINK erscheint nach außen in erster Linie als Data-Flow-Editor, in dem graphische Symbole mittels Maus zu einem System verbunden werden können. Hinter diesen Symbolen verbergen sich Simulationsobjekte (Rechenmodelle), die beim Start der Simulation ihre Eingabedaten entlang der Verbindungslinien vom jeweils vorherigen Objekt erhalten. Die Simulationsobjekte können eine Zusammenfassung weiterer Objekte repräsentieren (SIMULINK-Modell) oder können ein Unterprogramm (“S-Function”) beinhalten, in dem das Modell als m-Skript (der Programmiersprache von MATLAB)[i] formuliert ist.

SIMULINK Toolboxen, also Symbolbibliotheken, werden vom Entwickler sowie von diversen Zulieferern angeboten. Der Vertrieb wird zentral über das MATLAB / SIMULINK Vertriebsnetz abgewickelt, wodurch jeder potenzielle Käufer von MATLAB / SIMULINK bereits anhand des Katalogs den Umfang der schon fertig programmierten Bibliotheken abschätzen kann.

Zur Zeit existieren, laut Katalog, etwa 60 verschiedene Toolboxen aus den Bereichen Regelungstechnik, Signalverarbeitung, Datenanalyse, Finanzen, Mathematik und Visualisierung. Diese Toolboxen werden zum Teil von Mathworks, dem Hersteller von MATLAB selbst angeboten, zum Teil sind es Entwicklungen von MATLAB-Nutzern, die über den Vertreiber von MATLAB ihre Eigenentwicklungen vertreiben.
Eine Toolbox, die insbesondere für Anwendungen im Bereich Regel- und Steuertechnik Anwendung findet, ist der sogenannte "Real-Time-Workshop". Mit dieser Toolbox ist es möglich, Echtzeit-Anwendungen zu steuern und zu regeln. Ein Beispiel im Bereich der Solar-Systeme wäre die Regelung einer Solar-Anlage mit parallel laufender Simulation, so dass die Regelung jederzeit online durch den Vergleich von Realität und Simulation optimiert werden kann.

[i] (oder C bzw. FORTRAN)

2.4 Ziele des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens sollte eine Simulationsumgebung zur Lösung heizungs- / solartechnischer Aufgabenstellungen erstellt werden. Zwei Designkriterien standen im Vordergrund: Benutzerfreundlichkeit und Offenheit.

Die Benutzerfreundlichkeit wurde durch Verwendung einer graphischen Standard-Eingabemöglichkeit[i] erreicht.

Hinter dem Begriff Offenheit verbirgt sich die einfache Integrationsmöglichkeit neuer Modelle, die Möglichkeit, mit anderen, bereits existierenden Softwaremodulen aus den Bereichen Regelungstechnik, Optimierung, Statistik usw. zusammenarbeiten zu können, sowie die fast beliebige Portierbarkeit auf diverse Hardwareplattformen.

Um eine problemlose Kommunikation einzelner Module (Komponenten) miteinander zu ermöglichen, sollte eine einheitliche Datenstruktur vereinbart werden, die thermische und hydraulische Kenngrößen sowie weitere Zustandsgrößen beinhaltet.

Die Planung von einfachen solaren Brauchwasseranlagen für Einfamilienhäuser bis zur vollständigen (solaren) Nahwärmeversorgung erfordert eine breite Palette von fertigen Modellen. Folgende Modelle sollten in der “Toolbox” enthalten sein:

Kollektoren:	Standard-Flachkollektor
Speicher:	Brauchwasserspeicher mit externem Wärmetauscher
	Brauchwasserspeicher mit internem Wärmetauscher
	idealer Schichtenspeicher
Heizung:	konventionelle Wärmequelle
	Heizkörper
Pumpen:	Heizungspumpen
Sonstiges:	Rohrleitung
	Zweipunkt-Regler (mit Hysterese)
	hydraulische Verzweigung
	Wetterdaten-Generator

Zusätzlich sollten sogenannte "Templates" entwickelt werden, die die Programmierung neuer Komponenten für den Anwender erleichtern. Diese Templates beinhalten bereits die komplette Modell-Struktur für die Programmiersprachen m-Skript, C und FORTRAN.

[i] der eingebaute Data-Flow Editor von MATLAB® / SIMULINK®

3 Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Komponenten abgebildet und Hilfsprogramme geschrieben, die in die Toolbox CARNOT integriert wurden. In der Toolbox CARNOT sind noch viele andere Funktionen und Möglichkeiten, die bereits in anderen Projekten entwickelt wurden (s. Kapitel 3.4). Aufgrund der umfassenderen Möglichkeiten der Toolbox CARNOT wird im Weiteren die Beschreibung an CARNOT angelehnt vorgenommen. Die Dokumentation, die Namen der Blöcke und die Kommentare in CARNOT sind komplett in englischer Sprache verfasst. Für diesen Bericht werden daher die englischen Bezeichnungen verwendet und wenn notwendig erläutert.

Die weitere Beschreibung gliedert sich in folgende Abschnitte: zunächst wird das Gesamtkonzept der Toolbox erläutert (Kapitel 3.1), in dem sich grundlegende Aspekte wie die Definition der Vektoren (Kapitel 3.1.1) und die Beschreibung der Druckverlustberechnung finden (Kapitel 3.1.2).

Daran anschließend werden die Einzelkomponenten vorgestellt, die von den Kollektoren (Kapitel 3.2.1) bis zu den Pumpen (Kapitel 3.2.5) reichen.

3.1 Gesamtkonzept der Toolbox

Die unter MATLAB/SIMULINK entwickelte Toolbox umfasst verschiedene Aspekte, die sich nach außen hin in ihrer Darstellung unterscheiden:

- unter SIMULINK programmierte Komponenten.
  Diese Komponenten wurden, wenn sie einfach zu beschreiben sind direkt in SIMULINK abgebildet, kompliziertere Modelle wurden in C geschrieben und als sogenannte "S-Function" in SIMULINK eingebunden.
- Hilfsprogramme, die als m-Skript geschrieben wurden.

Der Anwender öffnet durch den Aufruf der Toolbox ein Fenster, das in verschiedene Blocksets unterteilt ist (Bild 1). Diese Blocksets enthalten die Komponenten, aus denen er ein System (z. B. eine solar unterstützte Heizung) zusammenbauen kann.

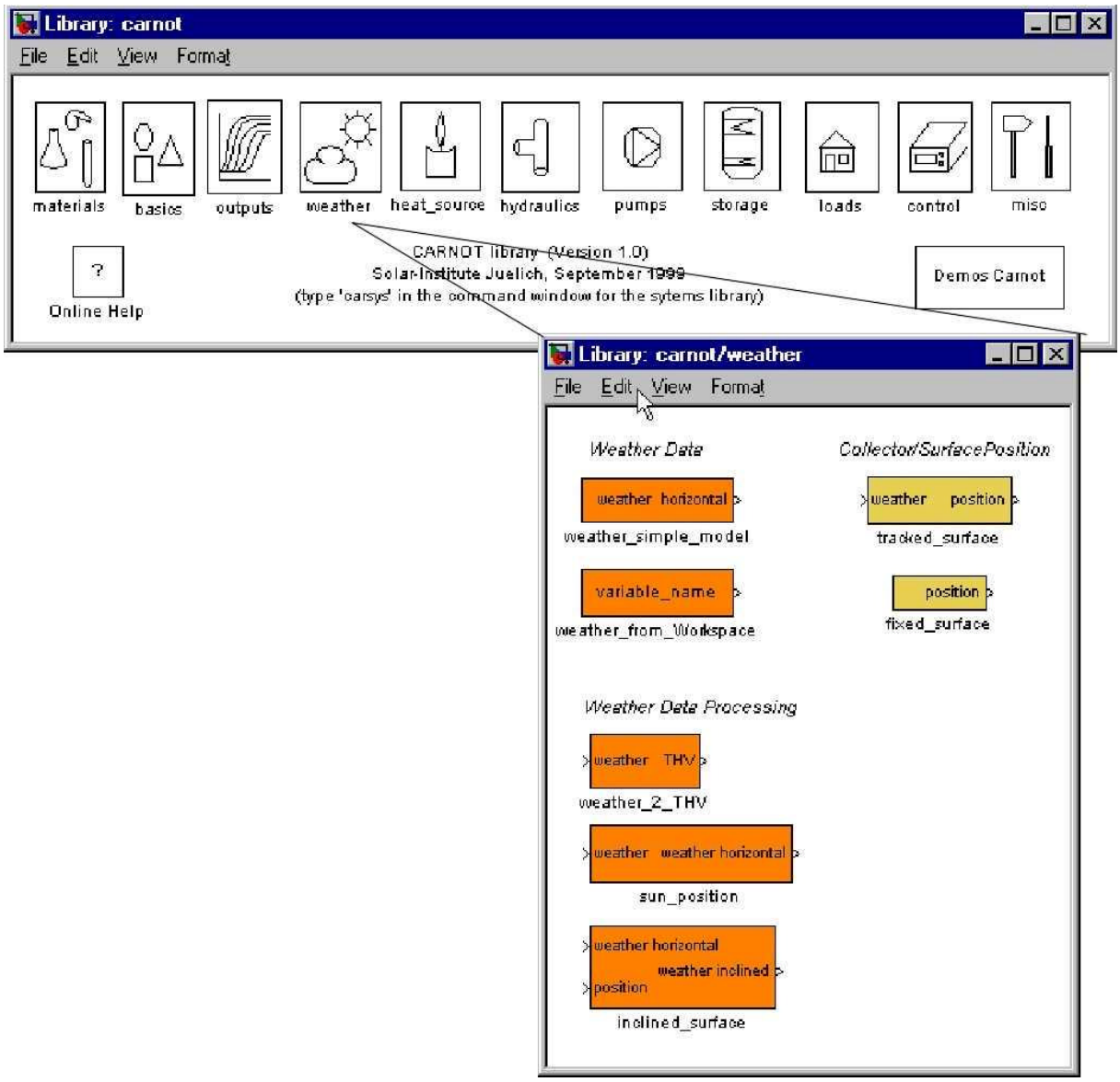


Bild 1: Fenster der CARNOT-Bibliothek mit geöffnetem Subset "weather"

Das zu berechnende System erscheint in SIMULINK als Data-Flow-Editor (Bild 2), in dem graphische Symbole mittels Maus zu einem System verbunden werden können. Hinter diesen Symbolen verbergen sich Simulationsobjekte (Rechenmodelle), die beim Start der Simulation ihre Eingabedaten entlang der Verbindungslinien vom jeweils vorherigen Objekt erhalten. Die Simulationsobjekte können eine Zusammenfassung weiterer Objekte repräsentieren (SIMULINK-Modell) oder können ein Unterprogramm (“S-Function”) beinhalten, in dem das Modell in C formuliert ist.

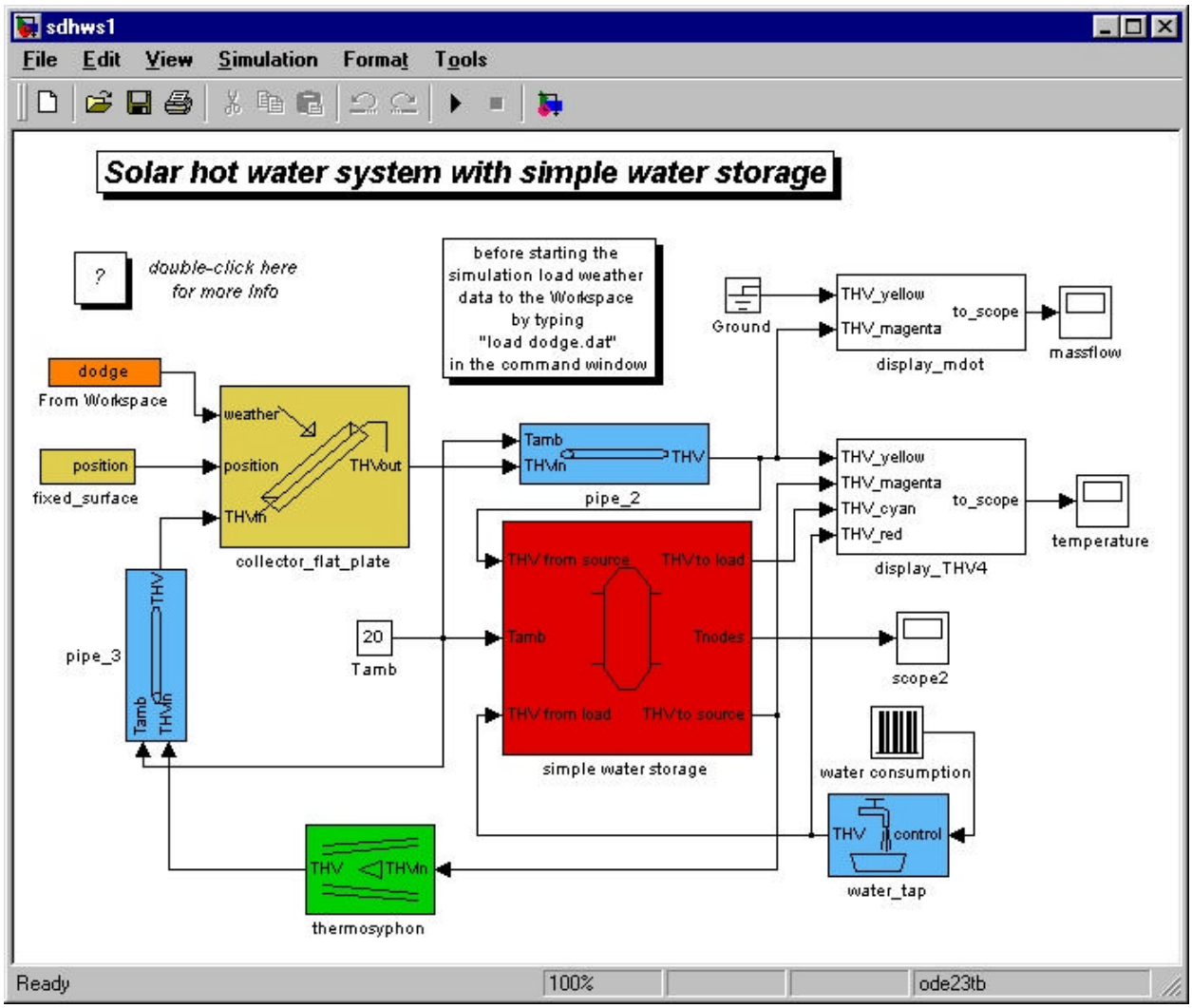


Bild 2: Modell einer solarthermischen Warmwasserversorgung mit Speicher.

Mit dem Lösen des Differenzialgleichungssystems, das durch die Verschaltung der einzelnen Komponenten entsteht, hat der Anwender nichts mehr zu tun. Es muss allein der bei der numerischen Lösung verwendete Integrationsalgorithmus, der Geschwindigkeit und Genauigkeit der Berechnung festlegt, durch einfachen “Maus-Klick” gewählt werden.

3.1.1 Definition der Vektoren

Die Verbindung der verschiedenen Komponenten miteinander erfordert, dass die durch die Verbindungslinien transferierten Größen in definierter Reihenfolge und in festgelegten Einheiten übergeben werden. Es wurden zwei Vektoren definiert: der thermohydraulische Vektor (THV) und der Wetterdaten Vektor.

Der thermohydraulische Vektor (THV)

Der thermohydraulische Vektor enthält alle wesentlichen Informationen über den transferierten Massenstrom und den Energiefluss. In jedem Block, in dem der thermohydraulische Vektor verwendet wird, wird er in seine Komponenten

aufgespalten, die Berechnungen werden durchgeführt und der Vektor wird anschließend wieder zusammengesetzt.

Jeder THV entspricht der physikalischen Verbindung und dem Informationsaustausch zwischen zwei Komponenten. Die eigentlichen Berechnungen werden immer in den Blöcken selbst durchgeführt.
Er hat 20 Einträge, von denen 10 derzeit genutzt werden und 10 für Erweiterungen offen sind. In Verschaltungen ohne Verzweigung ist die Anzahl der Einträge konstant. In Verschaltungen mit Verzweigung, z. B. Einsatz eines Teilers und eines Mischers, wird der THV in der Art erweitert, dass vier Einträge für die Unterverschaltung am Teiler hinzugefügt werden, die den gesamten Massenstrom, den konstanten, den linearen und quadratischen Druckverlustterm beinhalten. Am zugehörigen Mischer werden diese vier Komponenten wieder abgetrennt, ausgewertet und wenn nötig an den Teiler zurückgegeben (s. a. Kapitel 3.1.2. und Kapitel 3.2.7.3)

Die Struktur des Thermo-Hydraulischen Vektors ergibt sich aus der folgenden Tabelle:

No.	**Beschreibung**	**Abkürzung**	**physikalische Einheit**	**Bemerkung**
1	flow identifier	flow_ID	none	wird in der Simulation gesetzt
2	temperature	T	[°C]	
3	mass flow	mdot	[kg/s]	
4	pressure	p	[Pa]	
5	fluid type	fluid_ID	none	wird in der Pumpe gesetzt
6	mixture of fluid	fluid_mix	[0..1]	wird in der Pumpe gesetzt
7	diameter last piece	d_last	[m]	
8	constant coefficient of pressure drop	c	none	
9	linear coefficient of pressure drop	l	[s/kg]	
10	quadratic coefficient of pressure drop	q	[s^2/kg^2]	
11 to 20	not used ... not used			

Bemerkung: Die physikalische Einheiten aller Größen sind bis auf die Temperatur SI-konform. Die Temperatur wird in [°C] und nicht in [K] angegeben.

flow identifier (flow_ID)

Der flow_ID wird für die hydraulische Berechnung benötigt. Ist z. B. ein Ventil geschlossen, wird der flow_ID negativ gesetzt, so dass im nächst folgenden Block bekannt ist, dass kein Massenstrom in diesem Zweig vorhanden ist. Eine weitere Möglichkeit den flow_ID zu nutzen besteht in der Kontrolle des Druckverlusts.

wenn	**dann**
flow_ID < 0	Kein Massenstrom in diesem Zweig.
flow_ID <=10000	Es wird keine Druckberechnung vorgenommen.
flow_ID <=20000	Nur der Druckverlust wird berechnet.
flow_ID > 20000	Druckverlust und statischer Druck werden berechnet.

Definition der Fluide

fluid_ID	**Fluid**	**Bemerkungen**
1	water	Der Fluid-Mix ist der Dampfgehalt im 2-Phasengebiet
2	air	Der Fluid-Mix gibt das Verhältnis kg_{Wasser}/kg_{Luft}, also die absolute Wasserbeladung an.
3	cotton oil	
4	silicone oil	
5	water-glycol	Der Fluid-Mix gibt die Volumen-Prozent von Glykol an (Typhocor L, Hersteller: Typhorop Hamburg)

Mit dem THV sowie seinen Einträgen, insbesondere von flow_ID und fluid_ID, ist es möglich, das thermodynamische und hydraulische Verhalten des Fluids komplett zu charakterisieren.

Der Wetterdaten-Vektor

Der Wetterdaten-Vektor enthält die Information über das Wetter im betrachteten Zeitraum. Die Zeitschritte, in denen die Wetterdaten vorliegen, sind prinzipiell beliebig, allerdings sollten typische deterministische und stochastische Ereignisse wie der Tagesgang der Sonne, Schwankungen der Einstrahlung durch Wolkenzug in Zeitschritten abgebildet werden, die auch Einfluss auf die Simulation haben.

Die Wetterdaten müssen in einem bestimmten Format bereitgestellt werden:

Der Header:

```
% Format of weather data in the CARNOT toolbox.
% This file should be the header of each weather data file generated for CARNOT.
% Weather data are saved in ASCII-format.
% Each row contains a dataset for a specific time. Column limiter is
% a tabulator or a space.
% Load them to MATLAB Workspace with "load dataname.dat".
% Use in SIMULINK with the "from Workspace" block.
%
% Information on the dataset
```

% station name: country:
% geographical positon: longitude: , latitude:
% reference meridian for time (example: 0° = Greenwich Mean Time):
% mark type of data collection: measured/calculated/satellite

Die Matrix:

Spalte	Beschreibung	physikalische Einheit
1	time	[s]
2	timevalue YYYYMMDDHH (Y is the year, M the month, D the day, H the hour)	
3	zenith angle of sun (at time, not averaged) (continue at night to get time of sunrise by linear interpolation)	[°]
4	azimuth angle of sun (0°=south, east negative) (at time, not average in timestep)	[°]
5	incidence angle on surface (0° = vertical) (= -9999, if surface orientation is unknown)	[°]
6	direct solar radiation on surface	[W/m^2]
7	diffuse solar radiation on surface	[W/m^2]
8	ambient temperature	[°C]
9	radiation temperature of sky	[°C]
10	relative humidity	[%]
11	precipitation	[m/s]
12	cloud index (0=no cloud, 1=covered sky)	[0..1]
13	station pressure	[Pa]
14	mean wind speed	[m/s]
15	wind direction (north=0 deg; west=270 deg)	[°]
16	incidence angle in plane of vertical and main surface axis (the main axis is parallel to heat collecting pipes in a collector: it is pointing to the center of the earth)	[°]
17	incidence angle in plane of vertical and second surface axis (the second axis is in the surface and a vertical on the heat collecting pipes in a collector, it is pointing to the horizon)	[°]
UN-KNOWN	set -9999 for unknown values	

3.1.2 Druckverlustberechnung

Für die Druckverlustberechnung wurde der folgende Ansatz gewählt[1] (hochgestellte arabische Ziffern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Ende des Dokuments):

1. Der Druckverlust wird für jede Komponente berechnet und vom aktuellen Druck subtrahiert. Durch Vergleich mit dem Dampfdruck wird der Aggregatszustand kontrolliert.
2. Der Druckverlust (Δp) wird durch die drei Koeffizienten (c, l und q) eines quadratischen Polynoms weitergegeben. Der Druckverlust ist:

$$\Delta p = c + l \cdot \dot{m} + q \cdot \dot{m}^2$$

Dieser Ansatz entspricht der in der Strömungslehre üblichen Berechnung der Druckdifferenz infolge eines statischen Höhenunterschieds (c) und der Rohrreibungsverluste, (linearer (l) und quadratischer (q) Geschwindigkeitsanteil). Die drei Koeffizienten werden von Komponente zu Komponente weitergegeben und aufsummiert. In der letzten Komponente, der Pumpe, kann daraus durch algebraisches Lösen der quadratischen Gleichung der Massenstrom bestimmt werden.
Wie schon oben erwähnt, ist es bei einer Verzweigung notwendig, für jeden Strang die Koeffizienten zu ermitteln. Im Rahmen des Projektes wurde ein Verfahren erarbeitet, das bei der späteren Zusammenführung die Berechnung eines neuen, für den gesamten Massenstrom gültigen Satzes von Koeffizienten erlaubt.
Die Verwendung der Koeffizienten beinhaltet große Vorteile in Bezug auf die Rechenzeit, da, sobald die Koeffizienten bekannt sind, direkt analytisch der Druckverlust berechnet werden kann und kein iteratives Verfahren benötigt wird.

3.2 Modelle der Komponenten

Für solarthermische Anwendungen sind für die meisten Komponenten bereits Simulationsmodelle veröffentlicht oder reflektieren allgemein zugängliche thermodynamische Sachverhalte. Im Folgenden werden die Modelle behandelt, die im Rahmen dieses Projektes umgesetzt wurden.

3.2.1 Kollektoren

Die Berechnung der thermodynamischen und hydraulischen Vorgänge in Kollektoren lässt sich in verschiedene Teilschnitte aufsplitten:

- Berechnung der Einstrahlung auf geneigte Flächen,
- Berechnung der absorbierten Strahlung in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften des Kollektors,
- Berechnung der thermodynamischen Auswirkungen auf das den Kollektor durchströmende Medium[2],
- Berechnung der hydraulischen Auswirkungen auf das den Kollektor durchströmende Medium.

Diese verschiedenen Aspekte finden sich im grafischen Modell des Kollektors wieder (Bild 3):

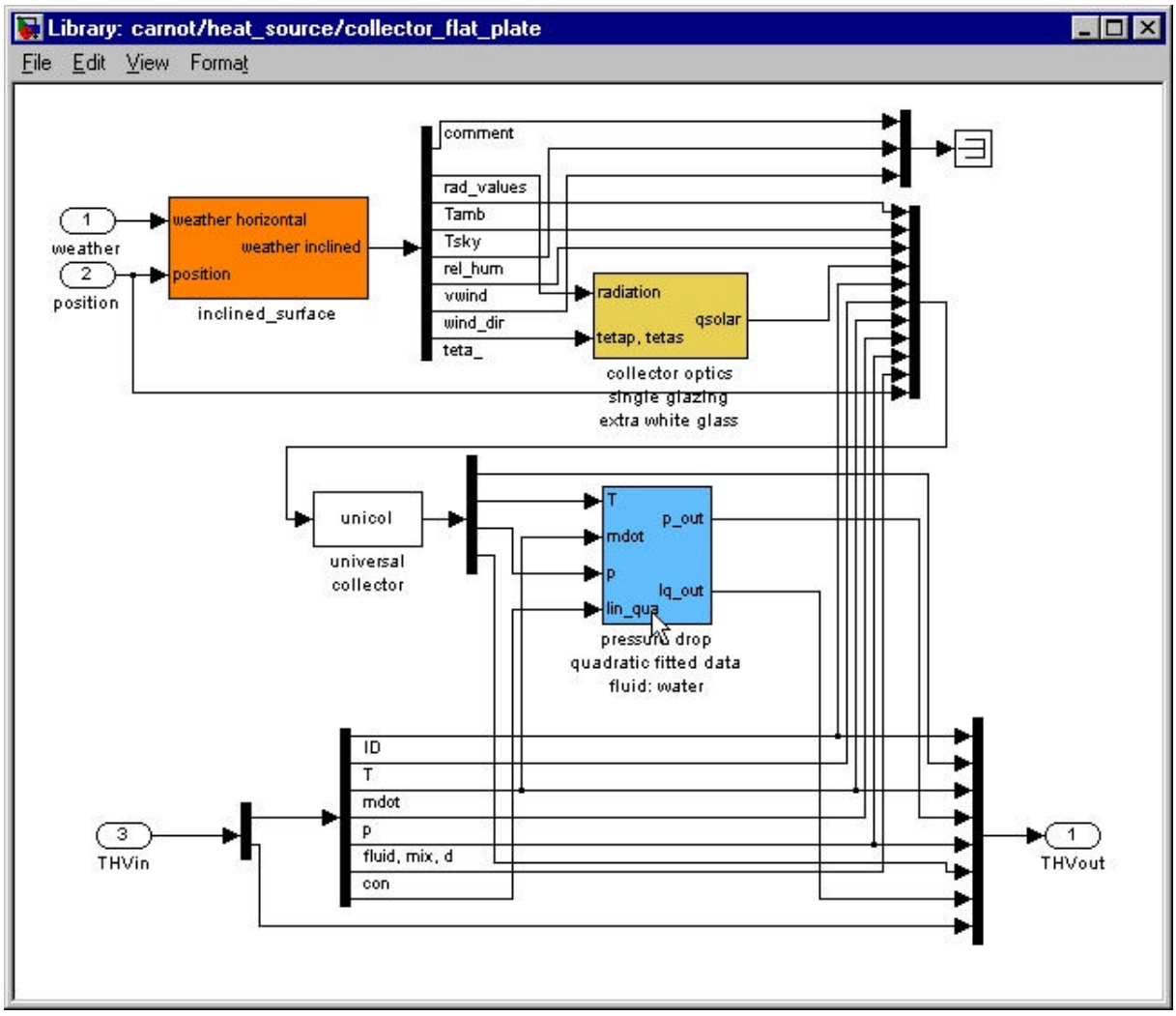


Bild 3: Modell des Flachkollektors

- der Block "inclined_surface" nimmt die Umrechnung auf die geneigte Fläche vor,
- der Block "collector_optics" berechnet die Absorption, dies wird in Abhängigkeit der Kollektorabdeckung vorgenommen, (hier: "single glazing extra white glass"),
- der Block "unicol" berechnet die thermodynamischen Vorgänge und
- der Block "pressure_drop" nimmt die hydraulische Berechnung vor.

Während die Blöcke "inclined_surface" und "unicol" in C programmiert und als S-Function in SIMULINK eingebunden wurden, sind "collecor_optics" und "pressure_drop" komplett in SIMULINK erstellt.

Die Umrechnung der im Wetterdatensatz gegebenen Strahlungsdaten auf eine **horizontale Fläche in die Strahlung auf eine geneigte Fläche** wird in Abschnitt 3.2.7 beschrieben.

Die **Absorption der Strahlung** in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften des Kollektors wird folgendermaßen vorgenommen: abhängig vom optischen Wirkungsgrad des Kollektors werden direkte und diffuse Strahlung pro Einheitsfläche

in thermische Energie umgewandelt. Dabei gehen insbesondere die Aperturfläche und der Einfallswinkel mit ein.
Vier verschiedene Kollektorabdeckungen werden in der Bibliothek bereitgehalten:

- double glazing extra white glass
- single glazing extra white glass
- double glazing float glass
- single glazing float glass

Der sogenannte incidence angle modifier (IAM), der den Einfluss des Einstrahlungswinkels auf die Absorptionseigenschaften des Kollektors angibt, wird aus den Fresnels-Gleichungen für Glas mit einem Brechungsindex von 1.526, und einem Extinktionskoeffizient von 4/m (extra white glass) oder 16/m (float glass) und einer Dicke von 4 mm gewonnen.

Das **mathematische Modell, das die thermodynamischen Vorgänge im Kollektor** beschreibt ist wie folgt[2]:
Es wird ein eindimensionales Mehrknotenmodell verwendet. Dabei wird der Kollektor in mehrere Knoten unterteilt. Typischerweise ist mehr als 1 Steigrohr vorhanden, so dass das Medium gleichverteilt durch alle Steigrohre fließt. Die Energiebilanz für jeden Knoten kann durch eine Differenzialgleichung dargestellt werden:

$$c_{coll}\frac{dT}{dt} = \dot{q}_{solar} + \frac{\dot{m}\cdot c}{A_{coll}}\cdot\left(T_{lastnode} - T\right) + U_1\cdot\left(T_{amb} - T\right) - U_2\cdot\left(T_{amb} - T\right)^2 + U_{wind}\cdot v_{wind}\cdot\left(T_{amb} - T\right) + U_{sky}\cdot\left(T_{sky} - T\right)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
c	heat capacity of fluid	J/(kg K)
c_{coll}	heat capacity of collector per area	J/(m^2 K)
$\dot{m}$	mass flow rate	kg/s
q_{solar}	power input per surface area from sun	W/m^2
T	Temperature	°C
t	Time	s
U_1	linear heat loss coefficient	W/(m^2 K)
U_2	quadratic heat loss coefficient	W/(m K)^2
U_{wind}	wind speed dependant heat loss coefficient	W/((m/s) m^2 K)
U_{sky}	radiative heat loss coefficient	W/(m^2 K)
T_{amb}	ambient temperature	°C
T_{sky}	sky temperature	°C
v_{wind}	wind speed	m/s

Druckverluste werden mit dem in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Verfahren ermittelt.

Die notwendigen Modellparameter beschränken sich auf ein Minimum und können mittels Messungen ermittelt werden oder sind öffentlich zugänglichen Testberichten zu entnehmen.
Eingabemaske und Eingabeparameter der Kollektoren entsprechen sich weitestgehend, die jeweiligen Einzelbausteine im dahinterliegenden Modell unterscheiden sich jedoch.

Eingabemaske:

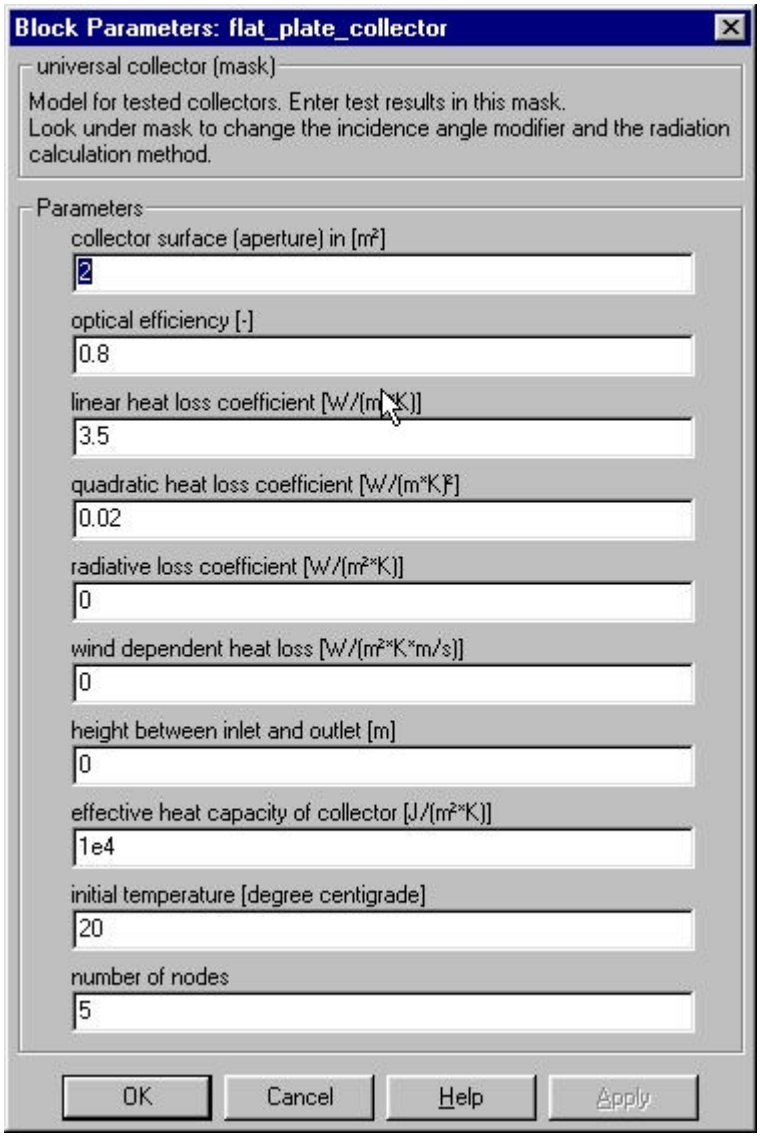


Bild 4: Eingabemaske für Kollektoren

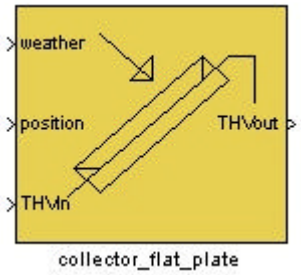
Eingabeparameter:

Symbol	**Beschreibung**	**Einheit**
collector surface		m^2
optical efficiency	efficiency without heat losses, from collector data sheet	-
linear heat loss coefficient	U_1, from collector data sheet	$W/(m^2 K)$

quadratic heat loss coefficient	U_2, from collector data sheet	W/(m K) ^{2}
wind dependent heat loss	U_{wind}, from collector data sheet, set to zero if no value is given	W/((m/s)m^2 K)
radiative heat loss coefficient	U_{sky}, from collector data sheet, set to zero if no value is given	W/(m^2 K)
initial temperature	temperature at start of simulation, usually ambient temperature 20°C	°C
number of nodes	for numerical purposes, collector is cut into nodes in flow direction, a default value has 1 node every 0.5 meters	-

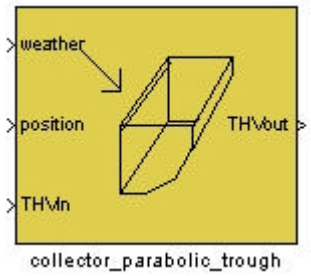
3.2.1.1 Standard Flachkollektor (collector_flat_plate)

Die obige allgemeine Beschreibung kann direkt auf den Flachkollektor angewendet werden.



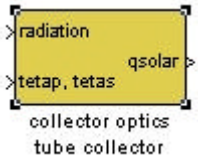
3.2.1.2 Parabolrinnenkollektor (collector_parabolic_trough)

Der Unterschied des Parabolrinnenkollektors zum Flachkollektor ist, dass ein anderes Verfahren für die Berechnung der absorbierten Strahlung verwendet wird. Von der eintreffenden Strahlung wird nur der direkte Teil, der auf die Aperturfläche auftrifft, absorbiert.



3.2.1.3 Röhrenkollektor (collector_optics_tube_collector)

In diesem Block wird die eintreffende direkte und diffuse Strahlung in absorbierte Leistung pro Einheitsfläche umgerechnet. Beim Röhrenkollektor muss zwischen den Einstrahlungswinkeln aus verschiedenen Himmelsrichtungen unterschieden werden. Im Wetterdatenvektor sind die Einstrahlungswinkel als Elemente 16 und 17 eingetragen:

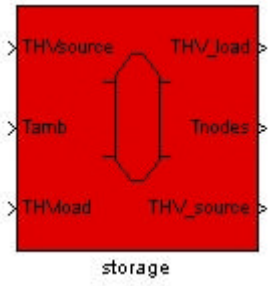


16: Einstrahlungswinkel in der Ebene vertikal zur Hauptachse (die Hauptachse ist parallel zu den Röhren, so dass der Einstrahlungswinkel auf den Erdmittelpunkt verweist). Dieser Winkel dient zur Berechnung des IAM.
17: Einstrahlungswinkel in der Ebene vertikal zur zweiten Hauptachse (die zweite Hauptachse ist vertikal zu den Röhren und zeigt in Richtung Horizont). Dieser Winkel dient zur Berechnung des IAM in dieser Ebene, IAF genannt.

IAM und IAF können in Abhängigkeit der Kollektorabdeckung berechnet werden, wobei der IAF im Wesentlichen durch die Geometrie des Kollektors bestimmt ist und zumeist aus Datenblättern entnommen werden kann.

3.2.2 Speicher

3.2.2.1 Brauchwasserspeicher mit externem Wärmetauscher (storage)



Der Brauchwasserspeicher mit externem Wärmetauscher lässt sich in die zwei Komponenten Speicher und Wärmetauscher unterteilen. Hier wird zunächst der Speicher beschrieben (zum Wärmetauscher siehe Kapitel 3.2.6). Der Speicher wird durch ein Finite-Volumen Modell abgebildet. Die Berechnung über ein Mehrknotenmodell vorgenommen, das den Speicher in eine beliebige Anzahl Knoten unterteilt. Für jeden Knoten erfolgt eine Energiebilanzierung, die der folgenden Differenzialgleichung genügt und nach einem Differenzenverfahren gelöst wird:

$$\rho c \frac{dT_{node}}{dt} = \frac{(UA)_{loss}}{V_{node}} \cdot (T_{amb} - T_{node}) + \frac{\lambda_{eff}}{dh^2} \cdot (T_{node_above} + T_{node_below} - 2T_{node}) + \frac{\dot{m}_{up} \cdot c}{V_{node}} \cdot (T_{node_below} - T_{node}) + \frac{\dot{m}_{down} \cdot c}{V_{node}} \cdot (T_{node_above} - T_{node})$$

mit:

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_{loss}	surface area for losses of one storage node	[m^2]
λ_{eff}	effective axial thermal conductivity	[W/(m K)]
c	heat capacity of fluid	[J/(kg K)]
D	(inner) diameter of storage tank	[m]
dh	distance between two nodes	[m]
$\dot{m}_{up}$	mass flow rate	[kg/s]
$\dot{m}_{down}$	mass flow rate ($\dot{m}_{down}$ or $\dot{m}_{up}$ is zero according to sum of flow rates)	[kg/s]
ρ	density	[kg/m^3]
T	temperature	[K]
t	time	[s]
U_{loss}	heat loss coefficient	[W/(m^2 K)]
V_{node}	node volume	[m^3]

Die effektive axiale Wärmeleitfähigkeit kann durch die Gleichung

$$\lambda_{eff} = \frac{4A_{C,wall}\lambda_{wall}}{\pi \cdot D^2} + \lambda_{fluid}$$

angegeben werden, wobei:

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A_{C,wall}$	cross-sectional area of storage	[m^2]
λ_{fluid}	thermal conductivity of fluid	[W/(m K)]
λ_{wall}	thermal conductivity of wall	[W/(m K)]

Für den Knoten am Boden des Speichers wird die Temperatur $T_{nodebelow}$ durch die Temperatur des kalten Wassers $T_{coldwater}$ ersetzt, da das kalte Wasser am Boden des Speichers eingelassen wird.
Der Massenstrom wird dann durch jeden Knoten bis hin zum obersten Knoten berechnet. Der Wärmestrom der Wärmequelle wird direkt in den Speicher am untersten Knoten eingebracht. Am ersten Knoten von oben, an dem die Temperatur kleiner als die Kollektortemperatur ist ($T_{node} < T_{fc}$), wird das vom Kollektor eingespeiste Wasser mit der Temperatur T_{fc} eingebracht.

Zu jedem Knoten wird die Temperatur über die angegebene Gleichung berechnet. Die Anzahl der Knoten ist variabel und kann als Parameter gesetzt werden. Zur Überprüfung der Temperaturen innerhalb des Speichers können "Sensoren" in äquidistanten Abständen im Speicher angegeben werden (unabhängig von der Zahl der Knoten).

Für das Knoten-Schema ist es notwendig, dass die Nebenbedingung für die Courant-Zahl c beachtet wird, wenn Zeitschrittlöser mit festen Zeitschritten verwendet werden:

$$c = \frac{\text{Zeitschritt} \cdot \text{Geschwindigkeit}}{\text{Höhe_des_Knotens}} \leq 1$$

Um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt sich eine maximale Zeitschrittweite von 300 Sekunden.

Eingabemaske:

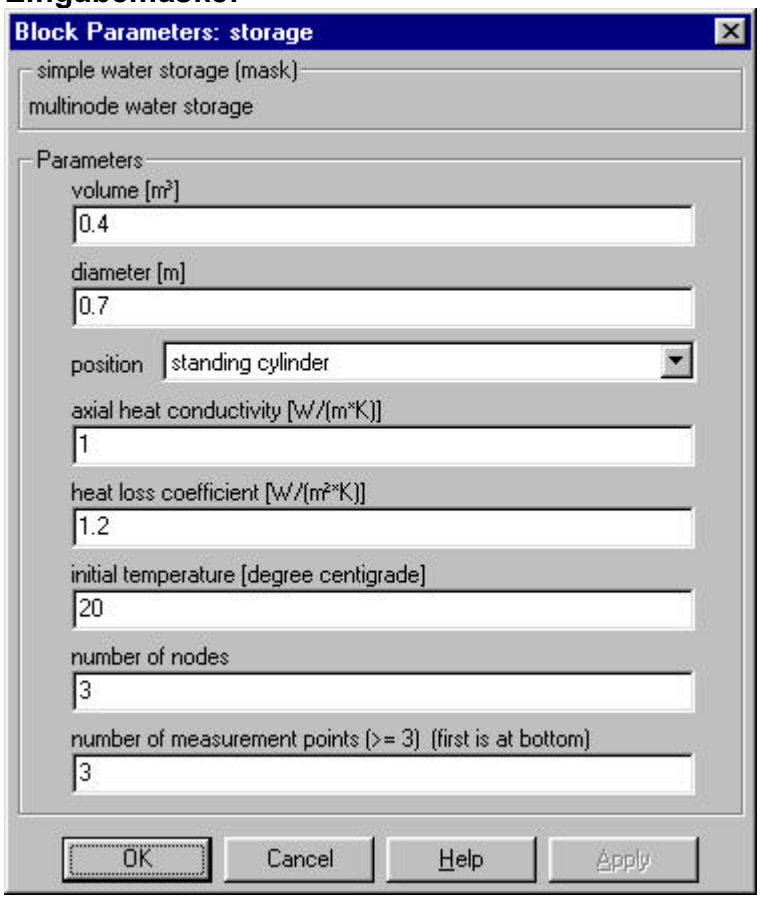
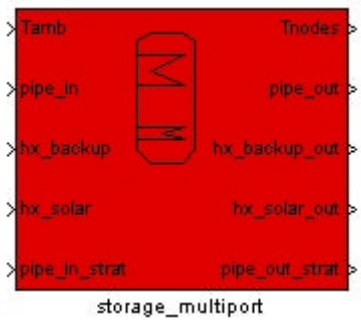


Bild 5: Eingabemaske des Speichers

Eingabeparameter:

- Durchmesser [m]
- Volumen [m³]
- Position [stehend oder liegend]
- k-Wert der Wand [W/(m² K)]
- effektive axiale Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
- Anfangstemperatur (die Anfangstemperatur kann ein skalarer Wert für alle Knoten des Speichers oder ein Vektor sein, der für jeden Knoten einen eigenen Wert vorgibt).

3.2.2.2 Brauchwasserspeicher mit internem Wärmetauscher, Multiport-Speicher (storage_multiport)



Für die verschiedenen Speichertypen des Multiport-speichers wird ein universelles eindimensionales Modell verwendet. Die Verbindung zu anderen Komponenten ist durch verschiedene Ports gegeben. An den Ports wird die Information des angeschlossenen THV's auf ein notwendiges Maß reduziert (Fluid-ID, Temperatur, Massenstrom etc.). Analog zu den Eingangsports existieren Ausgangsports, in denen

wieder ein THV aus den durch den Speicher modifizierten Werten zusammengesetzt wird.

Modell des Multiport Speichers

Der Multiport Speicher ist mittels eines Mehrknotenmodells abgebildet, das die Berechnung mehrerer zusätzlicher Komponenten wie z. B. interne Wärmetauscher, Zusatzheizung innerhalb des Speichers erlaubt.

Unter dem Symbol (durch Doppelklick zu öffnen) für den Multiport-Speicher befindet sich das Modell des Multiport-Speichers, das in Bild 6 gezeigt ist.

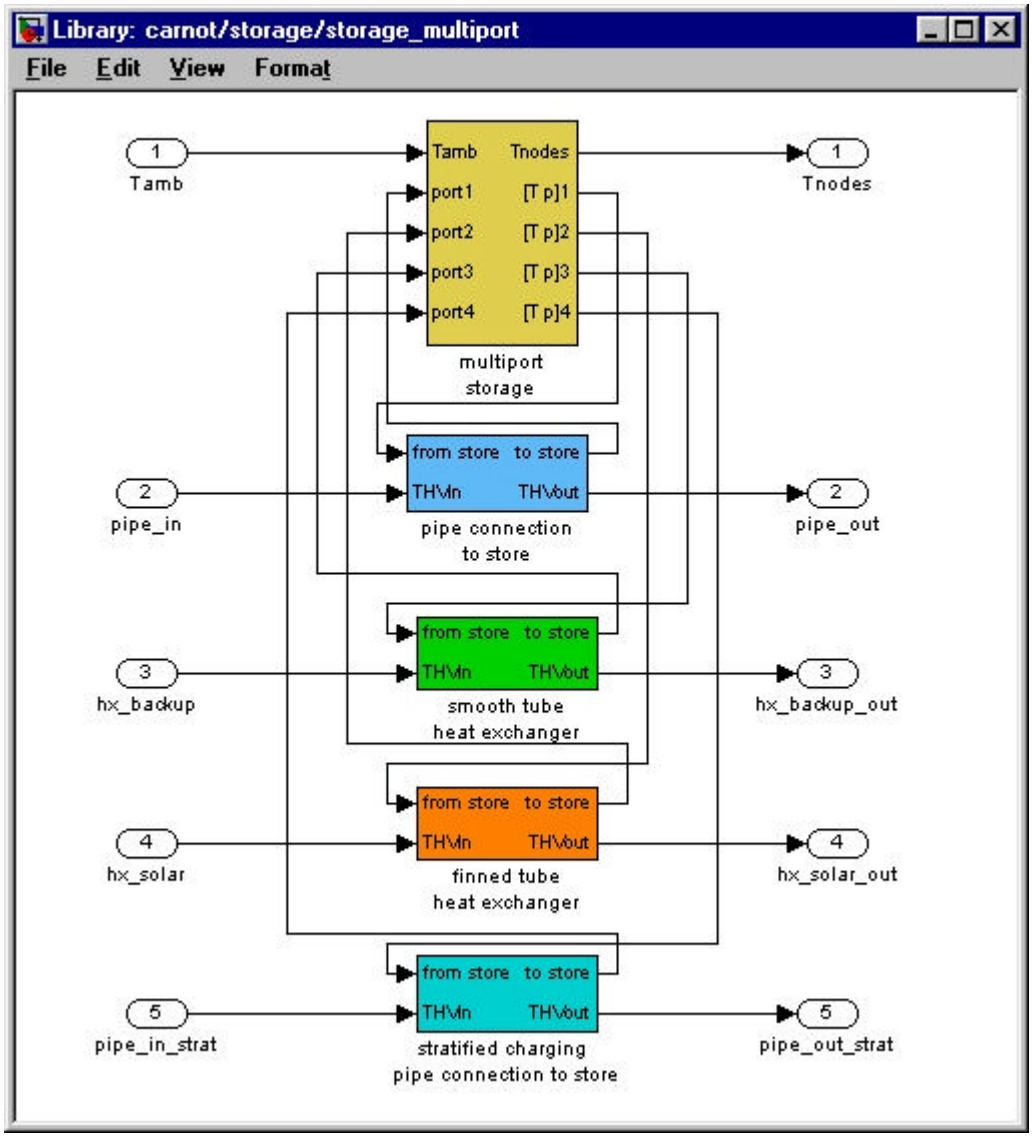


Bild 6: Subsystem des Multiport Speichers

Der Nutzer gibt an, welche Elemente (Wärmetauscher, Zusatzheizung etc.) im Speicher vorhanden sind und wie deren räumliche Anordnung ist. Die einzelnen Blöcke werden einfach eingesetzt und mit den jeweiligen Ports verbunden.

Prinzipiell existieren drei verschiedene Blöcke, um den Speicher zu beschreiben:

- der Multiport-Speicher-Block,

- die Blöcke für die Ports, die Typ und Eigenschaften der Einzelelemente sowie deren relative räumliche Position im Speicher beschreiben (Bild 7),
- der maskierte Block des Speichers, um die Parameter zu setzen (Bild 8).

Diese Parameter beschreiben komplett die geometrischen und thermodynamsichen Eigenschaften des Speichers. Die eigentliche Berechnung des Speicherverhaltens wird durch eine dem Multiport-Speicher-Block unterlagerte S-Function übernommen.

Für jeden Knoten wird eine Energiebilanz entsprechend der folgenden Gleichung vorgenommen und nach einem Differenzenverfahren gelöst:

$$\rho c \frac{dT_{node}}{dt} = \frac{(UA)_{loss}}{V_{node}} \cdot (T_{amb} - T_{node}) + \frac{\lambda_{eff}}{dh^2} \cdot (T_{node_above} + T_{node_below} - 2T_{node}) + \frac{\dot{m}_{up} \cdot c}{V_{node}} \cdot (T_{node_below} - T_{node}) + \frac{\dot{m}_{down} \cdot c}{V_{node}} \cdot (T_{node_above} - T_{node}) + \frac{(UA)_{hx}}{V_{node}} \cdot (T_{hx} - T_{node})$$

Symbol	**Beschreibung**	**Einheit**
A_{loss}	surface area for losses of one storage node	m^2
A_{hx}	surface area of heat exchanger per storage node	m^2
λ_{eff}	effective axial thermal conduction	W/(m K)
c	heat capacity	J/(kg K)
dh	distance between two nodes	m
$\dot{m}$	mass flow rate (“up” or “down” is zero according to sum of flowrates)	kg/s
ρ	density	kg/m^3
T	temperature	K
t	time	s
U_{loss}	heat loss coefficient	$W/(m^2 K)$
U_{hx}	heat transfer coefficient of heat exchanger	$W/(m^2 K)$
V_{node}	node volume	m^3

Die Anzahl der Knoten ist variabel und kann als Parameter gesetzt werden. Für dieses Knoten-Schema ist es wiederum notwendig, dass die Nebenbedingung für die Courant-Nummer beachtet wird, wenn Zeitschrittlöser mit festen Zeitschritten verwendet werden.
Die effektive axiale Wärmeleitfähigkeit kann durch:

$$\lambda_{eff} = \frac{A_{C,wall} \cdot \lambda_{wall} + A_{C,storage} \cdot \lambda_{fluid} + A_{C,hx} \cdot \lambda_{hx}}{A_{C,storage}}$$

berechnet werden.

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A_{C,wall}$	cross-sectional area of wall	m^2
$A_{C,storage}$	cross-sectional area of storage	m^2
$A_{C,hx}$	cross-sectional area of heat exchanger	m^2
λ_{wall}	thermal conductivity of wall material	W/(m K)
λ_{fluid}	thermal conductivity of fluid in storage	W/(m K)
λ_{hx}	thermal conductivity of heat exchanger material	W/(m K)

Da die Temperatur an verschiedenen Stellen im Speicher von Interesse ist, kann eine Anzahl von Messpunkten an äquidistanten Stellen im Speicher gesetzt werden und zwar unabhängig von der Anzahl der Knoten. Die erste Temperatur im Ausgabe-Vektor "T_{node}" entspricht dem räumlich tiefsten Messpunkt: die folgenden Werte entsprechen den höher gelegenen Messstellen.

Der Aufbau des Multiport-Speicher Blocks (Block multiport storage in Bild 6) ist folgendermaßen

Eingänge:

- Umgebungstemperatur in °C
- Thermo-Hydraulischer Vektor an Port1 (der Typ des Ports wird im Subsystem spezifiziert)
- Thermo-Hydraulischer Vektor an Port2 (der Typ des Ports wird im Subsystem spezifiziert)
- ...

Ausgänge:

- Vektor der Länge "Sensor" mit den Temperaturen der Messsensoren (das erste Element ist das des untersten Sensors)
- Thermo-Hydraulischer Vektor an Port1 (der Typ des Ports wird im Subsystem spezifiziert)
- Thermo-Hydraulischer Vektor an Port2 (der Typ des Ports wird im Subsystem spezifiziert)
- ...

Der Speicher besteht damit aus verschiedenen Subsystemen. Die verschiedenen Elemente sind in einer eigenen Unterbibliothek abgelegt (Bild 7).

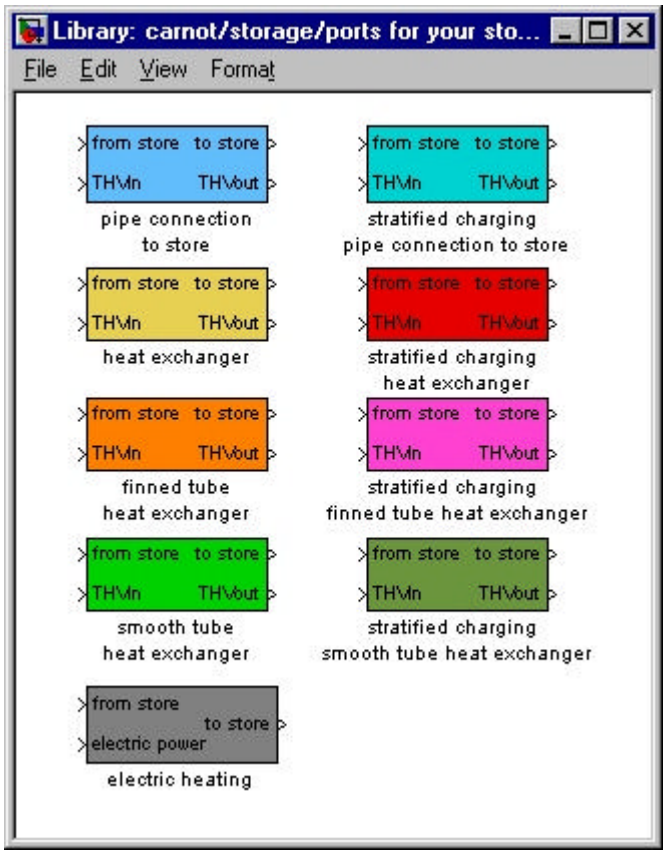


Bild 7: Ports für den Multiport Speicher

Wie aus Bild 7 ersichtlich sind folgende Elemente einsetzbar:

- einfache Rohrverbindung
- Wärmetauscher
- Rippenrohrwärmetauscher
- Glattrohrwärmetauscher
- Schichtenladerohr
- Schichtenladewärmetauscher
- Schichtenlade-Rippenrohrwärmetauscher
- Schichtenlade-Glattrohrwärmetauscher
- elektrische Heizung

Eingabemaske:

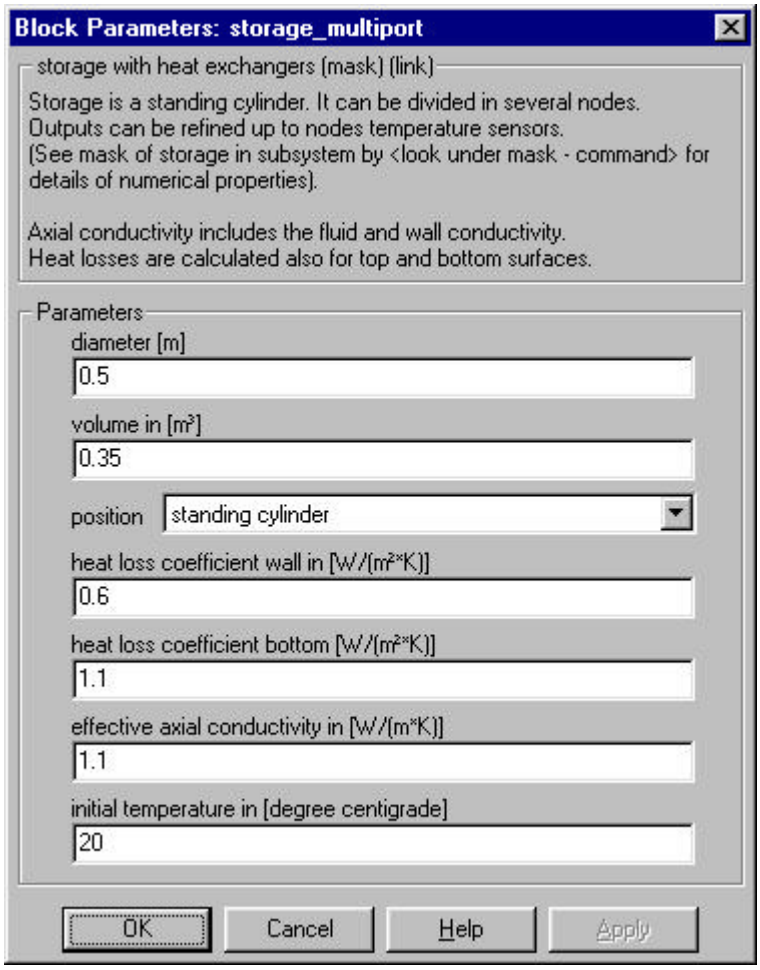


Bild 8: Maske des Multiport Speichers

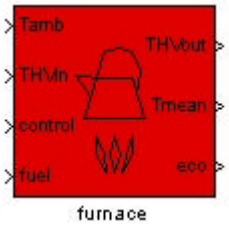
Eingabeparameter:

- Durchmesser [m]
- Volumen [m³]
- Aufstellungsart [stehend oder liegend]
- k-Wert der Wand [W/(m² K)]
- k-Wert des Bodens [W/(m² K)]
- effektive axiale Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
- Anfangstemperatur (die Anfangstemperatur kann ein skalarer Wert für alle Knoten des Speichers oder ein Vektor sein, der für jeden Knoten einen eigenen Wert vorgibt).

Das hier angegebene Modell eines Speichers ist das umfassendste, da viele verschiedene geometrische Anordnungen vieler verschiedener Komponenten realisiert werden können. In der Bibliothek des Programmpakets CARNOT befinden sich weitere Modelle für Speicher, die meist einfacherer Struktur sind:

- Speicher mit einem innenliegenden Wärmetauscher
- Speicher mit einem innenliegenden zweiten kleinerem Speicher

3.2.3 Konventionelle Wärmequelle (furnace)



Die konventionelle Wärmequelle (Heizung) wird durch ein Modell abgebildet, das nur den konstanten Leistungstransfer der Brennkammer berücksichtigt. Der Wärmeübergang auf das Fluid wird mittels eines Mehrknotenmodells abgebildet, um das zeitabhängige Verhalten zu berücksichtigen. Die Differenzialgleichung zur Beschreibung des thermischen Verhaltens des Wasser ist:

$$\frac{m \cdot c}{N}\frac{dT_{node}}{dt} = \frac{U_1}{N} \cdot (T_{amb} - T) + \dot{m} \cdot c \cdot (T_{lastnode} - T_{node}) + \frac{P_{nom}}{N}$$

mit den Variablen

Symbol	Bedeutung	Einheit
m_{node}	actual mass at node	[kg]
c	heat capacity of fluid	[J/(kg K)]
T	temperature of furnace water	[K]
t	time	[s]
U_1	heat loss coefficient to ambient	[W/ K]
T_{amb}	ambient temperature	[K]
T_{node}	node temperature	[K]
m_{dot}	mass flow rate	[kg/s]
N	number of nodes	[-]
P_{nom}	nominal power of the furnace	[W]

Eingabemaske:

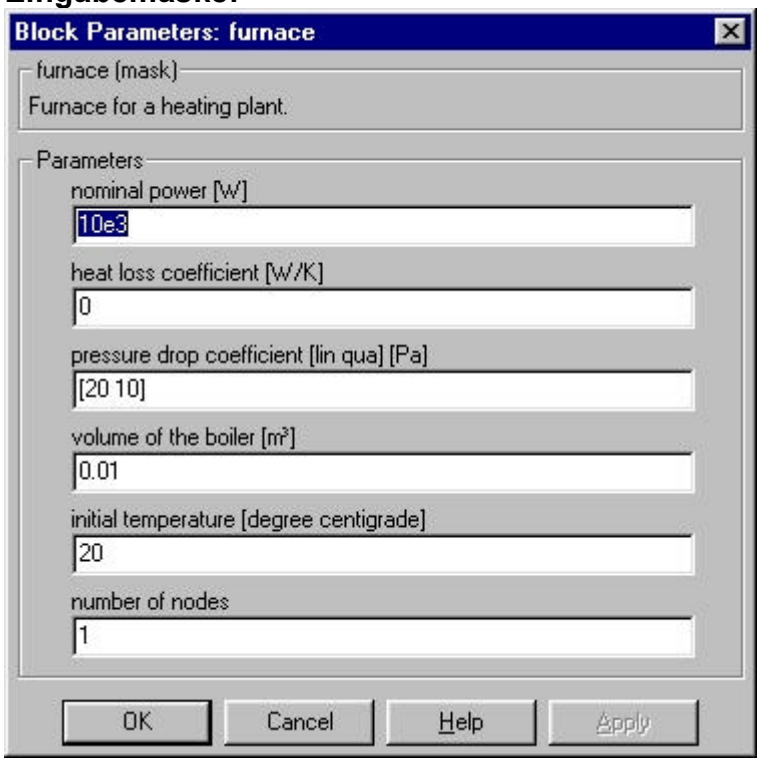
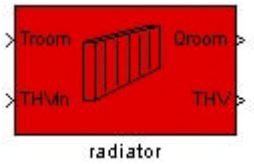


Bild 9: Maske der konventionellen Heizung

Eingabeparameter:

- Nennleistung [W]
- k-Wert (k*A) [W/(m^2*K)]
- Druckverlustkoeffizieten [l q] [Pa]
- Anfangstemperatur [°C]
- Anzahl der Knoten

3.2.4 Heizkörper (radiator)



Dieser Block bildet einen konventionellen Heizkörper einer Wärmeversorgung ab. Dabei wird die Zeitverzögerung zwischen der Raumtemperatur T_{room} und der Temperatur des Wärmekreises modelliert. Die Temperatur des Heizkörpers kann durch eine Energiebilanzgleichung angegeben werden:

$$(m \cdot c)_{Unit} \cdot N \frac{dT_R}{dt} = -\dot{q} \cdot N + \dot{m} \cdot c_f \cdot (T_{in} - T_R)$$

mit den Koeffizienten:

m	mass of one unit in [kg]
c	heat capacity of one unit in [J/(kg K)]
c_f	heat capacity of fluid in [J/(kg K)]
N	number of units
$\dot{m}$	massflow rate in [kg/s]
T_{room}	room temperature in [°C]
T_R	radiator temperature in [°C]

Die Leistung (in Watt) pro Einheit (unit) ist aus der Nennleistung bei Nenn-Temperaturdifferenz erhältlich:

$$\dot{q} = \dot{q}_{nominal} \cdot \left(\frac{T_R - T_{room}}{\Delta T_{nominal}} \right)^n$$

n	Heizkörperexponent

Eingabemaske:

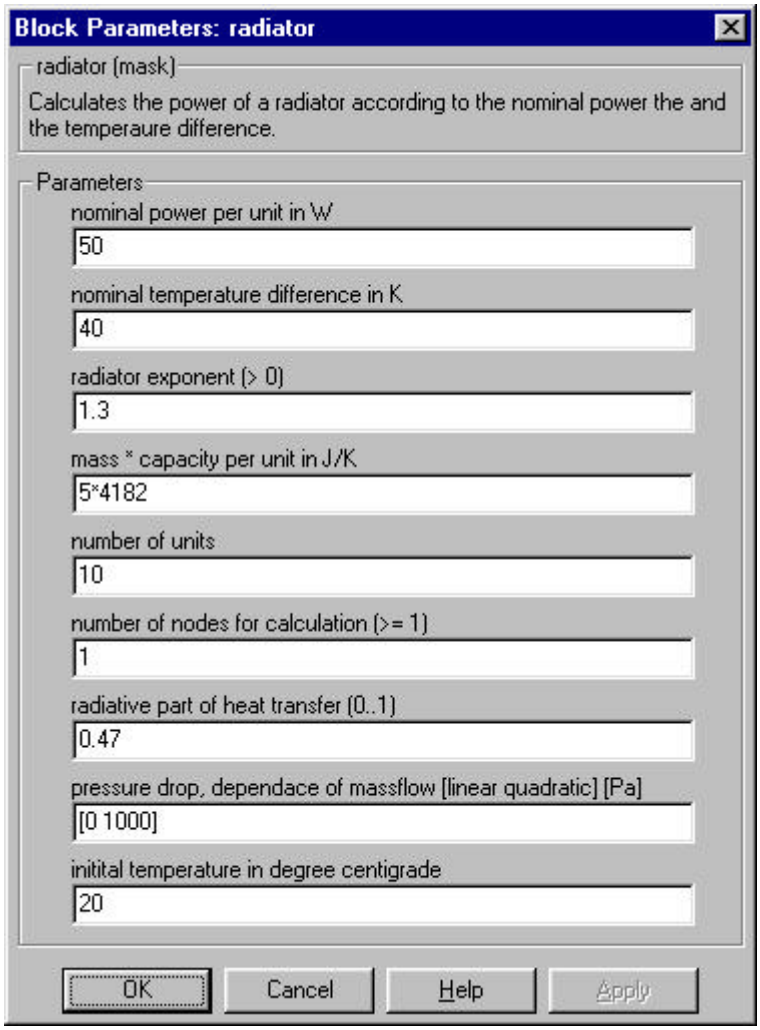


Bild 10: Eingabemaske für den Heizkörper

Eingabeparameter:

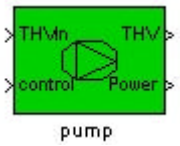
- Nennleistung [W]
- Nenn-Temperaturdifferenz [K]
- Heizkörper-Exponent [1,25-1,45]
- Masse und Kapazität pro Einheit [J/K]
- Anzahl der Einheiten
- Anzahl der Knoten
- Strahlungsanteil des Wärmetransfers
- Druckverlustkoeffizienten [l q] [Pa]
- Anfangstemperatur [°C]

3.2.5 Pumpen

Die Abbildung verschiedener Pumpen ist möglich:

- Abbildung einer Pumpe bei bekannter Kennlinie
- Pumpe mit konstantem Massenstrom
- Pumpen des Herstellers WILO

3.2.5.1 Pumpe mit bekannter Kennlinie (pump)



Eine Pumpe mit bekannter Kennlinie kann durch die Angabe der Koeffizienten a_0, a_1, a_2 eines quadratischen Polynoms Δp_{pump} abgebildet werden, das die Pumpencharakteristik beschreibt.

$$\Delta p_{pump} = a_0 + a_1 \cdot \dot{m} + a_2 \cdot \dot{m}^2$$

Mit diesen Koeffizienten wird durch die vorgegebene Pumpe der Massenstrom in Abhängigkeit der Druckverluste im System festgelegt. Der Druckverlust im System wird im THV angegeben und setzt sich aus den Druckverlusten einzelner Komponenten im System zusammen (c: konstanter, l: linearer und q: quadratischer Term):

$$\Delta p_{system} = c + l \cdot \dot{m} + q \cdot \dot{m}^2$$

Δp_{pump} und Δp_{system} müssen identisch sein. Die entstehende Gleichung wird analytisch gelöst. Um ein direktes Durchschleifen der Temperatur zu verhindern (dies würde zu einer algebraischen Schleife führen), wird diese durch eine Transferfunktion mit einer Zeitkonstante von 100 s versehen.
Um die elektrische Leistung der Pumpe zu ermitteln, muss die Wirkungsgradkennlinie in einer Tabelle hinterlegt sein, aus der die elektrische Leistung abgelesen werden kann. Der Pumpenblock ist als eine in C geschriebene S-Function ausgeführt.

Eingabemaske:

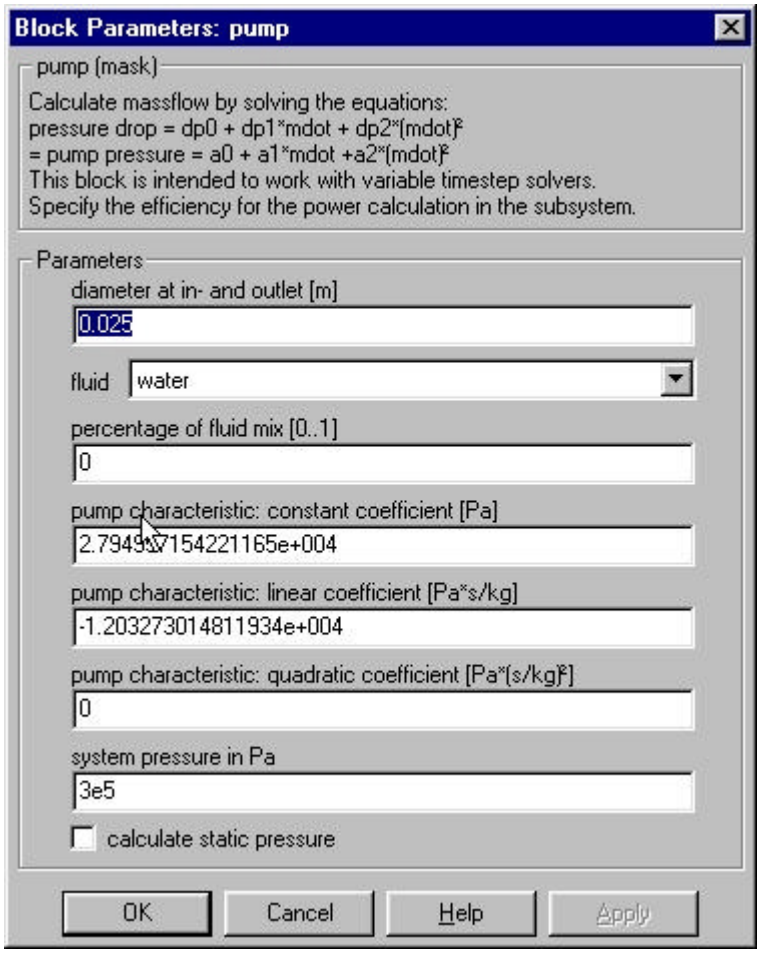
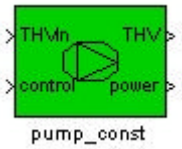


Bild 11: Eingabemaske der Pumpe

Eingabeparameter:

- Durchmesser des Zu- und Abflusses [m]
- Fluid [Wasser, Luft, Baumwollöl, Silikonöl, Wasser-Glykol-Gemisch]
- Mischungsverhältnis [0..1]
- konstanter Pumpenkoeffizient [Pa] (muss > 0 sein)
- linearer Pumpenkoeffizient [Pa] (normalerweise < 0)
- quadratischer Pumpenkoeffizient [Pa] (muss < 0 sein)
- Systemdruck [Pa]
- Art der Druckverlustberechnung [nur Reibung, Reibung und statischer Druck]

3.2.5.2 Pumpe mit konstantem Massenstrom (pump_const)



Die Pumpe mit konstantem Massenstrom ist so konzipiert, dass der in der Eingabemaske angegebene Massenstrom immer dann von der Pumpe gefördert wird, wenn die Pumpe eingeschaltet ist.
Um ein direktes Durchschleifen der Temperatur zu vermeiden, wird auch hier eine Transferfunktion mit einer Zeitkonstante von 100 s eingesetzt. Die Pumpe hat eine

Wärmekapazität von ca. 1 kg Stahl, so dass die Temperatur am Ausgang nicht exakt der Eingangstemperatur entspricht.
Der Massenstrom ist durch

$$\dot{m} = \dot{m}_{max} \cdot control$$

bestimmt.

Eingänge:

- THV
- Kontroll/Steuersignal [0..1]

Ausgänge:

- THV

Eingabemaske:

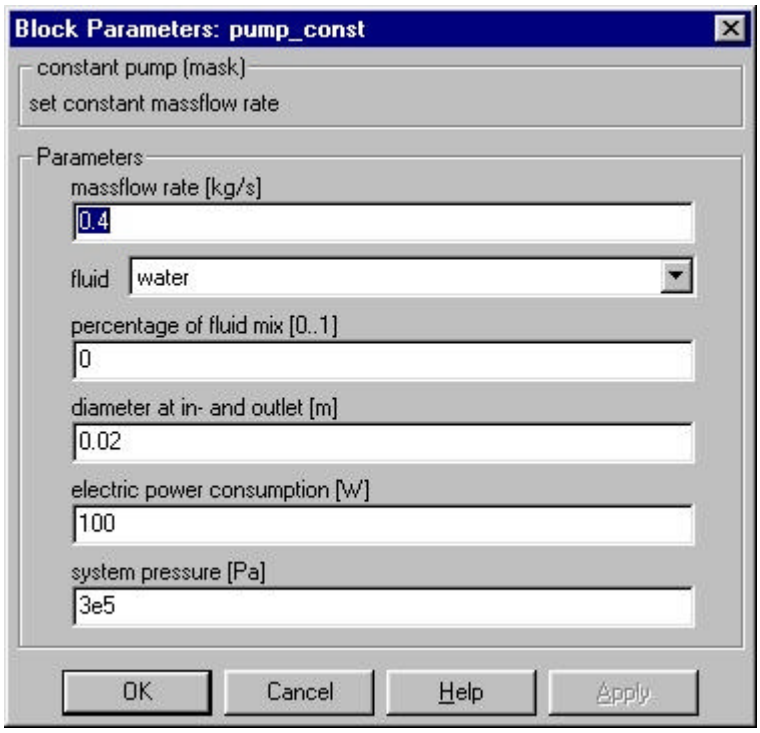
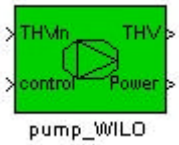


Bild 12: Eingabemaske der Pumpe mit konstantem Massenstrom

Eingabeparameter:

- Maximale Fördermenge [kg/s]
- Fluid [Wasser, Luft, Baumwollöl, Silikonöl, Wasser-Glykol-Gemisch]
- Mischungsverhältnis (nur für Mischungen wie Wasser- Glykol) [0..1]
- Ein- und Auslassdurchmesser der Rohrleitung [m]
- Druck [Pa]
- Art der Druckverlustberechnung [nur Reibung, Reibung und statischer Druck]

3.2.5.3 Pumpen des Herstellers WILO (pump_WILO)



Die Abhängigkeit des Massenstroms m_{dot} von der Druckerhöhung ist für 12 Pumpen des Herstellers WILO explizit angegeben. Dem Block (pump_WILO) sind die Charakteristiken dieser Pumpen hinterlegt, die mit einem sogenannten pop-up Menu ausgewählt werden können. Maximale Fördermengen und Drücke der verschiedenen Pumpen sind:

Bezeichnung	**max. Fördermenge [kg/s]**	**max. Druck [Pa]**
E 30/1-5	0.117	4922
Z 15 C	0.167	1726
RP 25/100	1.319	78480
RS 25/7	1.342	35316
TOP RS 30/7	1.342	78480
TOP RS 30/10	1.61	117720
TOP-S 40/4	2.292	39240
TOP-S 40/7	3.12	78480
TOP-S 40/10	4.0	97511
TOP-S 50/10	6.3889	117720
TOP-S 65/13	9.72	137340
TOP-S 80/10	14.81	117720

Der Massenstrom in der Pumpe wird entsprechend dem Massenstrom im System, bzw. dem der an die Pumpe angeschlossenen Rohre gesetzt.

Die Vielfalt der hier angegebenen Pumpen ermöglicht es, für viele Anwendungen eine dieser Pumpen auszuwählen. Um eine Anwendung mit dem Real-Time-Workshop zu realisieren (es müssen Löser mit fester Zeitschrittweite eingesetzt werden), stehen alternative Modelle zu Verfügung (Pump_Wilo_RTW).
Die elektrische Leistung der Pumpe wird mittels der S-Function "wilopower" berechnet. Wie bei den anderen Pumpen wird eine Wärmekapazität von 1 kg Stahl angenommen, so dass die Temperatur am Auslass nicht exakt der Einlasstemperatur entspricht.

Die Pumpeneigenschaften werden durch ein Polynom 2. Ordnung angenähert:

$$dp = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$$

wobei die Koeffizienten a_i aus Datenblättern des Herstellers entnommen wurden. Weiterhin wird der Wirkungsgrad der Pumpe mittels eines Polynoms 4. Ordnung ermittelt:

$$\eta = e_4 x^4 + e_3 x^3 + e_2 x^2 + e_1 x + e_0$$

Die Berechnung des Wirkungsgrades ist erforderlich, um die elektrische Leistung der Pumpe zu berechnen.

Eingabemaske:

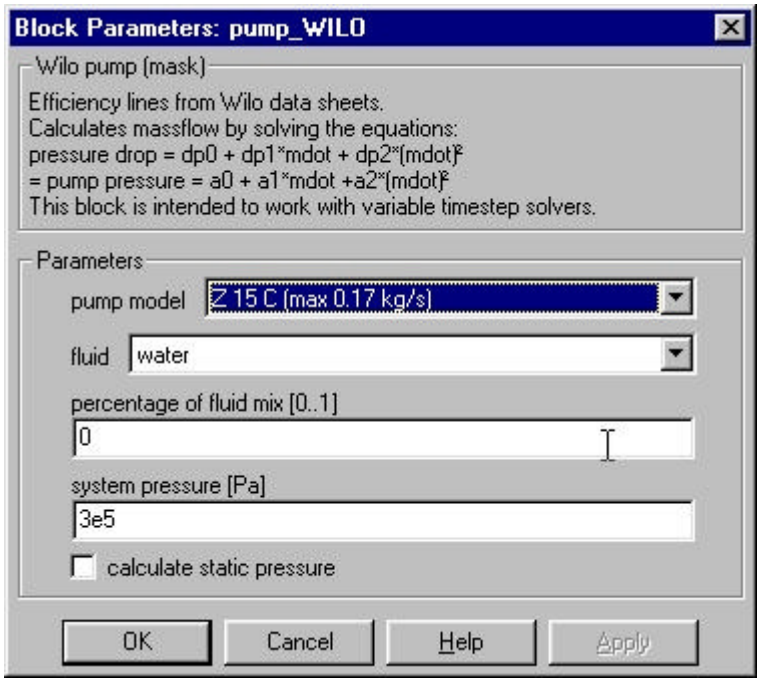
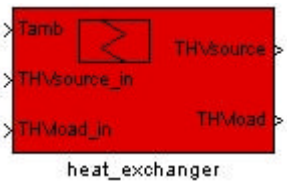


Bild 13: Eingabemaske der WILO-Pumpen

- Modell der Pumpe (auszuwählen aus den 12 Typen)
- Fluid [Wasser, Luft, Baumwollöl, Silikonöl, Wasser-Glykol-Gemisch]
- Mischungsverhältnis des Fluids (nur für Mischungen von Wasser - Glykol) [0..1]
- Systemdruck in [Pa]

3.2.6 Wärmetauscher (heat_exchanger)



Der Wärmetauscher wird durch **n**umber of **t**ransfer **u**nits (NTU) beschreiben. Bei diesem Modell werden die Eingangstemperaturen durch die Wärmekapazität des Wärmetauschers verzögert. Es sind sowohl parallele als auch kreuz- oder gegenläufige Durchströmung der beiden Fluide möglich.

$$T_{hot_out} = T_{hot_in} - psi * (T_{hot_in} - T_{cold_in}) \quad (1)$$

$$T_{cold_out} = T_{cold_in} - W_{hot}/W_{cold} * (T_{hot_in} - T_{hot_out}) \quad (2)$$

$$NTU = (u_{a0} + u_{a1} * m_{dot_hot} + u_{a2} * m_{dot_cold})/W_{hot} \quad (3)$$

$$psi1 = \exp(-NTU*(1 + \min(w1,w2)/\max(w1,w2)*(1 - 2*flow))) \quad (4)$$

$$psi = (1-psi) / (1+\min(w1,w2)/\max(w1,w2)*(1-flow*(1+ psi))) \quad (5)$$

Die Zeitverzögerung der Eingangstemperatur ist:

$$(0.5*c)*dT/dt = (T_{in} - T) - (UA)_{loss} * (T_{amb} - T)$$

Symbol	**Beschreibung**	**Einheit**
c	heat capacity	[J/K]
psi	dimensionless temperature change	
T	temperature	[°C]
t	time	[s]
$(UA)_{loss}$	heat loss	[W/K]
w1	mass flow * capacity hot fluid	[W/K]
w2	mass flow * capacity hot fluid	[W/K]
flow	(0=parallel,0.5=cross,1= counter)	

Die angegebene Gleichung ist für kreuzweise Durchströmung der Fluide nicht korrekt, sondern stimmt nur für NTU <= 2, für NTU = 4 beträgt der Fehler ca. 5%

Eingabemaske:

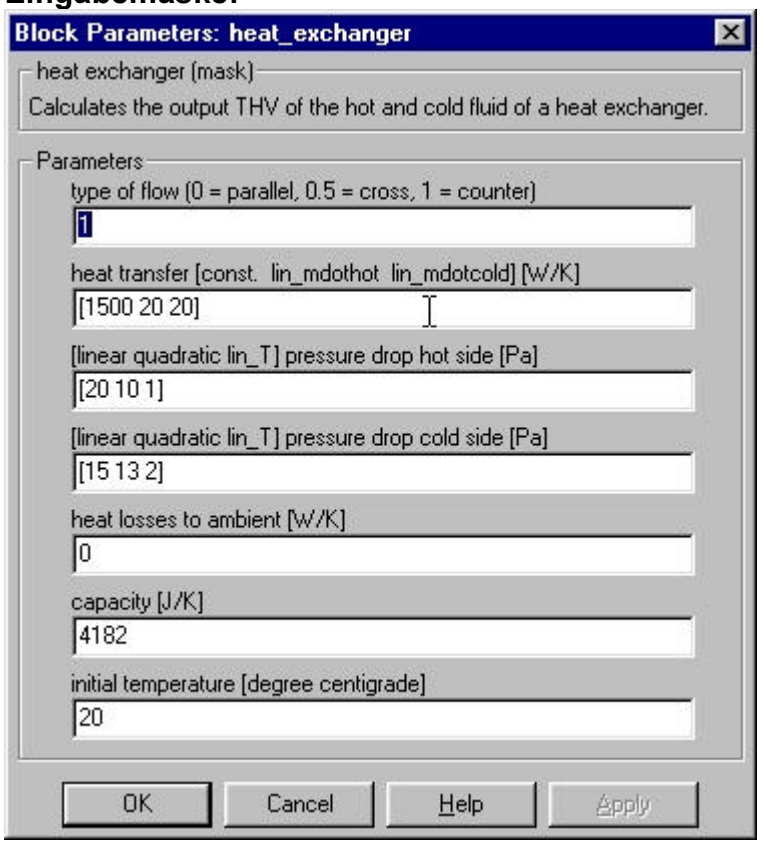


Bild 14: Eingabemaske für den Wärmetauscher

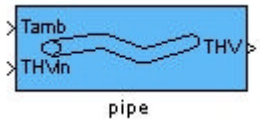
Eingabeparameter:

- Durchströmung (0=parallel, 0.5 = kreuz, 1 = gegenläufig)
- Nennwärmeübergang [W/K]
- Durchmesser der heißen Leitung [m]
- Druckverlustkoeffizienten der heißen Leitung

- Durchmesser der kalten Leitung [m]
- Druckverlustkoeffizienten der kalten Leitung
- Wärmeverlust an die Umgebung [W/K]
- Wärmekapazität [J/K]
- Anfangstemperatur [°C]

3.2.7 Sonstige Komponenten

3.2.7.1 Rohrleitung mit Wärmekapazität (pipe)



Die Rohrleitung wird mittels eines eindimensionalen Mehrknotenmodells abgebildet. Die Wärmekapazität der Rohrwände wird ebenso berücksichtigt wie Wärmeverluste an die Umgebung, die Wärmeleitung zwischen zwei Knoten und der Wärmetransport durch den Massenstrom. Die diesem Modell zugrunde liegende Differenzialgleichung für Wärme- und Massentransport wird mittels einer Finite-Volumenmethode gelöst[3]. Der Wärmeübertragung aufgrund von Konvektion wird durch ein "upwind"-Verfahren, die Wärmeleitung durch zentrale Differenzen berechnet. Die resultierende Differenzialgleichung für einen Knoten ist damit:

$$\frac{c_{wall} L}{V_{node}} \frac{dT}{dt} = \frac{UA_{loss}}{V_{node}} (T_{amb} - T) + \frac{\lambda_{eff}}{dx^2} (T_{last} + T_{next} - 2T) + \frac{\dot{m} c_{fluid}}{V_{node}} (T_{last} - T)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_{loss}	surface area for losses	m^2
λ_{eff}	effective axial thermal conductivity	W/(m K)
c_{fluid}	heat capacity of fluid	J/(kg K)
c_{wall}	heat capacity of pipe per length	J/(m K)
dx	distance between two nodes	m
$\dot{m}$	mass flow rate	kg/s
ρ	density	kg/m^3
T	temperature	K
t	time	s
U	heat loss coefficient	$W/(m^2 K)$
V_{node}	node volume	m^3

Die Berechnung wird in der S-function pipe ausgeführt. Diese Funktion berechnet zudem den Druckverlust im Rohr entsprechend:

$$\Delta p = \lambda_{flow} \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \frac{l}{d_i}$$

Bei der Benutzung von Differenzialgleichungslösern mit fester Zeitschrittweite muss die Bedingung für die Courant-Zahl erfüllt sein: $c = \Delta t * v/L_{node} <= 1$

Eingabemaske:

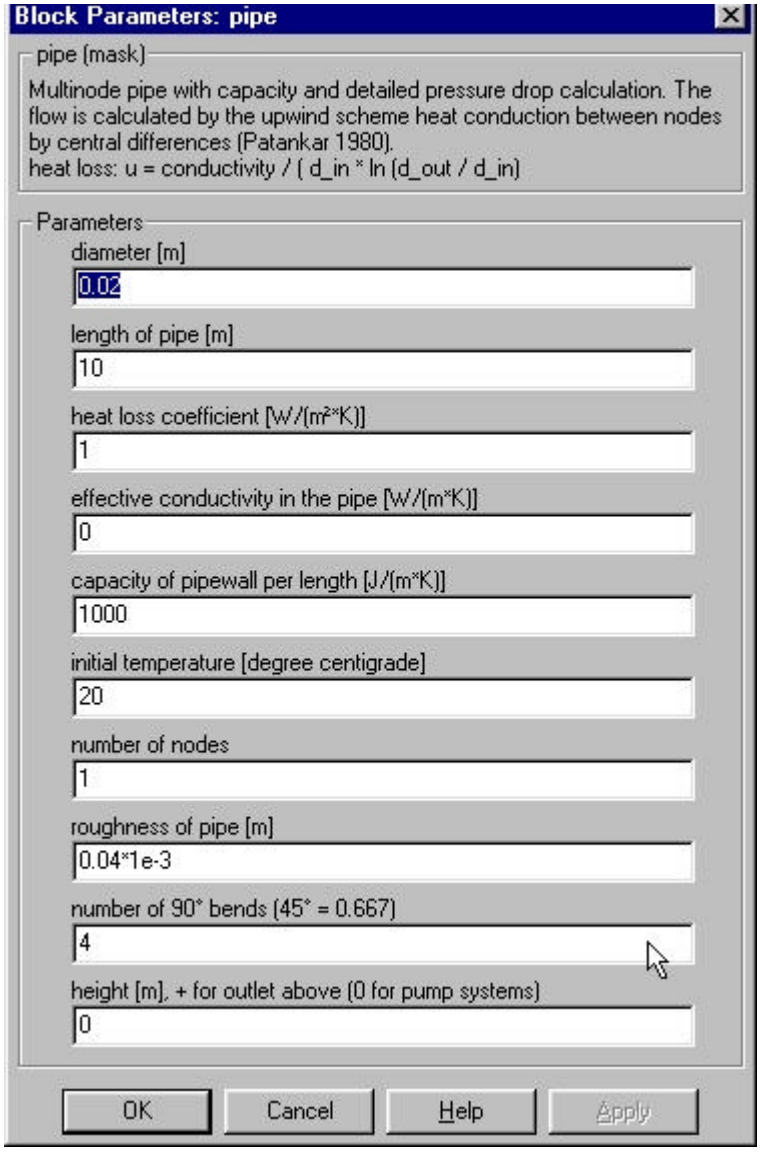


Bild 15: Eingabemaske der Rohrleitung

Eingabeparameter:

- innerer Durchmesser des Rohrs [m]
- Länge des Rohrs [m]
- k-Wert in [W/(m^2 K)]
- effektive axiale Wärmeleitung [W/(m K)] (= (Querschnitt der Wand)/π*(d^2/4)*λ_{wall})
- Wärmekapazität pro Länge [J/(m K)]
- Anfangstemperatur [°C]
- Anzahl der Knoten (1 Knoten pro Meter ist normalerweise ein akzeptabler Wert für numerische Berechnungen)
- Wand-Rauhigkeit [m]
- Summe aller Krümmungen (wird für die Druckverlustberechnung benötigt), 1 für eine 90° Biegung, 0.667 für eine 45° Biegung

- Höhendifferenz zwischen Rohreinlass und -auslass (positive Werte für einen Auslass über dem Einlass). Zur Vereinfachung kann die Höhe 0 gesetzt werden falls die natürliche Konvektion keine Rolle spielt, wie zumeist der Fall, wenn eine Pumpe eingesetzt wird.

3.2.7.2 Zweipunkt-Regler (controller_bang_bang)

Der Zweipunkt-Regler ist eine einfacher Hysterese-Regler. Abhängig von den an den Eingängen anliegenden Temperaturen wird der Ausgang gesetzt:

1 wenn $(T_{hot} - T_{cold}) < \Delta T_{on}$

0 wenn $(T_{hot} - T_{cold}) < \Delta T_{off}$

Der Ausgang wird außerdem zu 0 gesetzt, falls T_{hot} oder T_{cold} größer als T_{max} ist

Eingabemaske:

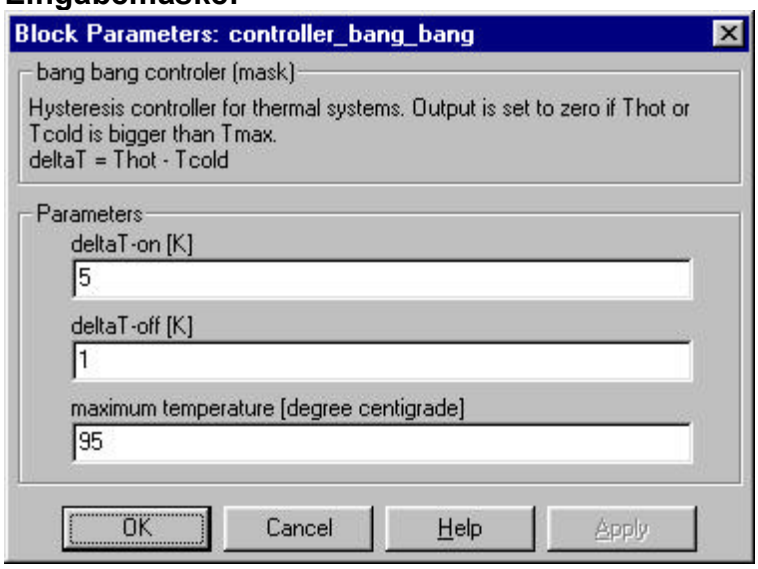


Bild 16: Eingabemaske für den Hysterese-Regler

Eingabeparameter:

- Einschalttemperaturdifferenz ΔT_{on} [°C]
- Ausschalttemperaturdifferenz ΔT_{off} [°C]
- Maximale Temperatur [°C]

3.2.7.3 Verzweigung

Wie schon weiter oben erwähnt, wird der Druckverlust als quadratische Funktion dargestellt:

$$\Delta p = c + l \cdot \dot{m} + q \cdot \dot{m}^2$$

wobei c ein konstanter Term, l der lineare Druckverlustkoeffizient und q der quadratische Druckverlustkoeffizient ist. Falls diese drei Koeffizienten und der aktuelle Massenstrom bekannt sind, kann der Druckverlust berechnet werden. Die

Information über den Druckverlust kann damit über den Vektor [c l q] von einem Block zum nächsten weitergegeben werden.
Eine hydraulische Verzweigung beginnt typischerweise mit einem Teiler und endet mit einem Mischer, diese beiden Komponenten können einzeln nicht auftreten (Bild 17). Die Druckverlustberechnung beinhaltet die folgenden Schritte:

1. Der Koeffizientenvektor $[c\ l\ q]_0$ (vor der Verzweigung) und der Massenstrom $m_{dottotal}$ werden an den THV als weitere Elemente angehängt und ungeändert durch das Subystem durchgeschleift. Diese Element werden erst im Mischer modifiziert.

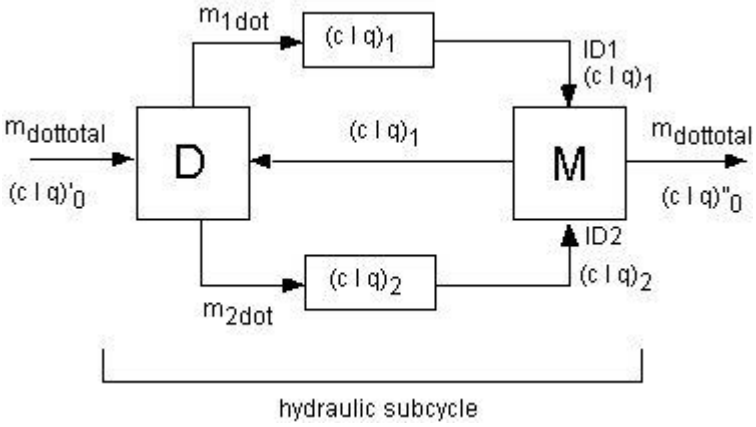


Bild 17: Hydraulische Verzweigung

2. Im Teiler werden zwei weitere Vektoren $[c\ l\ q]_{1/2}$ zu Beginn zu [0 0 0] initialisiert und im THV an den Positionen 8, 9, 10 gespeichert und von Block zu Block transferiert. In jedem Teil der Verzweigung wird abhängig von den in der Verzweigung existierenden Blöcken der Druckverlust bis zum Mischer-Block anhand der Koeffizienten [c l q] aufaddiert.

Von diesem Block wird die Information über den Druckverlust in jedem Zweig an den Teiler-Block zurückgegeben, so dass die Aufteilung des Massenstroms für den nächsten Zeitschritt in die beiden Zweige entsprechend dem Widerstand in den Zweigen vorgenommen werden kann. Um eine algebraische Schleife zu vermeiden, wird mittels eines State-Space-Blocks mit PT_1-Charakteristik eine Entkopplung vorgenommen. Die Zeitverzögerung durch den State-Space-Block ist sehr kurz gewählt (1/100 Sekunde) , so dass auch An- und Ausschaltvorgänge korrekt wiedergegeben werden. Zusätzlich zu den Koeffizienten [c l q] wird eine Verzweigungs-ID weitergegeben. Falls die ID eines Zweiges negativ wird, bedeutet dies, dass dieser Zweig geschlossen ist, so dass der Massenstrom zu 0 gesetzt wird (z. B. bei einem geschlossenen Ventil im Zweig).
Mit der Information über den Druckverlust im vorherigen Zeitschritt wird also am Teiler die Aufteilung des Massenstroms unter der Bedingung realisiert, dass der Druckverlust in beiden Zweigen gleich sein muss:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2$$

und

$$c_1 + l_1 \cdot \dot{m}_1 + q_1 \cdot \dot{m}_1^{\,2} = c_2 + l_2 \cdot \dot{m}_2 + q_2 \cdot \dot{m}_2^{\,2}$$

Außerdem muss die Kontinuitätsgleichung erfüllt sein

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

Mit diesen drei Gleichungen kann die quadratische Gleichung für den Druckverlust gelöst werden und der Massenstrom für beide Zweige eingestellt werden.
Im Mischer wird auch der Druckverlust der gesamten Unterverzweigung berechnet. Dieser gesamte Druckverlust wird zum Koeffizientenvektor $[c\ l\ q]'_0$ addiert und parallel zu den Zweigen weitergereicht. Der Druckverlust wird an drei Punkten berechnet: voller/halber und viertel-Massenstrom. Diese drei Punkte definieren eine Parabel (Gleichung 1), so dass die drei Koeffizienten $[c\ l\ q]_{subcycle}$ gefunden sind. Diese Koeffizienten werden zu den Koeffizienten $[c\ l\ q]'_0$ addiert, und das Ergebnis $[c\ l\ q]''_0$ an den nächsten Block hinter dem Mischer weitergereicht.
Für den Hauptstrom beginnt die Druckverlustberechnung immer in der Pumpe. Die Koeffizienten $[c\ l\ q]_0$ werden dort zu [0 0 0] gesetzt und dann der Druckverlust der Einzelkomponenten pro Komponente addiert.
Die normalen Teiler/Mischer-Blöcke sind für Löser mit variabler Zeitschrittweite konzipiert und benutzen einen State-Space-Block, um die algebraische Schleife zu vermeiden. Für Löser mit fester Zeitschrittweite wurden extra Teiler/Mischer-Blöcke entwickelt, die damit auch für Anwendungen des Real-Time-Workshops geeignet sind.

3.2.7.4 Umrechnung der Strahlungsdaten von horizontaler auf geneigte Fläche

Oftmals stehen Strahlungsdaten nur für die horizontale Fläche und nicht für die Ebene, in der der Kollektor liegt, zur Verfügung. Mittels der Umrechnung der Strahlung auf die geneigte Fläche können diese Daten ebenfalls genutzt werden.

Himmelsmodelle:
Die Solarstrahlung kann in einen diffusen und in einen direkten Anteil aufgespalten werden. Der diffuse Anteil lässt sich weiterhin in drei Anteile aufteilen:

- die isotrope diffuse Strahlung, die durch den gesamten Himmel gegeben ist,
- die sogenannte Zirkumsolarstrahlung, ein Anteil der nahe der direkten Strahlung auftritt und
- das Horizontleuchten, das in der Nähe des Horizonts auftaucht.

Die Gesamtstrahlung auf eine geneigte Fläche enthält auch die Anteile durch Bodenreflexion und Reflexion an benachbarten Flächen.

Die Himmelsmodelle beschreiben mathematisch den diffusen Anteil der Strahlung. Abhängig vom Modell werden bestimmte Anteile der Diffusstrahlung berücksichtigt oder nicht. Hier können zwei verschiedene Modelle ausgewählt werden: das Modell des isotropen Himmels und das Himmelsmodell nach Hay-Davis.

Isotroper Himmel:
Dieses Modell berücksichtigt die diffuse Strahlung komplett als isotrop, so dass Zirkumsolarstrahlung und Horizontleuchten nicht auftreten. Die Globalstrahlung wird aus drei Termen zusammengesetzt: der direkten und der diffusen Strahlung sowie der Bodenreflexion.

Himmelsmodell nach Hay-Davis:
Dieses Modell berücksichtigt die diffuse Zirkumsolarstrahlung. Das Horizontleuchten wird nicht berücksichtigt, so dass die diffuse Strahlung aus der Zirkumsolarstrahlung und dem isotropen Anteil besteht. Die Richtung der Zirkumsolarstrahlung ist dieselbe wie der direkte Anteil der Strahlung. Ein Anisotropieindex als Funktion der Transmission der Atmosphäre wird verwendet, der den Anteil der diffusen Strahlung beschreibt, der parallel zur direkten Strahlung gestreut wird. Falls der Himmel unbewölkt ist, ist der Anisotropieindex groß, falls der Himmel bewölkt ist, wird der Anisotropieindex 0 und das Modell entspricht dem isotropen Modell. Die Strahlung auf die geneigte Fläche I_T besteht aus 4 Teilen:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot 0{,}5 \cdot (1+\cos\beta) + I_d \cdot I_b / I_0 \cdot [R_b - 0{,}5 \cdot (1+\cos\beta)] + (I_b + I_d) \cdot \rho_{ground} \cdot 0{,}5 \cdot (1-\cos\beta) \quad [W/m^2]$$

wobei:
I_b : beam radiation
I_d : diffuse isotropic sky
R_b = $\cos\theta / \cos\theta_z$
β : slope of surface, degree
θ : angle incidence to normal of surface, degree
θ_z : zenith angle of the sun, degree
ρ_{ground} : reflection of ground, [0,1]

Das Hay-Davis-Modell ist nicht viel komplizierter als das isotrope Modell, führt aber zu verbesserter Abbildung der Strahlung[4].

Eingabemaske:

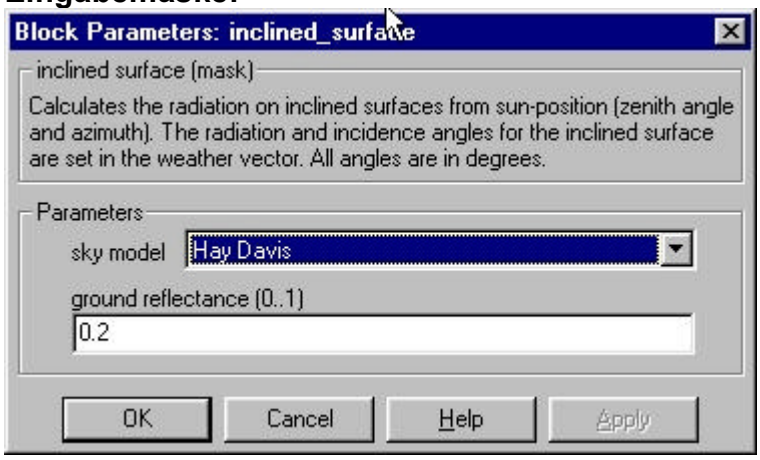


Bild 18: Eingabemaske des Blocks "inclined_surface"

Eingabeparameter:

- Himmelsmodell (isotroper Himmel oder Hay Davies)
- Bodenreflexion (0.2 für normalen Boden, 0.3..0.5 für Sand und Schnee)

3.3 Vorlagen für neue Modelle

Die Einschränkung fast aller Simulationsprogramme für thermische Anlagen ist, dass eine Erweiterung kaum möglich ist, wenn z. B. neue Modelle und Komponenten eingefügt werden sollen. Um dies für das vorliegende Programm zu vereinfachen, wurden sogenannte "Templates" (Vorlagen) entwickelt, die das Einfügen von neuen Modellen und Komponenten ermöglichen.

- Einbindung neuer Komponenten/Modelle
- Einbindung von neuen Typen schon bestehender Modelle

3.3.1 Einbindung neuer Komponenten/Modelle

Hier wird zunächst vorgestellt, wie eine neue Komponente als S-Function eingefügt wird, d. h. in C programmiert, kompiliert und dann als Block in SIMULINK verfügbar gemacht wird.

Sollen neue Modelle eingefügt werden, z. B. ein Absorptionskühlgerät, so ist dieses zunächst mathematisch (zumeist durch ein Differenzialgleichungsystem) zu beschreiben. Ist dieses System bekannt, kann es in eine Vorlage, die standardmäßig von SIMULINK zu Verfügung gestellt wird, eingefügt werden. Außerdem müssen die Zahl der Ein- und Ausgangsgrößen, die Parameter und die Anfangsbedingungen definiert werden.

Als Beispiel ist hier die Differenzialgleichung für die konventionelle Heizung angegeben (s. Kapitel 3.2.3). Sie wird in der Form dargestellt, dass nur der Term dT/dt (hier als dx bezeichnet) auf der linken Seite der Gleichung steht und alle anderen Terme auf der rechten Seite:

$$dx = \frac{1}{m \cdot c}\left\{U_1 \cdot (T_{amb} - T_{node}) + \dot{m} \cdot c \cdot (T_{lastnode} - T_{node}) + \frac{P}{N}\right\}$$

Da das Heizungsmodell ein Mehrknotenmodell ist, muss diese Berechnung für alle Knoten in einer Schleife durchgeführt werden. $T_{lastnode}$ ist dabei jeweils die Temperatur des vorherigen Knoten, bzw. die Anfangstemperatur für den ersten Knoten. Der zugehörige C-Code der S-Function sieht folgendermaßen aus:

```
for (n = 0; n < nodes; n++) {
dx[n]=((Tamb-Tnode)*U1 + mdot*c*(Tenter-Tnode)+Pnom/nodes)/mnode/cp;
Tenter = Tnode;
}
```

Bei der Verschaltung mit anderen in diesem Vorhaben entwickelten Blöcken ist wichtig, dass die in Kapitel 3.1 beschriebenen Vereinbarungen wie z. B. die Verwendung des THV eingehalten werden.

3.3.2 Einbindung neuer Typen bestehender Modelle

Hat man z. B. einen neuen Kollektor, der noch nicht abgebildet ist, kann man das schon bestehende Kollektormodell verwenden und muss allein die Kollektorparameter eingeben. Dies ist dadurch direkt möglich, dass man diese Parameter in die Eingabemasken einträgt. In CARNOT steht zusätzlich eine Bibliothek "CARSYS" zu Verfügung, die schon komplett definierte Komponenten bereithält. Durch ein Pop-up Menu kann einfach ein Kollektor, Speicher etc. anhand seiner Typbezeichnung ausgewählt werden (Bild 19).

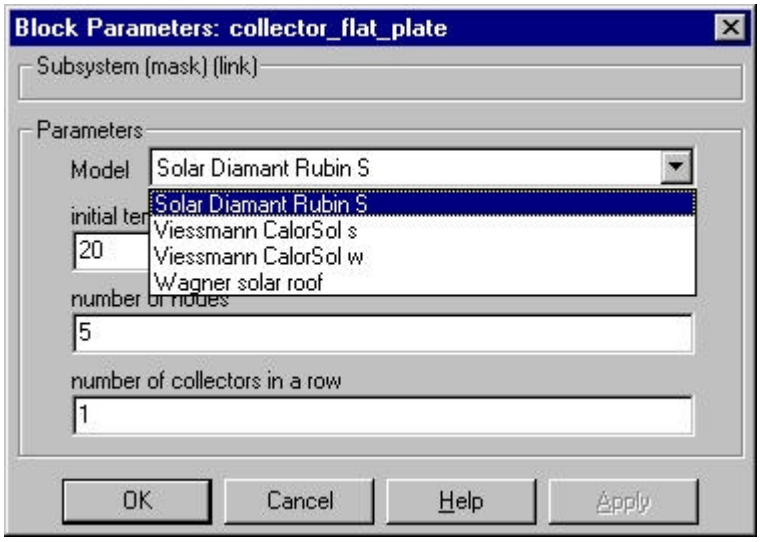


Bild 19: Auswahl eines definierten Kollektors

Durch die Angabe "Solar Diamant Rubin S" wären automatisch alle Parameter, die normalerweise in der Eingabemaske (Bild 4) gesetzt werden müssten, definiert. Diese Bibliotheken fertiger Modelle können selbstverständlich durch die Angabe eines neuen Parametersatzes erweitert werden.

3.4 Weitere Blöcke des Programmpakets "CARNOT"

Die bisher beschriebenen Blöcke wurden im Rahmen des Vorhabens entwickelt. Die in anderen Projekten entwickelten Blöcke und Konzepte werden im Programmpaket "CARNOT" zusammengefasst. Hier soll kurz der Umfang von CARNOT dokumentiert werden, um einen Überblick über die Leistungsfähigkeit dieses Paketes zu geben. Wie aus Bild 1 ersichtlich, gibt es folgende Unterbibliotheken:

- materials (Materialeigenschaften)
- basics (grundlegende Blöcke)
- outputs (Ausgabeblöcke)
- weather (Wetterdatenverarbeitung)
- heat_source (Kollektoren, Wärmepumpe,...)
- hydraulics (Rohrleitungen, Verzweigungen,...)
- pumps (definierte Pumpe, ...)
- storage (einfacher Speicher, Multiportspeicher...)
- loads (Nutzwärme Haus, Warmwasserbereitung...)
- control (Regel- und Steuerblöcke, Sensoren,...)
- misc (Verschiedenes)

3.4.1 Basics

Im Paket Basics sind grundlegende Blöcke vorhanden, die die Berechnung des Verhaltens eines Fluids erlauben. Folgende Funktionen sind verfügbar:

- capacity (Wärmekapazität)
- velocity (Geschwindigkeit)
- Reynolds (Reynoldszahl)
- Prandtl (Prandtlzahl)
- Grashof (Grashofzahl)
- pressure drop (Druckverlust)
- pressuredrop_linear (linearer Druckverlust)
- pressuredrop_quadratic (quadratischer Druckverlust)
- mix_T_mdot (Zusammenführen von Temperatur und Massenstrom in einem T-Stück)
- rel_hum2x (Umrechnung relative in absolute Luftfeuchte)
- x2rel_hum (Umrechnung absolute in relative Luftfeuchte)

3.4.2 Control

Im Paket Control sind Mess- und Regelblöcke enthalten:

- controller_bang_bang (Zweipunktregler)

- measure_mdot (Messsensor Massenstrom)
- measure solar_radiation (Messsensor Einstrahlung)
- measure_T (Messsensor Temperatur)
- measure_T_surface (Messsensor Oberflächentemperatur)

3.4.3 Heat Source

Im Paket HeatSource sind folgende Wärmequellen aufgelistet:

- heatpump (Wärmepumpe)
- heat_exchanger (Wärmetauscher)
- electric_heating (elektrische Heizung)
- collector_flat_plate (Flachkollektor)
- collector_parabolic_trough (Parabolrinnenkollektor)
- radiator (Heizkörper)
- furnace (konventionelle Heizung)

Weiterhin sind Blöcke vorhanden, die für die Umrechnung von Strahlungsdaten auf die Kollektorebene notwendig sind:

- fixed_surface (feste Position)
- tracked_surface (Nachführung)

Spezielle Blöcke für die Berechnung der Kollektoren sind:

- incidence angle modifier (IAM)
- pressure drop of collector (Druckverlustberechnung Kollektor)

3.4.4 Hydraulics

Zur Berechnung des hydraulischen Verhaltens sind folgende Blöcke verfügbar:

- flow_diverter no_pressuredrop (Teiler ohne Druckverlust)
- flow_diverter fixed_rate (Teiler mit fester Einstellung)
- flow_mixer (Mischer)
- valve_gate (Druckverlustberechnung an einem Schieber)
- valve (Druckverlustberechnung an einem Ventil)
- valve_universal (Druckverlustberechnung an einem Ventil, verschiedene Ventile können ausgewählt werden)
- valve_tempering (Ventil zur Mischung von zwei Strömen zu einer vorgegebenen Temperatur)
- valve_thermostatic (Thermostatventil)
- flow_diverter line2branch (Aufteilung eines Massenstroms an einem T-Stück)
- flow_diverter branch2line (Zusammenführung eines Massenstroms an einem T-Stück)
- pipe (Rohrleitung)
- pipe_2 (Rohrleitung ohne Reibungsverluste an der Rohrwand)

Weiterhin wurden Blöcke für die Anwendung des Real-Time-Workshops entwickelt:

- flow_diverter_RTW_no_pressure_drop (s. o.)
- flow_diverter_RTW_line2branch (s. o.)
- flow_diverter_RTW_branch2line (s. o.)

3.4.5 Incidence Angle Modifier (IAM)

Umwandlung der auf horizontale Ebene einfallende Strahlung in zu absorbierende Strahlung.

- collector_optics_double_glazing_extra_white_glass
- collector_optics_single_glazing_extra_white_glass
- collector_optics_double_glazing_float_glass
- collector_optics_single_glazing_float_glass

3.4.6 Loads

Im Subsystem Loads sind verschiedene Verbraucher angegeben:

- room_radiator (Raum mit Heizkörper)
- room_floor_heating (Raum mit Fußbodenheizung)
- water_tap (Wasserhahn)

Die Blöcke zum Aufbau der Systeme room_radiator und room_floor_heating sind

- wall_floor (Wandmodell/Fußbodenmodell, gibt es für Innen- und Außenwände)
- room_node (Raumknoten für Bilanzierung der Wärme- Luftflüsse)
- ventilation_heating (Modellierung der Lüftung).

3.4.7 Materials

Folgende Materialeigenschaften lassen sich mit den in dieser Unterbibliothek abgelegten Funktionen berechnen:

- density (Dichte)
- thermal_conductivity (thermische Leitfähigkeit)
- heat_capacity (Wärmekapazität)
- kinematic_viscosity (kinematische Viskosität)
- enthalpy (Enthalpie)
- entropy (Entropie)
- specific_volume (spezifisches Volumen)
- evaporation_enthalpy (Verdampfungsenthalpie)
- vapourpressure (Dampfdruck)
- saturationtemperature (Sättigungstemperatur)
- saturationproperty (Stoffwerte bei Sättigung)
- input_water (Eigenschaften von Wasser)
- input_air (Eigenschaften von Luft)
- input_water_glycol (Eigenschaften von Glykol)
- vapourcontent (Dampfgehalt)

- saturationvalue_water (Sättigungswerte von Wasser)

Die Materialeigenschaften können für die Materialien:
- water (Wasser)
- air (Luft)
- cotton oil (Baumwollöl)
- silicone oil (Silikonöl)
- water-glycol mixture (Wasser-Glykolgemisch)

berechnet werden.

3.4.8 Misc

Folgende Funktionen sind in Misc zu finden:
- set_temperature (Vorgeben einer Temperatur im THV, fix)
- constant_THV (Vorgeben eines konstanten THV)
- create_THV (Zusammensetzen eines THV aus verschiedenen Einzelwerten)
- phase_check (Überprüfung der Phase des Fluids)
- count_working_time (Laufzeit Zähler)
- add_constant (Addition einer Konstanten)
- THV_template (Template für einen THV)
- set_T (Einschleifen einer Temperatur in den THV)
- fuel_source (Brennstoffangabe)
- economy_ecology (Berechnung von wirtschaftlichen und ökologischen Kennwerten)

3.4.9 Outputs

Ausgabewerte können über die Blöcke der Output- Bibliothek verfügbar gemacht werden
- display_THV (graphische Darstellung von Komponenten des THV)
- display_weather (graphische Darstellung von Komponenten des Wetter-Vektors)
- printer (Ausgabe der Werte direkt in das Kommandofenster von MATLAB)
- energy_meter (Energiebilanzierung)
- collector_efficiency (Berechnung des Kollektorwirkungsgrades)

Für das Hausmodell werden folgende Ausgabeblöcke bereitgestellt:
- Sensitive_room_temperature (Angabe der gefühlten Raumtemperatur)
- AIV_selector (Ausgabe der Eigenschaften der Luft im Raum: Temperatur, CO_2-Gehalt etc.)
- S_selector (Ausgabe der Energieflüsse im Raum: Einstrahlung, konvektive Verluste etc.)

3.4.10 Ports for storage construction

Die in dieser Bibliothek angegebenen Blöcke dienen dazu, Speicher aufzubauen:

- pipe_connection_to_store (Rohrverbindung zum Speicher)
- stratified_charging_pipe_connection_to_store (Rohrverbindung zum Schichtenspeicher)
- smooth_tube_heat_exchanger (Glattrohrwärmetauscher)
- stratified_charging_smooth_tube_heat_exchanger (Glattrohrwärmetauscher zum Schichtenspeicher)
- finned_tube_heat_exchanger (Rippenrohrwärmetauscher)
- stratified_charging_finned_tube_heat_exchanger (Glattrohrwärmetauscher zum Schichtenspeicher)
- heat_exchanger (Wärmetauscher)
- stratified_charging_heat_exchanger (Wärmetauscher zum Schichtenspeicher)
- electric_heating (elektrische Nachheizung)

3.4.11 Pressure drop of collector

Diese Blöcke dienen dazu, den Druckverlust im Kollektor zu bestimmen:

- pressure_drop_calculated_for_header-riser_fluid:_water (Druckverlust bei Parallelverschaltung, für Wasser)
- pressure_drop_quadratic_fitted_data_fluid:_water (Druckverlust aus quadratisch gefitteten Daten, für Wasser)
- pressure_drop_quadratic_measured_data_fluid:_water (Druckverlust aus gemessenen Daten, für Wasser)
- pressure_drop_quadratic_fitted_data (quadratisch gefittete Daten)

3.4.12 Pumps

Verschiedene Pumpen:

- pump_const (Pumpe mit konstantem Massenstrom)
- pump (selbstdefinierte Pumpe über Kennlinie)
- pump_WILO (Pumpen des Herstellers WILO)
- thermosyphon (Thermosiphonprinzip)

Dieselben Pumpen sind auch für den Real-Time Workshop erhältlich.

3.4.13 Storage

Verschiedene Speicher:

- storage (einfacher Speicher)
- storage_multiport (Multiport-Speicher)
- storage_tank_in_tank (Speicher mit eingebautem zweiten Tank)
- heat_exchanger_storage (Speicher mit einem eingebautem Wärmetauscher)

Außerdem sind zwei Erdsondenspeicher abgebildet:

- ground_storage_U-tube (Erdsondenspeicher U-Form)
- ground_storage (Erdsondenspeicher)

Diese Blöcke sind abhängig vom Erdreich, die zugehörigen Modelle sind in der Bibliothek “surface_models_for_ground_storage" enthalten.

3.4.14 Surface models for ground storage

Modelle für das Erdreich:

- open_surface_model (Modell mit offener Oberfläche)
- isolated_cover_model (Isolierte Oberfläche)

3.4.15 Weather

Blöcke für die Generierung und Verarbeitung von Wetterdaten:

- weather_simple_model (einfaches Wettermodell)
- weather_from_Workspace (Einlesen externer Wetterdaten)
- weather2THV (Umwandlung der Wetterdaten in den THV)
- sun_position (Sonnenstand)
- fixed_surface (Einstellungen einer festen Kollektorausrichtung)
- tracked_surface (Nachführung)
- inclined_surface (Umrechnung auf geneigte Fläche)

Die Auflistung zeigt, dass das Programmpaket CARNOT die in diesem Projekt entwickelten Bausteine bei weitem übersteigt und viele andere Aspekte (z. B. Hausmodell, Lüftung) mit beinhaltet.

3.5 Beispiele

Um einen ersten Überblick über die Leistungsfähigkeit der entwickelten Toolbox zu geben, werden zwei Beispiele vorgestellt:

- solare Warmwasseranlage
- hydraulische Verzweigung

3.5.1 Beispiel 1: solare Warmwasseranlage (Thermosiphon-Prinzip)

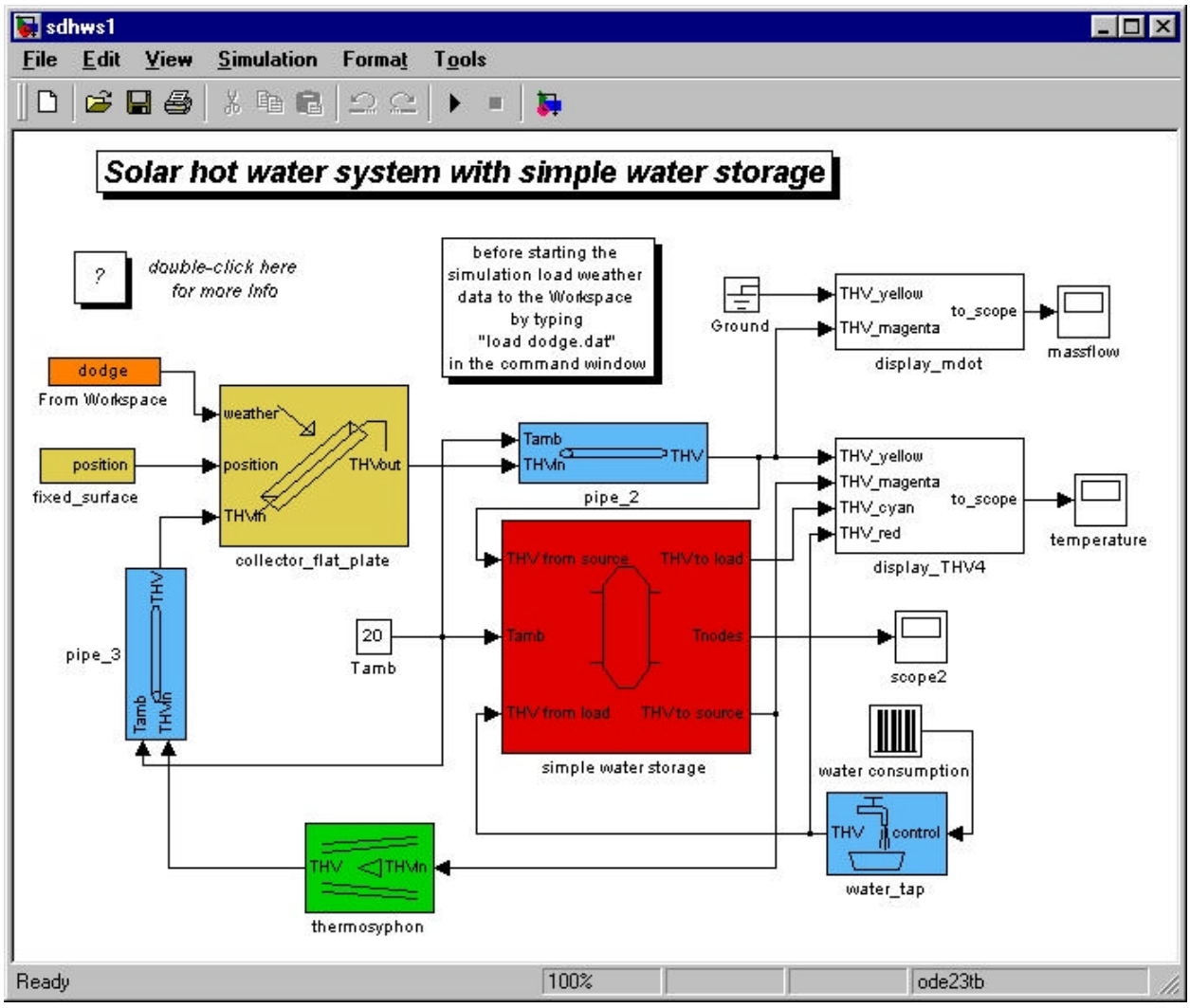


Bild 20: Verschaltung der solaren Warmwasseranlage nach dem Thermosiphon-Prinzip

In Bild 20 ist die Verschaltung einer solaren Warmwasseranlge dargestellt. Man erkennt auf der linken Seite die Eingabe der Wetterdaten (From_workspace), die direkt mit dem Kollektor (collector_flat_plate) verbunden sind. Die Verbindungen vom Kollektor zum Speicher sowie vom Speicher zum Kollektor sind durch Rohre (pipe_2) und pipe_3) realisiert. Die Umwälzung erfolgt in diesem System nach dem Thermosiphon-Prinzip (Block thermosyphon). Die Nutzer wird dargestellt durch den

Block water_tap, der den Massenstrom des verbrauchten Wassers angibt. Alle anderen Blöcke dienen der Darstellung der Ergebnisse.
Die dünnen Linien, die die Komponenten im System verbinden, dienen der Weitergabe der Informationen, typischerweise des thermohydraulischen Vektors (THV). In den einzelnen Komponenten wird der THV in seine Einzelelemente aufgespalten und die Berechnungen, die zu einer Veränderung des THV abhängig von der Komponente führen, werden dort durchgeführt.

3.5.2 Beispiel 2: Hydraulische Verzweigung

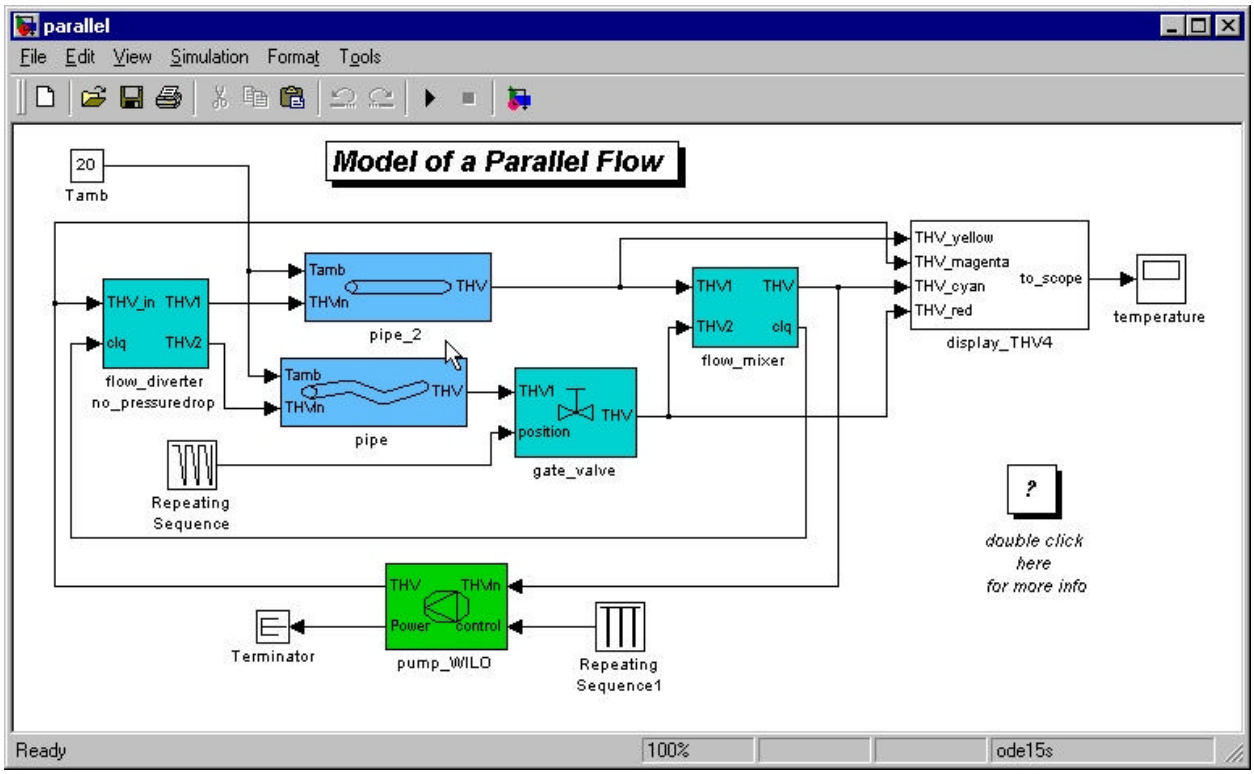


Bild 21: Verschaltung einer hydraulischen Verzweigung

In Bild 21 ist ein hydraulischer Kreislauf mit zwei parallelen Zweigen dargestellt. Ein Zweig besteht in einem einfachen Rohr, der andere Zweig beinhaltet einen Schieber. Diese Verschaltung stellt eine typische Bypass-Schaltung dar. Während der eine Zweig eine hydraulische Last repräsentiert, ist der andere ein einfacher Bypass. Bei einer Verzweigung in einem Kreislauf muss es immer einen Teiler und einen Mischer geben. Falls die Aufteilung am Teiler nicht fest vorgegeben ist, stellt sie sich automatisch in Abhängigkeit des Druckverlusts in den jeweiligen Zweigen ein.
Die im Kreislauf angebrachte Pumpe sorgt dafür, dass die Druckverluste in den einzelnen Komponeten (Rohr, Schieber etc.) kompensiert werden und das Fluid beschleunigt wird.
Die Druckverluste werden in den einzelnen Komponenten jeweils berechnet, so auch selbst im Teiler und Mischer. Das Einstellen der Aufteilung der Massenströme in den beiden Zweigen wurde im Detail in Kapitel 3.2.7.3 dargestellt. Der Schieber könnte auch durch eine Steuerung betätigt werden. Abhängig von der Position des Schiebers erhöht oder verringert sich der Druckverlust in diesem Zweig.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurden Bausteine für ein Programmpaket zur Simulation thermischer Anlagen entwickelt und erprobt. Schwerpunkt der Tätigkeiten war die Entwicklung von Bausteinen, die für die Simulation von solar-thermischen Anlagen notwendig sind wie Kollektoren, Warmwasserspeicher, Rohrverbindungen, konventionelle Heizungen, Pumpen sowie Bausteine für die Be- und Verarbeitung von Wetterdaten.
Die Ergebnisse flossen in die mittlerweile auf dem Markt erhältliche Toolbox CARNOT ein, die noch viele weitere Elemente und Optionen beinhaltet.

Das Konzept, das in diesem Projekt (und demnach auch für CARNOT) umgesetzt wurde, besteht in der Nutzung einer professionellen Programmieroberfläche (MATLAB/SIMULINK), die mathematische Hilfsmittel, wie z. B. Löser von Differenzialgleichungssystemen bereitstellt, so dass sich der Entwickler ganz auf die Abbildung der Komponenten konzentrieren kann. Der Anwender kann durch einfaches Drag & Drop sich die Komponenten für das von ihm zu simulierenden System zusammenstellen und miteinander verbinden. Sowohl für kleine Ingenieurbüros, die Anlagen berechnen wollen, die keine Standardanlagen mehr sind, wie auch für Universitäten und Entwicklungsabteilungen großer Industrieunternehmen ist der Einsatz der entwickelten Toolbox sinnvoll.

Mit den in diesem Projekt entwickelten Bausteinen können einfache Heizungsanlagen berechnet werden. Im Gegensatz zu anderen Simulationstools sind folgende Vorteile dieser Entwicklung hervorzuheben:

- Die Berechnung von thermodynamischen und hydraulischem Verhalten wird kombiniert vorgenommen.
- Es kann in variablen Zeitschritten gerechnet werden, so dass auch das Regelverhalten im Kurzzeitbereich (Sekunden) realitätsnah abgebildet werden kann.
- Nutzungsmöglichkeiten aller unter MATLAB/SIMULINK zu Verfügung gestellten Toolboxen (z. B. für Regelung, Optimierung, Statistik)
- Anschlussmöglichkeiten an eine I/O-Karte zur Regelung von Echtzeitanwendungen: hardware in the loop test, online-Parameteridentifikation, online predictive Control.
- Einfache Erweiterungsmöglichkeiten durch nutzerdefinierte Blöcke.

Ausblick:
Die rasche und erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens und die Kopplung mit anderen Projekten führte zur Erstellung der Toolbox CARNOT, die von Scientific Computers, Aachen mittlerweile vertrieben wird. Seit Markteinführung im Dezember 1999 wurden (ohne größere Werbemaßnahmen) 5 Industrie 7 Unilizenzen von

CARNOT verkauft. Eine Werbeaktion von Scientific Computers ist für Anfang 2000 geplant, so dass für die folgenden Monate mit einem erhöhten Absatz gerechnet wird.
Ziel für die Weiterentwicklung von CARNOT ist die Programmierung von Bautsteinen, die eine Simulation des gesamten Komplexes Haus erlauben. Insbesondere die Simulation von Niedrigenergiehäusern mit ihrem langsamen thermischen Verhalten, sowie die Abbildung von Altbauten steht dabei im Vordergrund. Aktive Komponenten zur Klimatisierung und Lüftung sollen in weiteren Schritten zur Verfügung gestellt werden.

5 Publikationen

- Solar-Institut Jülich: **CARNOT Conventional and Renewable Energy Optimization Toolbox for use with MATLAB-SIMULINK**, Handbuch zur Toolbox.
- Bernd Hafner, Robert Höller, Carsten Wemhöner, Klemens Schwarzer: **Dynamische Simulation thermischer Speicher mit MATLAB**, 11. Internationales Sonnenforum der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS), Köln, 26.6.-30.6., 1998
- Solar-Institut Jülich: **CARNOT Conventional and Renewable Energy Optimization Toolbox for use with MATLAB-SIMULINK**, Informationsfaltblatt
- Bernd Hafner, Carsten Wemhöner, Peter Roosen, Klemens Schwarzer: **Berechnung von Solaranlagen mit CARNOT unter MATLAB-SIMULINK**, Zehntes Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 10.5.-12.5., 2000
- Bernd Hafner, Carsten Wemhöner, Peter Roosen[*)], Klemens Schwarzer: **Das Programm CARNOT zur Simulation solarthermischer Anlagen unter MATLAB/SIMULINK,** eingereicht bei 12. Internationales Sonnenforum der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) e.V, Freiburg, 5.7.-9.7., 2000

Alle Publikationen sind dem Abschlussbericht als Anlage beigefügt.

6 Literatur

[1] VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991

[2] Per Isakson, Matched Flow Solar Collector Model for TRNSYS, Users and Programmers Manual, November 1991

[3] Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, New York, 1980.

[4] Duffie, J., Beckman, W.: Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc. 1991