

GEBÄUDESIMULATION MIT ADAPTIVEN MODELLIERUNGSANSÄTZEN

C. Nytsch-Geusen^{1,2}, T. Nouidui³

¹ Institut für Architektur und Städtebau, Universität der Künste Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

² Fraunhofer-Institut für Computerarchitektur und Softwaretechnik,
D-12489 Berlin, Germany

³ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, D-83626 Valley, Germany

KURZFASSUNG

Der Beitrag stellt ein Modelica-basiertes Gebäudemodell vor, welches verschiedene Detaillierungsebenen in seiner physikalischen Beschreibung beinhaltet. Der Umfang der berücksichtigten physikalischen Effekte - z.B. eine rein thermische oder hygrothermische Modellierung, aber auch der Grad der örtlichen Auflösung können hierbei variieren. Das Gebäudemodell besitzt zudem die Fähigkeit während des Simulationsexperiments in Abhängigkeit von seinem aktuellen Systemzustand zwischen diesen Detaillierungs-ebenen zu wechseln. Beispielsweise kann zur Berechnung des jährlichen Gebäudewärmebedarfs im Simulationsexperiment während der Heizperiode ein bauphysikalisch detailliertes Modell und in der übrigen Zeit des Jahres ein schnelles, stark vereinfachtes Modell benutzt werden. Zur Realisierung dieses adaptiven Modellierungsansatzes wurde eine Spracherweiterung der objektorientierten Modellierungssprache Modelica zusammen mit dem Simulationswerkzeug MOSILAB genutzt.

ABSTRACT

This article presents a Modelica-based thermal building model, which includes several levels of detail in the physical description. The scale of the considered physical effects - e.g. a reduced thermal or an advanced hygrothermal modelling approach, but also the degree of the local resolution are adaptable. Furthermore, this building model has the capability to switch from one model level to another, depending on the current model state during the simulation experiment. For example, if the annual energy demand of a building should be calculated in a long term simulation experiment over a year, a detailed building model can be used during the periods of heating demand, and a highly simplified and fast building model can be used in the rest of the year. For the realisation of this adaptive modelling approach a language extension of the object-oriented modelling language Modelica in combination with the simulation tool MOSILAB were used.

EINFÜHRUNG

Der Beitrag erläutert die Verwendung eines adaptiven Gebäudemodells innerhalb eines Systemmodells für ein solares Heizsystem. Dieses besteht aus einem unveränderlichen Teilmodell für den solaren Heizkreislauf und einem adaptiven Teilmodell für das Gebäude. Das Gebäude wird im vereinfachten Fall mit weniger als 50 Gleichungen und beim detaillierten physikalischen Modell mit einigen hundert Gleichungen beschrieben. Das Ziel dieser Modellierung besteht in der Beschleunigung der numerischen Berechnung, wobei die adaptiven Modelle eine ähnliche Genauigkeit wie die Detailmodelle erreichen sollen.

GEBÄUDEMODELLE UNTERSCHIEDLICHEN DETAILLIERUNGSGRADES

Zwei Gebäudemodelle mit einem extrem unterschiedlichen Detaillierungsgrad in der physikalischen Beschreibung wurden in Modelica entwickelt. Beide Gebäudemodelle repräsentieren ein einfaches abstraktes Gebäude mit einer thermischen Zone und einem Fenster, welches in die Südfassade integriert ist.

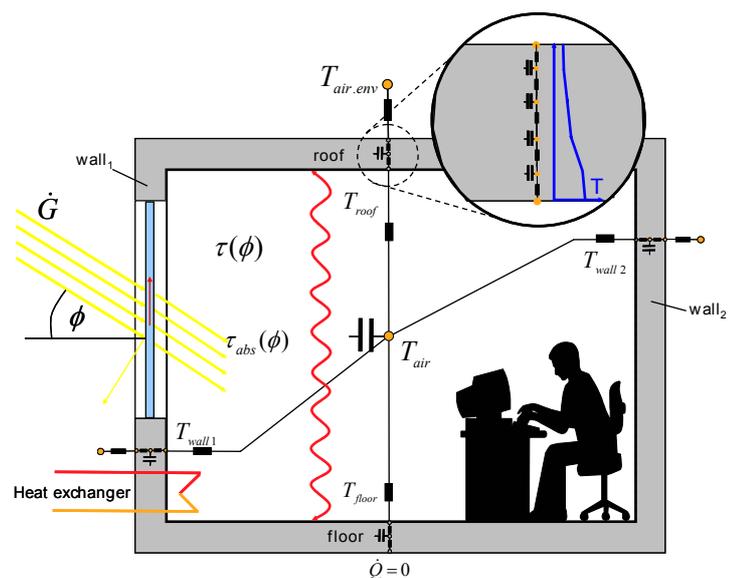


Abbildung 1 Modellerte physikalische Effekte beim detaillierten Gebäudemodell

Das detaillierte Modell wurde mit Hilfe der Modellklassen der objektorientierten Modelica-Bibliothek *BuildingPhysicsLibrary* (Nytsch-Geusen et al., 2005a) erstellt. Es beinhaltet eine ausführliche Beschreibung der bauphysikalischen Effekte in der Gebäudehülle wie die solare Strahlungsabsorption und –transmission in den Fensterverglasungen, den instationären Wärmetransport im Baukörper, den konvektiven Wärmeübergang und den langwelligen Strahlungsaustausch innerhalb der thermischen Zone (vgl. Abbildung 1). Das detaillierte Gebäudemodell wird mit 489 Differential- und algebraische Gleichungen beschrieben.

Das vereinfachte Modell basiert dagegen auf wenigen konzentrierten Parametern. Einige physikalische Effekte wurden vernachlässigt (z.B. der langwellige Strahlungsaustausch innerhalb der Zone) oder vereinfacht modelliert (z.B. solare Transmission der Fensterverglasung). Alle außen liegenden Gebäudeelemente (Wände, Dach, Fenster) wurden zu einer "Ersatzkomponente" vereinigt, welchen den gleichen mittleren U-Wert und mittlere Wärmekapazität aufweist wie die Summe aller Einzelkomponenten. Der gleiche Modellierungsansatz wurde für die Abbildung der internen Gebäudemassen genutzt. Im Vergleich zum detaillierten Modell wird das vereinfachte Gebäudemodell lediglich mit 49 Gleichungen beschrieben.

ADAPTIVES GEBÄUDEMODELL

Das Simulationswerkzeug MOSILAB (Nytsch-Geusen et al., 2005b) kann das Modellverhalten in Abhängigkeit vom Modellzustand während des Simulationsexperiments verändern. Für diesen Zweck unterstützt MOSILAB eine abwärtskompatible Erweiterung der Modelica-Sprachbeschreibung in Form von Statecharts und dynamischen Objekten (Nytsch-Geusen et al., 2006).

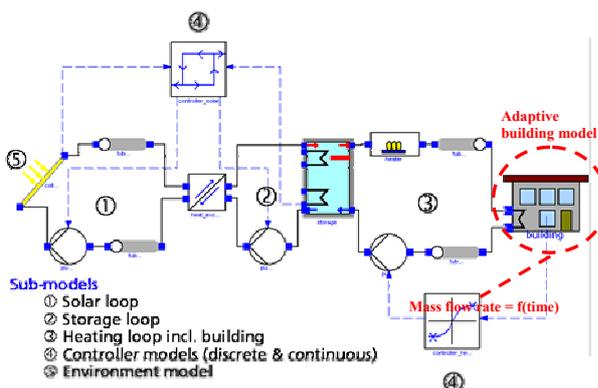


Abbildung 3 Integration des adaptiven Gebäudemodells in das solare Heizsystem

Diese Eigenschaft des Simulationswerkzeugs wurde genutzt, in dem beide Gebäudemodelle gemeinsam als adaptives Teilmodell in ein Systemmodell – ein

solares Heizungssystem - integriert wurden (vgl. Abbildung 3). Aus der Sicht der Gebäudemodelle bildet der Rest des Systemmodells eine "intelligente Randbedingung", welche zustandsabhängige Bedingungen liefert, um das detaillierte oder vereinfachte Modell zu nutzen. Die Anzahl der Zustandsvariablen des detaillierten Gebäudemodells (489) stellt einen wesentlichen Anteil der Modellgleichungen am gesamten Systemmodell dar (672). Im Fall des einfachen Gebäudemodells ist die Größe des numerischen Systems auf 232 Variablen reduziert, wodurch eine Beschleunigung des Simulationsexperiments ermöglicht wird.

In diesem Beispiel soll im Simulationsexperiment die zwischen Heizkreislauf und Gebäude übertragene Heizleistung ermittelt werden. Ein kontinuierlicher Regler regelt hierfür den Massenstrom der Heizungspumpe für eine Raumsolllufttemperatur von 20 °C. Falls nicht genug Wärme im Solarspeicher vorhanden ist, liefert das Nachheizsystem im Heizkreislauf die Zusatzenergie für eine Soll-Vorlauftemperatur von 45 °C.

Das Statechart-Diagramm (Abbildung 4) erläutert den Wechsel zwischen zwei Modellzuständen - *standby* (niedriger Massenstrom u. niedrige Heizleistung, kombiniert mit einem vereinfachten Gebäudemodell) und *heating* (hoher Massenstrom u. substantielle Heizleistung, kombiniert mit einem detaillierten Gebäudemodell). Wenn der Massenstrom den Grenzwert von 0,003 kg/s überschreitet, tritt das Event *finer* auf und das vereinfachte Gebäudemodell wird durch das detaillierte ersetzt. Wenn der Massenstrom unter den Grenzwert fällt, schaltet das Systemmodell auf Grund des Events *coarser* vom Zustand *heating* zu *standby*, und das detaillierte wird gegen das vereinfachte Modell ausgetauscht.

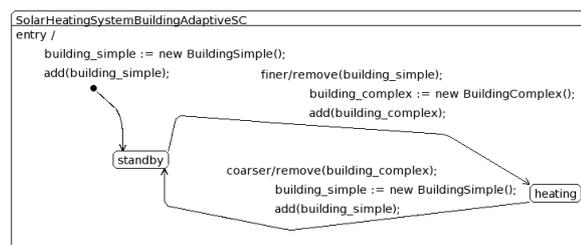


Abbildung 4 Statechart-Diagramm für den Wechsel zwischen einfachen und komplexen Gebäudemodell

Für den diskreten Wechsel zwischen vereinfachten und detaillierten Modell wird ein Algorithmus definiert, der die Startwerte zu Beginn einer neuen kontinuierlichen Phase, ausgehend vom aktuellen Systemzustand berechnet. Dabei soll stets der Energieerhaltungssatz für alle Gebäudekomponenten und für die Raumluft gelten. Für die Starttemperaturen $T_{start,i}$ des detaillierten Wandmodells mit i thermischen Knoten, werden die alten Temperaturwerte eines vereinfachten

Wandmodells mit einem Knoten genutzt, wobei die folgende Gleichung erfüllt sein muss:

$$\sum_i m_i \cdot c_i \cdot T_{start,i} \equiv m \cdot c \cdot \bar{T} \quad (1)$$

Auch beim Übergang vom detaillierten zum vereinfachten Modell muss die Energieerhaltung durch den Initialisierungs-Algorithmus erfüllt werden:

$$m \cdot c \cdot \bar{T}_{start} \equiv \sum_i m_i \cdot c_i \cdot T_{i,old} \quad (2)$$

SIMULATIONSERGEBNISSE

Mit Hilfe von drei unterschiedlichen Simulationsexperimenten wurde der adaptive Gebäudemodellansatz über eine Periode von zwei Sommertagen analysiert (155. u. 156. Tag im Jahr):

1. Die ausschließliche Nutzung des detaillierten Modells benötigt 100 Prozent Simulationszeit.
2. Die ausschließliche Nutzung des vereinfachten Modells benötigt 4,5 Prozent der Simulationszeit.
3. Das Nutzen des adaptiven Gebäudemodells benötigt 57 Prozent der Simulationszeit.

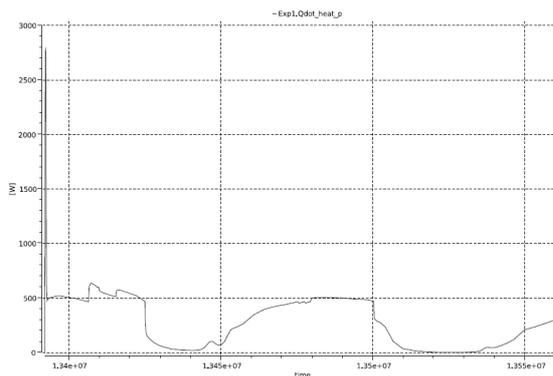


Abbildung 5 Berechnete Heizleistung

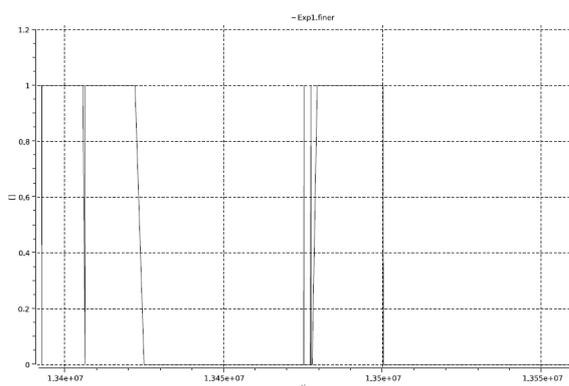


Abbildung 6 Event-Variable finer

Abbildung 5 zeigt für die dritte Simulationsvariante die vom Gebäudemodell berechnete Heizleistung $Qdot_{heat_p}$. Sie wird wechselnd vom detaillierten Modell (wenn $finer$ gleich 1) oder vom vereinfachten Modell (wenn $finer$ gleich 0) berechnet (vgl. Abbildung 5 und 6). Beim Unterschreiten des Massenstroms von 0,003 kg/s wird auf das

vereinfachte schnelle Gebäudemodell des Zustands *standby* umgeschaltet. Die vorliegende Heizleistung ist dann so klein, dass sich größere Fehler des größeren Modells nur noch sehr gering auf die absolut berechnete Heizleistung auswirkt.

ZUSAMMENFASSUNG

Der adaptive Modellierungsansatz auf Basis einer Spracherweiterung von Modelica ermöglicht flexible Gebäudemodelle mit unterschiedlichen Genauigkeitsebenen. Für Kurzzeitanalysen und komplexe Fragestellungen sind Modelle mit örtlich verteilten Parametern und einer genauen physikalischen Beschreibung gut geeignet. Für Langzeitsimulationen oder die Simulation komplexer Modelle wie Gebäudegruppen, bieten sich stark vereinfachte Modelle an. Der adaptive Modellierungsansatz erlaubt die Kombination solcher unterschiedlicher Modelle in einem gemeinsamen adaptiven Modell. An einem nichttrivialen Beispiel konnte gezeigt werden, dass hierdurch eine deutliche Beschleunigung von Simulationsexperimenten möglich ist.

Zukünftige Arbeiten werden die Genauigkeit und Fehleranalyse von Gebäudemodellen mit unterschiedlicher detaillierter physikalischer Modellierung im Kontext der adaptiven Modellierung betrachten.

NOMENKLATUR

- m : Masse der Wand; m_i : Mass von Wandknoten i
 c : mittlere spezifische Wärmekapazität der Wand
 c_i : spezifische Wärmekapazität von Wandknoten i
 \bar{T} : Ersatztemperatur der Wand
 T_i : Temperatur von Wandknoten i

LITERATUR

- Nytsch-Geusen C. et. al., 2006. "Advanced modeling and simulation techniques in MOSILAB: A system development case study". *Proceedings of the 5th International Modelica Conference, Arsenal Research, Wien.*
- Nytsch-Geusen C. et. al., 2005a. "MOSILAB: Development of a Modelica based generic simulation tool supporting model structural dynamics," *Proceedings of the 4th International Modelica Conference, TU Hamburg-Harburg.*
- Nytsch-Geusen C., Nouidui T., Holm A., Haupt W., 2005b. "A hygrothermal building model based on the object-oriented modelling language Modelica," *Proceedings of the Building Simulation 2005, International Building Performance Simulation Association, Montreal.*