

ANLAGENREGELUNG IN ODE-SYSTEMEN AM BEISPIEL DER THERMISCHEN RAUM- UND GEBÄUDESIMULATION

Anne Paepcke¹, Andreas Nicolai¹

¹Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden

KURZFASSUNG

Neben der Bewertung der Gebäudeeffizienz tritt innerhalb der Praxis zunehmend die thermische Behaglichkeit als zusätzliche Forderung in den Fokus. Deshalb hat sich die thermische Analyse sowohl auf der Gebäudeebene als auch auf Raumebene etabliert. Vorgestellt werden die Programme NANDRAD für die Multizonensimulation und HAJAWEE für die geometrische Raumsimulation. Beide Modelle berücksichtigen Speichermassen der Gebäudehülle sowie im Raum und erlauben die Integration von stationären Anlagenmodellen wie zum Beispiel Heizungen mit idealer Regelung. Die Bilanzgleichungen beider Modelle sind eingebettet in eine Integrationsplattform, welche die Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen (ODE-Systeme) der Raum- und Wandbilanzen numerisch löst. Dies bietet Vorteile für die Wahl effizienter Lösungsmethoden. Die stationären Bilanzgleichungen des langwelligen Strahlungsaustausches und der idealen Heizung sind allerdings innerhalb der Modellgleichungen auszuwerten. Dies kann zu linearen oder nichtlinearen Kopplungen führen, welche geeignet behandelt werden müssen. Die Lösungsstrategien für stationäre Gleichungen in NANDRAD und HAJAWEE werden vorgestellt und im Vergleich zu etablierten Programmen wie EnergyPlus ausgewertet.

Besides the evaluation of the energy efficiency of buildings thermal comfort analysis has become an increasing focus in practical application. Consequently, thermal analysis of the building as well as room simulation has established. We present the multi zone simulation program NANDRAD and the geometric room model HAJAWEE. Including steady state models for plant components both programs take into consideration the thermal storage properties of the walls and the room. We integrate the balance equations into an integrator framework which numerically solves the systems of ordinary differential equations (ODE-systems) arising from the room and the wall balance equations. This design is advantageous with regard to an efficient numerical solution. We interpret the steady state long wave radiation balance and the ideal heating equations as

part of the model evaluation block. Therefore, linear or nonlinear couplings may occur. We represent and the solution strategies for coupled steady state equations of NANDRAD and HAJAWEE and compare the results with established simulation programs like EnergyPlus.

Einleitung

Für die Bilanzierung des Energiebedarfs in Räumen und Gebäuden werden zum derzeitigen Stand der Technik sowohl statische als auch dynamische Methoden eingesetzt. Während statische Methoden einen Zugang zu einfachen analytischen Lösungsansätzen bis hin zur Handberechnung bieten, erlaubt die dynamische Simulation eine Berücksichtigung der thermischen Gebäudespeichermasse. Somit bilanzieren dynamische Berechnungen die verzögerte Gebäudereaktion auf Heizregelstrategien und schätzen folglich den Energiebedarf realistischer ein. Allerdings sind die zugrundeliegenden Gleichungen komplexer als im stationären Fall und benötigen eine numerische Simulationsumgebung.

Innerhalb der Forschungslandschaft haben sich dynamische Gebäudesimulationsprogramme etabliert, welche eine generische Erweiterung der Modellgleichungen durch den Nutzer ermöglichen. Hierzu zählen die Programme EnergyPlus (EnergyPlus, 2010), TRNSYS (TRNSYS, 2010), IDA ICE (Sahlin et al., 2004), aber auch Bibliotheken auf Basis der Modelica-Sprache (Nyttsch-Geussen et al., 2004), (Wetter, 2009).

Diesen Programmen ist gemein, dass sie eine numerische Lösungsumgebung anbieten, welche universell auf alle implementierten und nutzerdefinierten Gleichungen angewendet wird. EnergyPlus und TRNSYS lösen Systeme dynamischer Gleichungen, verwenden allerdings hierbei numerische Verfahren, welche sich nicht auf dem aktuellen technischen Stand befinden wie explizite Eulerintegration und Einschrittverfahren in Verbindung mit Fixpunktiteration und fester Zeitschrittweite (Renon, 2002), (Wetter et al., 2006). Alle Modelica-basierten Bibliotheken sowie IDA ICE setzen hingegen auf implizite Verfahren zur Lösung gemischter Systeme aus dynamischen und stationären Gleichungen, kontrollieren

Zeitintegrations- und Konvergenzfehler und verwenden eine adaptive Zeitschrittweitensteuerung.

Die am Institut für Bauklimatik entwickelten Programme zur Gebäude- und Raumsimulation NANDRAD und HAJAWEE (Nicolai et al., 2012), (Paepcke et al., 2013) nutzen eine gemeinsame modulare Solver-Bibliothek, die Integrations-Plattform (Nicolai et al., 2011). Dabei werden die Problemstellungen der Simulation durch implizite Verfahren gelöst, welche ebenso zeitschritt- und konvergenzkontrolliert sind. Allerdings wurde sich bei der Konzeption der numerischen Lösung auf Systeme von Differentialgleichungen konzentriert. Konkret wird für beide Programme sowohl die thermische Speichermasse der Gebäudewände als auch die Speicherfähigkeit von Einrichtungsgegenständen berücksichtigt. Daher sind alle Bilanzen, welche das passive Gebäude umschreiben, dynamischen Types und können durch die Methoden der Integrations-Plattform direkt behandelt werden. Anlagenkomponenten und stationäre Wärmeaustauschmechanismen hingegen liefern statische Nebenbedingungen, welche auf der Modellebene aufgelöst werden. Diese Lösungsstrategie bietet im Kontext der Raum- und Gebäudesimulation Vorteile, welche den Modellierungsmehraufwand rechtfertigen und im Folgenden erläutert werden sollen.

DIFFERENTIALGLEICHUNGS- SYSTEME UND GEMISCHE DIFFERENTIAL-ALGEBRAISCHE GLEICHUNGSSYSTEME IN DER GEBÄUDESIMULATION

Während die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD ein Mehrzonenmodell abbildet, beschreibt die Raumsimulation HAJAWEE geometrisch die Einflüsse von Wärmeleitung und Wärmestrahlung auf die thermische Behaglichkeit im Raum. Beide Modelle bilanzieren die Wärmeströme durch Wärmeaustausch mit der Wand $\dot{Q}_{W,i}$, Wärmetransmission und Solarstrahlung durch die Fenster $\dot{Q}_{F,i}$ in den Raum, die an den Raum abgegebene Heizleistung $\dot{Q}_{H,i}$, Lüftungsgewinne oder -verluste \dot{Q}_L und thermische Lasten durch die Raumnutzung \dot{Q}_N . Kummulativ bewirken diese Wärmeeinträge eine Änderung der inneren Energie des Raumes Q_R nach Gleichung (1).

$$\frac{dQ_R}{dt} = \sum_i^{n_W} \dot{Q}_{W,i} + \sum_i^{n_F} \dot{Q}_{F,i} + \sum_i^{n_H} \dot{Q}_{H,i} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_N \quad (1)$$

Die Wärmeströme sind hierbei temperaturabhängig. Beispielsweise kann die Heizleistung im Raum durch einen P-Regler kontrolliert werden, welcher die Temperaturdifferenz zwischen der Solltemperatur

T_{Setpoint} und der Raumlufttemperatur T_R als Eingangssignal nutzt (Gleichung (2)). Hierbei bezeichne \dot{Q}_0 den Shift der Heizleistung um die Solltemperatur, k_P das P-Regelglied.

$$\dot{Q}_{H,i} = \max\left(0, \dot{Q}_0 + k_P (T_{\text{Setpoint}} - T_R)\right) \quad (2)$$

Die Berücksichtigung der Wärmekapazität der Raumumschließungswände ist durch den kontinuumsphysikalischen Ansatz (3) gegeben, welcher Änderungen der inneren Energiedichte der Wand u durch Wärmeleitung q über die Wanddicke x beschreibt. Die Gleichung schließt zusätzliche Wärmequellen durch aktive Bauteile \dot{u}_{AB} ein und gilt für eindimensionale Wandschichtaufbauten.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} q + \dot{u}_{AB} \quad (3)$$

Die räumliche Wärmestrom- und Temperaturverteilung über die Wanddicke werden durch eine Finite-Volumen-Diskretisierung approximiert und erzeugen den Vektor der inneren Energiedichten \mathbf{u} für alle Volumenelemente in allen Wänden sowie den Vektor der Wärmeströme zwischen allen Elementen \mathbf{q} , der von den Wandtemperaturen \mathbf{T}_W abhängt. Die Temperaturen und Ströme können abstrakt im Eingangsvektor \mathbf{v} zusammengefasst werden, die innere Energie und Energiedichten im Lösungsvektor \mathbf{y} .

$$\mathbf{v} = \left(\underbrace{\mathbf{T}_R^T, \mathbf{T}_W^T}_{\mathbf{v}_1}, \underbrace{\dot{Q}_F^T, \dot{Q}_W^T, \dot{Q}_H^T, \dot{Q}_L^T, \dot{Q}_N^T, \mathbf{q}^T, \dot{u}_{AB}^T, \dots}_{\mathbf{v}_2} \right)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = (\mathbf{Q}_R^T, \mathbf{u}^T)^T$$

Im Eingangsvektor können die Erhaltungsgrößen \mathbf{v}_1 und Wärmeströme \mathbf{v}_2 unterschieden werden. Zusammen ergeben sie ein gemischtes System von differential-algebraischen Gleichungen (5).

$$0 = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} - \mathbf{f}(t, \mathbf{v}) \quad (5)$$

$$0 = \mathbf{F}(t, \mathbf{v})$$

Die algebraischen Gleichungen umfassen die Berechnungsvorschriften für alle Wärmeströme und Wärmestromdichten auf der Grundlage gegebener Zustände. Daher wirkt die Funktion \mathbf{F} formal als Summe auf Erhaltungsgrößen und Ströme.

$$\mathbf{F}(t, \mathbf{v}) = \mathbf{F}_1(t, \mathbf{v}_1) + \mathbf{F}_2(t, \mathbf{v}_2) \quad (6)$$

Im Fall der geregelten Heizung führt dies beispielsweise auf die Funktion (7).

$$F(\dot{Q}_{H,i}, T_R) = \dot{Q}_{H,i} - \max\left(0, \dot{Q}_0 + k_p (T_{\text{Setpoint}} - T_R)\right) \quad (7)$$

Die innere Energie der Raumluft $Q_R = (m_M c_M + \rho_{air} c_{air} V_R) T_R$ wird berechnet unter Kenntnis der Luftmassendichte ρ_{air} , der Wärmekapazität trockener Luft c_{air} , den im Raum befindlichen Speichermassen m_M mit der Wärmekapazität c_M sowie dem Raumvolumen V_R . Die Ermittlung der inneren Energiedichte in der Wand $u = \rho_b c_M T_W$ benötigt die Massendichte ρ_b und die Wärmekapazität c_M des Festkörperanteils im Wandmaterial. Beide Größen hängen von den Raum- und Wandtemperaturen ab, formal ausgedrückt durch die Dekompositionsvorschrift (8).

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}(\mathbf{v}_1) \quad (8)$$

Dies vervollständigt die algebraischen Gleichungen für jeden gegebenen Zeitpunkt t zu dem vollbestimmten System (9).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_1 & \mathbf{F}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Folglich kann die Wärmestromberechnung eliminiert und das Originalsystem in das Differentialgleichungssystem (10) überführt werden.

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} = \mathbf{f} \left(t, \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_1 & \mathbf{F}_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \right) \quad (10)$$

Zur Bestimmung der Eingabegrößen \mathbf{v} in einem Differentialgleichungssystem sind zwei Arbeitsschritte notwendig: die Dekomposition der Erhaltungsgrößen und eine Auswertung aller algebraischen Zusammenhänge. Letzteres kann mitunter hochkomplex sein, vor allem in Anwesenheit nichtlinearer Kopplungen.

LÖSUNG DES DIFFERENTIALGLEICHUNGSSYSTEMS

Zeitintegrationsverfahren haben sich für die Behandlung gewöhnlicher Differentialgleichungen etabliert. Die Auswahl des Verfahrens entscheidet hierbei, ob sich weitere Aufgaben im Lösungsablauf ergeben (Abbildung 1). Explizite Verfahren beispielsweise nähern die Integration so an, dass ein direkt lösbares System für die Erhaltungsgröße des nächsten Zeitschrittes entsteht. Implizite Verfahren hingegen erzeugen für jeden diskretisierten Zeitschritt ein nichtlineares Gleichungssystem mit einem impliziten Zusammenhang zur Erhaltungsgröße.

Sowohl das Newton-Verfahren als auch alle Typen von Splitting-Methoden erzeugen Sequenzen linearer Gleichungssysteme, welche ersatzweise für das nichtlineare Problem zu lösen sind. Für die Gebäude-

und Raumsimulation mit transienter Wandberechnung erweisen sich Krylow-Unterraum-Verfahren (Saad, 2003) als äußerst effizient im Vergleich zu direkten Eliminationsverfahren. Eine schnelle Verfahrenskonvergenz kann allerdings nur in Verbindung mit geeigneter Vorkonditionierung erreicht werden.

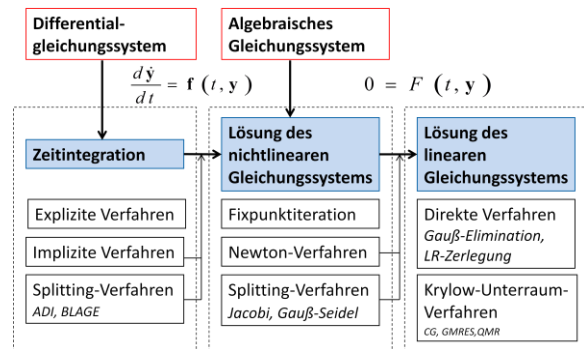


Abbildung 1: Lösungsverfahren gewöhnlicher Differentialgleichungssysteme

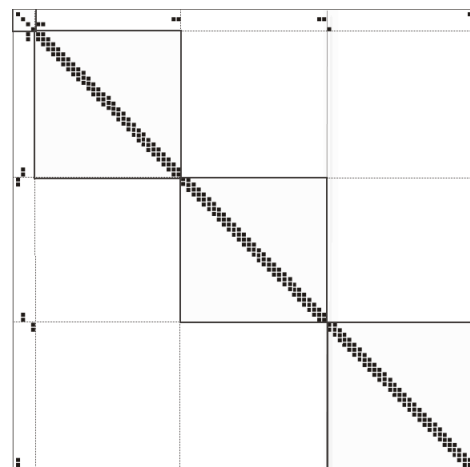


Abbildung 2: Besetzungsschema der Jacobi-Matrix

Hinsichtlich der Vorkonditionierung ist die Formulierung der Gebäude- und Raumgleichungen als Differentialgleichungssystem vorteilhaft. Die Kopplungsmatrizen enthalten in diesem Fall lediglich Raum-Wand-Wechselwirkungen sowie Kopplungen, die aus dem Kontinuumsproblem innerhalb der Wand resultieren. Die Wärmeströme verlaufen dabei in den meisten Fällen zwischen benachbarten Einheiten wie Raum und Wandoberflächen sowie benachbarten Finite-Volumen-Elementen der Wanddiskretisierung. Daher ist die Matrix schwachbesetzt, und ihre Besetzungsstruktur ist in wesentlichen Teilen durch die Wanddiskretisierung und die Gebäudetopologie bestimmt, also von vornherein bekannt (siehe Abbildung 2). Hydraulische Anlagenkomponenten können zusätzliche Einträge zwischen benachbarten Räumen im Leitungsnetzwerk erzeugen, welche sich in punktuellen Einträgen am oberen oder linken Matrixrand äußern.

Angesichts der charakteristischen Struktur sind Vorkonditionierungsvorschriften, welche die Besetzung der Matrix ausnutzen, nachweislich eine günstige Wahl. Hierzu zählen Vorkonditionierermatrizen mit einer reduzierten Bandbreite und ILU-Vorkonditionierer, welche sich einfach invertieren lassen und eine gute Näherung für das Originalproblem liefern.

Die Integration algebraischer Zusammenhänge in einem gemischten System erhöhen hingegen die Gleichungs- und Unbekanntenzahl erheblich und zerstören die typische Besetzung. Dies gilt insbesondere für Anlagensysteme, die in einem beliebigen Netzwerk eingebunden sind und für unstrukturierte Kopplungseinträge sorgen. Erfolgreiche Vorkonditionierungsstrategien für gemischte Systeme im Bereich der Gebäudesimulation sind zum derzeitigen Wissensstand unbekannt.

ANLAGENREGELUNG DURCH ALGEBRAISCHE GLEICHUNGEN

Bei der Modellierung einfacher Heizungen mit Regelsystemen spielen Verzögerungsmechanismen bei der Übertragung der Heizleistung keine Rolle. Folglich sind die beschreibenden Gleichungen stationär und somit algebraischen Types. Um derartige Zusammenhänge innerhalb einer Zeitintegrationsumgebung auszuwerten, existieren in NANDRAD und HAJAWEE unterschiedliche Lösungsansätze, welche vorgestellt und im Vergleich zwischen HAJAWEE und EnergyPlus diskutiert werden.

Graphenalgorithmen in NANDRAD

Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD nutzt die Integrationsplattform (Nicolai et al., 2011) zur Lösung der dynamischen Raum- und Wandenergiebilanzen. Innerhalb eines Zeitintegrationsschrittes wird durch die Lösungs Umgebung ein Newton-Verfahren ausgeführt, welches eine mehrfache Modellberechnung benötigt, sowohl für den Aufbau der Jacobi-Matrix als auch für die Auswertung der Bilanzfehler. Zu diesem Zweck werden systematisch Vorschläge für den Lösungsvektor \mathbf{y} unterbreitet und die Funktionsantwort $\mathbf{f}(t, \mathbf{v})$ angefordert. Die Aufgabe der Modellauswertung besteht in der Berechnung des Eingangsvektors \mathbf{v} und der zugehörigen Systemfunktion.

Das NANDRAD-Modell kann als Netzwerk unterschiedlicher Modellobjekte verstanden werden, welche eine Zone, eine Wand beziehungsweise Wandoberfläche oder eine Anlagenkomponente repräsentieren. Aufgrund von Nachbarschaftsbeziehungen und modellübergreifenden Wärmetransportströmen bestehen zwischen den Modellobjekten Ergebnisabhängigkeiten (siehe Abbildung 3). Dies

bedeutet, das Ergebnis einer Modellberechnung kann ebenso Eingabegröße für ein anderes Modellobjekt sein.

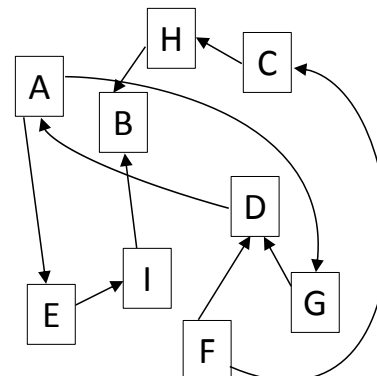


Abbildung 3: NANDRAD-Modellobjektgraph.

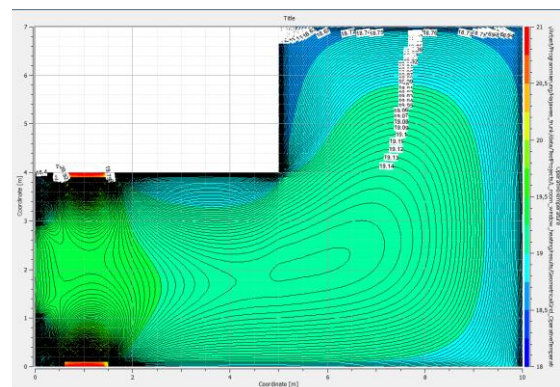


Abbildung 4: Empfindungstemperatur über dem Querschnitt eines HAJAWEE-Beispielraumes.

Neben fest vorgegebenen Modellkomponenten zur Beschreibung des passiven Gebäudes erlaubt NANDRAD die generische Modellerweiterung um nutzerdefinierte Anlagenkomponenten durch explizite Modellobjekte. Dies erschwert allerdings die Berechnung. Um korrekte Ergebnisse zu liefern, müssen die Modellobjekte für jeden Lösungsvorschlag \mathbf{y} mit aktuellen Eingabewerten versorgt und folglich in der richtigen Reihenfolge ausgewertet werden. Aufgrund der generischen Modellierungsfunktionalität sind die Modellobjekte und ihre Abhängigkeiten untereinander zum Zeitpunkt der Implementierung noch unbekannt. Daher ist die Vorgabe einer fixen Modellauswertungsstrategie unmöglich.

Durch das NANDRAD-Modell wird die Auswertungsreihenfolge stattdessen zur Laufzeit mit Hilfe von Graphenalgorithmen bestimmt. Innerhalb eines solchen Graphen sind zyklische Abhängigkeiten nicht ausgeschlossen, welche gekoppelte Zusammenhänge zwischen verschiedenen Modellergebnissen repräsentieren. Daher ist eine anfängliche Gruppierung zyklischer Modellobjekte notwendig. Sequenzen von abhängigen

Modellobjekten werden ebenso zusammengefasst, um für die parallele Modellauswertung größere Berechnungseinheiten zu schaffen. Nach dieser Gruppierung kann der Graph geordnet und die Modellobjektgruppen in eine Auswertungsreihenfolge sortiert werden (Nicolai et al., 2012).

Nichtlineare Anlagenregelung in HAJAWEE

Die Raumbehaglichkeitssimulation in HAJAWEE berücksichtigt geometrische Detailinformationen des Raumes, der Wand- und Fensteroberflächen, von Wandheizkörpern und thermisch aktiven Bauteilen. Diese Geometrieinformation erlaubt die Lösung einer geometrischen Strahlungsbilanz. Aus diesem Grund sind Strahlungs- und Empfindungstemperatur räumlich verteilte Größen (siehe Abbildung 4). Diese Temperaturen können ebenso als Kontrollgrößen für Regelalgorithmen gewählt werden, nur ist im Gegensatz zum NANDRAD-Modell die Angabe eines Kontrollpunkt innerhalb des Raumes notwendig. Dieser wird auch als Sensorpunkt bezeichnet und liefert die Solltemperatur T_{Sensor} . Die Heizleistung der idealen Heizung wird zudem durch die Maximalleistung $\dot{Q}_{H,max}$ begrenzt, und aus

$$\dot{Q}_0 = \frac{\dot{Q}_{H,max}}{2} \quad \text{folgt die modifizierte}$$

Berechnungsvorschrift (11).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{nominal} &= \max(0, \dot{Q}_0 + k_p(T_{Setpoint} - T_{Sensor})) \\ \dot{Q}_H &= \min(\dot{Q}_{H,max}, \dot{Q}_{nominal}) \end{aligned} \quad (11)$$

Diese Besonderheit des HAJAWEE-Modells wirkt sich auf die Regelalgorithmen aus, welche für alle Typen von Heizungen wie Flächenheizkörper, Raumheizkörper und aktive Bauteile innerhalb der Konstruktion hinterlegt werden können. Im speziellen Fall von Flächenheizkörpern wird Wärme in Form langwellige Strahlung in den Raum emittiert. Folglich nimmt ein solcher Heizkörper an der langwelligen Strahlungsbilanz (12), (13) teil. Die Bilanz für eine passive Wandoberfläche (12) setzt die spezifische langwellige Ausstrahlung \dot{f}_i aus Anteilen der Eigenemission \dot{e}_i und den reflektierten Anteil einfallender langwelliger Strahlung \dot{h}_i zusammen. Hierbei bezeichne ε_i den Emissionsgrad der Oberfläche für langwellige Strahlung und k_B die Boltzmann-Konstante. Die einfallende Strahlungsstromdichte \dot{h}_i wird durch andere sichtbare Strahlungsflächen hervorgerufen, also Wand-, Fenster oder Heizkörperoberflächen. Diese liefern die ausgestrahlten Stromdichten \dot{f}_j gewichtet mit dem Sichtbarkeitsfaktor $\Phi_{i,j}$. Bei einer Heizkörperoberfläche ersetzen die langwelligen

Strahlungsströme der Heizung $\dot{Q}_{H,rad,i}$ den Eigenemissionsanteil (Gleichung (13)).

$$\dot{f}_i = \underbrace{\varepsilon_i k_B T_{W,i}^4}_{\dot{e}_i} + (1 - \varepsilon_i) \underbrace{\sum_j \Phi_{i,j} \dot{f}_j}_{\dot{h}_i} \quad (12)$$

$$\dot{f}_i = \frac{\dot{Q}_{H,rad,i}}{A_i} + \sum_j \Phi_{i,j} \dot{f}_j \quad (13)$$

$$\dot{f}_{Sensor} = \sum_j \Phi_{Sensor,j} \dot{f}_j = k_B T_{Sensor,rad}^4 \quad (14)$$

Für die Berechnung der Strahlungstemperatur $T_{Sensor,rad}$ an einem beliebigen Sensorpunkt sind wiederum die effektiv ausgestrahlten Strahlungsstromdichten aller passiven und aktiven Oberflächen \dot{f}_j entscheidend, wobei die Sensorposition indirekt über die Sichtbarkeitsfaktoren zu allen Flächen $\Phi_{Sensor,j}$ erfasst wird (Gleichung (14)).

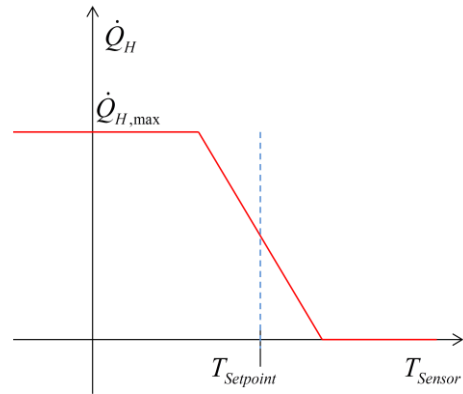


Abbildung 5: Heizleistung bei idealer Regelung in Abhängigkeit der Sensortemperatur.

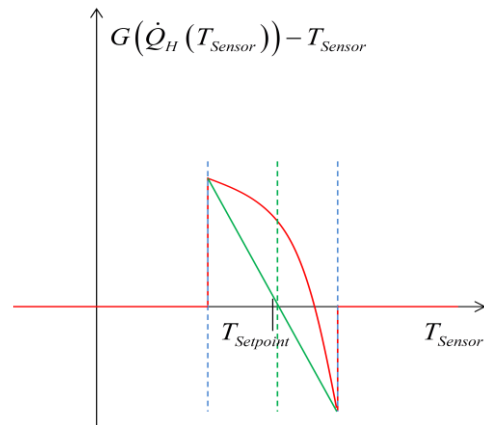


Abbildung 6: Berechnung der Sensortemperatur durch die Regula Falsi.

Die Strahlungstemperatur geht ihrerseits in die Berechnung der Empfindungstemperatur ein. Demzufolge liefert die langwellige Strahlungsbilanz eine nichtlineare Kopplung zwischen dem

Strahlungsanteil des Heizkörpers und der Empfindungstemperatur am Sensorpunkt, was die sequentielle Auswertung aller Gleichungen verhindert. Zudem ist die Abhängigkeitskurve an den Minima und Maxima der Heizleistung nicht monoton (Abbildung 5) und erschwert somit die Anwendung klassischer ableitungsbasierter Methoden wie das Newton-Verfahren.

Ein stabiles und genügend effizientes Verfahren für derartige Zusammenhänge ist beispielsweise durch die Regula Falsi gegeben. Diese Methode kombiniert die Nullstellensuche durch ein Sekantenverfahren mit Intervalleingrenzungen und ist daher auch für weniger glatte Funktionsverläufe geeignet. Allerdings löst die Regula Falsi ausschließlich Probleme in nur einer Dimension, also nur einer Gleichung mit einer Lösungsgröße.

Um dennoch dieses Verfahren für die Auswertung der Gleichungen aus Heizleistung und Strahlungsbilanz anwenden zu können, wird ein eindimensionales Ersatzproblem für die Sensortemperatur formuliert. Dies verlangt eine Zusammenfassung der Gleichungen (11)-(14) in die skalare Form (15) und die Formulierung des Fixpunktproblems (16).

$$0 = F_1(T_{Sensor}) + F_2(\dot{Q}_H(T_{Sensor})) \quad (15)$$

$$T_{Sensor} = \underbrace{-F_1^{-1}F_2}_{G}(\dot{Q}_H(T_{Sensor})) \quad (16)$$

Ein Verfahrensschritt der Regula Falsi ist in Abbildung 6 veranschaulicht, wobei grün die Nullstelle der Sekante gekennzeichnet ist, welche einen neuen Lösungsvorschlag für die Sensortemperatur T_{Sensor} liefert. Zu dieser Temperatur wird mittels einer Auswertung der Gleichungen (11)-(14) ein neuer Funktionswert $G(\dot{Q}_H(T_{Sensor}))$ ermittelt. Da dieser oberhalb der gesuchten Lösung liegt, wird die linke Intervallgrenze im Sinne einer Nullstelleneingrenzung an den neuen Temperaturwert verschoben.

Im seltenen Fall mehrerer Temperatursensoren wird die geforderte Eindimensionalität des Problems verletzt. Hier kann die Intervalleingrenzung durch ein Downhill-Simplex-Verfahren verallgemeinert werden (Nelder et al., 1965), welches allerdings keine Gradienteninformation verwendet und folglich wesentlich höhere Iterationszahlen benötigt.

Vergleich von HAJAWEE und EnergyPlus

Die Lösungsstrategie von EnergyPlus unterscheidet sich von den Ansätzen in NANDRAD und HAJAWEE. Innerhalb eines Zeitschrittes wird in EnergyPlus eine Sequenz aufeinanderfolgender Berechnungen durchgeführt: Zuerst erfolgt die Wandsimulation. Danach startet der HVAC-Manager, welcher aus den stationären Bedingungen

eine Schätzung der fehlenden Energie für jeden Raum vornimmt, welche als die zuzuführende Heizenergie identifiziert wird. Darauffolgend wird die Raumentnergiebilanz gelöst und die Heizleistung mit den Neuberechneten Daten korrigiert. Am Ende eines solchen sequentiellen Berechnungsschrittes erfolgt die Ermittlung der Raumtemperatur (Renon, 2002), (EnergyPlus, 2010). Die Abfolge von der Schätzung bis zur Auswertung der Raumbilanz und die Korrektur der Heizleistung wird auch als Prädiktor-Korrektor-Methode bezeichnet und ersetzt bei EnergyPlus die Regelung.

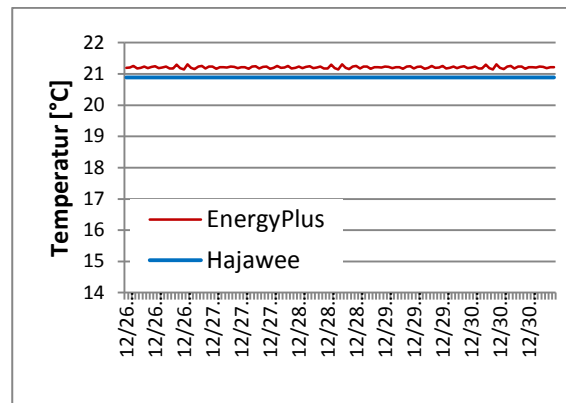


Abbildung 7: Raumlufthemperatur für EnergyPlus und HAJAWEE.

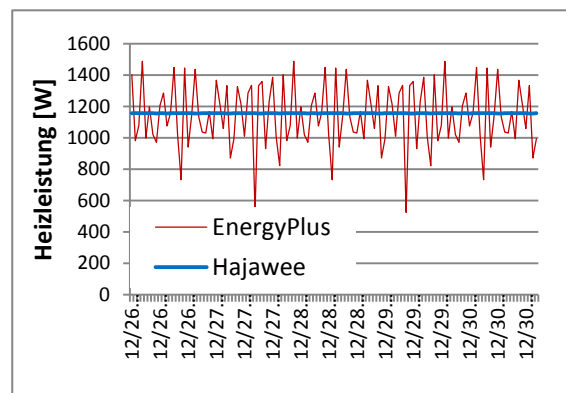


Abbildung 8: Heizleistung für EnergyPlus und HAJAWEE.

Dieses Verfahren kann mit einer verkürzten Fixpunktiteration verglichen werden. Kritisch hierbei ist die Wechselwirkung zwischen Raumentnergiebilanz, Raumtemperatur und Heizleistung zu sehen, die in starker Kopplung zueinander stehen. Durch eine sequentielle Auswertung können derartige Wechselwirkungen nicht adäquat berücksichtigt werden und führen in der Regel zu unstimmgigen Lösungen, in diesem Fall eine ungenügend genau geregelte Heizleistung.

Als äußerst dramatisch erweist sich die Simulation thermisch aktiver Bauteile unter Raumtemperaturregelung. In diesem Fall wirkt die Heizleistung auf die Energiebilanz der Wand, wird

aber erst nach der Wandberechnung aktualisiert. Für die Modellierung solcher Heizelemente wurden im Rahmen einer Projektarbeit Validierungsrechnungen zwischen EnergyPlus und HAJAWEE vorgenommen (Pfefferkorn, 2014). Zugrundegelegt wurde ein Raum mit quadratischem Grundriss, welcher mit der beheizten Wand an ein konstantes Außenklima, mit den restlichen Wänden an konstant temperierte Nachbarräume grenzt.

Unter den gegebenen Randbedingungen stellt sich im Laufe der Simulation ein konstanter Zustand ein, wobei sich die Raumlufttemperatur in einem Toleranzbereich um die Solltemperatur von 21°C bewegt. Die geregelten Temperaturen sind in Abbildungen 7 veranschaulicht.

Ein extrem verschiedenes Verhalten beider Simulationen ist in Bezug auf die Heizleistung zu bemerken (Abbildung 8). Während die Berechnung in HAJAWEE eine konstante Kurve ergibt, schwanken die Ergebnisse von EnergyPlus drastisch um einen Mittelwert, welcher mit der HAJAWEE-Lösung stimmig ist. Unter den gegebenen stationären Umgebungsbedingungen ist ein Einschwingen der Regelung auf einen konstanten Wert zu erwarten, und die EnergyPlus-Lösung ist als fehlerhaft einzustufen.

Der Kurvenverlauf für EnergyPlus ist der ungenügenden Behandlung von Wechselwirkungen zwischen Heizleistung und Wand- sowie Rauminnenklima geschuldet. Die Heizungsregelung reagiert aufgrund der sequentiellen Auswertung erst im darauffolgenden Zeitschritt auf Änderungen der Raumklimabedingungen. In Folge treffen Erwärmung beziehungsweise Abkühlung des Raumes und Heizleistungskorrektur verspätet aufeinander und erzeugen die in Abbildung 8 illustrierte oszillierende Lösung.

Angesichts der hohen Approximationsfehler ist von einer sequentiellen Auswertung von Bilanzen und Regelstrategien, zum Beispiel in Form der Prädiktor-Korrektor-Methode, dringend abzuraten, und die gekoppelten Verfahren von NANDRAD und HAJAWEE sind stattdessen vorzuziehen.

ZUSAMMENFASSUNG

Innerhalb von Systemen gewöhnlicher Differentialgleichungen wird die Aufgabe der Lösung algebraischer Zusammenhänge der Verantwortlichkeit des Modellentwicklers übertragen. Dies kann Vorteile haben, sobald individuelle Methoden für die Behandlung nichtlinearer Zusammenhänge erforderlich sind, aber auch Nachteile durch den Implementierungsmehraufwand. Insbesondere Anlagenregelstrategien reagieren extrem sensibel auf Temperaturänderungen und schaffen somit stark gekoppelte und teilweise hochgradig nichtlineare Problemstellungen. Die Lösung dieser Gleichungen durch vereinfachte Fixpunktmethoden wie in

EnergyPlus genügt den Anforderungen an Genauigkeit und Stabilität der Lösung in Anwesenheit von Regelalgorithmen nicht. In manchen Fällen scheitern sogar generalistische Methoden wie das Newton-Verfahren, und der Einsatz stabilerer Methoden wie der Intervalleingrenzung sind notwendig. Innerhalb der Programme NANDRAD und HAJAWEE wurden geeignete Algorithmen für gekoppelte nichtlineare Gleichungen umgesetzt und mehrfach auf Konvergenz und Genauigkeit getestet.

Gewöhnliche Differentialgleichungssysteme im Bereich der Gebäude- und Raumsimulation schaffen einen Zugang zu effizienten Methoden wie vorkonditionierten Krylow-Unterraum-Verfahren. Dies gilt insbesondere für Modelle, welche kontinuumsphysikalische Ansätze zur Lösung der Wandbilanzen berücksichtigen wie NANDRAD und HAJAWEE. Derartige Lösungsstrategien scheitern nach derzeitigem Kenntnisstand für gemischt differential-algebraische Systeme aufgrund unbekannter Matrizenbesetzung, insbesondere bei generisch erweiterbaren Programmcodes.

Der Vergleich von differentiellen und gemischt differential-algebraischen Methoden bezüglich der Simulationsgeschwindigkeit ist mit Hilfe der eingangs genannten Softwareprogramme prinzipiell möglich. Diese Aufgabe verlangt allerdings einen Abgleich der Simulationsbedingungen, Modellgleichungen und der numerischen Rechengenauigkeit.

LITERATUR

- EnergyPlus. 2010. EnergyPlus Engineering Reference, LBNL.
- TRNSYS. 2010, TRNSYS 17 (7), Programmers Guide.
- Nicolai, A., Grunewald, J. 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., Paepcke, A. 2012. Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD – Physikalisches Modell, Umsetzungskonzept und Technologien im Überblick, BauSIM 2012, Berlin, Germany.
- Nelder, J. A., Mead, R. 1965. A Simplex Method for Function Minimization, Computer Journal 7, p. 308–313.
- Nytsch-Geusen, C. et al. 2005. A hygrothermal building model based on the object-oriented modeling language Modelica, Proc. of the 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada.
- Paepcke, A. et al. 2013. HAJAWEE and NANDRAD - New thermal room and multizone models,

EnTool Symposium, Workshop & Summer School, Inst. for Building Climate Control, Technical University Dresden, Germany.

Pfefferkorn, K. 2014. Validierung der Behaglichkeitssimulation eines Raumes (HAJAWEE) mit integrierten Strahlungsheizelementen aus Textilbeton, Tech. Report, Inst. for Building Climate Control, Technical University Dresden, Germany.

Renon, O. 2002. Thermal Bridge Modeling in EnergyPlus, Building Energy Simulation User News 23(4), p. 14-24.

Saad Y. 2003. Iterative Methods for Sparse Linear Systems, SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

Sahlin, P. et al. 2004. Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers, Building and Environment 39(8), p. 949–958.

Wetter, M., Haugstette, C. 2006. Modelica versus TRNSYS -- A comparison between an equation-based and a procedural modeling language for Building Energy Simulation, Proc. of the 2nd SimBuild Conference, Cambridge, MA, USA.

Wetter, M. 2009. A Modelica-Based Model Library for Building Energy and Control Systems, Proc. of the 11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

BauSIM 2014 (Aachen, Deutschland) – Fünfte lokale IBPSA-Germany/Austria Konferenz

Ich (wir), der Autor (die Autoren) des beigefügten Artikels, habe(n) die Übertragung des Copyrights und den Haftungsausschluss gelesen und stimme(n) diesen hiermit zu.

- (1) Der Autor (die Autoren) versichert (versichern), dass vorliegender Artikel noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht worden ist. Es wird ferner versichert, dass der Artikel, sobald dieser zur Veröffentlichung angenommen wurde, nicht vor seiner Präsentation bei der BauSIM 2014 an anderer Stelle veröffentlicht wird.
- (2) Falls der Artikel angenommen wird, räumt (räumen) der Autor (die Autoren) IBPSA automatisch ein nichtexklusives, lizenzfreies, unbefristetes, weltweites, unwiderrufliches, unterlizensierbares und übertragbares Recht ein den Artikel (in unmodifizierter Fassung) in jeder Art und Weise (einschließlich aber nicht nur ausschließlich der Einbindung in den gedruckten und elektronisch, etwa via WWW veröffentlichten BauSIM 2014 Tagungsband und der Einbindung in weitere Zusammenstellungen von Beiträgen) zu veröffentlichen. Mit "nichtexklusivem" Recht ist nicht gemeint, dass der Autor (die Autoren) eingeschränkt wird (werden) das Material weiterhin zu verwenden, sondern dass für diesen Artikel keine exklusiven Rechte an Dritte vergeben werden können.
- (3) Der Autor (die Autoren) bestätigt (bestätigen), dass er (sie) die Erlaubnis besitzt (besitzen) das unter (2) genannte Recht zu übertragen, d.h., dass die Veröffentlichung durch IBPSA oder dessen Ermächtigte zu keiner Verletzung bestehender Copyrights oder anderer Restriktionen führen wird.
- (4) Der Autor (die Autoren) erkennt (erkennen) an, dass die Akzeptanz des Artikels keine Billigung oder Einverständnis der dargestellten Inhalte seitens IBPSA impliziert. IBPSA übernimmt unter keinen Umständen Verantwortung oder Haftung für Schäden, die aus Informationen oder der Nutzbarmachung von Informationen entstehen, die im entsprechende Artikel dargeboten sind.