



STABILE SIMULATION THERMOHYDRAULISCHER VERBRAUCHERNEZWERKE BEI EXTERNER PUMPENREGELUNG

Anne Paepcke¹, Martin Leuschke², Rene Hoch¹,
¹Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden
²EA Systems Dresden GmbH

Kurzfassung

Der Trend in Richtung regenerativer Energieträger im Gebäudesektor ist unaufhaltsam. Essentiell für dieses Szenario sind eine passende Anlagenauslegung und Lastmanagement, welche durch integrale Gebäudesimulation gut abgebildet werden können. Die Co-Simulationskopplung von Gebäude- und Anlagenmodell nach FMI-Standard stellt hierbei eine anerkannte Methodik dar. Konkret erfolgt die Bereitstellung und Konditionierung des Fluides durch die Anlagen-FMU, die Verteilung hingegen im Gebäudemodell. Typischerweise erfolgt die Pumpenregelung massstrombasiert in Abhängigkeit der Rücklaufstemperatur.

Diese Konstellation wird anhand verschiedener Modellierungsebenen auf Gebäudeseite diskutiert. Dabei finden Idealisierungen bezüglich der Heizleistung und der Massstromzufuhr statt. Neben den vereinfachten Modelle eine Gebäudeenergiesimulation mit thermohydraulischem Verteilnetz in die Schnittstelle integriert. Dabei wird ausschließlich mit Hilfe von erweiterten Modellierungsansätzen wie Pumpenregelung und Bypassäquivalenzmodellen eine stabiler numerischer Simulationslauf erzeugt. Die Qualität der Ergebnisse für die verschiedenen Modellierungsvarianten wird am Simulationsbeispiel überprüft.

Abstract

We observe a strong trend towards regenerative energy sources in the building sector. Covering a high level of detail, integral building simulation can help to find a convenient system design and load management, that are essential for this scenario. The co-simulation coupling of building and system model according to the FMI standard represents a recognized methodology. In detail, the fluid is provided and conditioned by the system FMU, while fluid distribution is task of the building model. Typically, the pump control is based on the mass flow depending on the return temperature.

This constellation is discussed using different detail levels on the building model side. In this case,

idealization takes place with regard to the heating output and the mass flow supply. In addition to the simplified models, a building energy simulation with a thermal-hydraulic distribution network is integrated into the represented FMI-interface. A stable numerical simulation run can be guaranteed exclusively with the help of extended modeling approaches, such as pump control and bypass equivalent models. The quality of the results for the different modeling variants is checked with the help of a simulation example.

Einführung

Simulationsgestützte Planungswerkzeuge bergen ein hohes Potential, den bisherigen Planungsprozess zu unterstützen und die Energieeffizienz von Gebäuden erheblich zu verbessern. Perspektivisch wird sich von daher der Trend zum digitalen Planungsprozess, auch bekannt als Building Information Modelling (BIM), durchsetzen. Vereinzelt werden bereits in der aktuellen Planungspraxis Wege aufgezeigt, BIM-basierte Prozessketten umzusetzen (Vogel, 2018). Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Sammeln und der vollständigen Übertragung von Daten, wobei Simulationswerkzeuge ein Teilglied dieses Prozesses sind. Charakteristisch ist die sequentielle Richtung der Abläufe. So werden anhand von Bedarfsberechnungen im Gebäude passende Kennwerte für die Auswahl und Dimensionierung von Anlagenkomponenten der technischen Gebäudeausrüstung ermittelt und darauf aufbauend die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Nur vereinzelt kommt es dabei zu Umentscheidungen und damit verbundenen Rückwärtsiterationen.

Weiterführende Ansätze verfolgen komplexere Anwendungsfälle. So werden in (Eckstädt, 2021) sechs verschiedene Szenarien abstrahiert, welche den Einsatz von Simulationswerkzeugen benötigen. Dabei wird im Gegensatz zum bisherigen Planungsprozess bereits bei der Auslegung der Anlagen- und Regeltechnik (Szenario 4) eine Leistungsbegrenzung vorausgesetzt. Auswirkungen und der Umgang mit eventuellen Versorgungsengpässen auf Gebäudeseite, die in diesem Fall dringend untersucht werden müssen, lassen sich nur durch gemeinsame Gebäude-

und Anlagenmodelle (sogenannte integrale Gebäude- modelle) abbilden.

Simulationskopplung

Sowohl im Gebiet der Gebäudemodellierung als auch für die Simulation komplexer Anlagen- und Regelkreise existiert eine Vielzahl hochspezialisierter Modelle und Modellierungsumgebungen. Dabei ist die Umsetzung der meisten Programme hinsichtlich ihrer grafischen Modellierungsumgebung und der numerischen Implementierung meist auf nur eines der beiden Fachgebiete, Gebäude oder Gebäudeanlagentechnik optimiert. Aus diesem Grund gewinnt Simulationskopplung zunehmend an Bedeutung (Wetter, 2013, 2021). Als etablierter technischer Standard hat sich in diesem Zusammenhang die FMI 2.0-Technologie durchgesetzt (Blochwitz, 2012), welche ein informationstechnisches Design von Schnittstellen für eine Laufzeitkopplung bereitstellt. Die zu koppelnden Modellkomponenten müssen hierfür als kopplungsfähige Bibliotheken (FMUs) gekapselt vorliegen. Die gemeinsame Simulation wird durch einen Simulationsmaster gesteuert. Speziell bei der Co-Simulation lässt der Master die FMUs innerhalb festgelegter Kommunikationszeitschritte miteinander in Austausch treten und bis zum nächsten Zeitschritt unabhängig voneinander simulieren.

Kopplungstechnologie im Umfeld der Gebäudesimulation wurde bereits umfangreich untersucht (Nicolai, 2017, Paepcke, 2016, Wetter, 2013). Dabei wurde als eine der technischen Hürden die korrekte Verknüpfung von Schnittstellengrößen identifiziert. Beispielsweise führt die Kopplung von zonen-spezifischen Heizlasten und Zonentemperaturen (mindestens vier Schnittstellengrößen pro Zone) im Fall von Gebäuden mit realistischer Zonierung auf eine Vielzahl zu koppelnder skalarer Größen, was manuell nicht mehr beherrschbar ist (Nicolai, 2017, Paepcke, 2016). Von daher wurde die Notwendigkeit einer Zusammenfassung von Kopplungsgrößen adressiert. Der FMI 3.0-Standard (Junghanns, 2021) führt zu diesem Zweck Terminals ein, welche die Gruppierung kompatibler Größen erlauben.

Als weiterer Themenschwerpunkt ist die konkrete physikalische Ausgestaltung der Kopplung zu nennen, vor allem in Gegenwart hydraulischer Heizungs- und Anlagenkomponenten. Konkret variiert der Informationsverlust innerhalb eines Co-Simulationsrechen-schrittes für unterschiedliche Schnittstellendefinitionen. Daraus ergeben sich Auswirkungen auf die numerische Stabilität und Ergebnisgenauigkeit des gekoppelten Simulationslaufes (Nicolai, 2017, Paepcke, 2016, Wetter, 2015).

In (Paepcke, 2016) wird die Vielfalt der möglichen Schnittstellenebenen für eine gekoppelte Simulation von Gebäude- und Gebäudeanlagentechnik näher betrachtet. Dabei kann die Gebäudetechnik im einfachsten Fall als zonenspezifische Wärmequellen im passiven Gebäude abstrahiert werden. Viele Gebäudemodelle bieten allerdings die integrierte

Modellierung von hydraulischen Heizkörpern und Verteilnetzwerken. Deshalb wird als weitere Ausbau- variante das Gebäude als abstrakter Verbraucher mit einem hydraulischen Anschluss an einen passend dimensionierten Erzeugerkreislauf gedeutet. Der Vorteil der letzten genannten Konfiguration besteht in der geringen Zahl an Kopplungsgrößen und der Austauschbarkeit des Gebäude- oder des Anlagen- modells für verschiedene Planungsphasen.

Schnittstellen

Gängige Betriebsarten für Pumpen sind neben der konstanten oder variablen Druckdifferenz die temperaturgeführte Differenzdruckregelung. Um möglichst flexibel unterschiedliche Strategien zu unterstützen, wird das Gebäude in Form zweier Bibliotheks- komponenten B1 und B2 abstrahiert. Die hydraulischen Schnittstellen unterscheiden sich bei beiden Varianten, einheitlich wird die Rücklauf- temperatur als potentielle Regelgröße zurückgeliefert. Die Gebäudetechnik mit integrierter Regelung wird in die passförmige Komponente P1 oder P2 gekapselt, siehe *Abbildung 1,2*.

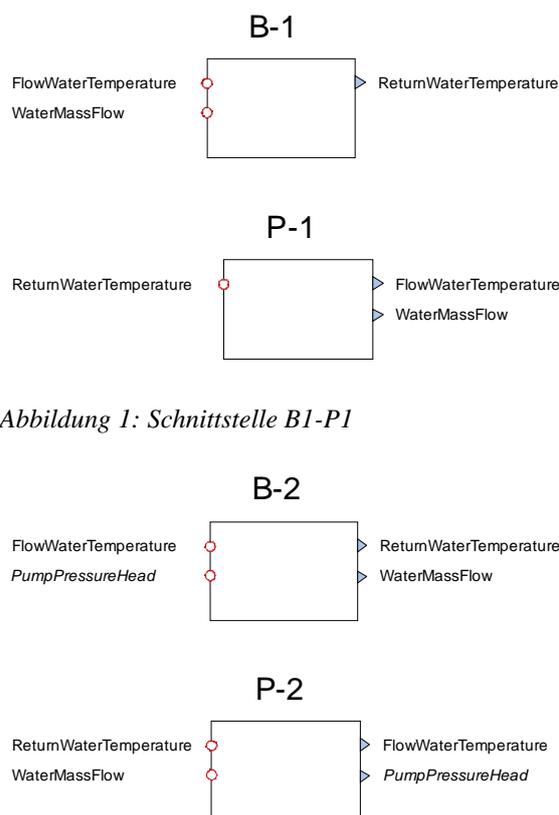


Abbildung 1: Schnittstelle B1-P1

Abbildung 2: Schnittstelle B2-P2

Die konkrete Umsetzung erlaubt verschiedene mögliche Kopplungsgrößen: In B1-P1 sind beispielhaft die Vorlauftemperatur (*FlowWaterTemperature*), die Rücklauf- temperatur (*ReturnWaterTemperature*) und der Massestrom (*WaterMassFlow*) ausgewählt, in Variante B2-P2 zusätzlich die Pumpendruckdifferenz (*PumpPressureHead*).

Wird innerhalb beider Modellkomponenten eine hydraulische Berechnung des Heizkreislaufes durchgeführt, so bietet sich die Schnittstelle B2-P2 an. Dabei wird vom Erzeugerkreislauf das Pumpensignal in Form einer Druckdifferenz an den Verbraucherkreislauf weiter gegeben. Für die Verbraucherseite ist dies vorteilhaft: ein hydraulischer Verbraucherkreislauf regelt auf natürliche Weise den Massestrom entsprechend des Strömungswiderstandes entlang von Rohren und durch geregelte Ventile. Dies führt bei der hydraulischen Berechnung automatisch zu einer Verteilung des Massestroms im unterversorgten Fall und zu einer Drosselung bei ausreichender Versorgung.

Da ein großer Teil an verfügbaren Gebäude- oder Anlagenmodellen keine hydraulische Berechnung durchführt, ist die Schnittstellenvariante B2-P2 nicht verallgemeinerbar. Daraus ergibt sich, dass der Massestrom nicht innerhalb des Gebäudes geregelt werden kann und durch die Anlage vorgegeben werden muss. Dies ist durch die vereinfachte Schnittstelle B1-P1 in *Abbildung 1* veranschaulicht. Auf Seite des Erzeugerkreislaufes bieten sich vier verschiedene potentielle Regelgrößen:

Zunächst wäre es möglich, auf die individuelle Raumtemperatur zu regeln und dann eine Summenbildung für das gesamte Gebäude durchzuführen. Hierdurch wäre eine sehr genaue Erfassung des Bedarfs und Regelung des Massestroms möglich. Jedoch ist diese Lösung schlecht skalierbar, da sich die Anzahl der Räume bei jedem Gebäude unterscheidet. Zudem würde diese Regelgröße bei einer großen Anzahl an Räumen bzw. Zonen wiederum zu einer sehr großen Schnittstelle führen. Eine durchschnittliche Raumtemperatur hingegen gibt die Verteilung der Temperatur unzureichend wieder und kann zum Versorgungsstopp unzureichend gewichteter Räume führen.

Möglich ist jedoch die Regelung auf die erforderliche kumulierte Heizleistung. Nachteilig an dieser Lösung ist jedoch die schlechte Übertragbarkeit in die Praxis, da die Heizleistung in der Regel nicht als Messwert zur Laufzeit zur Verfügung steht.

Die vierte Variante ist die Regelung auf eine vorgegebene Rücklauftemperatur. Durch diese ergibt sich eine definierte Temperaturspreizung, wodurch eine Regelung des Massestroms ermöglicht wird. Eine zu geringe Rücklauftemperatur indiziert hierbei einen Wärmeentzug, welcher größer als die bereitgestellte Heizleistung ist. Dies kann mit einem größeren Massestrom kompensiert werden. Diese Variante wird im Folgenden präferiert.

Detaillierungsebenen auf Gebäudeseite

Eine verallgemeinerbare Schnittstellendefinition sollte durch eine große Breite an Simulationswerkzeugen anschlussfähig sein. Für die Untersuchungen wurde die Schnittstellenvariante B1-P1 gewählt und die Gebäudesimulationsplattform

NANDRAD genutzt. NANDRAD unterstützt die Modellierung von Flächenheizelementen in Wandbauteilen und berücksichtigt deren thermische Trägheit (Paepcke, 2018). Die einzelnen Elemente können durch hydraulische Eigenschaften ausgestattet werden und sind anschlussfähig an ein hydraulisches Verteilnetzwerk (Hirsch, 2022). Damit kann der Detailgrad (LOD) der Heizungsmodellierung auf beliebige Stufen erhöht und somit das gesamte Spektrum der Gebäudemodelle abgebildet werden.

LOD1: Ideale Heizelemente

Im einfachsten Fall liefert die Gebäudemodellierung eine Abschätzung des Heizbedarfs. Im NANDRAD Modell wurden die Heizflächen innerhalb der Fußbodenschichten positioniert und mit einer unbegrenzten, durch ein Thermostat geregelten Heizleistung versehen. Die dabei benötigte Gesamtheizlast aller Heizelemente entspricht der thermischen Leistung $\dot{Q}_{heating}$, welche dem Fluid im Verbraucherkreislauf entnommen wird. Das Modell bietet hierfür einen Adapter an, welcher zu gegebenem Massestrom \dot{m} und spezifischer Wärmekapazität C_p die äquivalente Temperaturspreizung ermittelt (1).

$$\dot{m}C_p (T_{flow} - T_{return}) = \dot{Q}_{heating} \quad (1)$$

Hierbei bezeichne T_{flow} die Vorlauf- und T_{return} die Rücklauftemperatur.

Die Autoren rechnen mit nur geringen Abweichungen zur detailgetreuen Modellierungsvariante im Fall ausreichender Versorgungsleistung. Im Fall von unzureichender Energiezufuhr (zu geringer Massestrom oder Vorlauftemperatur) führt die unbegrenzte Heizlast auf dieser Modellierungsstufe zu einer Überschätzung der Wärmeentnahme aus dem Verbraucherkreislauf. Daher ist zu erwarten, dass die Rücklauftemperatur zwar zu stark abfällt, dem externen Regelkreis allerdings das korrekte Signal – Unterversorgung - übermittelt.

LOD2: Ideales Heizregister

Die nächstmögliche Ausbaustufe berücksichtigt thermohydraulische Eigenschaften der Heizelemente. Die Fußbodenheizung wird in NANDRAD als Gruppe parallel verlegter Rohrschlangen gedeutet. Thermostatventile regeln den Massestrom zwischen einem numerischen Minimalwert und einem modell-spezifischen Maximalwert. In den Rohren kühlt sich das Fluid bis maximal auf Umgebungstemperatur ab, und die entnommene Heizleistung bei unzureichender Energieversorgung ist begrenzt. Bei Überversorgung hingegen schließen die Ventile und senken die Gesamtheizlast ab. Diese Modellvorstellung ist äquivalent zu einem adiabaten Bypassrohr, das die überschüssige Fluidmenge aufnimmt.

Als kritisch hingegen erweist sich die Modellierung der Fluidverteilung auf die Heizelemente. Um keine Verteilannahme zu treffen, wurde jedes Heizelement

mit dem maximal verfügbaren Massestrom am Vorlaufstrang versorgt. Somit wird im schlechtesten Fall der Enthalpiestrom und damit verbunden die verfügbare Heizlast im einzelnen Heizelement überschätzt. Das Adapterelement liefert als Signal eine zu stark abgesenkte Rücklauftemperatur, auf welche die Regelung im Erzeugerkreislauf reagieren muss.

LOD3: Hydraulischer Verbraucherkreislauf

Die Modellierung der Fluidverteilung stellt die höchstmögliche aller Detaillierungsgrade dar. Allerdings ist zu beachten, dass die präferierte Schnittstelle B1-P1 anstelle der gewünschten Druckdifferenz einen geregelten Massestrom am Vorlauf übergibt. Neben der externen Regelung durch den Erzeugerkreislauf findet gebäudemodellintern eine Massestromregelung durch die Thermostatventile statt. Da bei der Co-Simulation eine Aktualisierung der Kopplungseingangsgrößen nur innerhalb vorgegebener Kommunikationsschrittweiten erfolgt, verlaufen beide Regelsignale nicht synchron. Dies führt, insbesondere bei Schluss aller Thermostatventilen, zu numerischen Artefakten bis hin zum Abbruch des individuellen Rechenschrittes der Gebäudesimulation.

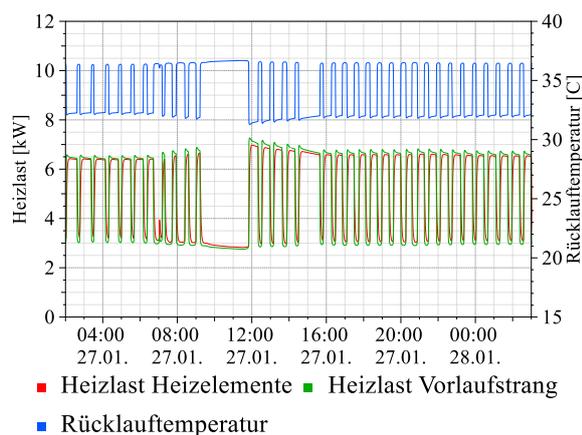


Abbildung 3: Heizlast und Rücklauftemperatur bei Thermostatregelung im transienten Fall

Aufgrund dieses Problems ist der Anschluss eines Bypasselementes parallel zum Verbraucherkreislauf unumgänglich. Ein reales Rohr, welches diese Aufgabe übernimmt, muss annähernd perfekt geöffnet sein, sobald alle Thermostatventile geschlossen sind, aber gleichzeitig perfekt geschlossen bei mindestens einem geöffneten Ventil. Mit Hilfe von Strömungswiderständen, die in hydraulischen Kreisläufen die Verteilung regeln, ist eine solche Parametrisierung nicht allgemeingültig zu leisten.

Als Alternative wurde eine Pumpe mit begrenzter Leistung dem Verbraucherkreislauf vorangestellt, welche nach dem vom Erzeugerkreislauf vorgegebenen Massestrom regelt, ihn aber niemals überschreitet. Die begrenzte Pumpenleistung bewirkt eine automatische Drosselung des Massestroms im

Verbraucherkreislauf bei geschlossenen Ventilen. Die Wirkung des adiabaten Bypassrohrs wurde wiederum mit Hilfe des Adapterelementes hergestellt.

Charakteristisch wirkt sich das Fluidvolumen im Verteilkreislauf und die damit verbundene thermische Trägheit aus. In *Abbildung 3* ist exemplarisch die geregelte Heizlast dargestellt, sowohl kumuliert über alle Heizkörper, als auch als Heizleistung am Vorlaufstrang, die zur Erwärmung rückgeführten Fluides durch den Erzeugerkreislauf nötig ist. Zwischen beiden Kurvenverläufen kommt es zu Abweichungen, welche der thermischen Trägheit des Fluides geschuldet sind. Gleichzeitig schwingt die Heizlast mit einer Wellenlänge, die der Verweildauer des Fluides im Verbraucherkreislauf entspricht. Dieser Effekt geht ebenso auf die thermische Trägheit des Fluides zurück und wurde durch andere Autoren bereits beobachtet (zum Beispiel Fuchs, 2013).

Als Konsequenz muss das Adapterelement anhand der Heizleistung des Erzeugerkreislaufs kalibriert werden. Des Weiteren ergeben sich Beschränkungen für die Kommunikationsschrittweite in der Co-Simulation durch die Wellenlänge der Schwingungen. Diese sind allerdings vergleichsweise lang, im aktuellen Beispiel 20-30 Minuten.

Ergebnisse

Als Demonstrator wurde eine Doppelhaushälfte mit drei Etagen (Erdgeschoss, Obergeschoss, Dachgeschoss) mit ungedämmter Beton-Außenfassade und gedämmter Obergeschossdecke modelliert und durch ein Drei-Zonen-Gebäudemodell abstrahiert (*Abbildung 4*). Die ersten zwei Etagen gelten als Wohnbereich und sind mit einer Fußbodenheizung versehen. Dabei wird soll eine konstante Temperatur von 21 °C erzielt werden. Pro Etage wurden 8 Rohrstränge mit einer Rohrlänge von 70m verlegt (bei ca. 100 m² beheizte Fläche je Etage).

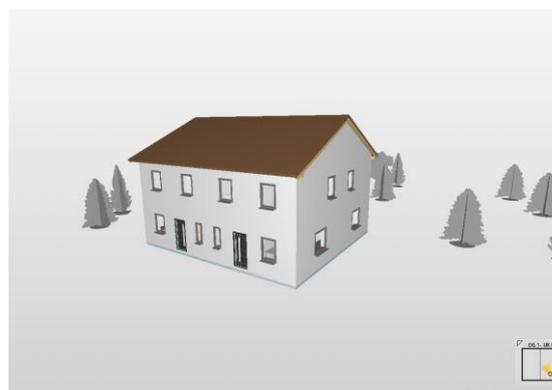


Abbildung 4: Simulator „Doppelhaushälfte“

Die Heizwärme wird durch eine Gasheizungsanlage bereitgestellt. Das zugehörige Modell wurde durch Modelica-Komponenten der Green-City-Bibliothek (GreenCity, 2022) nachgebildet. In *Abbildung 5* ist der Aufbau des Katalogelementes Gaskessel mit Speicher dargestellt.

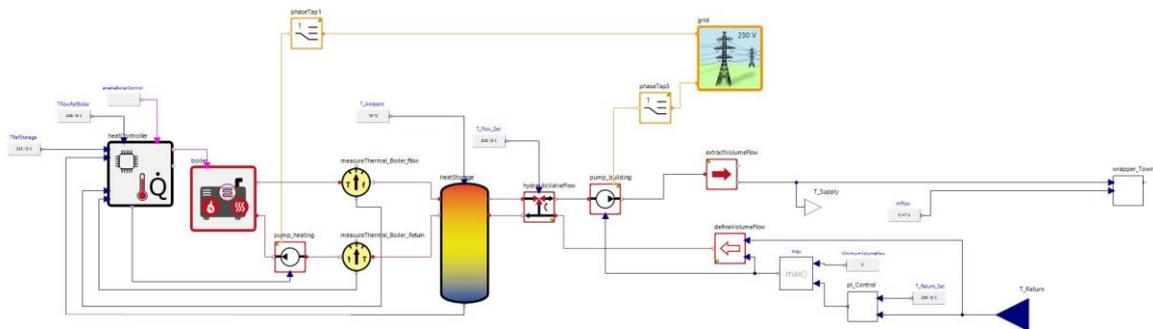


Abbildung 5: Heizanlage mit Gaskessel und Speicher

Eine Regelkomponente regelt den Gaskessel und die Speicherladepumpe auf die Speichertemperatur. Die Ein-/Ausschaltgrenze für den Gaskessel liegt bei ± 5 K, und der maximale Volumenstrom wird bei einer Abweichung der Ist-Vorlauftemperatur von der Soll-Vorlauftemperatur um 3 K erreicht. Das Mischventil regelt die Vorlauftemperatur indem dem wärmeren Vorlauf kaltes Rücklaufwasser beigemischt wird.

Für alle drei Detaillierungsstufen wurden Leistung und maximaler Volumenstrom der Heizungsanlage so parametrisiert, dass die ausreichende Versorgung des Gebäudes gewährleistet ist. Die Co-Simulation ergab mit einer relativ groben Kommunikationsschrittweite von 10min zufriedenstellende Ergebnisse.

Abbildung 6 zeigt den Jahresverlauf der mittleren Raumlufttemperaturen in allen Geschossebenen für die Detaillierungsstufe LOD3. Tabelle 1 zeigt die ermittelten Leistungsdaten für alle Detaillierungsgrade. Es ist davon auszugehen dass Variante LOD3 die qualitativ besten Ergebnisse liefert.

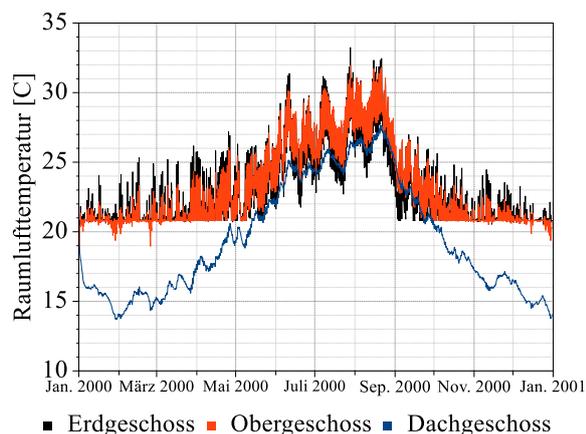


Abbildung 6: Mittlere Raumlufttemperatur für alle Zonen

Tabelle 1: Parameter für hinreichende Versorgung

DETAIL	KESSELLEISTUNG	VOLUMENSTROM
LOD1	11kW	-
LOD2	8kW	-
LOD3	7kW	0.0002m ³ /s

Erwartungsgemäß ist der benötigte maximale Volumenstrom durch die Modellvarianten ohne Verteilungsinformation nicht abschätzbar. Dennoch kann die benötigte Heizleistung durch LOD2 vergleichbar abgeschätzt werden, beim idealisierten Fall LOD1 wird erst bei erheblich höherer Heizlast die hinreichende Versorgung erreicht. Dies ist umso erstaunlicher, als dass die Heizenergie für alle drei Fälle (Abbildung 7) nahezu identisch ist.

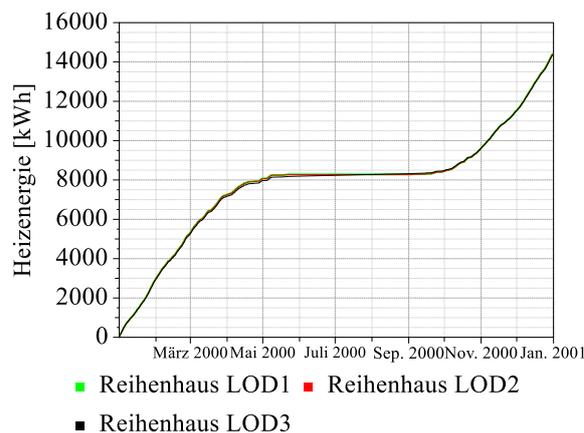


Abbildung 7: Gesamte Heizenergie

Zur Veranschaulichung wurden die Varianten LOD1 und LOD2 mit den geringeren Leistungskennwerten der Variante LOD3 parametrisiert. Abbildung 8 zeigt die errechnete Heizlast und Abbildung 9 die Rücklauftemperatur der letzten Januarwoche.

Wie deutlich wird, kommt es lokal zum Abfall der Rücklauftemperatur für die idealisierten Modellierungsfälle. Dieser Effekt wird durch die vereinfachte Modellierung überschätzt und senkt die erreichbare Vorlauftemperatur im Heizkessel, ein Effekt, der besonders deutlich bei Variante LOD1 zum Tragen kommt. Dieser Temperaturabfall kann erst nach einigen Stunden wieder ausgeglichen werden. Eine weniger sensitive Thermostatregelung wäre denkbar, welche dem beobachteten Temperatursturz entgegenwirkt. Die Bestimmung passender Parameter ist allerdings undeutlich und weicht von der Idealisierung ab, die der Modellvariante LOD1 zugrunde liegt.

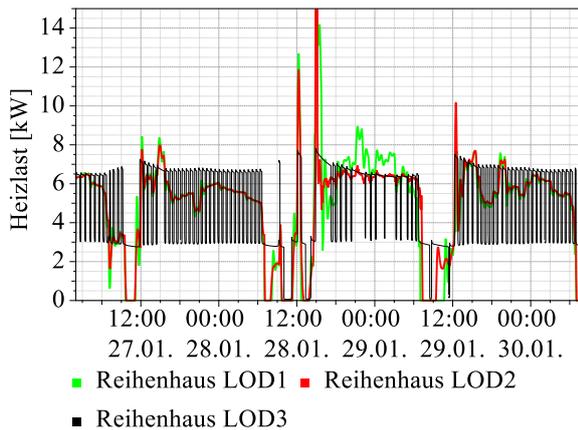


Abbildung 8: Heizlast zwischen Rücklauf- und Vorlaufstrang

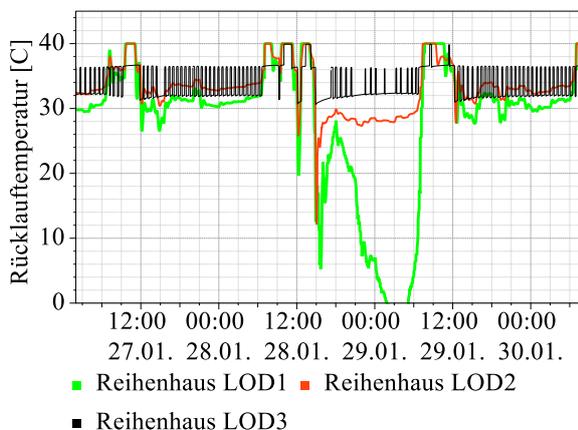


Abbildung 9: Rücklauftemperatur aus dem Gebäude

Zusammenfassung

Durch FMI-Kopplungstechnologien können Szenarien wie die unzureichende energetische Versorgung des Gebäudes aufgezeigt und analysiert werden. Die Abstraktion des Gebäudes als anschlussfähiger Verbraucherstrang und der Heizungsanlage als Erzeugerkreislauf bietet eine physikalische Schnittstellendefinition mit hoher Anwendungsbreite für verschiedene Gebäude- und Anlagenmodelltypen. Gebäudeseitig sind konkrete Fragestellungen, wie zum Beispiel die Abschätzungen von Maximalleistungen, durch idealisierte Modellierungsansätze ohne Kenntnis des hydraulischen Verteilkreislauf lösbar. Die Annahme eines ideal geregelten Heizelementes unter Vernachlässigung der Wärmeübertragung im Fluid unterliegt allerdings einem zu hohen Idealisierungsgrad. Dies äußert sich in Destabilisierungseffekten, die unrealistische Temperaturstürze hervorrufen und damit die Leistungsdaten verfälschen.

Danksagung

Wir bedanken uns für die vom BMWI gewährte Förderung im Rahmen des Projektes FMI4BIM, FKZ 03ET1603A.

Literatur

- Blochwitz et al. 2012. Functional Mockup Interface 2.0: The Standard for Tool independent Exchange of Simulation Models, 9th International Modelica Conference, Munich, Germany.
- Eckstädt, E. et al. 2020. Simulationsszenarien für Gebäudeenergiesimulation in frühen Planungsphasen, BauSIM 2020, Graz, Austria.
- Fuchs, M. 2013. Evaluation of interactions between buildings and district heating networks, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France.
- Green City. 2022. <https://www.ea-energie.de/de/projects/green-city-fuer-simulationx/>
- Hirsch, H. et al. 2022. Detailed modelling of large district heating and cooling network coupled to ground heat exchanger, BauSIM 2022, Weimar, Germany.
- Junghanns, A. et al. 2021. The Functional Mock-up Interface 3.0 - New Features Enabling New Applications, 14th International Modelica Conference, Linköping, Sweden.
- Nicolai, A. et al. 2017. Co-Simulation between detailed building energy performance simulation and Modelica HVAC component models, 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic.
- Paepcke, A. et al. 2016. Schnittstellen für die Co-Simulationskopplung zwischen Gebäude- und Heizungsanlagensimulation, BauSIM 2016, Dresden, Germany.
- Paepcke, A. et al. 2018. Integration verlustbehafteter Verbraucher und Verteil-Netzwerke in dynamischer Gebäudeenergiemodelle am Beispiel von Nandrad, BauSIM 2018, Karlsruhe, Germany.
- Vogel, P. et al. 2017. BIM im Planungsprozess der TGA, GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 138(1), S. 44-52.
- 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.
- Wetter, M. et al. 2021. Software Architecture and Implementation of Modelica Buildings Library Coupling for Spawn of EnergyPlus, 14th International Modelica Conference, Linköping, Sweden.