

INTEGRATION VERLUSTBEHAFTETER VERBRAUCHER UND VERTEILNETZWERKE IN DYNAMISCHE GEBÄUDEENERGIEMODELLE AM BEISPIEL VON NANDRAD

A. Paepcke¹, A. Nicolai¹ und D. Weiß¹

¹Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

KURZFASSUNG

Wärmeübertragung und Wärmeverlustmechanismen von Anlagenkomponenten und ihrer Verteilnetzwerke haben entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit eines Gebäudes. Der Artikel konzentriert sich auf die Integration solcher Modelle in eine dynamische Simulation mit hohem geometrischen Detailgrad. Dabei ist eine numerisch akkurate und effiziente Lösung der Bilanzgleichungen und der algebraischen Kopplungsgleichungen innerhalb des Newton-Algorithmus verpflichtend. Geeignete Algorithmen und ihre Umsetzung werden vorgestellt.

ABSTRACT

Mechanisms of plant component heat transfer and heat loss have a large impact on building energy consumption and thermal comfort. The article focuses on integrating such models into a dynamic simulation with a high geometric detail level. In this case, the numerical solution of the balance equation and the coupled algebraic equations inside Newton's algorithm must be implemented in an accurate and efficient way. The equations lead to large sparse systems, whose structure may become very complex with regard to thermal interaction i.e. between neighbored rooms of the distribution network. We introduce suitable algorithms and implementations.

EINLEITUNG

Der Gebäudeenergiebedarf lässt sich derzeit bereits gut mittels dynamischer Simulationsprogramme abschätzen. Hierbei kommen üblicherweise Mehrzonenprogramme zur Anwendung, bei denen das Gebäude in

charakteristische untereinander verbundene Räume bzw. Raumgruppen unterteilt wird. Bei einer Bedarfsberechnung wird die Wechselwirkung des Gebäudes mit Klima und Nutzer abgebildet, wobei Energie je nach Bedarf den jeweiligen Räumen durch Heizung und Kühlung zugefügt oder entnommen wird.

Die klassische Gebäudeenergiesimulationen erfährt derzeit Impulse durch verschiedene erweiterte Anwendungsszenarien: die Berücksichtigung der Energiebereitstellung und Verteilung im Gebäude durch Anlagenkomponenten, Wärmeverteilnetze und Regelsysteme liefert realistische Leistungsbeschränkungen und führt auf die integrierte Gebäudesimulation. Ansätze hierzu werden sowohl durch klassische Gebäudeenergiesimulationsprogramme wie EnergyPlus, TRNSYS oder IDA-ICE (Castaldo et al., 2018), aber auch Modellentwicklungen auf generischen Plattformen wie Modelica unterstützt (Wetter et al., 2017). Zu nennen sind zudem Kopplungsansätze zwischen Anlagen- und Gebäudesimulation auf Grundlage der FMI-Kopplungstechnologie.

Gleichzeitig werden dynamische Effekte untersucht, die nicht nur das Gebäude zum Zeitpunkt der Auslegungsplanung, sondern auch während der Gebäudelebenszeit abbilden. Hierbei sind detaillierte Wechselwirkungen dynamischer Effekte wie Lastspitzen und thermische Speicherung von Interesse. Dieser Detaillierungsgrad führt auf hochdynamische mathematische Komplexmodelle.

Die numerische Behandlung solcher Modelle erfordert äußerste Sorgfalt. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die Berechnung komplexer

Modells zu vereinfachen. Dabei können jedoch Aussagen vereitelt oder verfälscht werden. Die Schätzung und Bereitstellung einer vorgegebenen numerischen Genauigkeit ist durch vorhandene mathematische Methoden möglich und liefert eine Kontrolle der Simulationsergebnisse. Die Forderung nach fehlerkontrollierten Lösungsverfahren für die Modellgleichungen ist nach Meinung der Autoren notwendig und zeitgemäß. Weiterhin sollte die numerische Lösung Stabilität und Konsistenz garantieren, um numerische Ausreißer oder unplausibles Verhalten zu verhindern. Nicht zuletzt sollte die Simulationsgeschwindigkeit in einem akzeptablen Rahmen von Minuten bis wenigen Stunden auf einem Bürorechner liegen, was die Voraussetzung für die Anwendung solcher Instrumente innerhalb des Planungsprozesses ist.

Am Institut für Bauklimatik wurde in den letzten Jahren ein Rechenkern unter diesen Maßgaben entwickelt; das Gebäudeenergiesimulationsprogramm NANDRAD (Nicolai et al., 2012; Paepcke et al., 2014).

GEBÄUDESIMULATION NANDRAD

Das Simulationsmodell NANDRAD zeichnet sich durch einen hohen Detaillierungsgrad bei der Abbildung der Gebäudehülle ab. Speziell für die schweren Wandbauteile in Deutschland/Europa konzipiert, bildet es die verfügbare thermische Speichermasse ein- oder mehrschichtiger Konstruktionen durch Verwendung der Finite-Volumen-Methode für alle Flächenbauteile besonders präzise ab. Eine solche Genauigkeit ist beispielsweise bei der Berücksichtigung dynamischen Aufheizverhaltens relevant, vor allem im Sommer ohne aktive Klimatisierung. Die Modellierung berücksichtigt passend detailliert die klimatischen Einwirkungen und Randbedingungen. Zudem löst NANDRAD bei Anforderung die langwelligen Strahlungsbilanzen zwischen den Wandoberflächen (Validierung nach (DIN EN ISO 13791, 2012)). Damit ist die Wärmeübertragung durch langwellige Strahlung genau abbildbar. Thermische Zonen werden durch Luftknoten in einem Mehrzonennetzwerk beschrieben, wobei eine ideale Vermischung der Raumluft vorausgesetzt wird. Details zum physikalischen Modell sind in (Paepcke, 2017) zu finden.

Zur Bestimmung der Gebäudetemperaturen wird für jeden Raumluftknoten eine Energiebilanzgleichung gelöst, für jede Konstruktion mehrere Bilanzgleichungen, je eine für jedes Finite Volumen. Insgesamt führt der Modellansatz auf ein gekoppeltes System gewöhnlicher Differentialgleichungen.

Geometrische Verbraucherkomponenten

Heizkörper bilden Quellen für die Energiebilanzen. Sie können durch einen Wärmequelle innerhalb der Raumluft oder in einer Wandschicht repräsentiert werden, siehe Abbildung 1. Die Menge der abgegebenen Wärmeenergie muss hierbei durch ein geeignetes Anlagenmodell beschrieben werden.

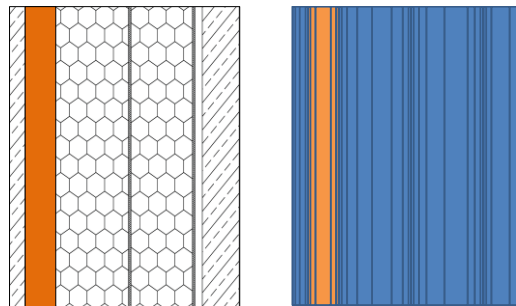


Abbildung 1: Wärmeabgabe eines Heizelementes innerhalb einer aktiven Wandschicht (orange markiert) und typische Wandschichtstruktur

Fußbodenheizungen beispielsweise werden in NANDRAD als thermisch aktive Flächenbauteile modelliert. Der hohe geometrische Detaillierungsgrad der Wandmodelle erlaubt hierbei die Berücksichtigung thermischer Speicher- und Verzögerungseffekte.

Numerisches Lösungsverfahren

Die Bilanzgleichungen bilden ein steifes System von Differentialgleichungen. Dafür sind unter anderem die Energiebilanzgleichungen der Wände verantwortlich, welche als räumlich diskretisierte Simulationsgebiete die wandinterne Wärmeleitung berücksichtigen. Als geeignete Kandidaten für die numerische Lösung solcher Systeme sehen die Autoren implizite Zeitintegrationsverfahren als einzige sinnvolle Wahl.

In NANDRAD werden die Gleichungen durch ein implizites Mehrschrittverfahren mit variabler Methodenordnung und adaptiver Zeitschrittsteuerung gelöst (Integrator in Abbildung 2). Letztere verwendet einen Fehlerschätzer zur Anpassung der Zeitschritte, üblicherweise in der

Größenordnung von Millisekunden bis zu maximal 30 Minuten, und erzwingt eine wiederholte Lösungskorrektur, bis eine nutzerdefinierte numerische Genauigkeit erreicht ist.

Die implizite Formulierung des Verfahrens erfordert die mitunter mehrmalige Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems in jedem Zeit- oder Zeitkorrekturschritt. Zu diesem Zweck kommt ein Newton-Verfahren zum Einsatz.

Auswertung der Systemfunktion

Integrator und eingebettetes Newton-Verfahren sind modellunabhängig implementiert. Die Lösungssuche wird vom Integrator durch den Vorschlag einer möglichen Lösung y und Auswertung der Systemfunktion $f(t, y)$ als Antwort des physikalischen Modells konstruiert. Die Lösung entspricht im Fall von NANDRAD den gegebenen Erhaltungsgrößen für alle Bilanzgleichungen. Die Systemfunktion ist vektorwertig und enthält die Änderungsraten der Energiebilanzgleichungen in Folge von Quellen und Senken. Der Integrator ermittelt aus dieser

Information die Zeitableitung aller Erhaltungsgrößen \dot{y} .

Die Auswertung der Systemfunktion bedingt die Lösung aller *algebraischen Zusammenhänge* und die Ermittlung aller Kopplungsgrößen. So müssen in einem Rohrleitungsnetzwerk die voneinander abhängigen Fluidtemperaturen und Strömungsraten bekannt sein, um die Wärmeabgabe der Heizkörper an den Raum und daraus resultierende Wärmequellen an die Zonen oder Wände berechnen zu können.

Auswertung des physikalischen Modells

Algebraische Zusammenhänge und Modellberechnungen, die zu verschiedenen Quellen und Senken beitragen, sind in zustandsbasierten Modellobjekten gekapselt, die voneinander abhängen können. Die einzelnen Modellobjekte werden in einem beliebig erweiterbaren Graphen zusammengefasst, die Bestimmung einer sinnvollen Auswertungsreihenfolge unterstützt.

Diese Modellstruktur ist sehr gut geeignet für die Erweiterung um Rohrnetzwerkmodelle.

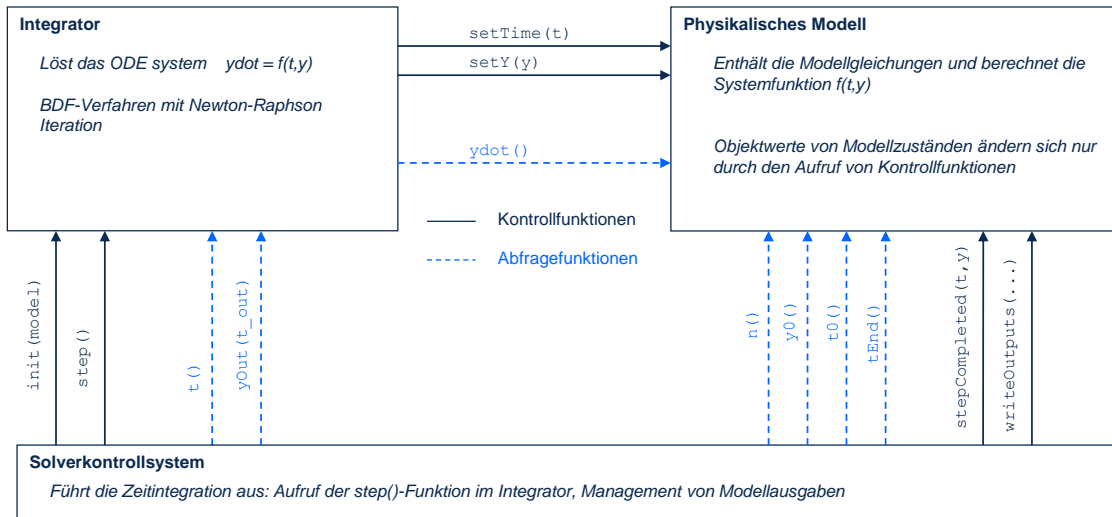


Abbildung 2: Struktur des Integrators, nichtlinearen Gleichungssystemlösers und Zusatzfunktionen (Nicolai et al., 2011)

Newton-Verfahren und Lösung der eingebetteten linearen Gleichungssysteme

Innerhalb der Integrator-Schleife kommt ein Newton-Verfahren zum Einsatz, welches die nichtlineare Lösung durch eine Iteration linearer Ersatzsysteme approximiert. Die effiziente Assemblierung und Umsetzung dieses

Verfahrens bildet die Kernaufgabe eines effizienten Algorithmus.

Zunächst wird die Ableitungsinformation in Form der Jacobi-Matrix ermittelt und durch Differenzen-Quotienten approximiert. Diese Differenzen-Quotienten registrieren Änderungs-

raten der Systemfunktion $f(t, y)$ für verschiedene Lösungsvorschläge und müssen dabei die vollständige Modelldimension abbilden. Daher sind häufige Auswertungen der Systemfunktion die Regel. Implementiert wurde ein Coloring-Verfahren, welches den Auswertungsaufwand bereits drastisch reduziert. Dennoch lässt sich die wiederholte Auswertung der Systemfunktion nicht vermeiden. Daher muss insbesondere die Berechnung der enthaltenen algebraischen Zusammenhänge besonders effizient erfolgen.

Einen numerisch aufwendigen Schritt stellt die Lösung des linearen Gleichungssystems dar. Dabei ist vor allem Struktur und Dimension der Jacobi-Matrix von Interesse, die bei realen Gebäudetypen üblicherweise groß (>10000 Unbekannte), jedoch sehr schwach besetzt ($<0.1\%$ Besetzungsgrad) ist. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Struktur der Jacobimatrix eines Gebäudes mit 2 Zonen und 3 Wänden, welche jeweils in 4 Finite-Volumen diskretisiert wurden.

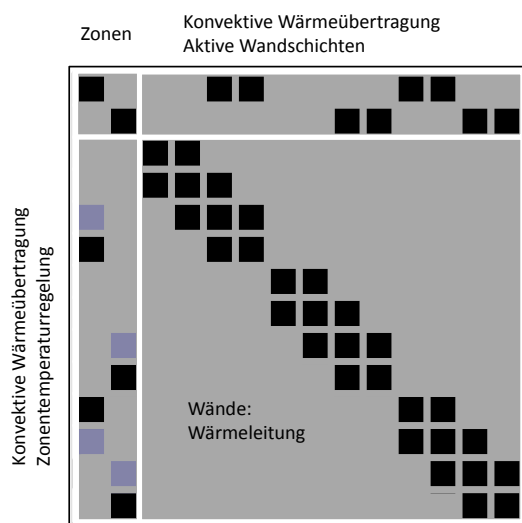


Abbildung 3: Besetzungsstruktur der Jacobimatrix: Oberer Diagonalblock = Zonenwechselwirkungen; Unterer Diagonalblock = Wechselwirkung der Temperaturen der Finiten Volumen in der Wand; Oberer rechter Block = Wirkungen der Wandoberflächentemperaturen auf die Zonenbilanz; Unterer linker Block = Wirkungen der Zonentemperaturen auf die Wandbilanzen

Dieses schwach besetzte lineare Gleichungssystem weicht stark von typischen Bandstrukturen ab, für welche klassische direkte Lösungsverfahren optimiert sind. Daher ist der Einsatz von Verfahren für schwachbesetzte Matrizen entscheidend für eine performante numerische Lösung. In NANDRAD finden iterative Krylow-Unterraumverfahren mit einem

ILU-Vorkonditionierer Verwendung. Insbesondere bei größeren Gebäuden erweist sich diese Verfahrenskombination als ausgesprochen effizient.

Co-Simulation

Bislang konnte detaillierte Anlagentechnik und Wärmeverteilsysteme nur durch FMI-Kopplung an Anlagenmodelle realisiert werden. Umgesetzt und getestet wurde dabei die Co-Simulations-Kopplung für das passive Gebäude (Paepcke et. al. 2016, Nicolai et al., 2017). Die gekoppelten Anlagenkomponenten liefern dabei Einträge konvektiver Wärme oder Strahlungswärme an die Zonenbilanz. Gerade bei stark dynamischer Interaktion von Anlage und Gebäude, z.B. bei Verwendung von Flächenheizkörpern und Gebäudeteilen als thermischen Speichern, erweist sich diese Form der Kopplung als ungünstig: Eingeschränkte Stabilitätsbereiche der globalen Zeitintegrationsmethoden erzwingen sehr kleine Kommunikationsintervalle und führen zu inakzeptabel langen Simulationszeiten.

ERWEITERUNG UM ROHRLEITUNGSNETZWERKE

Die Integration von Rohrleitungen und Heizkörper der Verbraucherseite in das Gebäudesimulationsprogramm ermöglicht es, stark gekoppelte Zusammenhänge innerhalb einer gemeinsamen Lösungsumgebung zu behandeln. Davon versprechen sich die Autoren einen Gewinn an numerischer Stabilität und Simulationsgeschwindigkeit im Vergleich zur bisher vorhandenen Co-Simulationslösung. Mit einer robusten numerischen Lösungsumgebung geht eine höhere Flexibilität in der Modellbildung einher, vor allem was die Komplexität und den Detailgrad der verwendeten Modelle betrifft.

Darüber hinaus können Leitungsverluste des Rohrnetzwerkes an die beteiligten thermischen Zonen beobachtet und bilanziert werden. Die Information über die Lage der Rohrleitungen ist hierfür notwendig. Daher ist es naheliegend, die Netzwerkarchitektur in dem BIM-basierten Datenmodell abzulegen, welches für die Parametrisierung des Simulationsmodells verwendet wird und folglich Kenntnisse über Gebäudegeometrie und Lage der Zonen besitzt. Dass die Generierung der entsprechenden Berechnungsmodelle für Rohrstücke, Heiz-

körper, Thermostate/Ventile innerhalb des Gebäudemodells und nicht in einem externen Programm erfolgt, ist eine zwingende Konsequenz.

Auswirkung auf Systemfunktion

Die Enthalpieströme im Rohrnetzwerk sowie der Temperaturunterschied zwischen Fluid und Umgebung sind verantwortlich für die Wärmeeinträge in der beheizten Zone oder Wandschicht. Diese gehen folglich in die Berechnung der dynamischen Bilanzgleichungen ein. Die zugehörigen Massenströme im Rohrleitungsnetzwerk sind allerdings bedarfsabhängig und werden durch die Pumpenleistung und die Ventilstellungen der Heizkörperthermostate beeinflusst. Folglich ist die Temperatur der jeweiligen Zonen sowohl Systemgröße der Gebäudesimulation als auch Regelgröße für die Rohrnetzwerkberechnung.

Die Druck- und Massestromverteilung im Rohrnetzwerk genügt einem stationären nichtlinearen Gleichungssystem. Somit ist die Rohrnetzwerkberechnung Teil der Systemfunktion und muss möglichst effizient umgesetzt werden (siehe Erweiterung 1 und 2).

Auswirkung auf Jacobi-Matrix

Konvektiver Wärmetransport in einem Rohrleitungsnetzwerk führt zu Verlusten der Fluidtemperatur aufgrund der Wärmeabgabe im Heizelement oder Wärmeverlusten an die Umgebung. Thermische Wechselwirkungen im Gebäude entstehen daher nicht länger nur durch Wärmeaustausch der Zonenluftknoten mit den Wandoberflächen und Wärmetransport durch die Wand. Alle im Rohrnetzwerk verbundenen Zonen geraten in direkten thermischen Austausch miteinander, und die Zonenbilanzen sind untereinander gekoppelt.

Diese Zusammenhänge haben Auswirkungen auf die Newton-Raphson-Methode. Insbesondere die Assemblierung der Jacobi-Matrix muss hierbei besonders sorgfältig erfolgen, um Konvergenzproblemen des Verfahrens vorzubeugen. Alle durch das Rohrnetzwerk gegebenen Kopplungen erzeugen Einträge der schwachbesetzten Jacobimatrix, wie beispielsweise zwischen den Temperaturen und Energiebilanzen unterschiedlicher Zonen eines Netzwerkes in Abbildung 4.

Typische Simulationen können folglich auf beliebig komplexe Besetzungsmuster führen. Die Modellierung von Wandheizelementen beispielsweise stellt direkte Zusammenhänge zwischen Zonentemperaturen und Wandbilanzen her, die zusätzlichen Einträge in den Nebendiagonalblöcken der Matrix entsprechen. Eine manuelle Bestimmung der Jacobi-Besetzung ist nicht mehr allgemeingültig möglich.

Zonenwechselwirkung im Rohrnetzwerk

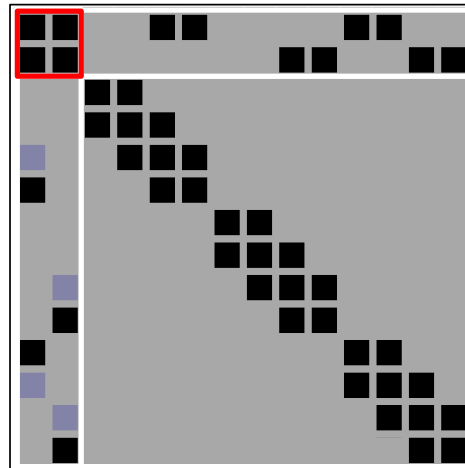


Abbildung 4: Zusätzliche Einträge in der Jacobi-Matrix bei konvektiven Heizkörpern in einem Rohrnetzwerk

Erweiterung 1 – Effiziente Berechnung der Systemfunktion

Die NANDRAD-Modellstruktur besteht aus einem Graphen voneinander abhängiger Modellobjekte. Ein Modellgraph eines Gebäudes ohne Rohrnetzwerk enthält zunächst nur geordnete Zusammenhänge. Ausgehend von gegebenen Eingangsgrößen (konkret Erhaltungsgrößen der Bilanzgleichungen) lassen sich alle Modellobjekte nacheinander auswerten, wobei ein Modellobjekt dabei stets auf vorab von anderen Modellobjekten berechnete und zwischengespeicherte Ergebnisse zugreifen kann.

Modellobjekte in Rohrleitungsnetzwerken sind hingegen zyklisch verbunden. Die Rohrleitungen, welche die Architektur für die Berechnung der Masseströme und Druckverluste definieren, sind bereits zur Modellierungszeit bekannt und werden in ein gemeinsames Modellobjekt gekapselt.

Komplexer gestaltet sich die Berechnung der Fluidtemperaturen. Die Energiebilanzen im Fluid sind nicht auf die Rohrnetzwerke beschränkt,

sondern berücksichtigen Wärmeabgabe an die Umgebung und Wechselwirkung zwischen verschiedenen Rohrsystemen, so zum Beispiel in einem Wärmetauscher. Das System zyklisch gekoppelter Modellobjekte ist folglich erst zur Laufzeit bekannt und enthält viele Elemente. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, wurde der Graphenalgorithmus, welcher die Auswertungsreihenfolge berechnet, um eine effiziente Zykluserkennung erweitert. Die Implementierung basiert auf (Bastian et al., 2011), ist jedoch auf die Datenstrukturen im NANDRAD (Modellobjekte) angepasst. Alle Modellobjekte eines Zyklus werden dabei in einer Modellgruppe zusammengefasst, welche nachfolgend wie ein einzelnes Modellobjekt behandelt wird. Dieses Modellgruppen-Objekt vereint die Abhängigkeiten aller der Gruppe zugehörigen Modellobjekte.

Erweiterung 2 – Berechnung von Masse- und Enthalpieströmen im Netzwerk

Die Berechnung von Masseströmen erfolgt unter Berücksichtigung von Druckverlusten in einem eigenen Berechnungsmodell. Die Energiebilanz im Fluid hängt direkt von den zugehörigen Enthalpieströmen ab, aber die Systemgrenzen sind größer als das eigentliche Rohrnetzwerk und zur Modellierungszeit unbekannt. Daher wird die Berechnung der Enthalpieströme unabhängig von der Verteilungsberechnung vorgenommen und durch einen generischen Lösungsalgorithmus ausgeführt.

Rohrnetzwerke erzeugen schwachbesetzte lineare oder nichtlineare Gleichungssysteme. Als geeignetes Lösungsverfahren für solche Problemklassen bewährt sich der KLU-Algorithmus (Davis et al., 2010), der in der Implementierung der KINSOL-Bibliothek (Hindmarsh et al., 2005) integriert ist. Dieses Verfahren wurde für die Rohrverteilungsberechnung und die Lösung der Energiebilanzgleichungen im Fluid adaptiert.

Erweiterung 3 – Bestimmung der Jacobi-Besetzungsstruktur

Die Bestimmung der Jacobi-Matrix bei Anwesenheit von verlustbehafteten Rohrnetzwerken erfolgt automatisiert. Zu diesem Zweck werden die Modellgleichungen in Differentialgleichungen und algebraische Gleichungen eingeteilt. Die Auswertung der Systemfunktion beinhaltet die Lösung aller algebraischen

Zusammenhänge. Heizkörpergleichungen benachbarter Räume 1 und 2 im Rohrnetzwerk sind beispielsweise algebraische Gleichungen. Diese werden bei Auswertung der Systemfunktion gelöst, innerhalb des Systems eliminiert und schaffen so einen transitiven Zusammenhang zwischen Raumtemperatur 1 der Fluidtemperatur am Heizkörpereinlass, der Heizkörpergleichung der Netzwerkvorgängerkomponente zur Raumtemperatur von Raum 2, vergleiche Abbildung 4.

Diese Operation lässt sich durch die Inversion innerhalb einer Block-Matrix abstrahieren: Die algebraischen Gleichungen werden eliminiert und die zugehörigen Zustände als Unbekannte aus dem System entfernt. Das resultierende System enthält alle transitiven Verbindungen, die innerhalb der eliminierten Gleichungen kodiert sind.

In NANDRAD wird die Elimination von Gleichungsblöcken von der Ermittlung der transitiven Hülle begleitet. Hierfür hat sich der Algorithmus von Floyd-Warshall (Floyd, 1962; Warshall, 1962) als effiziente Methode bewährt. Insbesondere erlaubt der Algorithmus die Auswahl einer Teilmenge an Gleichungen, im konkreten Fall aller algebraischen Gleichungsblöcke. Die Ermittlung der Besetzungsstruktur erfolgt auf Basis von Bit-Operationen, die besonders effizient sind. Die originale Besetzung der isolierten Energiebilanzgleichungen für Wände und Räume zusammen mit den Einträgen aus der transitiven Hülle ergeben die Jacobi-Besetzung für das globale ODE-System.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Zur Demonstration wurde ein Haus mit zwei bewohnten Etagen identischen Grundrisses gemäß Abbildung 5 und einem darüber liegenden Dachgeschoss generisch erzeugt (Weiß et al., 2018). Alle Zimmer mit Ausnahme des Daches und des Flurs wurden vereinfacht mit je einer Fußbodenheizung versehen. Die Rohrzuleitung erfolgt durch den Flur von Erdgeschoss und erster Etage, wobei Rohrleitungsverluste berücksichtigt werden. Insgesamt modelliert das Beispiel 13 Zonen, davon 10 beheizte Zonen, 67 Wände mit einer Finite-Volumen Diskretisierung von durchschnittlich 25 Elementen. Dies führt auf insgesamt ca. 1700 Energiebilanzgleichungen.

Die Räume wurden im Sinne einer Referenzlösung mit einer idealen Heizung mit Raumlufttemperaturkontrolle durch einen P-Regler versehen. In einem zweiten Schritt wurde das Heizelement vom Raum in eine Estrich-Schicht der Fußböden versetzt, jedoch immer noch ideal nach der Raumlufttemperatur geregelt. Die abschließende Berechnung modelliert das Heizelement als gewundenen Rohrstrang in einem hydraulischen Netzwerk. Die Raumlufttemperaturregelung erfolgt dabei durch ein Drosselventil vor dem Heizelement (P-Regelung des Strömungswiderstandes bis zu einem sehr hohen Maximalwert). Die benötigte Wassermenge wird durch eine stufenlos regelbare Pumpe mit konstantem Differenzdruck bereitgestellt.

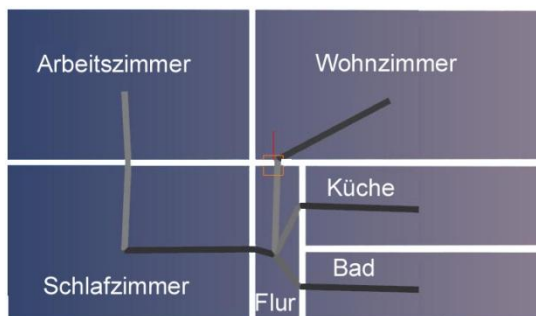


Abbildung 5 Grundriss und Rohrleitung für Erdgeschoss und Obergeschoss

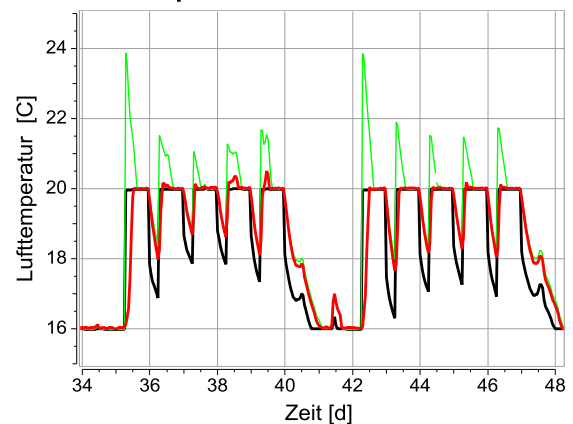
Die sequentielle Berechnung benötigt eine Simulationszeit von ca. 15 Minuten für eine Jahressimulation bei idealer Heizung, ca. 30 Minuten für die Simulation mit integriertem Rohrnetzwerk auf einem Bürorechner. Die Simulationszeiten werden für eine Ingenieuranwendung als akzeptabel eingestuft.

Abbildung 6 zeigt die Raumlufttemperaturen exemplarisch für Arbeitszimmer und Flur der Wohneinheit im Erdgeschoss für die ersten zwei Arbeitswochen des Februars. Das Arbeitszimmer wird in den Nachtzeiten und am Wochenende als nicht belegt eingestuft, die Temperaturvorgaben schwanken zwischen 20°C zu Belegungszeit und 16°C in den Pausenzeiten.

Auffallend ist, dass bei dem Wandheizsystem im Rohrnetzwerk (rote Kurve in Abbildung 6) die Solltemperatur zu Beginn der Wochenarbeitszeit verzögert erreicht wird (zwei bis drei Stunden). Dieser Effekt ist auf die thermische Trägheit der Bodenkonstruktion zurückzuführen. Zur Veran-

schauung wurde die Wandheizung ideal ohne Rohrnetzwerk simuliert (grüne Kurve in Abbildung 6). Hier stellt sich das gewünschte minimale Temperaturniveau im Raum zwar pünktlich ein, dabei kommt es allerdings zu einem Überschwingen der Raumlufttemperatur, bis nach zwei bis drei Stunden ebenso die Solltemperatur erreicht wird.

Lufttemperaturen im Arbeitszimmer EG



Lufttemperaturen im Flur EG

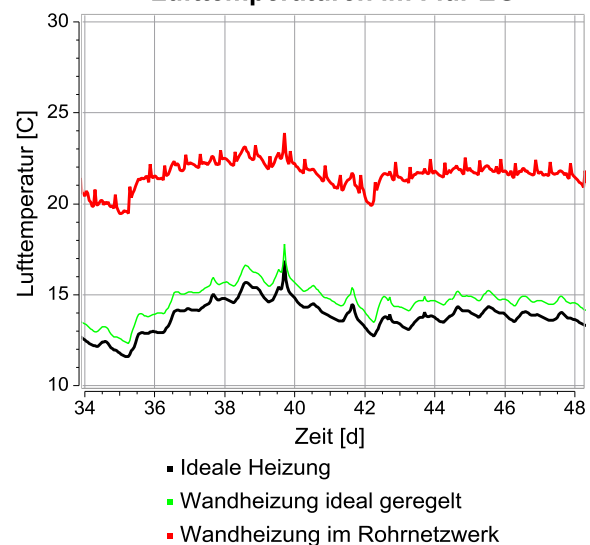


Abbildung 6 Raumlufttemperaturen für verschiedene Simulationsszenarien

Die Einbindung der Heizung in ein hydraulisches Netzwerk liefert hingegen Schranken für die maximale Heizleistung. Dies macht sich in einem geringeren Temperaturanstieg und dem Fehlen des Überschwingens bemerkbar. Zusätzliche Leitungsverluste entstehen durch Wärmeabgabe der Zuleitungsrohre im Flur, ein Effekt, der für die Erhöhung der Flurtemperatur verantwortlich ist, siehe Abbildung 6.

Die beobachteten Effekte werden als realistisch eingeschätzt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Integration von Rohrnetzwerken in ein dynamisches Gebäudesimulationsmodell erfolgt mit dem Ziel, Wechselwirkungen dynamischer Effekte und thermischer Speichermechanismen im Gebäudebetrieb detailliert abbilden zu können. Vorteile im Vergleich zur Simulationskopplung werden vor allem in einer stabilen und effizienten numerischen Umsetzung gesehen.

Aus der Modellerweiterung ergeben sich verschiedene mögliche Weiterentwicklungen: Die FMI Co-Simulation kann durch alternative Schnittstellen unterstützt werden, die geringere Kopplung aufweisen und eine stabilere Simulation erlauben, so zum Beispiel durch die Kopplung von Erzeuger- und Verbraucher-Kreislauf. Die Parallelisierung der Systemfunktion und der Newton-Iteration bietet sich als Ansatz an, eine weitere Verbesserung der Simulationsperformance zu erzielen. Die Erweiterung der verfügbaren Lösungsmethoden, insbesondere die Implementierung eines ILUT-Vorkonditionierers für die dynamischen Bilanzgleichungen bietet Möglichkeiten, die schwache Besetzungsstruktur noch besser zu berücksichtigen und weitere Effizienzgewinne zu erzielen.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung gewährte Förderung im Rahmen des Projektes „NANDRAD-PR“, Projektnr. 10.08.18.7-16.31.

LITERATUR

- Bastian, J. et al. 2011. Master for co-simulation using FMI. Proc. of the 8th International Modelica Conference, Dresden.
- Braun et al. 2017. Solving large-scale Modelica models: new approaches and experimental results using OpenModelica, Modelica Conference 2017, Prag.
- Castaldo, L.V. 2018. Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review, WIREs Energy Environ. 2018.
- Davis, T.A. et al. 2010. Algorithm 907, KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems, ACM Transactions on Mathematical Software 37(3), 2010.
- DIN EN ISO 13791 2012. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren, 2012.
- Floyd, R.W. 1962. Algorithm 97, Communications of the ACM 5, 1962, S. 345.
- Hindmarsh, A.C. et al. 2005. SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers. ACM Transactions on Mathematical Software 31(3), 2005, S. 363-396.
- Nicolai, A. et al. 2011. Towards a semi-generic simulation framework for mass and energy transport in porous materials, Proc. of the 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland.
- Nicolai, A., et al. 2012. Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD – Physikalisches Modell, Umsetzungskonzept und Technologien im Überblick, BauSIM 2012, Berlin.
- Nicolai, A. et al. 2017. Co-Simulation between detailed building energy performance simulation and Modelica HVAC component models, Modelica Conference 2017, Prag.
- Paepcke, A. et al. 2014. Anlagenregelung in ODE-Systemen am Beispiel der thermischen Raum- und Gebäudesimulation, BauSIM 2014, Aachen.
- Paepcke, A. et al. 2016. Schnittstellen für die Co-Simulationskopplung zwischen Gebäude- und Heizungsanlagensimulation, BauSIM 2016, Dresden.
- Paepcke, A. 2017. NANDRAD 1.4 building simulation model, url: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-230427>.
- Warshall, S. 1962. A Theorem on Boolean Matrices, Journal of the ACM 9(1), 1962, S. 11–12.
- Wetter, M. et al. 2017. New generation computational tools for building and community energy systems, Final Report, IEA EBC Annex 60.
- Weiß, D. et al. 2018. Algorithmus zur Aufbereitung generischer Quartiere für die thermische Mehrzonen-Simulation mit dem Gebäudesimulationssolver NANDRAD, BauSIM Konferenz, 2018, Karlsruhe.