ANBINDUNG VON DETAILLIERTER ANLAGENTECHNIK AN HYGROTHERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

Matthias Pazold[1], Florian Antretter[1] und Jan Radon[2]
[1]Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Valley, Germany
[2]Agr. University of Cracow, Poland

KURZFASSUNG

Die Multi-Domain-Modellierungssprache Modelica bietet eine hervorragende Möglichkeit eine Vielzahl von Simulations-Modellen jeder Art zu entwickeln, zu simulieren und zu validieren. Grafische Modellierungs- und Simulationsumgebungen helfen bei der Erstellung der Modelle, vereinfachen den Eingabeaufwand und stellen Simulationsergebnisse anschaulich dar. Daneben findet die Softwareentwicklung für den Endanwender weiterhin in traditionellen Programmiersprachen statt, wie auch die Entwicklung der Software zur hygrothermischen Gebäudesimulation WUFI® Plus. Spezielle effiziente Algorithmen berechnen dort den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport über sämtliche Gebäudebauteile, verknüpft zum gesamten Gebäudemodell. Dieser Artikel beschreibt die bisherige Gebäudesimulation mit idealer Anlagentechnik und weiterführend die Anbindung von dynamischen Anlagentechnik-Simulationsmodellen, entworfen in der Modellierungssprache Modelica. Mit der standardisierten Schnittstelle, dem „Functional Mock-up Inferface“ (kurz FMI), werden die Modelle, welche die Anlagentechnik detailiert simulieren, als einzelne Softwarekomponenten an das Gebäudemodell in der vorhandenen Software gekoppelt. Notwendige Anpassungen werden beschrieben. Ein hier beschriebenes Konfigurations-Tool vereinfacht die Anbindung der Vielzahl von unterschiedlichen Anlagentechniksystemen, ohne Anpassungen des Programmcodes. Abschließend stellt ein Simulationsbeispiel die damit mögliche erweitere Gebäudesimulation vor und gibt einen Ausblick auf erzielbare Simulationsergebnisse.

ABSTRACT

The multi-domain modelling language Modelica offers a magnificent method to develop, simulate and validate of different simulation models. Some graphical user interfaces support this design process even more and reduce the amount of work. Besides, the software development fort the end user is done with traditional programming languages as for the development for the hygrothermal building simulation software WUFI® Plus. Specialized and efficient solution techniques compute the coupled heat- and moisture transfer through the building components and furthermore by coupling those components the indoor climate. This paper describes the existing building simulation with ideal plant equipment and the implementation of the dynamic simulation of the plant equipment designed in Modelica. Those detailed Plant equipment models are coupled via the Functional Mock-up Interface (FMI) to the existing software. Necessary improvements are shown. A developed configuration tool enhances the coupling of many and different models without any further source code adaptations. Finally, a short example simulation is done to present some of the new features with this coupled simulation.

EINLEITUNG

Ausgehend von Verfahren zur eindimensionalen Berechnung des gekoppleten Wärme- und Feuchtetransportes in mehrschichtigen Bauteilen (Künzel, 1994) entstand die Software WUFI® Plus (Holm et al., 2004), welche eine beliebige Anzahl solcher Bauteile zu einem gesamten Gebäude koppelt. Sämtliche weitere Einflussvariablen auf das Raumklima, wie beispielsweise innere Wärme- und Feuchtequellen, solare Einstrahlung und Lüftung ermöglichen die dynamische hygrothermische Gebäudesimulation. Aus dem Bereich der Gebäudehülle kommend, wird der ideale Heiz- und Kühlbedarf ermittelt, welcher nötig ist um das Raumklima innerhalb von Auslegungsbedingungen zu halten. Die Auslegung der Anlagentechnik ist erst in einem nächsten Schritt möglich, eine direkte Interaktion zwischen Anlangentechnik, Gebäudehülle und Raumklima wird bisher nicht berücksichtigt.

Die Multi-Domain-Modellierungssprache Modelica (1998) bietet eine schnelle und übersichtliche Möglichkeit eine Vielzahl von komplexen Modellen zu entwickeln, zu simulieren und zu validieren. Die Modellierung findet dabei näher am „realen System“ statt, durch Eingabe der tatsächlichen modellrelevanten Gleichungen. Auch komplexe nichtlinearen Differenzialgleichungen können so definiert werden. Eine direkte Zuweisung, wie bei

traditionellen Programmiersprachen ist nicht erforderlich. Die Umwandlung der Gleichungen in ein lösbares Gleichungssystem erfolgt automatisiert. Die detailierten Anlagentechnikmodelle werden in Modelica mit der graphischen Benutzeroberfläche Dymola 2012 (Dassault Systèmes, 2011) entwickelt. Schon im Bereich von Heizungsanlagen gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Anlagenkonfigurationen, mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern, Warmwasserspeichern, Verteilungs- und Heizkörper-Systemen. Alle Systeme sollen als Gesamtmodell in Modelica zusammengestellt und validiert werden. Diese Anlangetechnikmodelle werden mit dem *Functional Mock-up Interface* (kurz: FMI), als *Functional Mock-up Unit* (FMU) exportiert und an die besetehende Software angebunden. Ein FMU Adapter ermöglicht der Software den Zugriff, den Variablenaustausch und die parallele Simulation der externen Modelle, muss jedoch für jedes Modell konfiguriert werden. Variable Eingabeparameter, zur Endkonfiguration der Anlagentechnick, wie beispielsweide die maximale Heizleistung des Wärmeerzeugers oder das Volumen des Wärmespeichers, sollen vom Endanwender eingegeben werden können. Eine reibungslose Ankopplung einer Vielzahl von Modellen an das bestehende Gebäudemodell ist zu bewerkstelligen.

Da die Anlagenmodelle und auch das Gebäudemodell einer stetigen Weiterentwicklung unterliegen ist es notwendig, den Kopplungsprozess auf ein Minimum an Zeitaufwand und Fehleranfälligkeit zu optimieren. In erster Linie geht es dabei um die einzugebenden Anlagenparameter, welche durch den Anwender auf der grafischen Benutzeroberfläche der Gebäudesimulationssoftware eingegeben, gespeichert oder geladen werden und um die Simulationsvariablen die während der Simulation ermittelt, ausgetauscht und als Ergebniss gespeichert werden können. Ein Konfigurations-Tool wurde hierfür entwickelt, das diesen internen Kopplungs-Prozess auf einfache Art und Weise ermöglicht, sowie die durchgeführte Kopplung und das angekoppelte Modell auf Eignung überprüft.

ANBINDUNG

Export / Import

Mit dem FMU Adapter fungiert die vorhandene Software als Simulationsmaster und kann ein externes Modell mit *FMI for Co-Simulation* (Modelisar, 2010) simulieren und Information austauschen. Im Vergleich zur *FMI for Model Exchange* Schnittstelle, enthält ein mit *FMI for Co-Simulation* exportiertes Modell neben dem lösbaren Gleichungssystem auch einen Solver. Wählt ein Anwender eine Anlagenkonfiguration aus, wird das entsprechende Modell instanziiert, also geladen und steht zur Anwendung bereit. Vor der Simulation sind Modellparameter, wie zum Beispiel das Volumen eines Warmwasserspeichers, oder die maximale Heizkesselleistung notwendig. Während der Simulation muss der FMU Adapter zeitabhängige Werte, wie zum Beispiel die Innen- oder Außenlufttemperatur der Anlagenkonfiguration mitteilen und erhält von dieser Wärmequellen, z.b. von den Heizkörpern, welche das Raumklima beeinflussen. Der FMU Adapter benötigt sämtliche Information über die in den externen Modellen enthaltenen Parameter und Variablen. Beim FMU Export werden diese Informationen in Form einer Modellbeschreibung, in einer XML-Datei (modeldescription.xml) gespeichert. Dies ist wichtig, da im Programmcode des Modells, einer dynamic link library (<modelname>.DLL) nur über eindeutige Identifikationsnummern (Value References) mit den Variablen und Parametern kommuniziert werden kann und nicht über Variablen- bzw. Parameterna-men. Die Modellbeschreibung liefert zu jeder im Modell vorhandenen Variablen (den Namen) die entsprechende Identifikationsnummer. Auch weitere Informationen über jeden Wert, ob er während der Simulation variieren kann, ein Parameter, oder auch nur eine weitere Bezeichnung für einen schon vorhandenen Wert (Alias) ist, wird beschrieben. Werte die nach dem Export nicht mehr geändert werden sollen und können, im Modell als Constant deklariert, sind ebenfalls entsprechend markiert.

Jede Anlagenkonfiguration besteht aus unterschiedlichen Teilmodellen. Als Beispiel verwendet eine Konfiguration einen Heizkessel zur Wärmeerzeugung, eine andere eine Wärmepumpe. Diese Zusammenstellung und auch die Validierung der Anlage erfolgt in der externen Entwicklungsumgebung, in Modelica. Für Übersichtlichkeit und zur klaren Abgrenzung der Anlage sorgt ein generalisierter „Austausch-Frame“ mit dem sämtliche Eingabe- und Ausgabe-Variablen sowie Parameter für alle Arten von Konfigurationen definiert sind. Die graphische Benutzeroberfläche der Gebäudesimulationssoftware kennt diesen Austausch-Frame und stellt dem Anwender je nach Anlagenkonfiguration entsprechende Variablen, bzw. Inputs, Outputs und Parameter zur Verfügung. Trotz diesem internen Standard können sich die zuvor beschriebenen Identifikationsnummern einzelner Werte beim Export ändern. Aber auch Anpassungen des Austausch-Frames nach Weiterentwicklung der Modelle sind nicht ausgeschlossen. Das Konfigurations-Tool kennt diesen Austausch-Frame der bei Bedarf ohne Eingriff in den Programmcode ebenfalls geändert werden kann.

In einer FMU sind alle modellrelevanten Dateien gepackt. Für den Import entpackt das Konfigurations-Tool die FMU, liest die Modellbeschreibung und listet sämtliche Informationen des Modells auf. Dies erfordert lediglich ein Klick auf *Load FMU*

(Abbildung 1). Darüber hinaus kennt das Tool, wie erwähnt den Austausch-Frame und somit sämtliche in WUFI® Plus vorhandenen und zur Kopplung bereitgestellten Eingabeparameter- und Simulationsvariablen und stellt diese ebenfalls in einer Tabelle dar (Abbildung 2, Spalte WUFI name). Abbildung 2 zeigt ebenfalls die Verknüpfung. Für jede Variable, bzw. jeden Input, Output und Parameter kann der Name der Variablen der FMU (des Anlagenmodells) in der Spalte *FMU var name* ergänzt werden. Mit einem Klick auf *Set new connection* wird die Konfiguration gespeichert und die Verknüpfung hergestellt. Wenn während dieser Anbindung eines Modells Fehler aufgetreten sind, z.B. wenn unterschiedliche Variablentypen wie eine Konstante mit einem Parameter, ein Parameter mit einer zeitveränderlichen Variablen vernüpft wurden oder wenn Variablennamen in der FMU nicht gefunden wurden, wird dies in der Spalte Coupling success angezeigt. Ist die Anbindung möglich, wird dies ebenfalls in dieser Spalte vermerkt.

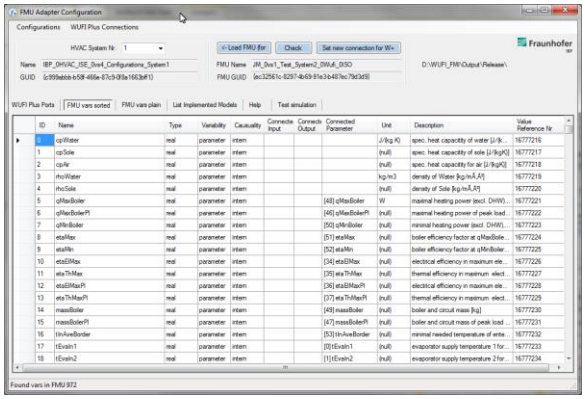

Abbildung 1: Informationen über das exportierte Modell (die FMU) dargestellt im Konfigurations-Tool

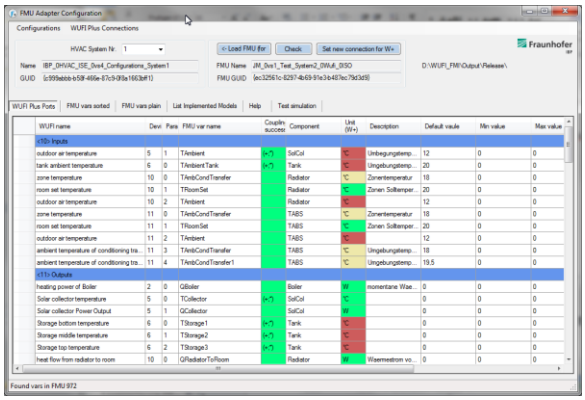

Abbildung 2: Informationen zur Kopplung und dessen Status im Konfigurations-Tool

Mit dem Tool können beliebig viele verschiedene FMU's, also Anlagenkonfigurationen verwaltet werden. Jede Anlagenkonfiguration erhält dafür eine eindeutige Modell-Identifikationsnummer, welche links oben im Programmfenster des Konfigurations-Tools ausgewählt bzw. hinzugefügt werden kann. Nach Auswahl, bzw. Eingabe wird folgend nur das bestimmte Modell bearbeitet. Mit dieser Modellnummer wird auf der WUFI® Plus Benutzeroberfläche die entspechende Anlangenkonfiguration angezeigt. Soll eine neue Analgenkonfiguration hinzugefügt werden, ist der Ablauf wie folgend:

1. Festlegung einer eindeutigen Anlangenkonfiguration-Identifikationsnummer.
2. Laden der Anlagenkonfiguration, also der FMU.
3. Eventuelle Anpassung der zu verknüpfenden Variablen, wenn sich z.B. deren Bezeichnung im Modell geändert hat, auch Einheiten-Transformationen.
4. Speichern der Konfiguration.

Festgelegte Verknüpfungen werden in einer Konfigurationsdatei gespeichert auf die sowohl das Konfigurations-Tool, als auch der FMU Adapter und damit die Gebäudesimulationssoftware zugreifen kann. Diese Konfiguration und Koppung ist in Abbildung 3 dargestellt. Des Weiteren wird zur Dokumentation und als Sicherung das Modell und alle kopplungsrelevanten Informationen in einem Ordner mit entsprechender Identifikationsnummer gespeichert.

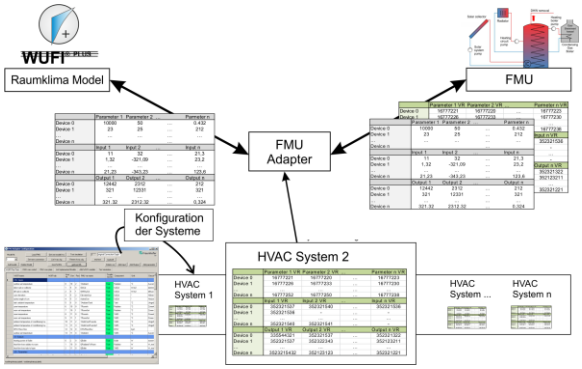

Abbildung 3: Informationen über das exportierte Modell (die FMU) dargestellt im Konfigurations-Tool

Zur Vermeidung von Fehlern bei der Anbindung, sowie zur Prüfung, ob ein Modell für den Import geeignet ist, kann eine kurze Testprozedur, bzw. Test-Simulation innerhalb des Konfigurations-Tools gestartet werden. Das ausgewählte Modell wird dabei instanziiert und mit den Standard Parameterwerten initialisiert. Folgend werden mehrere Zeitschritte simuliert. Dabei kann zeit-veränderlicher Input

variirend vor jeden Zeitschritt an das Modell geschickt werden. Sollten Fehler während der Testprozedur auftreten, z.B. wenn das Modell mit der Schnittstelle *FMI for Model exchange* und nicht mit der *FMI for Co-Simulation* Schnittstelle exportiert wurde, werden diese angezeigt. Abbildung 4 zeigt die Ausgabe einer solchen erfolgreichen Testprozedur.

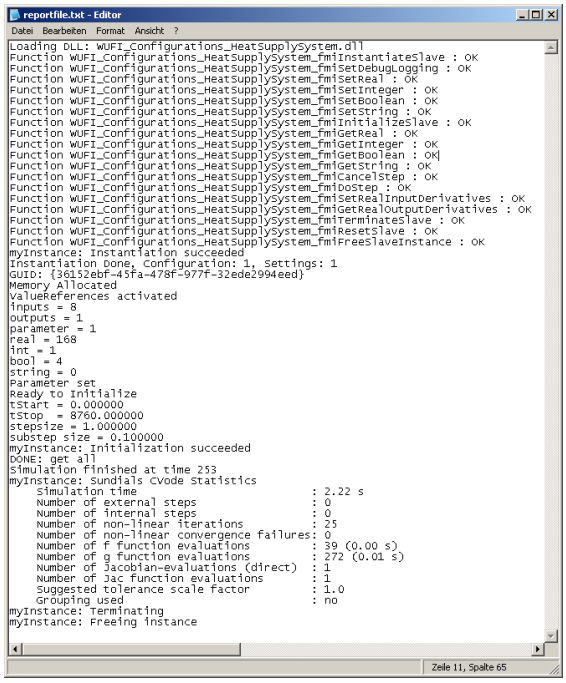

Abbildung 4: Textausgabe nach erfolgreicher Testsimulation mit dem Konfigurations-Tool

Kopplung

Die Simulation von Gebäudehülle und Raumklima und die Simulation des Anlagenmodells beeinflussen sich gegenseitig, sie soll simultan stattfinden. Ergebnisse des einen Modells sind Eingabewerte des anderen und umgekehrt. Als Beispiel sei hier die Innenraumtemperatur genannt, die sowohl vom Wärmeaustausch über die Bauteile des Gebäudes, als auch von der Heizleistung der Anlagentechnik abhängt. Zwei Lösungsalgorithmen sind im Folgenden dargestellt.

Die hygrothermische Gebäudesimulationssoftware verwendet bislang ein iteratives Lösungsverfahren zur Berechnung der Innenraumklimas eines Zeitschrittes (Holm et al., 2004). Maßgeblich dafür ist die Wärme- und Feuchtebilanz, resultierend aus Transportprozessen über die Bauteile, durch Luftwechsel und durch Solarstrahlung. Hinzu kommen innere Wärme und Feuchtequellen und/oder -senken. Solange die Wärmebilanz nicht erfüllt ist, wird die Innenraumtemperatur für jeden Simulationszeitschritt iterativ angepasst. Sind z.B. die Wärmeverluste höher als die Wärmegewinne, wird die Innentemperatur herabgesetzt. Folglich werden die Wärmeverluste über die Gebäudehülle auf Grund der kleineren Temperaturdifferenz geringer. Dies wird wiederholt, solange die Bilanzen ausgeglichen sind. Ohne Berücksichtigung idealer, oder detailierter Haustechnik resultiert ein „frei schwingendes System“. Definiert der Anwender Auslegungsbedingungen für das Innenraumklima, z.B. eine gewünschte minimale Innenraumtemperatur und ebenfalls eine ideale maximale Heizleistung wird, im Gegensatz zum frei schwingenden Innenraumklima, die Innenraumtemperatur auf die Minimaltemperatur begrenzt. Die Differenz in der Wärmebilanz stellt den für den Zeitschritt benötigten Heizwärmebedarf dar. Solange die eingegebene ideale Heizleistung ausreicht wird somit die Innenraumtemerpatur nicht unter die Minimaltemperatur abgesenkt. Der Ablauf dieses impliziten Lösungsverfahrens zur Simulation des Innenraumklimas ist in Abbildung 5 dargestellt.

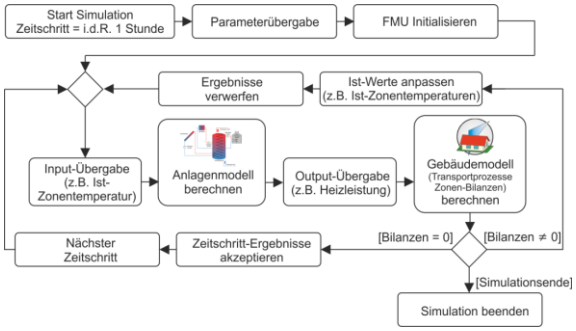

Abbildung 5: Implizites Lösungsverfahren zur Simulation des Raumklimas

Der naheliegende Kopplungs-Ansatz ist, dieses iterative und flexible Verfahren weiter zu verwenden. Die Anlagenkonfiguration bekommt als Beispiel die Ist- und Soll-Innentemperatur eines Zeit- oder Iterationsschrittes und liefert den mit dem Modell berechnenten möglichen Wärmestrom an den Innenraum. Dadurch wird wiederrum die Ist-Temperatur für den nächsten Iterationsschritt angepasst, solange bis die Wärmebilanz für einen Zeitschritt ausgeglichen ist.

Hierfür sind nur wenige Modifikationen bei der Berechnung des Raumklimas notwendig. Jedoch wird von der FMU verlangt, Zeitschritte verwerfen und wiederholen zu können. Wird ein Zeitschritt vom Simulationsmaster mit `fmiDoStep(..)`, nach dem Standard der FMI for Co-Simulation Schnittstelle ausgeführt, sollte dazu der Parameter `newStep` auf `fmiFalse` gesetzt werden. Dazu muss jedoch die exportierte FMU das Verwerfen und Wiederholen unterstützen. Bei der mit Dymola 2012 exportierten FMU ist dies nicht der Fall. Erkennbar ist dies daran, dass in der erwähnten Modellbeschreibung der Eintrag `canRejectSteps` fehlt, bzw. nicht wahr ist. Das exportiere Modell unterstützt diese

Funktionalität nicht, was für die iterative Simulation ein Problem darstellt.

Wird ein Zeitschritt als eigenständige Simulation betrachtet, könnte eine mögliche Zwischenlösung die Re-Initialisierung der FMU für jeden Zeit- und Iterationsschritt sein. Damit sämtliche Informationen erhalten bleiben ist es notwendig, alle zeitabhängigen Variablen innerhalb des Modells nach dem Zeitschritt zwischen zu speichern. Solange ein Zeitschritt iteriert dienen die zwischengespeicherten Werte des vorherigen Schrittes zur erneuten Initialisierung. Sind die Bilanzen erfüllt, werden diese durch die aktuell simulierten Werte ausgetauscht. Dies kann viel Zeit und Speicher fordern und es ist nicht sichergestellt, dass alle dynamsichen Zustände des Modells auf diese Art und Weise zwischengespeichert werden. Tests haben gezeigt, dass dadurch vermutlich die Gradienten verloren gehen. Es wurden im direkten Vergleich Simulationsergebnisse des extern simulierten Modells mit Re-Initialisierung den intern in Dymola 2012 simulierten gegenübergestellt und deutliche Abweichungen festgestellt.

Weiter betrachtet führt das iterative Verfahren zur Dauerschleife. Die Anlagentechnik Modelle (im Folgenden beschrieben durch ein Heizungssystem) sind dafür ausgelegt, einen Wärmestrom zu liefern, wenn die Raumtemperatur kleiner als die Soll-Temperatur ist. Dafür sorgt die Abbildung eines Thermostat-Ventils. Am Start der Iteration eines Zeitschrittes ist die Ist-Raumtemperatur oft deutlich niedriger als die Soll-Temperatur, und das Gebäudemodell bekommt vom Anlagenmodell einen entsprechend hohen Wärmestrom. Mit diesem Wärmestrom wird die Raumluft erwärmt und folglich im nächsten Iterationsschritt erhöht. Nähert sich die Raumtemperatur der Solltemperatur, oder ist dieser gar gleich, liefert das Heizungssystem einen geringeren oder gar keinen Wärmestrom. Dieser war jedoch zu Beginn der Iteration des Zeitschrittes notwendig, bzw. verantwortlich zum Erhöhen der Raumtemperatur. Durch Wegfall der Wärmequelle wird somit die Raumluft während der Iteration wieder abgekühlt. Das Anlagenmodell liefert damit im nächsten Iterationsschritt einen größeren Wärmstrom, der Zeitschritt konvergiert nicht.

Die erwähnten Probleme der iterativen Ankopplung führten zum echten Co-Simulation Ansatz, bzw. zur expliziten Simulation. Dabei fällt die iterative Berechnung weg, die Zeitschritte der FMU müssen nicht mehr wiederholt werden. Das Raumklimamodell von WUFI® Plus und die Anlagenkonfiguration rechnen abwechselnd, mit einer Art Ping-Pong Methode. Die Wärme- und Feuchtebilanzen werden weiterhin verwendet, jedoch nicht mehr zur Anpassung des Innenraumklimas im aktullen Zeitschritt, sondern zur Änderungen des Innraumklimas, z.B. der Raumlufttemperatur, für den folgenden Zeitschritt. Dieses explizite Lösungsverfahren ist in Abbildung 6 dargestellt. Die übliche Zeitschrittweite bei der Gebäude-Jahressimulation ist stündlich. Iterativ wurde über die gesamte Stunde ein Mittelwert berechnet. Da bei der expliziten Co-Simulation die Änderung für den folgenden Zeitschritt berechnet wird, ist diese Schrittweite zu groß. Die explizite Simulation erfordert verkürzte Zeitschritte, welche gemittelt den Stundenwert einer iterativen Simulation ergeben sollen.

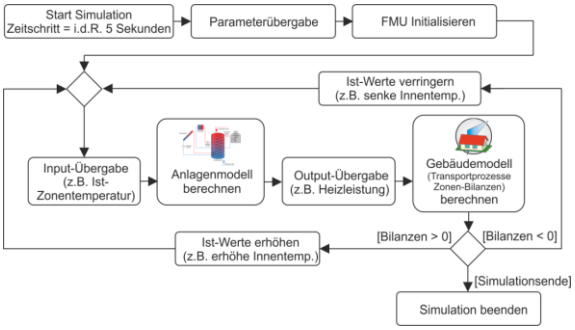

Abbildung 6: Explizites Lösungsverfahren zur Simulation des Raumklimas

Das explizite Lösungsverfahren benötigt dadurch, je nach gewählter Zeitschrittweite, eine deutlich häufigere Berechnung sämtlicher Transportprozesse (Gebäudebauteile, Luft-Durchströmungsmodell,…). Bei einer Schrittweite von 5 Sekunden sind das 720 Berechnungen pro simulierter Stunde. Im Vergleich sind bei der impliziten Simulation 10-30 Iterationen pro simulierter Stunde üblich. Jedoch müssen i.d.R. nicht sämtliche berechneten Werte für jeden Zeitschritt gespeichert und zur Auswertung aufbereitet werden. Es ist möglich, die Simulationsschrittweite unabhängig von der Ergebnis Ausgabeschrittweite (weiterhin wie üblich z.B. eine Stunde) einzugeben. Dies reduziert die Simulationszeit deutlich. Weitere Optimierungen, wie z.b. eine adaptive Zeitschrittsteuerung, welche längere Zeitschritte, bei geringen Änderungen der Randbedingungen zulässt, sind denkbar.

ANWENDUNG

Beispiel Gebäudemodell

Betrachtet wird ein Einfamilienhaus von 1993 mit ausgebautem Dachgeschoss und unbeheiztem Keller. Die Wohnfläche beträgt 156 m² bei einem Nettovolumen von 371 m³. Der Gebäudestandort befindet sich in Holzkirchen. Die Außenwände sind aus Porenbeton errichtet mit einem U-Wert von 0,41 W/m²K. Für das Dach, mit einer Neigung von 40° und den Dachflächen in Richtung Süden und Norden, wird ein U-Wert von 0,29 W/m²K angenommen, für die Decke vom unbeheizten Keller 0,53 W/m²K und für die sanierten Fenster 0,8 W/m²K bei einer Fensterfläche von insgesamt 35 m². Es soll

ein konstanter Luftwechsel von 0,5 h^{-1} stattfinden. Das Haus wird von einem vier Personenhaushalt bewohnt, entsprechend werden innere Wärmegewinne über ein Tagesprofil angesetzt.
Die thermische Gebäudesimulation (mit WUFI®Plus Therm) mit idealer Anlagentechnik ergibt ein Heizwärmebedarf von 85 kWh/m²Jahr bei einer Soll-Innenraumtemperatur von 20°C. Die erforderliche Heizleistung, welche nötig ist um die Soll-Innenraumtemperatur einzuhalten, wurde stündlich ermittelt (Abbildung 7) und kann als Auslegungskriterium für die Maximalleistung eines Wärmeerzeugers dienen. Ob allerdings die so dimensionierte Anlage, inklusive Wärmespeicher und Wärmeübergabe die simulierte Innenraumtemperatur einhält und nicht unter-, oder gar übersteigt ist nicht untersucht. Ändert sich die Innenraumtemperatur, ändert sich auch die erforderliche Heizleistung. Folgend wird das Gebäude erneut mit gekoppelter dynamischer Anlagentechnik simuliert.

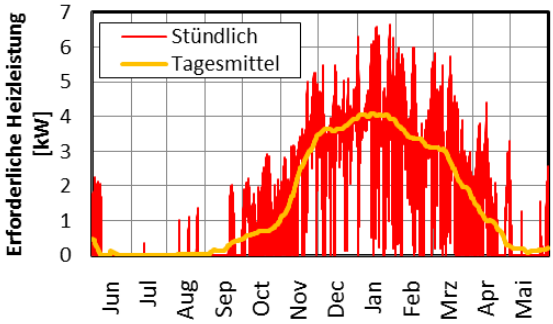

Abbildung 7: Erforderliche Heizleistung; thermische Gebäudesimulation mit idealer Anlagentechnik

Simulation mit detaillierter Heizanlage

Eine Anlagenkonfiguration mit Gas-Brennwertkessel, Flachkollektor zur Heizungsunterstützung, 1000 Liter Warmwasserspeicher und Plattenheizkörpern wird dem Gebäudemodell hinzugefügt. Der Brennwertkessel wird mit einer Maximalleistung von 6 kW dimensioniert. Die Grenztemperatur welche eine Beladung durch den Heizkessel verlangt wird auf 70°C eingestellt. Es werden drei Solarkollektormodule mit hochselektiv beschichteten Absorbern und einer Fläche von 6,6 m² eingesetzt. Die benötigte Heizkörperleistung wird auf 80 W/m² ausgelegt. Neben der Heizenergie wird mit dem Anlagentechnik-Modell weiterführend der Warmwasser Energiebedarf simuliert. Ein stündliches Zapfprofil liefert den Warmwasserverbrauch der Bewohner über das Jahr.

Ausgabe

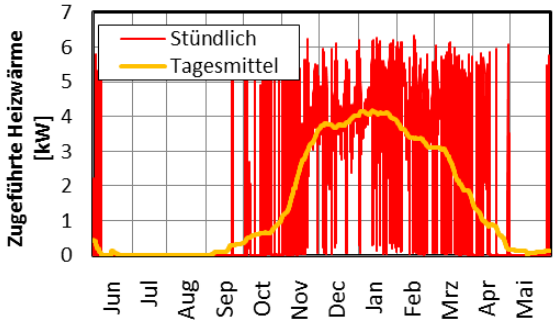

Abbildung 8: Zugeführte Heizwärme; hygrothermische Gebäudesimulation gekoppelt mit dynamischer Anlagentechnik

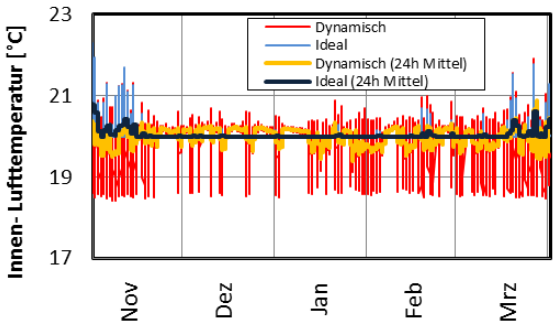

Abbildung 9: Luft-Innentemperatur im Vergleich (ideale und dynamische Anlagentechnik)

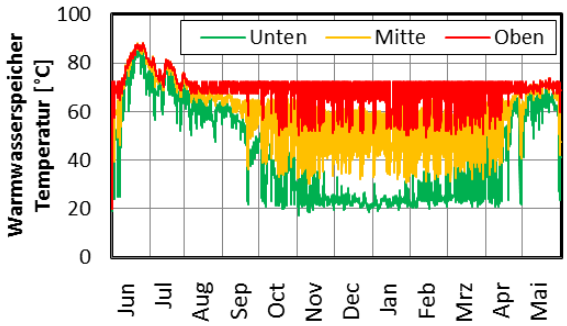

Abbildung 10: Wasser-Schichtentemperatur im Warmwasserspeicher

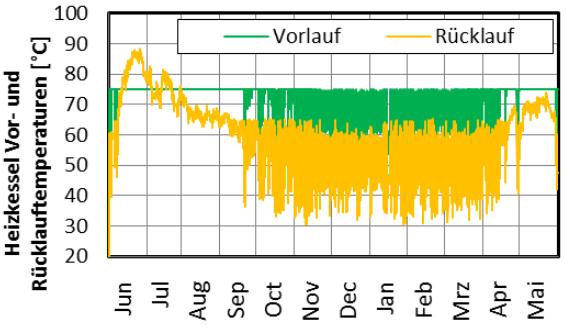

Abbildung 11: Heizkessel Vor- und Rücklauftemperaturen

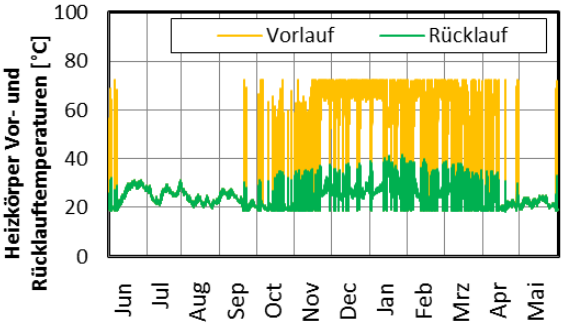

Abbildung 12: Heizkörper Vor- und Rücklauftemperaturen

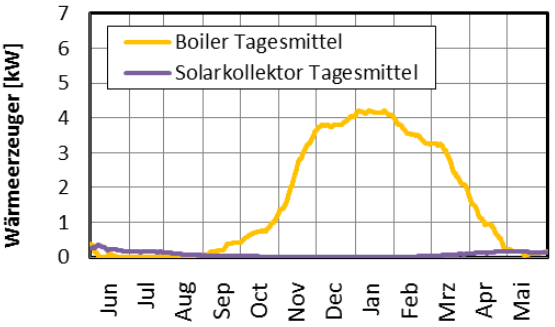

Abbildung 13: Wärmeabgabe von Gas-Brennwertkessel und Solarkollektor

Die Abbildungen 8 bis 13 zeigen mögliche Ergebnisse detaillierter Anlagentechniksimulation. Zum einen wird die sich einstellende Raumlufttemperature in Abhängigkeit der Regelung ermittelt. Auch die Temperaturen im System, Vor- und Rücklauf- sowie Speichertemperaturen lassen sich bewerten. Außerdem läßt sich beispielsweise durch Abgleich der Boiler- und Solarkollektorleistung eine Dimensionierung und Feinabstimmung durchführen.

Auswertung der Simulation

Mit gekoppelter dynamischer Anlagensimulation sind weiterführende Ergebnisse der Gebäudesimulation abrufbar. Die Innenraumtemperatur schwankt um die Soll-Innentemperatur und wird nicht (ideal) auf einer Soll-Temperatur gehalten. Dadurch ändert sich auch der Transmissionswärmeverlust. Die Berechnung der erforderlichen Heizleistung (Heizlast) wird durch die Simulation der tatsächlich zugeführten Heizwärme ersetzt.

Bei dem vorgestellten Simulationsbeispiel fällt die Innenraumtemperatur 2088 Stunden im Jahr unter die Auslegungstemperatur von 20°C, im Durchschnitt auf 19,4°C bis auf 18,4°C. Öffnet das Thermostatmodell das Heizungsventil, beträgt die mittlere Vorlauftemperatur zu den Heizkörpern 65°C und die mittlere Rücklauftemperatur 29°C.

Der Solarkollektor zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung liefert in Summe 680 kWh, etwa 5% des Wärmebedarfs. Dies könnte durch weitere Simulationen und Einstellungsvariationen gesteigert werden. Der Brennwertkessel liefert 14630 kWh.

Die Anlagentechnik befindet sich im Simulationsbeispiel außerhalb der beheizten Gebäudehülle. Die Wärmeabgabe des Warmwasserspeichers, insgesamt 605 kWh, erfolgt im unbeheizten Keller und erhöht dort die mittlere Raumtemperatur um 0,1°C auf 12,6°C im Vergleich zur Simulation mit idealer Anlagentechnik.

Mit den Ergebnissen der Simulation sind weitere Auswertungen zum Primärenergiebedarf und zu Betriebskosten möglich. Durch weitere Eingabevariationen und Auslegungs-Anpassungen kann die Energieeffizienz des Gebäudes optimiert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Der FMU Adapter in Kombination mit dem Konfigurations-Tool ermöglicht eine schnelle Ankopplung verschiedener in Modelica entwickelter und mit dem *FMI for Co-Simulation* Standard-Interface exportierer Modelle an bestehende Gebäudesimulationssoftware. Eine kurze Testsimulation erlaubt es dem Konfigurations-Tool die Funktionalität und die Interaktion zu testen. So können Fehler bei der Kopplung schon früh erkannt und im Modell behoben werden. Beliebig viele, unterschiedliche Anlagenkonfigurationen können mit dem Tool verwaltet und hinzugefügt werden.

Zukunftsorientiert können mit dem FMU Adapter und dessen Konfigurations-Tool nicht nur Anlagenmodelle, sondern auch weitere, auch mit anderen Entwicklung- und Simulationsumgebungen erstellte und mit dem FMI-Standard exportierte, Modelle gekoppelt werden. Das Hinzufügen und Verwalten der unterschiedlichen Modelle kann ohne

Eingriff in den Programmcode mit dem Konfigurations-Tool erledigt werden.

Die Simulationsmethodik wird auf Grund softwaretechnischer und modellspezifischer Anforderungen vom impliziten zu einem expliziten Lösungsalgorithmus geändert, wenn die dynamsiche Anlagentechnik Simulation eingesetzt wird. Simulationszeitschritte werden dann nicht mehr wiederholt bzw. iterativ berechnet. Die Wärme- und Feuchtebilanzen in den Zonen dienen so zur Anpassung der Temperatur und Feuchte des folgenden Zeitschrittes.

Die simultane Anbindung der dynamischen Anlagentechniksimulation an die dynamisch-hygrothermischen Gebäudesimulation vereinfacht bei der Gebäudeplanung die Bewertung von Gebäudehülle und Anlangentechnik im Zusammenspiel. Die erforderliche Haustechnik kann für die Gebäudehülle, oder umgekehrt, die Gebäudehülle für die Haustechnik bei unterschiedlicher Gebäudenutzung optimiert werden. Weiterführend können Betriebskosten und Primärenergiebedarf mit den Ergebnissen der Simulation ermittelt werden. Auswirkungen von Auslegung und Regelung der Anlagentechnik auf das Raumklima können untersucht werden, um den Energiebedarf zu minimieren, bei gleichzeitiger Steigerung von Komfort und Feuchteschutz.

DANKSAGUNG

Diese Studie zur Anbindung detailierter Anlagentechnik wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert (BMWi 0329663L) im Rahmen zur Weiterentwicklung von WUFI Plus zur einfachen thermischen Gebäudesimulation für die Praxis.

LITERATUR

Künzel, H.M. 1994. Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart

Holm, A., Radon, J., Künzel, H. M., Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94.

Antretter, F., Sauer, F., Schöpfer, T., Holm, A.: Validation of a hygrothermal whole building simulation software. 12th International Building Performance Simulation Association 2011. 14–17 November, 2011, Sydney/ Australia.

Modelica 1998. A unified object- oriented language for physical systems modeling. Modelica homepage: http://www.Dynasim.se/Modelica/.

Modelisar 2010. Functional Mock-up Interface for Co-Simulation (ITEA 2 – 07006)

Dassault Systèmes. 2011. Dymola. Dynamic Modeling Laboratory. Dymola Release notes, Lund, Sweden.