

## GEKOPPELTE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION MIT MODELICA

Dirk Müller, Azadeh Hosseini Badakhshani  
 RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center  
 Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik  
 Email: dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

### KURZFASSUNG

Zunehmende Anforderungen an die Energieeffizienz von Versorgungssystemen können zu komplexen gebäudetechnischen Anlagen führen, die nicht mehr mit einfachen Berechnungswerkzeugen bewertet werden können. Die steigenden Anforderungen an den Komfort erfordern zudem eine detaillierte Abbildung der empfundenen Temperatur, die bei leistungsbeschränkten Anlagen nur durch eine instationäre Berechnung aller Umschließungsflächen ermittelt werden kann.

Die Auslegung und die Optimierung dieser Systeme sind daher nur noch mit Hilfe von computergestützten Verfahren möglich. Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik wird hierfür seit vielen Jahren die Programmiersprache Modelica verwendet. Es wurden umfangreiche Bibliotheken sowohl für die Gebäude- als auch für die Anlagensimulation erstellt, aus deren Elementen die Gebäudestruktur und die Anlagentechnik zusammengesetzt werden können. Die strikte Objektorientierung ermöglicht es, Modelle zu verknüpfen, wieder zu verwenden und auszutauschen. Es ergibt sich eine Strukturierung und Übersichtlichkeit des Berechnungsmodells, sowie die Möglichkeit, Modellbausteine bei Bedarf zu erweitern oder zu vereinfachen.

Die Bibliothek für die thermische Gebäudesimulation enthält Elemente für alle Umschließungsflächen, Nutzerprofile und Wetterdaten. Das Wettermodell kann mit Daten der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes sowie mit eigenen Messwerten arbeiten. Die zweite Bibliothek für die Anlagentechnik beinhaltet die üblichen Komponenten eines hydraulischen Systems sowie lüftungstechnische Anlagenteile. Die Zustandsänderungen von Medien werden anhand von empirischen Zusammenhängen oder tabellenbasiert berechnet. Dabei werden die Medienmodelle der Modelica\_Fluid-Bibliothek verwendet; es können allerdings auch externe Medienbibliotheken integriert werden.

Abbildung 1 zeigt die Kombination der einzelnen Komponenten für eine gekoppelte thermisch-hydraulische Simulation. Das eingebaute Raummodell besitzt einen Luftknoten mit homogener Tem-

peraturverteilung. Wandmodelle mit eindimensionaler Diskretisierung sowie Fenster- und Türmodelle bilden die Umschließungsflächen des Raumes. Der Raum wird über einen Brennwertkessel mit einem Verteilsystem beheizt. Die implementierte Regelung übernimmt die Steuerung des Kessels, der Zirkulationspumpe und des Dreiwegeventils. Der Heizkreis wird anhand einer Heizkurve geregelt, die die Heizungsvorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur vorgibt.

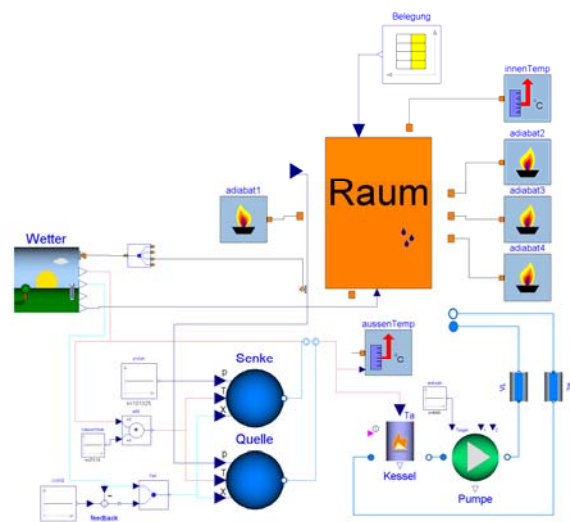


Abbildung 1: Modell für gekoppelte thermisch-hydraulische Simulation

### ABSTRACT

Energy efficiency of buildings gains importance considering its great portion to the overall energy consumption and its huge potential for energy savings. As every existing and new building is a unique set-up, adaptable simulation tools are required to calculate and predict its energy demand.

The Modelica libraries developed at the Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate allow a detailed modelling of the whole thermo-hydraulic system. They are subdivided into a part considering the thermal building simulation taking structural effects, user behaviour and weather data into account. The components library allows the implementation of complex systems consisting of e.g. storage systems, heat pumps and geothermal probes.

## EINLEITUNG

Die Simulationssprache Modelica ist eine frei verfügbare, objektorientierte Sprache, die durch die „Modelica association“<sup>1</sup> betreut und weiterentwickelt wird. Modelica eignet sich besonders zur Modellierung multiphysikalischer Systeme. Die Multi-Domäne Simulation hat bei der Gebäudesimulation eine große Bedeutung, da sowohl das thermische Verhalten des Gebäudes als auch das hydraulische Verhalten der Anlagentechnik abgebildet werden kann.

Der offene Charakter des Sprachstandards und der Standardbibliotheken gewährleistet eine gut nutzbare Entwicklungsumgebung für die Erstellung eigener Modelle. Der objektorientierte Ansatz ermöglicht die Erstellung komplexer Modelle, die auf Basis bereits aggregierter Teilmodelle erzeugt werden können.

Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik der RWTH Aachen wurde in den letzten Jahren, begleitend zu laufenden Forschungsprojekten, am Aufbau einer neuen Gebäude- und Anlagensimulation in der Programmiersprache Modelica gearbeitet. Für die Erstellung der eigenen Bibliotheken werden zwei von der Modelica Association entwickelte Komponenten-Bibliotheken verwendet: die Modelica Standard Bibliothek und Modelica-Fluid.

Die Modelica Standard Bibliothek enthält diverse Pakete mit den grundlegenden Komponenten einer physikalischen Systemmodellierung. Diese Bibliothek kann zur Simulation von verschiedenen digitalen und analogen elektrischen Bauteilen, mechanischen Komponenten mit Reibung und nützlichen thermischen Komponenten für die eindimensionale Wärmeleitung benutzt werden. Wichtige physikalisch-mathematische Konstanten wie  $\pi$  oder die Gravitationskonstante  $g$  sind in dieser Bibliothek definiert. Verschiedene Ein-/Ausgangsböcke sind im Paket „Blocks“ enthalten. Typ-Definitionen der physikalischen Größen basieren auf SI-Einheiten. Konversionen zwischen Einheiten sind in dieser Bibliothek ebenfalls möglich. Das Paket „Media“ enthält die Medienmodelle für ein- und mehrphasige Fluide mit mehreren Substanzen (Elmqvist et al, 2003).

Die Bibliothek „Modelica-Fluid“ ist insbesondere für die Hydrauliksimulation bedeutsam. Die Komponenten für die eindimensionale Beschreibung der Hydraulik und Rohrströmungen können dieser Bibliothek entnommen werden (Casella et al, 2006). Die Implementierung der Medienmodelle für die Modellierung des thermo-hydraulischen Verhaltens von Fluiden ist die wichtigste Anwendung von Modelica-Fluid in den neuen Bibliotheken. Die grundlegenden Komponenten der

Bibliotheken wurden bereits seit 2003 am Hermann-Rietchel-Institut der TU Berlin entwickelt (Hoh et al, 2005).

Die Struktur der neuen Bibliotheken ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Hauptbibliothek „BaseLib“, wird ergänzt durch eine Bibliothek zur Simulation der Anlagentechnik, die „HVAC“ Bibliothek und eine „Building“ Bibliothek mit den verschiedenen Gebäudekomponenten.



Abbildung 2: Struktur der Bibliotheken

## BASELIB BIBLIOTHEK

Die BaseLib (Basic Library) Bibliothek bildet die Basis aller neuen Bibliotheken. So enthält BaseLib Komponenten, die in den anderen Bibliotheken mehrfach verwendet werden. Ohne diese Bibliothek sind die aufbauenden Bibliotheken (HVAC und Building) nicht funktionsfähig. Die Struktur dieser Bibliothek ist in Abbildung 2 dargestellt.

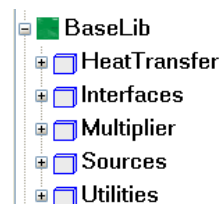


Abbildung 3: Struktur der BaseLib-Bibliothek

Zu den wichtigen Komponenten dieser Bibliothek gehören die verschiedenen thermischen „Interfaces“ für die Phänomene Leitung, Konvektion und Strahlung. Die Erstellung komplexerer Modelle basiert immer auf der Nutzung dieser Verbindungselemente.

Die Modelle zur Abbildung der unterschiedlichen Wärmetransportprozesse sind im Paket „HeatTransfer“ hinterlegt. Zusätzlich sind in dieser Bibliothek verschiedene Komponenten zur Simulation diverser Wärmequellen („Sources“) hinterlegt. Durch diese Elemente können unterschiedliche Verläufe für thermische Lasten oder Wärmestromdichten definiert und in die Berechnungsmodelle eingefügt werden.

<sup>1</sup> www.modelica.org

Hinter der Bezeichnung „Multiplier“ liegen Modelle zur Multiplikation der Wärme- oder Massenflüsse. Das Paket „Utilities“ beinhaltet Modelle und Funktionen, die für die Regelung oder Erstellung der anderen Komponenten benutzt werden können.

## BUILDING BIBLIOTHEK

Die Modelle zur Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes befinden sich in der Building-Bibliothek. Diese Bibliothek hat zwei Hauptverzeichnisse: Komponenten und Beispiele, siehe Abbildung 4. Basiselemente wie Wände, Türen und Fenster befinden sich in einem Komponentenverzeichnis. Die Wandmodelle simulieren mit einer vorwählbaren Diskretisierung den Wärmetransport durch die Wand. Es ist möglich, Wände mit mehreren Schichten aufzubauen und dadurch die bauphysikalischen Eigenschaften der Wände detailliert abzubilden. Die Fenster- und Türenmodelle sind in der Lage, die Luftwechsel und mögliche Infiltration durch diese Elemente zu berücksichtigen. Modelle des Luftvolumens, die sich ebenfalls in dieser Bibliothek befinden, können sowohl trockene als auch feuchte Luft berücksichtigen.

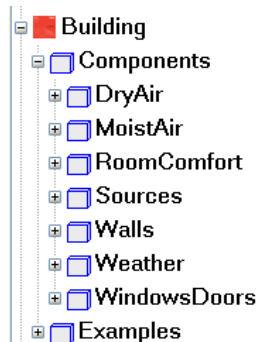


Abbildung 4: Aufbau der Building-Bibliothek

Eine Besonderheit dieser Bibliothek ist, dass externe Wetterdaten direkt in die Modelle eingefügt werden können. Die entsprechenden Wettermodelle lesen diese externen Wetterdaten und konvertieren alle Angaben in ein Format, das innerhalb der Bibliotheken verwendet werden kann. Die Position der Sonne, die Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck, die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung können in den Wetterdatensätzen berücksichtigt werden. Durch die Einbindung von Messdaten, können Feldexperimente direkt nachgerechnet werden.

Im Verzeichnis „Examples“ gibt es Beispiele von Modellräumen und Modellräumen mit Wettermodellen. Mit Hilfe dieser Beispiele können die Anwender einfach auf komplexe Modelle zugreifen und diese für die eigenen Aufgabenstellungen erweitern.

## Übersicht der Wandmodelle

In der Building-Bibliothek gibt es bereits verschiedene Wandmodelle, die für unterschiedliche Aufgaben verwendet werden können. Als ein Beispiel ist in Abbildung 5 der graphische Aufbau des Modells *ConvNLayerClearanceStar* gezeigt. Die Parameter dieses Modells sind: Länge und Höhe der Wand, Anzahl der Schichten, die Dichte, die thermische Leitfähigkeit, die Wärmekapazität jeder Schicht, die Anfangstemperatur und der Emissionskoeffizient für den Strahlungstransport. Die Ausrichtung (horizontal/vertikal, innen/außen) dieser Wand kann ebenfalls als ein Parameter festgelegt werden. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten wird an die Ausrichtung der Wand angepasst. Im Fall einer Außenwand wird der Windgeschwindigkeitseinfluss nach Norm DIN EN ISO 6946:2008 berücksichtigt. Die Windgeschwindigkeit kann durch einen „RealInput“ Port eingegeben werden. Für Innenwände erfolgt eine Berechnung nach Glück (Glück 1990).

In diesem Wandmodell gibt es die Option, eine bestimmte Fläche als Lücke (clearance) zu definieren. In diese Lücke kann später im Gesamtmodell des Raums ein Fenstermodell oder Türmodell implementiert werden.

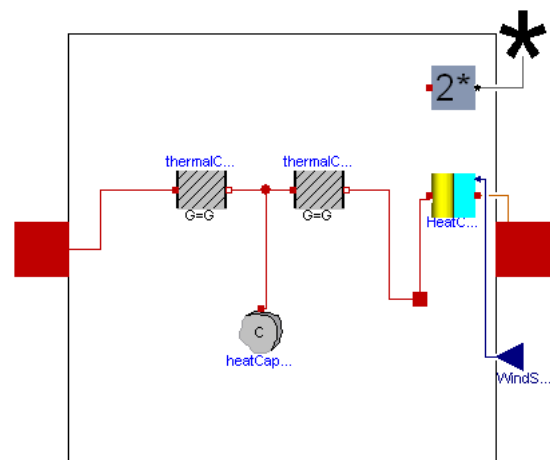


Abbildung 5: Graphischer Aufbau des Wandmodells: *ConvNLayerClear*

## HVAC BIBLIOTHEK

In der „Heating, Ventilation and Air Conditioning“ Bibliothek („HVAC“) sind alle Modelle für die Abbildung von anlagentechnischen Komponenten hinterlegt.

Im Hauptverzeichnis „Komponenten“, siehe Abbildung 6, wird eine breite Auswahl an Anlagenkomponenten für den Aufbau einer Simulation gegeben. In den Rohrmodellen werden das thermische und das hydraulische Verhalten der Fluide abgebildet. Die physikalischen Eigenschaften der Rohre und die Dämmung der Leitungssysteme können als Parameter angegeben werden.

Komplexere Modelle, wie zum Beispiel die Pumpenmodelle, können mit Regelstrategien (konstanter Volumenstrom, konstanter Differenzdruck etc.) versehen werden. Die Heizflächenmodelle im Paket „HeatExchanger“ können die konvektive Wärmeabgabe und den Strahlungstransport an den Raumwände simulieren. Unter „Sources“ sind Wärmequellen- und Wärmesenkenmodelle enthalten. Diese Modelle können eine Kältemaschine oder einen Kessel darstellen. Auch komplexere Wärmepumpenmodelle sind unter „Sources“ abgelegt.

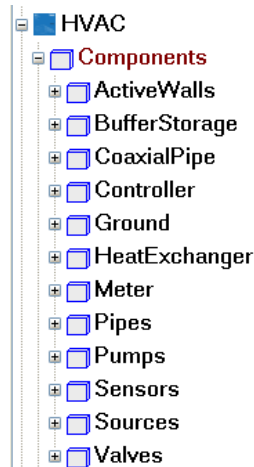


Abbildung 6: Komponenten der HVAC-Bibliothek

Zwei weitere Komponenten in der HVAC-Bibliothek sind die Ventile und Sensoren. Je nach Regelstrategie können die Ventile den Massenstrom oder Temperaturen regulieren. Es stellt sich ein auf der Ventilkennlinie basierender Druckverlust ein. Mit den Temperatursensoren kann die Temperatur in Kelvin oder Celsius an jedem Ort eines Leitungssystems bestimmt werden

Im Paket „Ground“ gibt es Modelle zur Berechnung einer Erdreichanbindung. Diese Modelle können zum Beispiel an „CoaxialPipe“ Modelle angeschlossen werden, um eine Erdsonde abzubilden.

Auch in dieser Bibliothek wurde für jede Komponente ein Beispiel hinterlegt. Die Beispiele zeigen, wie Interfaces miteinander verbunden sind und welche externen Informationen in die Modelle mit eingebunden werden können.

### Beispiel einer freien Heizfläche

Abbildung 7 zeigt ein Modell einer freien Heizfläche, in dem die Wärme des Fluids durch Konvektion und Strahlung an den Raum abgegeben wird. Das Verhältnis der konvektiven Wärmeabgabe zum Strahlungstransport wird über den definierten Typ der freien Heizfläche festgelegt (DIN EN 442-2). Entsprechend der DIN hängt die Wärmeleistung einer freien Heizfläche von der Temperaturdifferenz zwischen der Heizfläche und dem Raum ab:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{nom}} = \left( \frac{\Delta T_{log}}{\Delta T_{log,nom}} \right)^n \quad (1)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{T_V - T_R}{\ln \left( \frac{T_V - T_{Raum}}{T_R - T_{Raum}} \right)} \quad (2)$$

Hier sind  $\dot{Q}$  die Wärmeleistung und  $\dot{Q}_{nom}$  die Nennleistung der freien Heizfläche.  $T_V$  und  $T_R$  sind die Vor- und Rücklauftemperatur.  $T_{Raum}$  bezeichnet die Raumtemperatur.

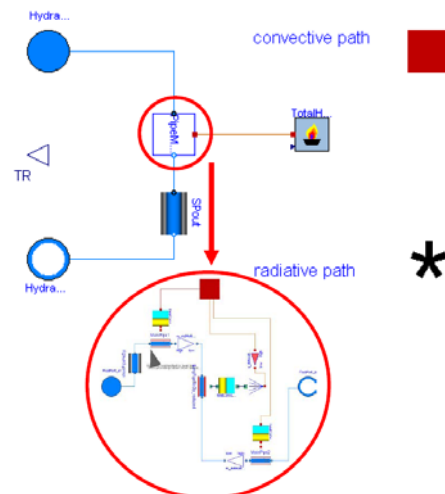


Abbildung 7: Graphische Darstellung des Modells einer freien Heizfläche

Das Modell verwendet für die Berechnung des Wärmeübergangs die logarithmische Übertemperatur  $\Delta T_{log}$ , um die Simulation zu vereinfachen. Alternativ kann ein feiner diskretisiertes Modell der freien Heizfläche verwendet werden.

## DATABASE-BIBLIOTHEK

DataBase ist die Datenbank für die Parametrierung aller Modelle. Insbesondere die Herstellerdaten der Anlagenkomponenten wie Kessel, Ventile, Pumpen, Rohre und freier Heizflächen sowie thermische und bauphysikalische Eigenschaften diverser Wandaufbauten und Fenstertypen befinden sich in dieser Bibliothek.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die neuen Bibliotheken ermöglichen eine geschlossene Simulation der thermischen Eigenschaften eines Gebäudes sowie eine hydraulische Zustände des Versorgungssystems. Abbildung 8 zeigt eine graphische Darstellung eines Gesamtmodells auf Basis der vorgestellten Anlagen- und Gebäudebibliotheken.

Räume, Nutzer, Wetter und Anlagentechnik können einschließlich der Regelungstechnik dynamisch berechnet werden, so dass das thermo-hydraulische Verhalten des Gebäudes bewertet werden kann.

Die Bibliotheken werden kontinuierlich weiterentwickelt, um neue Komponenten ergänzt und an geeigneten Beispielen validiert. Die Bibliotheken werden über ein zunächst geschütztes Internetportal bereitgestellt an Kooperationspartner weitergeben. Die externen Nutzer können über dieses Internetportal die Modelle herunterladen und für eigene Projekte. Neue Modelle sollten nach der Fertigstellung über das Internetportal anderen Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

Ein Kommunikationsportal gibt den Anwendern die Möglichkeit, aktiv in die Verbesserung der Modelle eingebunden zu werden.

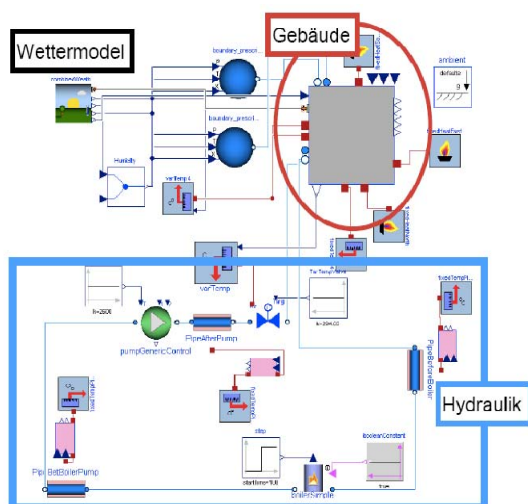


Abbildung 8: Gesamtmodell einer thermo-hydraulischen Simulation

## DANKSAGUNG

Dieses Projekt wurde durch den Projektträger PTJ im Forschungszentrum Jülich unter dem Förderkennzeichen 0327466A betreut und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert, wofür wir uns herzlich bedanken.

## LITERATUR

- Casella, F., Otter, M., Proelss, k., Richter., und Ch., Tummescheit, H., 2006. The Modelica Fluid and Modelica library for modeling of incompressible and compressible thermo-fluid pipe networks, 5<sup>rd</sup> International Modelica Conference, Wien, Österreich . (Modelica Fluid)
- Elmquist, H., Tummescheit, H., und Otter, M., 2003. Object-Oriented Modeling of Thermo-Fluid Systems, 3<sup>rd</sup> International Modelica Conference, Linköping, Schweden. (Modelica Fluid)
- Glück, B., 1990. Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2.Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH
- DIN EN ISO 6946. 2008. Bauteile-Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Deutsche Normen Anhang A