SCHNITTSTELLEN FÜR DIE CO-SIMULATIONSKOPPLUNG ZWISCHEN GEBÄUDE- UND HEIZUNGSANLAGENSIMULATION

Anne Paepcke[1], Torsten Schwan[2], Andreas Nicolai[1],
[1]Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden
[2]EA Systems Dresden GmbH

KURZFASSUNG

Im Feld der Energiesimulation von Gebäuden ist ein Trend in Richtung immer detailgetreuerer Abbildung von Gebäude und Anlagentechnik zu bemerken. Die Co-Simulation auf Basis des FMI-Standards gilt hierbei als vielversprechende Kopplungstechnologie. Dennoch wird die gewünschte Anwendbarkeit nur bei Entwurf geeigneter Schnittstellen zwischen den Gebäude- und Anlagensimulationsentwicklern gelingen. Am Beispiel der Kopplung zwischen passivem Gebäude und Heizungsanlage werden verschiedene Kopplungsvarianten hinsichtlich ihres Bedarfes an Informationsaustausch zwischen den Entwicklern, Komplexität der Modellbildung und Simulationsgeschwindigkeit diskutiert. Exemplarisch finden dabei das Gebäudesimulationsprogramm NANDRAD sowie eine Anlagensimulation in Modelica Verwendung. Herausforderungen an die Schnittstellendefinition werden im Vergleich zwischen der gekoppelten und der integrierten Programmversion aufgezeigt.

ABSTRACT

In the field of building simulation a trend towards more detailed modelling of the building and the plant components can be observed. The Co-simulation based on the FMI standard is considered a promising coupling technology. Indeed, it requires the development of suitable interfaces between building and plant simulation before it is ready for application. Focusing the coupling between a passive building and a possible heating system different coupling scenarios are discussed due to their demands on data and information exchange between developers, the complexity of modelling and simulation performance. For analysis the building simulation platform NANDRAD and a plant simulation in Modelica are coupled. Further, major challenges towards a suitable interface design are illustrated by comparison of the coupled and the integrated program version in an exemplary way.

KEYWORDS: Co-Simulation, Numerical Methods, Building Energy Simulation, FMI 2.0, NANDRAD

EINLEITUNG

Energieeffiziente Gebäude sowie die Erschließung dezentraler Energiekonzepte stellen entscheidende Anliegen der aktuellen Forschung im Bereich der Gebäudesimulation dar. Insbesondere die Bereitstellung des nutzungs- und zeitabhängigen Energiebedarfes im Gebäude macht die Auslegung von Anlagenkomponenten und dazugehörige Speicherkonzepte durch dynamische Simulation notwendig (Grunewald, 2015). Folglich ist die isolierte Betrachtung des Gebäudes als Energieverbraucher nicht länger zielführend, sondern die integrierte Gebäudeenergiesimulation (Integrated Building Performance Simulation) wird als zukunftsträchtig gesehen (Trčka, 2010).

Diese Anforderungen stellen die Modellentwicklung vor strategische Herausforderungen. Die große Breite an Gebäudesimulationswerkzeugen auf dem Markt (Crawley et. al, 2008) lässt eine Nachmodellierung des Gebäudes innerhalb einer Anlagensimulation als unsinnig erscheinen. Die Erweiterung vorhandener Gebäudemodelle hingegen um eine Anlagentechnik genügenden Umfangs und Flexibilität ist angesichts der Vielzahl von bereits existierenden Planungswerkzeugen der Gebäudeenergietechnik (Knabe, 1999) ebenso unsachgemäß. Hingegen bietet sich Simulationskopplung an, um die fachliche Expertise beider Wissensbereiche zusammenzuführen.

Ein Weg, der von mehreren Modellierern verfolgt wird, ist die Einbettung der Anlagen- und Gebäudebeschreibung in eine generische Simulationsumgebung wie (MATLAB Simulink, 2016) und (SimulationX 2016), (Dymola, 2016).

Die Abbildung und Simulation komplexer Gebäude oder umfangreicher Regelkreise sind allerdings hochspezialisierte Aufgaben, welchen eine solche generische Entwicklungs- und Lösungsumgebung nur unter Vereinfachungsannahmen begegnen kann. Bei kommerziellen Werkzeugen steht zudem die Geheimhaltung einer Portierung von Anlagen- und Reglerparametrisierungsvorschriften in eine generische Simulationsumgebung entgegen. Aus diesem Grund gewinnt der Ansatz der Simulationskopplung von Anlagen- und Gebäudesimulation zur Laufzeit an Bedeutung (Trčka, 2010).

Die FMI 2.0-Technologie bietet einen allgemeinen Standard für das informationstechnische Design von Schnittstellen (FMI 2.0 Standard, 2014) für eine Laufzeitkopplung durch ModelExchange und Co-Simulation. Bei beiden Typen wird die Auswertung der gekoppelten Modellgleichungen sowie die Ermittlung einer passenden gekoppelten Lösung durch einen Simulationsmaster verwaltet. Speziell bei der Co-Simulationstechnik beschränkt sich der Master auf die Berechnung passender Kopplungsgrößen und überträgt die Auswertung der Modellgleichungen bei gegebenem Input der entsprechenden Simulationsanwendung. Diese Technologie ist vor allem bei Programmen, die eigene optimierte numerische Zeitintegrationsverfahren liefern, von Interesse. Dieser Fakt darf allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Master-Algorithmen für die Co-Simulationskopplung komplexe Aufgaben zu bewältigen haben, wie die Verwaltung der Auswertungsreihenfolge, die Zeitentwicklung der Koppelgrößen, die Auflösung nichtlinearer Zyklen und die Bestimmung eines Kommunikationszeitschrittregimes. Neben bereits etablierten Master-Programmen wie (Dymola, 2016) wird im Annex 60 Projekt (Wetter, 2013) die Entwicklung von verbesserten Master-Algorithmen verfolgt (Trčka, 2010, Galtier, 2015). Zu nennen sind zudem die Simulationsmaster der ITI GmbH (SimulationX, 2016) und des Fraunhofer-Instituts EAS (Bastian, 2011), welche ebenso Co-Simulation auf Basis der FMU 2.0-Technologie unterstützen.

In den folgenden Ausführungen werden exemplarisch die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD und die Modelica-Anlagenbibliothek Green Building in SimulationX mittels FMU 2.0-Technologie miteinander gekoppelt. Das am IBK entwickelte Programm NANDRAD (Nicolai, 2012, Paepcke, 2014) verfolgt gezielt die Entwicklung effizienter Datenstrukturen und numerischer Lösungsalgorithmen für die meist rechenintensive dynamische Gebäudesimulation. Die Modelica-Bibliothek (Green Building) ist spezialisiert auf die Modellierung von modernen Anlagensystemen für Energiebereitstellung, -speicherung und -verbrauch im Gebäude unter Nutzung der modernen Lösungsumgebung von (SimulationX). Durch Co-Simulationskopplung können die Vorzüge beider Programme und der zugehörigen Rechenkerne gezielt ausgenutzt werden. Als Co-Simulationsmaster werden sowohl SimulationX als auch der von EAS entwickelte Master verwendet.

ASPEKTE DER SIMULATIONSKOPPLUNG

Die NANDRAD-Gebäudesimulation und die Green Building-Bibliothek sollen im Folgenden als austauschbare Komponenten für die integrierte Gebäudeenergiesimulation behandelt werden. Die informationstechnische Standardisierung der Schnittstellen nach FMI 2.0 stellt hierbei die Basis für eine mögliche Universallösung dar. Um der Vision gerecht zu werden, müssen zusätzlich konkrete physikalische Austauschgrößen zwischen Anlage und Gebäudesimulation spezifiziert werden. Typische Programme bedienen jedoch in der Regel keine getrennten Modellmengen, sondern eine Vielzahl an Überlappungen, die mehrere mögliche Kopplungsgrößen erlauben würden. Deshalb ist die physikalische Schnittstellenstandardisierung ein Diskussionspunkt im Annex 60 Projekt, in welches die hier vorliegende Arbeit eingebettet ist.

Nicht zu unterschätzen ist der Einfluss des Schnittstellendesigns auf die Komplexität und die numerischen Eigenschaften der gekoppelten Modelleinheit. So beeinflusst zum Beispiel die Zahl der zu koppelnden Größen die Modellkomplexität, stark gekoppelte Austauschgrößen können ein numerisch nachteiliges Verhalten begünstigen. Soll zusätzlich die Austauschbarkeit des Simulationsmasters gewährleistet sein, so müssen die Anforderungen an die Kopplungsalgorithmen jedoch möglichst gering gehalten werden.

Konkret müssen folgende wesentliche Anforderungen beim Schnittstellendesign berücksichtigt werden:

Physikalische Zerlegung

Es ist naheliegend, dass die Schnittstellen für Gebäudesimulation und Gebäudetechnik an den fachlichen Kompetenzgrenzen verlaufen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass eine hochqualitative modellbasierte Abbildung den Zugang zu notwendigen Daten wie zum Beispiel Klimadatenbanken oder Anlagenkennlinien voraussetzt. Daher ist es sinnvoll zu fordern, dass die Menge fehlender Information für die einzelnen Modellkomponenten minimal ist. Umgekehrt können mehrdeutige Berechnungsvorschriften in unterschiedlichen Modellen vorkommen, so zum Beispiel bei einem durch Netzwerke ausgetauschtem Medium, dessen Materialeigenschaften rechnerisch zu bestimmen sind. Dies kann zu Unstimmigkeiten und Fehlern führen. Neben der Vermeidung solcher Schnittstellen kann eine möglichst hohe Fehlertoleranz Abhilfe schaffen, also die Garantie einer nur geringfügigen Verletzung der gekoppelten Bilanzen bei unstimmigen Modellgrößen. Nicht zuletzt ist zu überprüfen, inwiefern die gewählten Kopplungsgrößen für einen Fehlertest durch den Simulationsmaster geeignet sind.

Numerische Eigenschaften

Anlagen- und Gebäudesimulation treten bei Simulationskopplung stets in Wechselwirkung. Dies ist vor allem der Anlagenregelung und Dimensionierung geschuldet, welche auf die Rückantwort des Gebäudes reagiert. Es ist naheliegend, derartige Kopplungsgrößen quantitativ zu reduzieren, um den Aufwand des Co-Simulationsmasters für ein mögliches Ausiterieren gering zu halten. Die numerischen Anforderungen an den Simulationsmaster steigen zusätzlich, wenn die physikalische Zerlegung an stark gekoppelten Schnittstellengrößen erfolgt. So kann die

Extrapolation von Eingangsgrößen zu Stabilitätsproblemen führen. Einfache iterative Verfahren wie die Fixpunktiteration im Fall der Interpolation hingegen sind für nur schwach sensible (kontrahierende) Gleichungsabhängigkeiten geeignet.

Modellparametrisierung und Dimensionierung

Nicht zuletzt stellt die Bedienbarkeit der gekoppelten Simulation ein Kriterium dar, welches über die Praxistauglichkeit der Co-Simulationstechnologie entscheidet. Hierzu zählen die Parametrisierung der Modellkomponenten sowie ihre Verknüpfung miteinander. Während das Gebäude direkt über BIM-Datenmodelle parametrisiert werden kann, ist für Anlagenkomponenten eine Dimensionierung unter Kenntnis der Gebäudereaktion notwendig. Diesem Aspekt ist durch den Schnittstellenentwurf oder durch entsprechende Parametrisierungsautomatismen Rechnung zu tragen. Des Weiteren stellt die spätere Verknüpfung einzelner Modelleingaben und Ausgaben durch den Nutzer einen Arbeitsschritt dar, der manuell nur bei einer überschaubaren Anzahl an Kopplungen beherrschbar ist. Hochkomplexe Gebäudemodelle verlangen jedoch mehrere Kopplungsgrößen für jeden Raum oder jeden Rohrleitungsstrang einer hydraulischen Anlage. So wird eine Vielzahl gleichartiger Eingänge oder Ausgänge für jede konkrete physikalische Größe, zum Beispiel die Raumtemperatur, erzeugt. Um die Handhabbarkeit solcher FMUs zu gewährleisten, müssen Verknüpfungsautomatismen geschaffen werden. Folgen alle FMU Eingänge und Ausgänge einem vordefinierten Benennungsschema, so ist eine Verknüpfung von FMU-Eingängen und passenden Ausgängen durch Skripte denkbar. Die Unterstützung vektorieller Datenstrukturen innerhalb der FMU oder die Anbindung an Adaptoren mit vektorwertigen Ausgängen, zum Beispiel ein Modelica-Modell, bieten alternative Ansätze.

MODELLSCHNITTSTELLEN

Zunächst lässt die gemeinsame Simulation von Gebäude und Heizungssystem lediglich anlagenspezifische Kopplungen vermuten. Weitere Austauschgrößen können dennoch sinnvoll sein, sobald zeitabhängige Datensätze gemeinschaftlich genutzt werden aber nicht redundant vorhanden sein sollen. In diesem Fall muss einer Modellkomponente die Berechnungshoheit gewährt werden, welche die Ergebnisse dann öffentlich in Form von FMU-Kopplungsgrößen zur Verfügung stellt. Die Diskussion um die Synchronisierung zeitabhängiger Daten ist somit ein weiterer Aspekt der Schnittstellendefinition. Im konkreten Fall betrifft diese Problematik das von beiden Modellkomponenten genutzte Realzeitregime, daran gebundene Raumnutzungseigenschaften und das Außenklima.

Zeitsynchronisation und Raumnutzungsgrößen

Sowohl Gebäudeenergiesimulation und Anlagenmodelle benötigen unterschiedliche Zeitregimes. So ist die aktuelle Uhrzeit im Gebäude für alle Zeitreihen relevant, welche die Personenbelegungen, die Belüftung und sinnvolle Raumluft-Solltemperaturen beschreiben. Diese Größen werden mittels Wochenzeitplänen beschrieben, variieren also nicht nur für unterschiedliche Zeitpunkte innerhalb eines Jahres, sondern auch für einzelne Simulationsjahre selbst. Der Simulationsmaster hingegen verwaltet eine vom Zeitpunkt 0 beginnende und stetig fortlaufende Simulationszeit, die als Differenz zum Simulationsstartzeitpunkt gedeutet und folglich auf die aktuelle Uhrzeit im Gebäude abgebildet werden muss. Zusätzlich ist für die Klimadatenberechnung die wahre Ortszeit von Bedeutung, welche sich am Sonnenstand orientiert und von der Uhrzeit im Gebäude abweichen kann. Zwangsläufig müssen alle beteiligten FMUs den gleichen Regeln für die Zeitabbildung, zur Bestimmung der Wochentage und der aktuellen Ortszeit genügen. Die damit verbundene Gefahr asynchroner Daten motiviert zunächst die Bereitstellung der Lokalzeit durch eine eigenständige FMU-Komponente, welche alle notwendigen Umrechnungen liefert und somit die modellinterne Zeitberechnung in Anlagen- und Gebäudesimulation substituiert.

Fragwürdig ist diese Option allerdings in Anbetracht des enormen Zuwachses an Schnittstellengrößen, die einen zusätzlichen Verwaltungsaufwand vom Simulationsmaster erfordern. Zudem sind die Raumnutzungs- und Außenklimaberechnungen, welche die dann synchronisierte Ortszeit als Eingangsparameter benötigen, ebenfalls redundant vorhanden und müssen ohnehin synchronisiert werden. Daher ist es schlüssig, nicht die vergleichsweise umfangreichen Zeitwerte selbst, sondern nur die daraus berechneten Raumnutzungsgrößen des Gebäudes sowie Klimadaten durch FMU-Export bereitzustellen.

Klimadatensynchronisation

Im Gegensatz zur Zeitsynchronisation erweist sich die Klimadatensynchronisation aufgrund unterschiedlicher Datensätze und Berechnungsvorschriften als dringend erforderlich. Das bedeutet, Klimadaten werden innerhalb einer Modellkomponente berechnet und zu jedem Simulationszeitpunkt als FMU-Ausgabegrößen bereitgestellt. Da es sich hierbei um eine rein zeitabhängige Größe handelt, deren Auswertung gerichtet erfolgen kann, ist der Zuwachs an numerischem Aufwand durch diese zusätzlichen Koppelgrößen von Seite des Simulationsmasters in einem Kommunikationsintervall überschaubar.

Allerdings erzeugen sprunghafte Klimaverläufe zwischen den Messdaten für den Master numerisch aufwändige Zeitevents, die durch eine lineare Interpolationsvorschrift hingegen vermieden werden können. Zudem begrenzt der FMU-Export die Kommunikationsschrittweite des Masters auf maximal die Hälfte eines Messdatenintervalls, um eine genügend hohe zeitliche Auflösung der Klimaverläufe garantieren zu können. Die Wahl des Werkzeu-

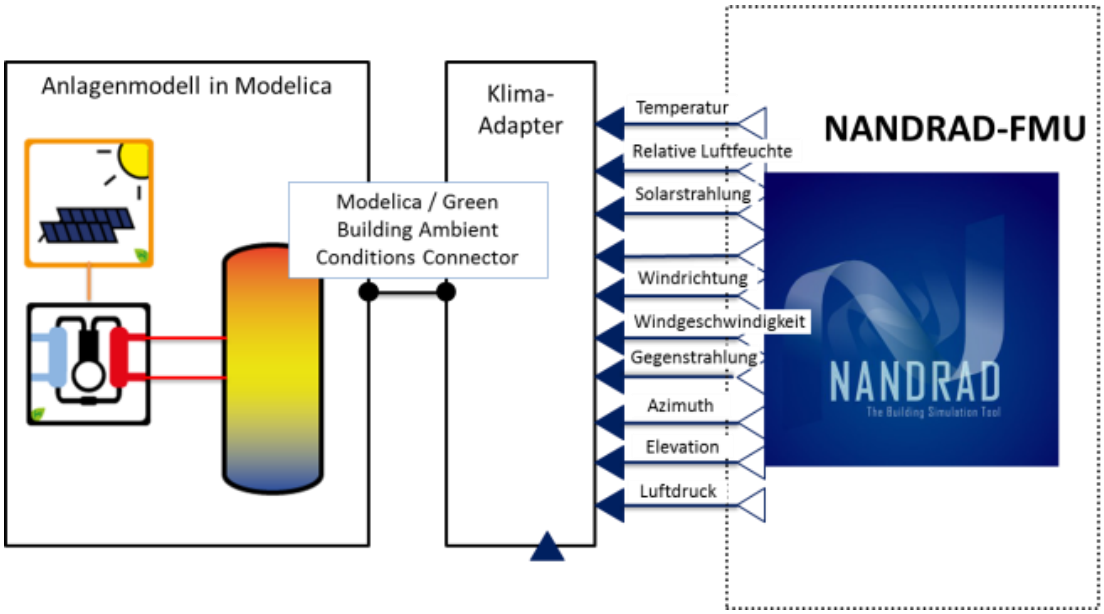

Abbildung 1: Synchronisation von Klimadaten durch Export aus der Gebäude-FMU und Transformation auf das Zielformat im Anlagenmodell durch einen Klimaadapter.

ges für die Klimaberechnung fällt hierbei auf die Gebäudesimulation, welche im Fall der meisten Programme eine eigene Klimadatenbank mit nutzerfreundlicher Verwaltungsfunktionalität enthält.

Die Klimabibliothek von NANDRAD bietet zudem eine Konvertierung aus anderen typischen Formaten wie zum Beispiel **.epw*, dem Klimadatenformat von EnergyPlus, an. Dabei liefert die in (Abbildung 1) blau gekennzeichnete Gebäude-FMU die skalaren Größen Klimagrößen *Temperatur,…* über die mit Pfeil gekennzeichneten Verknüpfungen an einen zwischengeschaltenen Klimaadapter. Dieser nimmt die für die Synchronisation erforderlichen Umrechnungen vor, zum Beispiel zwischen euklidischen und spherischen Sonneneinfallskoordinaten, bündelt die Daten und liefert sie über eine passende Verknüpfung, dem *Ambient Conditions Connector*, an das Anlagenmodell.

Im Sinne einer Verallgemeinerbarkeit der Schnittstelle wird sich bei den FMU-Austauschgrößen auf SI-Einheiten festgelegt.

Stabilität der Masterintegration bei hydraulischen Kreisläufen

Die inhaltliche Zerlegung zwischen Heizkreislauf und Gebäudeenergiebilanz hat aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkungen der Modellaustauschgrößen weitreichende Auswirkungen auf die numerischen Lösungseigenschaften. Reagiert zudem die Ausgangsgröße einer FMU sehr sensibel auf Änderungen der Eingangsgröße, so liegen starke Kopplungen vor.

Beispielsweise liefert die Gebäudesimulation die Raumlufttemperatur, woraus die Anlagen-FMU eine Heizleistung berechnet. Bei einer verzögerungsfreien Regelung ist diese Heizleistung direkt von der Raumtemperatur abhängig. In (Abbildung 2) sind exemplarisch die Ergebnisse eines Einzonenmodells mit geregelter Heizung aufgetragen. Bei einer fixen Kommunikationsschrittweite von einer Stunde sind starke Oszillationen der zu berechnenden Raumtemperatur zu sehen. Bei dieser Simulation wurde vom Master eine konstante Extrapolation der Eingangsgrößen verwendet. Das bedeutet, die Eingangsgrößen wurden von einer FMU während des gesamten Kommunikationsintervalls als konstant angesehen. Jedes Kommunikationsintervall wurde hierbei nur einmal durchlaufen.

Die beobachteten Stabilitätsprobleme sind bei der Anwendung des expliziten Euler-Verfahrens für die Zeitintegration bekannt (Gear, 1971). Temperatur und Heizleistung sind in dem hier betrachteten Fall dynamische Größen, und beide FMUs können als gewöhnliche Differentialgleichungen nach den Kopplungsgrößen verstanden werden. Eine konstante Extrapolation bei nur einmaligem Durchlauf eines Kommunikationsintervalls ist mit der Verfahrensvorschrift des expliziten Euler-Verfahrens identisch. Aus dieser Analogie lässt sich ableiten, dass numerische Stabilität nur bei begrenzter Zeitschrittweite erreicht werden kann. Dies gilt insbesondere für steife Probleme, also wenn wie in dem hier vorgestellten Beispiel die Kopplungsterme sehr stark sind, auch wenn sie asymmetrisch wirken. So stellt die Gebäude-FMU eine positive Korrelation zwischen Heizleistung und Zonentemperatur her, die Anlagen-FMU jedoch wird für niedrige oder hohe Raumtemperaturen eine genau entgegengesetzt geregelte Heizleistung bereitstellen. Aufgrund dieser Gegensätzlichkeit ist es dem Verfahren überhaupt möglich, eine passende Lösung zwischen den Extremen der maximal verfügbaren und keiner

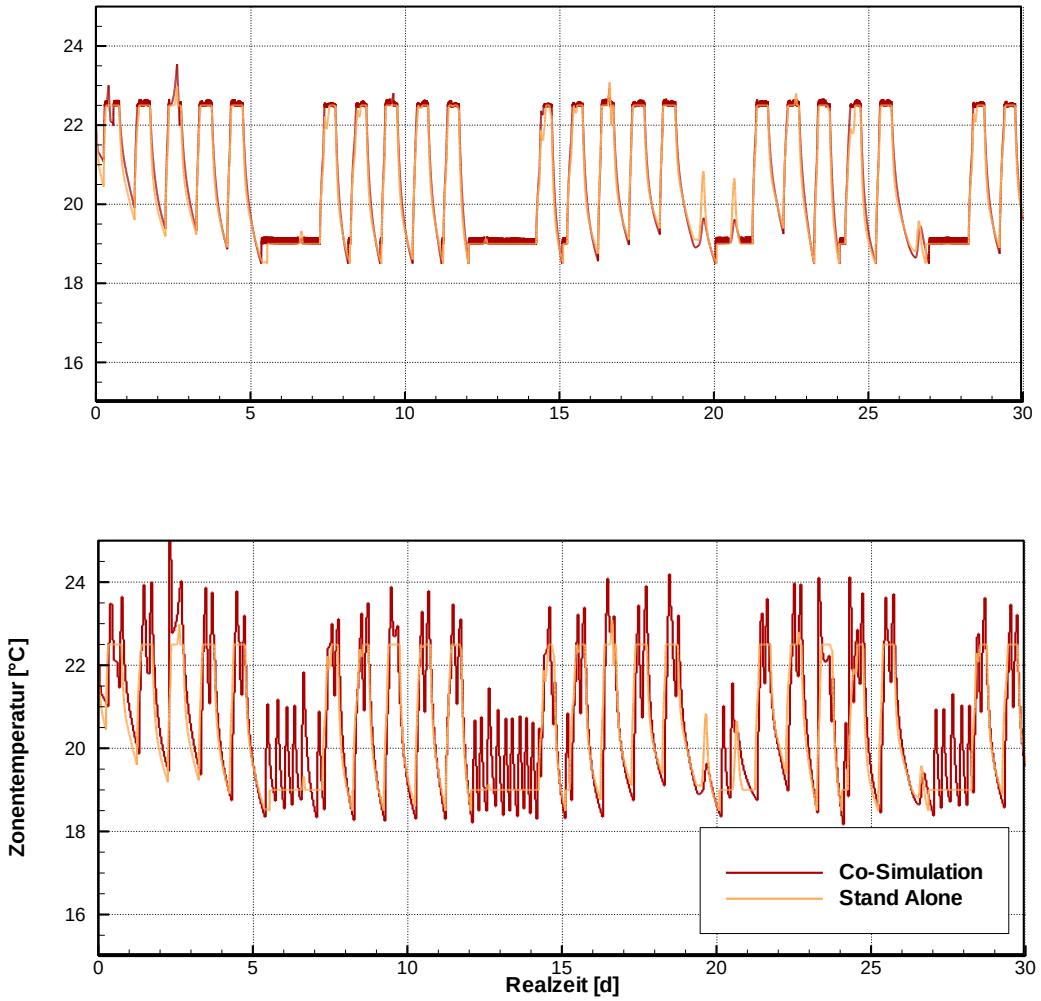

Abbildung 2: Simulation von Anlage und Gebäude durch die Green Building-Bibliothek (orange Kurve) und Co-Simulationskopplung mit NANDRAD nach Kopplungsszenario 1 (dunkelrote Kurve) bei konstanter Kommunikationsschrittweite von 1 min (oben) und 1 h (unten).

Heizleistung zu bestimmen. Voraussetzung ist jedoch, dass die Zeitschritte klein genug gewählt sind.

Bei größeren Zeitschritten verhindert die Beschränkung der Heizleistung auf Maximal- und Minimalwerte eine über die sichtbaren Oszillationen hinausgehende Fehlerfortpflanzung, wie in der (Abbildung 2) unten zu sehen ist. Die Gefahr besteht in diesem Beispiel darin, dass die numerischen Artefakte als physikalisch korrekte Ergebnisse gedeutet werden. Angesichts derartiger Fehlerquellen ist die konstante Extrapolation in Kombination mit vom Nutzer vorgegebenen festen Kommunikationsschrittweiten als äußerst kritisch zu sehen.

Dieser Problematik kann von Seiten des Simulationsmasters durch Fehlerschätzung, wie sie beispielsweise bei (Arnold, 2013) vorgestellt wird, und durch die Bestimmung einer adaptiven Zeitschrittweite begegnet werden. Der FMU-Standard erlaubt daneben den Mehrfachdurchlauf eines Kommunikationsintervalls, wodurch eine Qualitätsverbesserung der Lösung erwartet wird. Bei konstanter Eingangsgrößenextrapolation ist dieses Verfahren mit einer Fixpunkt- oder auch Gauß-Seidel-Iteration vergleichbar, die für stark gekoppelte Modellgrößen jedoch ebenfalls instabil werden können (Meister, 2008).

Idealerweise werden die Eingangsgrößen unter Einbeziehung des folgenden Kommunikationszeitpunktes interpoliert. Damit entstehen allerdings implizite Zusammenhänge zu noch unbekannten Größen. Geeignete Iterationsverfahren wie das Newton-Verfahren sind wesentlich rechenintensiver als die oben erwähnte Fixpunkt- oder Gauß-Seidel-Iteration und verlangen eine sehr große Anzahl an Modellauswertungen. Hier beeinflussen die Anzahl der Kopplungsgrößen, deren interne Verknüpfung und die Nichtlinearität der Modellgleichungen entscheidend den Berechnungsaufwand.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Schnittstellendiskussion nicht unabhängig von der Wahl des Simulationsmasters und der verfügbaren Masteralgorithmen zu führen ist.

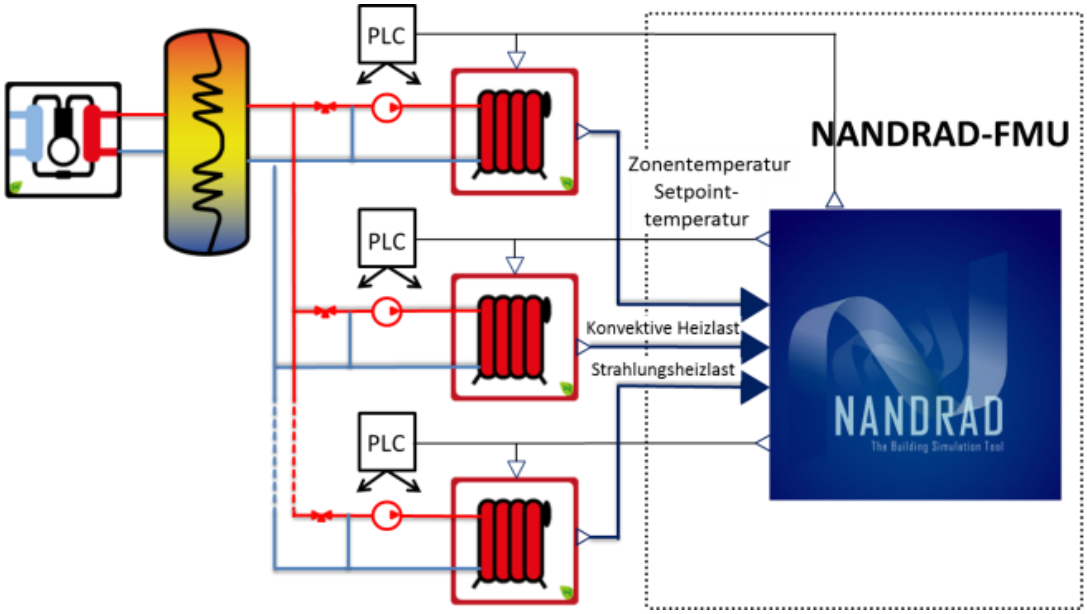

Abbildung 3: Schnittstellen für den Heizkreislauf, Szenario 1.

Schnittstellen für den Heizkreislauf

Für die gekoppelte Simulation von Heizkreisläufen bieten sich unterschiedliche Schnittstellenvarianten an:

1. Trennung zwischen idealer Heizregelung und Gebäudeenergiebilanz

Vom physikalischen Standpunkt naheliegend ist eine Trennung zwischen passivem Gebäude und Anlagentechnik. Dies führt zu einem nativen Schnittstellenentwurf: das Gebäude liefert Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur (sowie Raumsolltemperatur) als FMU-Ausgabegrößen. Mit diesen Daten ermittelt die Anlagensimulation per Regelung passende konvektive Wärmeströme und Strahlungswärmeströme, die ihrerseits als FMU-Ausgaben angeboten werden. (Abbildung 3) zeigt das Szenario im Fall der blau gekennzeichneten NANDRAD-Gebäude-FMU: die nach außen gerichteten Dreiecke symbolisieren die FMU-Exportschnittstellen, welche für jede beheizte Zone eine Temperatur und Setpointgröße an den Heizungsregler (PLC) und den rot gekennzeichneten Heizkörper über eine skalare Verknüpfung liefern. Der Heizkörper selbst ist gebunden an einen rot gekennzeichneten Zulauf und einen blauen Rücklaufstrang und berechnet die konvektiv und über langwellige Strahlung an den Raum abgegebene Wärmemenge, welche über eine skalare Verknüpfung an die Gebäude-FMU zurückgeliefert werden und als FMU-Importgrößen Eingang in die Zonen- und Wandbilanzen des Gebäudemodells finden.

Alternativ kann anstelle des Heizkörpers ein isolierter idealer Regler eingesetzt werden, aber auch komplexe Anlagensysteme mit Erzeuger- und Verbraucherseite können die Schnittstelle bedienen. Die Stärke dieses Schnittstellentwurfs liegt in seinem hohen Abstraktionsgrad, der jegliche Form geregelter Heizungs- oder Kühlungsanlagen erlaubt. Zudem werden die Modellierungskompetenzen klar getrennt.

Die unzureichende Gebäudekenntnis gereicht der Anlagensimulation hingegen zum Nachteil und verlangt vom Gebäudemodell, fehlende Information als Parameterset zu bereitzustellen. Die Unterteilung der Wärmeeinträge beispielsweise entsprechend ihrer Übertragung (konvektiv oder per langwellige Strahlung) ist ohne Geometrieinformation des Gebäudes nicht zu modellieren. Hier muss durch eine fixe Parametrisierung, zum Beispiel einer vorgegebenen Lastverteilung, Abhilfe geschaffen werden.

Des Weiteren gestaltet sich die Dimensionierung der Heizungs- und Kühlungsanlagen für die Anlagenseite als äußerst kompliziert. Diese Aufgabe muss folglich der Gebäudeenergiesimulation übertragen werden. Die meisten Gebäudemodelle bieten dafür nutzbare Heiz- und Kühllastbedarfsrechnungen an. Das NANDRAD-Modell wurde beispielsweise um eine Designtagberechnung auf Basis ideal geregelter Heizung und Kühlung erweitert.

Der entscheidende Nachteil des vorliegenden Schnittstellendesigns ist vornehmlich in seinen numerischen Eigenschaften begründet. Insbesondere eine ideale Regelung reagiert extrem sensitiv auf Änderungen der Raumtemperaturen, die Kopplungsterme sind ungünstig groß. Dies kann zu Stabilitätsproblemen der Master-Algorithmen auf Basis konstanter Extrapolation führen (Abbildung 2).

Einen Ausweg bieten eine adaptive Zeitschrittweitensteuerung, die Anwendung einer Extrapolation höherer Ordnung oder Eingangsgrößeninterpolation durch den Simulationsmaster. Allerdings sind auch hier die

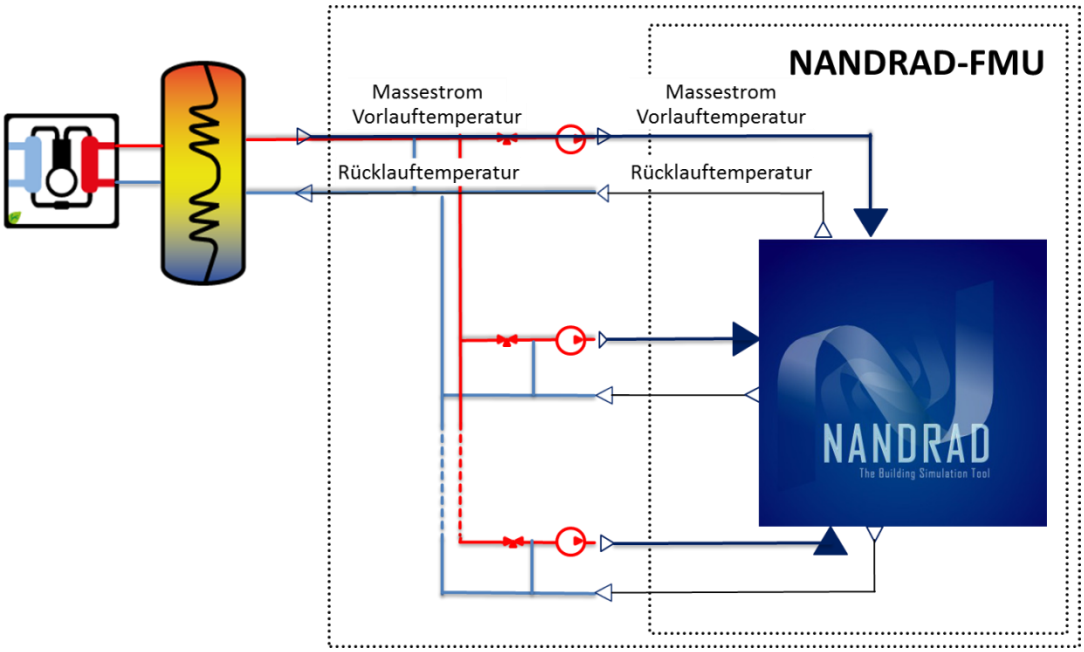

Abbildung 4: Schnittstellen für den Heizkreislauf, Szenario 2 und 3.

Stabilitätseinschränkungen von Iterationsverfahren in der Gegenwart hoher Gradienten zu beachten, die vor allem für die Fixpunktiteration gelten. Gegebenenfalls sind auch robustere Verfahren wie die Newton-Methode anzuwenden.

Dem Problem kann allerdings auch von Seiten der Modellierung begegnet werden. Fragwürdig ist beispielsweise, inwiefern das starke P-Glied einer idealen Regelung den realen Heizsystemen gerecht wird, deren Wärmebereitstellung tatsächlich einer Verzögerung unterliegt. Die Einführung von Speichertermen oder die Berücksichtigung von PID-Reglergliedern könnte hier Abhilfe schaffen.

Alternativ bietet sich eine Schnittstellenumgestaltung an (siehe Abbildung 4):

2. Trennung zwischen Vorlaufleitung und Heizkörpermodell

3. Trennung zwischen Erzeuger- und Verbraucherkreis

Beide Varianten sind in (Abbildung 4) veranschaulicht. Bei Variante 2 sind Heizkörper und Thermostat in die Gebäude-FMU integriert, die Kopplung erfolgt an der Vorlauf- und Rücklaufleitung. Damit ist die sonst vergleichsweise aufwendige Heizkörperdimensionierung unnötig. Zudem wird die numerisch ungünstige Kopplung zwischen Regelgröße und Regelantwort umgangen. Daher stellt dieses Schnittstellendesign einen Lösungsansatz für die bereits skizzierten Probleme dar.

Die Variante 3 ist als numerisch noch günstiger zu werten, da sich die FMU-Kopplung auf die Erhaltungsgrößen der Rohrstränge von Vorlauf und Rücklauf zwischen Erzeuger- und Verbraucherseite beschränkt. Die Modellierung des gesamten Verbrauchernetzwerkes auf der Gebäudeseite verlangt jedoch einen nicht zu unterschätzenden Modellierungsaufwand. Inwiefern dieser gerechtfertigt ist, kann zum derzeitigen Kenntnisstand nicht eingeschätzt werden.

Beide Designvorschläge führen hingegen auf ein derzeit noch ungelöstes Problem: die Schnittstelle verläuft direkt durch das transportierende Medium. Das bedeutet, Enthalpiestrom oder Vorlauftemperatur, die zusammen mit dem Massestrom von der Anlagenseite als FMU-Exportgrößen angeboten werden, können unter Umständen modellseitig verschieden interpretiert werden. Folglich ändert das fließende Medium beim Überqueren der FMU-Schnittstelle seine Eigenschaften, was beispielsweise zur Verletzung der Energiebilanz führen kann. Eine weiterführende Diskussion dieser Problematik findet sich bei (Wetter et. al, 2015).

ZUSAMMENFASSUNG

Die Co-Simulation auf Basis des FMI 2.0-Standards bietet großes Potential zur Integration verschiedener Anlagen- und Gebäudeprogrammkomponten in eine gemeinsame Simulationsanwendung. Um diese Technik jedoch in der nötigen Breite der Anwendung zugänglich zu machen, müssen viele verschiedene Simulationsprogramme die FMI 2.0-Schnittstellen unterstützen und zueinander kompatibel sein. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn nicht nur eine informationstechnische, sondern auch eine physikalische Schnittstellenspezifikation erfolgt.

Die Festlegung geeigneter Kopplungsgrößen stellt eine nichttriviale Aufgabe dar, da neben der Fachkompetenz und dem Datenzugang beider Modelliererseiten ebenso die numerischen

Anforderungen an die Simulationsmaster-Algorithmen im Blick behalten werden müssen. Eine bisher nur in Ansätzen betrachtete Problematik stellt die Existenz redundanter oder sogar widersprüchlicher Berechnungsvorschriften in verschiedenen Modellkomponenten dar. Die Spezifikation von eindeutigen FMI-Schnittstellen, zum Beispiel für zeitabhängige Größen wie die Klimaberechnung oder Raumnutzungsgrößen, tragen hierbei einer Reduzierung der Fehleranfälligkeit bei.

Die numerische Problematik starker Kopplungen ist bei der Zerlegung von hydraulischen Heizungsanlagen besonders präsent, vor allem, wenn Regelgrößen als Schnittstellen verwendet werden. Die native Zerlegung der Simulation in Anlagenseite und passives Gebäude erscheint daher zunächst unattraktiv. Eine zunehmende Abbildung der Verbraucherseite durch die Gebäudesimulation im Sinne einer verbesserten Numerik hingegen führt den originalen Zweck der Co-Simulation, nämlich die Trennung von Fachkompetenzen, ad Absurdum. Außerdem sind die Möglichkeiten von Seiten des Simulationsmasters, dem stark gekoppelten Problem durch Eingangsgrößeninterpolation und geeigneten nichtlinearen Verfahren zu begegnen, noch nicht ausgeschöpft. Daher wird bei Wahl der Simulationsschnittstelle zwischen dem Modellierungsmehraufwand und den Fähigkeiten des Simulationsmasters abzuwägen sein. Für eine Standardisierung erscheint daher eine Kombination geeigneter Schnittstelldefinitionen zu gegebenen Mastereigenschaften zweckmäßig.

LITERATUR

Arnold, M. et al. 2013. Error Analysis and Error Estimates for Co-simulation in FMI for Model Exchange and Co-Simulation v2.0. The archive of mechanical engineering 60(1), p.75-94.

Bastian, J. et al. 2011. Master for co-simulation using FMI. Proc. of the 8th International Modelica Conference, Dresden. Germany.

Crawley, D. B. et al. 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment 43(4), p.661-673.

Dymola. 2016. http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/fmi/

EnergyPlus. 2010. EnergyPlus Engineering Reference, LBNL.

FMI 2.0 Standard. 2014. Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation.

Galtier, V. et al. 2015. FMI-Based Distributed Multi-Simulation with DACCOSIM. Symposium on Theory of Modeling and Simulation, Alexandria, USA.

Gear, C.W. 1971. Numerical initial value problems in ordinary differential equations. Prentice Hall PTR Upper Saddle River. New York. USA.

Green Building. 2016. http://www.ea-energie.de/de/products/green-building-simulationsbibliothek-2-2/

Grunewald et al., 2015. Wissenstransfer-Plattform EnTool: Neue Anforderungen an Planungswerkzeuge für Energie⊕-Siedlungen und –Quartiere. Bauphysikkalender 2015 D3, Ernst Wiley & Sohn, Frankfurt, Germany.

Knabe, G. et al. 1999. Gebäude- und Anlagensimulation, BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH.

MATLAB Simulink. 2016. http://de.mathworks.com/products/simulink/

Meister A. 2008. Numerik linearer Gleichungssysteme. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden. Germany.

Nicolai, A. et al. 2012. Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD – Physikalisches Modell, Umsetzungskonzept und Technologien im Überblick, BauSIM 2012, Berlin, Germany.

Paepcke, A. et al. 2014. Anlagenregelung in ODE-Systemen am Beispiel der thermischen Raum- und Gebäudesimulation, BauSIM 2014, Lund, Sweden.

SimulationX. 2016. https://www.simulationx.de/simulationssoftware/experten/fmi-simulation.html

Trčka, M. et al. 2010. Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings, Journal of Building Performance Simulation 2(3), p. 209-230.

Wetter, M. et al. 2013. New generation computational tools for building and community energy systems, IEA EBC Annex 60.

Wetter, M. et al. 2015. Design Choices for Thermofluid Flow Components and Systems that are Exported as Functional Mockup Units, 11th International Modelica Conference, Versailles. France.