

Hygrothermische Gebäudesimulation mit Multizonen-Gebäudedurch- strömungsmodell

Matthias Pazold, M.Eng.
Florian Antretter, M.Eng.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer)

Holzkirchen

Postfach 11 52
83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10
83626 Valley

Hygrothermische Gebäudesimulation mit Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell

Mit hygrothermischer Gebäudesimulation lässt sich der Feuchte- und Wärmetransport in einem Gebäude und über dessen Bauteile detailliert berechnen. Der natürliche oder mechanisch angetriebene Luftwechsel mit dem Außenklima sowie der Luftwechsel zwischen definierten Zonen innerhalb des Gebäudes tragen erheblich zu einem energetisch sinnvollen und behaglichen Raumklima bei. Es ist bei der Erstellung des Gebäudemodells möglich, den Luftwechsel je Zeitschritt vorzugeben. Jedoch ist dieser in Realität vom vorherrschenden Raumklima abhängig. Wird die hygrothermische Gebäudesimulation mit einem Mehrzonen-Gebäudedurchströmungsmodell gekoppelt, so werden das Innenklima und der Luftwechsel je Zeitschritt, gegenseitig beeinflussend, simuliert. Dieser Beitrag erzielt einen Einblick in das Berechnungsverfahren des Durchströmungsmodells und dessen Kopplung mit dem hygrothermischen Gebäudemodell. Ferner ist ein Beispiel der erweiterten Simulation mit Infiltration und interzonalem Luftaustausch, auch im Vergleich zum fest definierten eingegebenen Luftwechsel, enthalten.

Hygrothermal building simulation coupled with multizone air flow model. *With hygrothermal whole building software it is possible to calculate heat and moisture transport within a building and its components. The natural or mechanical driven air exchange between indoor and outdoor climate as well as airflow between defined building zones are significant contributors to an energetically and comfortable indoor environment. At the design of the building model it is possible to set the ventilation per time step. However, the ventilation depends on the indoor climate. The hygrothermal whole building software coupled with a multizone building airflow model can simulate the indoor climate and the natural and interzonal air exchange influencing each other. This paper gives an insight into the airflow model and its implementation and shows some results of an example simulation.*

1 Einleitung

Behaglichkeit, Energiebedarf, eventuelle Schädigung der Bausubstanz? Zu all diesen Fragestellungen sollte das hygrothermische Verhalten eines Gebäudes und dessen Innenklima untersucht werden. Messungen und Beobachtungen an realen Objekten oder Modellen sind kosten- und zeitin-

tensiv. Um eine wirtschaftliche Beurteilung treffen zu können, wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) ein hygrothermisches Raumklimamodell WUFI®Plus und dessen Rechenmodell [2] entwickelt. Natürlich unterliegt dies einer stetigen Weiterentwicklung und Validierung.

Der Luftwechsel ist beim Betrachten des Innenklimas eine nicht zu vernachlässigende Größe. Von modernen energieeffizienten Gebäuden werden eine hohe Luftdichtheit und gleichzeitig genügend Frischluft und der Abtransport von Luftfeuchtigkeit gefordert. Mechanische Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung kommen zum Einsatz. Leckagen in der Gebäudehülle lassen sich jedoch nicht völlig vermeiden. Letztendlich trägt die Lüftungsgewohnheit eines Nutzers bedeutend zum hygrothermischen Gebäudeverhalten bei. Bislang ist es möglich, natürliche und interzonale Luftwechselraten oder Luftvolumenströme per Zeitplan vor dem Start einer Simulation in WUFI®Plus festzulegen. Eine realistische Annahme der besagten Größen ist dabei oft nur mit sorgfältiger und zeitaufwendiger Vorbereitung möglich.

Modellierungsansätze zur Simulation der Gebäudedurchströmung unterscheiden sich hauptsächlich im Detaillierungsgrad und dem damit verbundenem Simulationsaufwand [5]. Ein-Zonen-Modelle berechnen die Infiltration über die Gebäudehülle. Mehr-Zonen-Modelle können weiterführend den Luftaustausch zwischen Räumen simulieren. Beide genannten Modelle definieren Bauteile wie Wände, Decken aber auch Öffnungen als Strömungshindernisse und berechnen den Luftaustausch, der über diese stattfindet. Die Luftströmung innerhalb eines Raumes wird nicht abgebildet. Detaillierter wird mit numerischer Strömungsmechanik (CFD) ein Raum bzw. ein Volumen in eine Vielzahl von Knoten unterteilt. Es entsteht ein Feldmodell, mit dem die Strömung für jeden Knoten berechnet wird. Dies erfordert jedoch eine ebenso detaillierte Eingabe der Randbedingungen und einen hohen Modellierungs- und Berechnungsaufwand. Einen Kompromiss zwischen Detaillierungsgrad und Rechenzeit stellen die jüngsten zonalen Modelle dar [6]. Dabei wird ein Raum in deutlich weniger Zonen als bei CFD-Simulationen, etwa in 10 bis 100 unterteilt. Für diese Zonen innerhalb des Raumes können nach Simulation Aussagen über die darin vorhandene jeweilige Strömungsgeschwindigkeit und -richtung bzw. über deren Zustand getroffen werden.

Im Allgemeinen ist die Gebäudedurchströmung, neben äußeren Einflüssen wie Windgeschwindigkeit und -richtung,

Dieser Beitrag wurde für die BauSIM 2012 (4. deutsch-österreichische IBPSA Konferenz) verfasst. Ausgewählte Beiträge dieser Konferenz sind auch in BAUPHYSIK 35 (2013) Heft 1 veröffentlicht.

auch vom Innenklima, also von den Simulationsgrößen einer WUFI®Plus-Berechnung abhängig. Gleichzeitig beeinflusst sie diese. Es wird im Folgenden das hygrothermische Gebäudemodell kurz erklärt und darauf ein kompatibles Gebäudedurchströmungsmodell (ein Mehr-Zonen-Modell) und dessen Anbindung vorgestellt. Im gegenseitigen Austausch werden mit der erweiterten Simulation der natürliche, der interzonale und der mechanisch angetriebene Luftwechsel berechnet.

2 Hygrothermisches Gebäudemodell

Eine holistische Gebäudesimulation ist mit der hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI®Plus [4] möglich. Sämtliche Simulationsgrößen, in erster Linie die Temperatur- und Feuchteverhältnisse innerhalb eines Gebäudes und dessen Bausubstanz, werden für die meisten Anwendungsfälle stündlich ermittelt. Die Software basiert auf dem hygrothermischen Rechenmodell für Bauteile von *Künzel* [3]. Es berechnet die instationäre zeitliche Entwicklung des Temperatur- und Feuchtefeldes in einem eindimensionalen Querschnitt. Dabei kann ein Bauteil aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien bestehen. Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung werden als Transportmechanismen berücksichtigt, ebenso wie die Speicherfähigkeit eingesetzter Materialien.

Der Dampftransport innerhalb eines Bauteils wird zum Teil von Temperaturverhältnissen angetrieben, der Wasserdampf kann wiederum Latentwärme transportieren, des Weiteren hängen thermische Kennwerte auch vom Wassergehalt und hygrische Kennwerte von der Temperatur ab. Aufgrund dessen wird der Wärme- und Feuchte-transport nicht unabhängig, sondern gekoppelt berechnet. Ein stabiler und effizienter numerischer Gleichungslöser löst die gekoppelten, nichtlinearen Gleichungen.

Mit WUFI®Plus können beliebig viele unterschiedliche Bauteile und Gebäudezonen zu einem Gesamtmodell verknüpft und simuliert werden. Klimadaten für den Gebäudestandort liefern dafür die äußeren Randbedingungen. Neben der Außenlufttemperatur und -feuchte werden auch die solare Einstrahlung und Schlagregen berücksichtigt. Das Klima innerhalb definierter Gebäudezonen wird simuliert. Die Ergebnisse der Bauteilsimulationen tragen dazu bei. Wärme- und Feuchtequellen und -senken dienen als innere Randbedingungen. Heizungs-, Kühlungs-, Be- und Entfeuchtungs- sowie Lüftungsanlagen sind als ideale Systeme mit deren Leistungsfähigkeit berücksichtigt. Es lassen sich obere und untere Grenzen für Simulationsgrößen, wie z. B. für die Raumtemperatur, bestimmen. Damit diese eingehalten werden, liefern die idealen Anlagensysteme die benötigte Leistung, solange die eingegebene Kapazität ausreicht. Zur Simulation werden Bilanzen herangezogen. Ein Zeitschritt wird iterativ mit Hilfe adaptiver Unterrelaxationsalgorithmen berechnet, bis die Wärme- und Feuchtebilanzen aller Zonen erfüllt sind.

3 Gebäudedurchströmungsmodell

3.1 Grundlagen

Das verwendete Gebäudedurchströmungsmodell ist ein Multi-Zonen-Luftknotenmodell. Es ist dem Modell, das CONTAM [10] verwendet, sehr ähnlich. Die einzelnen Zo-

nen entsprechen einem Raum oder einem Bereich eines Gebäudes und stimmen somit mit der WUFI®Plus-Zonen-Definition überein. In den Zonen wird die Luft als vollständig durchmischt betrachtet. Somit gelten an jedem Ort einer Zone die gleichen Eigenschaften der Luft. Der Luftdruck wird speziell behandelt, er wird hydrostatisch variierend über die Höhe einer Zone berechnet. Die Grenzen der Zonen stellen vorhandene Barrieren, die Bauteile – also Wände, Decken und Böden – dar. Das Außenklima wird ebenfalls durch eine Zone definiert. Die Zonen werden mit definierten Nachbarzonen über identifizierbare Strömungswege verbunden und zu einem Strömungsnetzwerk verknüpft. Die Strömungswege erhalten Eigenschaften und Berechnungsmodelle, welche ihrer Art entsprechen. Es gibt unterschiedliche gewollte und ungewollte Arten, darunter Leckagepfade durch oder zwischen Bauteilen, geöffnete Türen und Fenster, Fugen, Lüftungsschlitze und -schächte, mechanisch betriebene Lüfter und sonstige Öffnungen.

3.2 Verfahren

Es können beliebig viele Gebäudezonen und zwischen diesen beliebig viele Strömungswege definiert werden. Jeder Gebäudezone wird ein variabler Luftdruck, relativ zum Barometerdruck zugeschrieben. Der hydrostatische Luftdruck, abhängig von der Lufttemperatur und -feuchte einer Zone, wird jeweils in Höhe des Ein- und Auslasses eines Strömungsweges berechnet. Befindet sich ein Strömungsweg in der Gebäudehülle, kann zusätzlich Winddruck auf diesen einwirken.

Zwischen Ein- und Auslass eines Strömungsweges kann somit eine Druckdifferenz entstehen, [1]:

$$\Delta P = P_{\text{Zone},j} - P_{\text{Zone},i} + \Delta P_s + P_w \quad (1)$$

Die Druckdifferenz ΔP in [Pa] bildet sich aus den relativen Luftdrücken der Zonen $P_{\text{Zone},i,j}$, der hydrostatischen Druckdifferenz ΔP_s und dem Winddruck P_w , jeweils in [Pa]. Mit dieser Druckdifferenz wird der Luftmassenstrom \dot{m} in [kg/s] berechnet:

$$\dot{m} = f(\Delta P) \quad (2)$$

Die Funktion $f(\)$ dient dabei als Platzhalter für spezielle Berechnungsmethoden der Art eines Strömungsweges entsprechend. Über das Zonen- und Strömungspfad-Netzwerk stehen alle Luftmassenströme in Beziehung zueinander. Aufgrund der Massenerhaltung muss die Masse einströmender Luft gleich der Masse ausströmender Luft einer Zone sein. Dementsprechend lassen sich die relativen Luftdrücke der Zonen solange mit dem Iterationsverfahren nach Newton variieren, bis die Luftmassenstrombilanz Gl. (3) erreicht ist bzw. innerhalb einer akzeptierten Fehlertoleranz liegt:

$$\sum \dot{m} = 0 \quad (3)$$

Das Gebäudedurchströmungsmodell verlässt sich dabei stark auf empirisch hergeleitete Gleichungen und Strömungsbeiwerte der definierten Strömungswege im Gebäude [5]. Weiter sei angemerkt, dass es ein stationäres Modell ist, das für einen Zeitpunkt gegenwärtige Luftmassenströme berech-

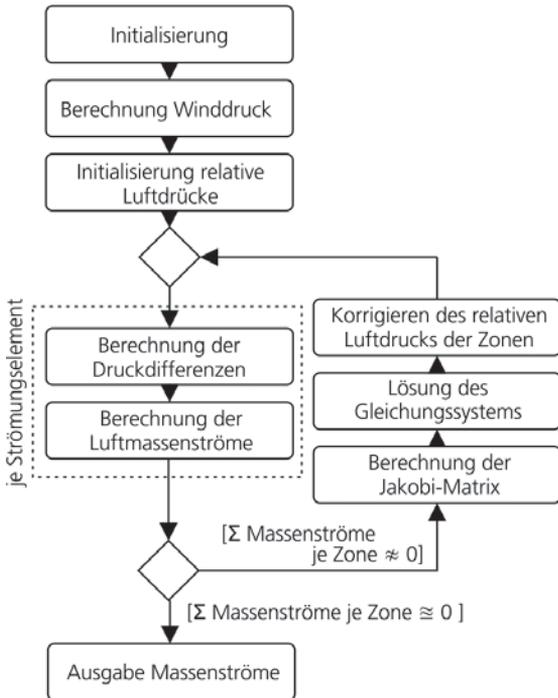


Bild 1. Ablaufschema Gebäudedurchströmungsmodell
Fig. 1. Building air flow model flow chart

net. Bild 1 zeigt das iterative Ablaufschema der Berechnung für einen Zeitschritt.

Hydrostatische Druckdifferenz

Die Höhen der Zonen $z_{j,i}$, sowie die Höhen der Strömungselemente $z_{m,n}$ (jeweils in [m]) sind relativ zur Geländehöhe, mit entsprechenden Klima- und Standortdaten. Verdeutlicht sind die genannten Höhen in Bild 2. Berechnet wird die hydrostatische Druckdifferenz mit Gl. (4):

$$\Delta P_S = \rho_j \cdot g \cdot (z_j - z_m) - \rho_i \cdot g \cdot (z_i - z_n) \tag{4}$$

Dabei sind ρ_j und ρ_i die jeweilige Dichte der Luft innerhalb einer Zone in $[kg/m^3]$ und g die Erdbeschleunigung in $[m/s^2]$.

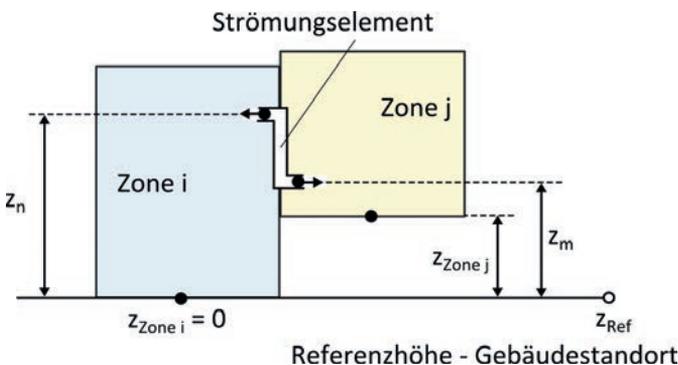


Bild 2. Darstellung der Höhen zur Ermittlung des hydrostatischen Luftdrucks
Fig. 2. Illustration of the heights for the assessment of the hydrostatic pressure

Winddruck

Der Wind erzeugt, in abhängig von Windstärke und Windrichtung, ein Luftgeschwindigkeits- und Druckfeld um ein

Gebäude. Der an verschiedenen Punkten oder Bereichen der Gebäudehülle variierende Staudruck oder Sog verursacht und beeinflusst die Gebäudedurchströmung. Für Klima- bzw. Wetterdaten wird häufig die über einen bestimmten Zeitraum gemittelte skalare Geschwindigkeit und Richtung des Windes aufgezeichnet. Dabei befindet sich der Messstandort üblicherweise auf freiem Gelände in 10 m Höhe über dem Boden. Mit der Windgeschwindigkeit und dem Winddruck-Koeffizienten wird der Winddruck oder -sog für bestimmte Bereiche der Gebäudehülle, relativ zum statischen Luftdruck des Außenklimas, als Bestandteil von Gl. (1), mit Gl. (5) [1] bestimmt:

$$P_W = C_p \cdot \rho \cdot \frac{v_H^2}{2} \tag{5}$$

Die lokale Windgeschwindigkeit v_H [m/s] wird üblicherweise auf Gebäudehöhe angenommen und ist nicht mit der durch Wetterdaten bereitgestellten Windgeschwindigkeit gleichzusetzen. Abweichende Geländetopografie, Umgebungsbebauung und Höhe des zu untersuchenden Gebäudes wird durch Umrechnung der Messdaten auf die lokale Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Dazu wird das jeweilige Windprofil (Windgrenzschichtdicke und Windgrenzschichtexponent) verwendet.

Der Winddruck-Koeffizient C_p wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Er ist abhängig von der Gebäudegeometrie, der Fassadenbeschaffenheit und -form, von Balkonen, von Dachvorsprüngen und Erkern und von der betrachteten Position oder des Bereiches an der Gebäudehülle. Sämtliche Einflüsse können bei der stündlichen Simulation von WUFI®Plus nicht berücksichtigt werden, da eine kurze Rechenzeit notwendig ist. Vereinfacht, da neben den Gebäudeabmessungen auch die Windrichtung bekannt ist, werden die Winddruck-Koeffizienten mit dem analytischen Modell von Swami/Chandra [8] berechnet. Es gilt jedoch in erster Linie nur für rechteckige, niedrige, bis zu drei Stockwerke hohe Gebäude.

Strömungsweg

Je nach Art eines Strömungspfades gibt es spezielle Möglichkeiten, die Durchströmungseigenschaften rechnerisch zu erfassen. Grundlegend wird zwischen laminarer, turbulenter sowie angetriebener Strömung unterschieden. Laminare Luftströmung wird durch sehr geringe Luftgeschwindigkeiten hervorgerufen.

Der turbulente Luftmassenstrom wird mit dem häufig verwendeten und dem für typische Druckdifferenzen natürlich belüfteter Gebäude gültigen Potenzgesetz [9] in der Form von Gl. (6) berechnet:

$$\dot{m} = C_{turb} \cdot \sqrt{\rho} \cdot (\Delta P)^n \tag{6}$$

Der turbulente Strömungskoeffizient C_{turb} und der Strömungsexponent n werden durch empirisch hergeleitete Gleichungen oder Tabellenwerte, je nach charakterisierender Art des Strömungsweges (im Folgenden beschrieben) bestimmt.

Für das Newton-Iterationsverfahren ist die partielle Ableitung des Luftmassenstroms notwendig. Für sehr kleine Luftmassenströme, berechnet mit dem Potenzgesetz Gl. (6), steigt diese ins Unendliche und würde zu Problemen beim Lösen der Massenbilanz führen. Abhilfe schafft hier eine

lineare Gl. (7) zur Berechnung laminarer Luftströmung infolge der Druckdifferenz [10]. Für jeden Strömungsweg werden beide Gleichungen, inkl. entsprechender partieller Ableitung, berechnet und anschließend der im Betrag geringere Luftmassenstrom als Ergebnis verwendet:

$$\dot{m} = C_{\text{lam}} \cdot \rho \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \quad (7)$$

Es hat sich herausgestellt, dass die laminare Luftströmung nur bei sehr geringen Luftmassenströmen unter etwa $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ relevant wird [9]. Sie trägt demnach nur insignifikant zur Gebäudedurchströmung bei. Im Folgenden wird deshalb auf die Vorstellung der Berechnung der laminaren Strömungskoeffizienten verzichtet. Die Lufteigenschaften, darunter die Luftdichte ρ in $[\text{kg}/\text{m}^3]$, abhängig von Lufttemperatur und -feuchte und die Viskosität μ in $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$, beeinflussen die Durchströmung eines Strömungsweges. Bei der Berechnung werden die Eigenschaften der Zone verwendet, von der die Strömung über einen Pfad ausgeht.

Wände/Decken

Wände und Decken eines Gebäudes sind häufig nicht luftdicht. Fugen zu anschließenden Bauteilen, Risse und Unregelmäßigkeiten können einen Luftwechsel hervorrufen. Einige Untersuchungen liefern für bestimmte Bauteile und Bauarten experimentell ermittelte Strömungskoeffizienten und -exponenten [7], bezogen auf die Fläche A in $[\text{m}^2]$ oder Länge L in $[\text{m}]$ des Bauteils. Dabei gibt es neben Mittelwerten über alle Messungen auch weitere Werte für das obere und untere Quartil. Welcher dieser Werte letztendlich zur Berechnung eingesetzt wird, ist nach Qualität der Bauausführung zu entscheiden. Der Strömungskoeffizient für das Potenzgesetz Gl. (6) wird berechnet nach Gl. (8) bzw. Gl. (9):

$$C_{\text{turb}} = 0,001 \cdot A \cdot C_A \cdot \sqrt{\rho} \quad (8)$$

$$C_{\text{turb}} = 0,001 \cdot L \cdot C_L \cdot \sqrt{\rho} \quad (9)$$

Dabei ist C_L $[\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^n)]$ der längenbezogene Strömungskoeffizient und C_A $[\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^n)]$ der flächenbezogene Strömungskoeffizient.

Soll ein existierendes Gebäude simuliert werden, besteht die Möglichkeit, das Differenzdruck-Messverfahren (Blower-Door-Test) anzuwenden. Als Resultat daraus lassen sich effektive Leckageflächen ermitteln. Wie auch bei CONTAM [10] wird mit der effektiven Leckagefläche A_{eff} $[\text{m}^2]$ der turbulente Strömungskoeffizient für das Potenzgesetz mit Gl. (10) ermittelt:

$$C_{\text{turb}} = A_{\text{eff}} \cdot C_d \cdot \sqrt{2} \cdot (\Delta P_r)^{\frac{1}{2}-n} \quad (10)$$

Übliche Durchlasskoeffizienten bezüglich einer luftdurchlässigen Gebäudehülle sind $C_d = 1,0$ für einen Referenzdruckunterschied von $\Delta P_r = 4 \text{ Pa}$ und $C_d = 0,6$ für $\Delta P_r = 10 \text{ Pa}$.

Öffnungen

Öffnungen in Bauteilen können explizit abgebildet werden, ein weiteres Strömungsmodell ist dafür dem Gebäudedurchströmungsmodell hinzugefügt. Dabei werden der sogenannte Entladungskoeffizient (engl. discharge coefficient)

und die Querschnittsfläche A der Öffnung zur Berechnung des turbulenten Strömungskoeffizienten für das Potenzgesetz (6) benötigt:

$$C_{\text{turb}} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2} \quad (11)$$

Fugen

Strömt die Luft durch schmale Fugen durch das Gebäude, können die Strömungsparameter mit Gln. (12) und (13) bestimmt werden. Als Eingabeparameter für diese Art eines Strömungsweges sind dann nur noch die Querschnittslänge und -breite der Fuge notwendig:

$$C_{\text{turb}} = \sqrt{\rho_0} \cdot L \cdot 0,0097 \cdot (0,0092)^n \quad (12)$$

$$n = 0,5 + 0,5 \cdot e^{-\frac{H}{2}} \quad (13)$$

Türen

Türen, Fenster oder sonstige große Öffnungen eines Gebäudes tragen maßgeblich zur Gebäudedurchströmung bei. Sie können offen oder geschlossen sein, weshalb die Öffnungsdauer bzw. der Öffnungszeitraum betrachtet werden muss. Wann ein Fenster oder eine Tür geöffnet ist, kann per definierten Zeitplan mit Hilfe eines Multiplikators ($1 =$ geöffnet; $0 =$ geschlossen) für den resultierenden Luftmassenstrom eingegeben werden.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Potenzgesetz eine Luftströmung stets in nur eine Richtung und über die Öffnungsfläche konstant berechnet. Sind zwei Zonen durch große Öffnungen verbunden, kann die Luft auch gegenläufig durch diese strömen. Unterschiedliche Temperaturen und damit verbundene Dichtedifferenzen sind der Auslöser dafür. Eine Möglichkeit, große Öffnungen mit dem Multizonenmodell zu simulieren, wäre eine Vielzahl von dem zuvor erwähnten Öffnungs-Strömungsmodell, über die Höhe verteilt hinzuzufügen.

Es gibt ein weiteres Strömungsmodell, welches auch bereits bei AIRNET [11] vorhanden war. Mit diesem wird zunächst eine neutrale Höhe Z_n in $[\text{m}]$ berechnet, auf der die Strömungsgeschwindigkeit Null und somit keine Druckdifferenz vorhanden ist:

$$Z_n = \frac{\Delta P}{g \cdot \Delta \rho} \quad (14)$$

Für den Fall, dass die Luftdichte in beiden Zonen gleich ist, führt Gl. (14) zu keinem Ergebnis, dann ist auch keine Strömung in beide Richtungen möglich, und die Öffnung kann als „normale“ Öffnung betrachtet werden. Für alle anderen Fälle ist die Lage der neutralen Höhe entscheidend. Liegt sie außerhalb der Öffnung, strömt die Luft weiterhin in nur eine Richtung und der resultierende Luftmassenstrom wird berechnet mit:

$$\dot{m} = G \cdot \sqrt{\rho} \cdot \left| |H - Z_n|^{\frac{3}{2}} - |Z_n|^{\frac{3}{2}} \right| \quad (15)$$

wobei

$$G = \frac{2}{3} \cdot W \cdot C_d \cdot (2 \cdot g \cdot |\Delta \rho|)^{\frac{1}{2}}$$

Liegt die neutrale Höhe innerhalb der Öffnung (definiert durch die Querschnittshöhe H und -breite W , jeweils in $[\text{m}]$),

ergeben sich mit diesem Modell zwei Strömungen in entgegengesetzter Richtung, berechnet mit Gln. (16) und (17).

In welche Richtung die Luftmassenströme fließen, ist jeweils davon abhängig, in welcher Richtung die Dichtedifferenz positiv ist und, bei Gl. (15), ob die neutrale Höhe ober- oder unterhalb der Öffnung liegt:

$$\dot{m}_a = -G \cdot \sqrt{\rho_j} \cdot |H - Z_n|^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

$$\dot{m}_b = G \cdot \sqrt{\rho_i} \cdot |Z_n|^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

Mechanischer Lüfter

Mechanische Lüftungsanlagen, also Lüfter bzw. Ventilatoren, treiben den Luftstrom an. Es sind hierfür zwei verschiedene Modelle vorhanden. Zum einen kann der angetriebene Luftstrom konstant betrachtet werden, zum anderen ist es möglich, den Lüfter mit Hilfe einer Lüfterkennlinie zu berücksichtigen. Die Lüfterkennlinie stellt die Druckdifferenz in Beziehung zum Luftvolumenstrom durch den Lüfter dar. Sie kann durch eine Polynomfunktion 3. Grades angenähert werden [11]. Anhand von vier verteilten Punkten dieser Kennlinie (Druckdifferenz mit zugehörigem Volumenstrom) werden die Koeffizienten bestimmt.

Die Polynomfunktion stellt somit die Druckdifferenz in Abhängigkeit zum Luftmassenstrom dar. Der Berechnungsalgorithmus ist jedoch darauf ausgelegt, anhand der Druckdifferenz den Massenstrom zu ermitteln. Um dies zu erreichen, wird zur Berechnung des Massenstroms das iterative Sekantenverfahren „Regula falsi“ angewendet. Damit ist für eine eindeutige Lösung gefordert, dass die Polynomfunktion keine Extremstellen, also Minimal- oder Maximalstellen, im notwendigen Definitionsbereich vorweist.

Luftschacht

Die Reibungsverluste über die Länge L in [m] des Luftschachtes müssen einbezogen werden. Der resultierende Luftmassenstrom berechnet sich nach Gl. (18).

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \Delta P}{f \cdot \frac{L}{d_h} + \sum C_{\text{dyn}}}} \quad (18)$$

Der Reibungsfaktor f ist von der resultierenden Strömung im Luftschacht abhängig. Zur Berechnung wird das iterative Verfahren nach AIRNET [11] angewendet und eine Genauigkeit von 10^{-3} gefordert.

4 Kopplung

4.1 Eingabe

Die Eingabe eines Gebäudemodells in WUFI®Plus wird hier nicht weiter erläutert. Eine Anleitung sowie weitere Informationen dazu sind im Online-Handbuch [12] verfügbar.

WUFI®Plus unterscheidet zwischen simulierten Zonen und an diesen angrenzenden Zonen. Das Innenklima angrenzender Zonen wird nicht simuliert sondern definiert. Es bleibt dem Anwender überlassen, welche Zonen er simuliert und des Weiteren für welche dieser er das Durchströmungsmodell aktivieren will. Ist eine Zone aktiviert, bedeutet dies, dass für diese die Luftmassenbilanz bzw. der relative Luftdruck ermittelt, aber gleichzeitig die

Eingabe der festgelegten Luftwechselzahlen oder Volumenströme deaktiviert wird. Angrenzende Zonen werden automatisch aktiviert, wenn zu einer simulierten Zone ein Strömungsweg definiert ist. Die Außenklima-Zone wird als Zone mit konstantem Druck berücksichtigt.

Bei der Erstellung des Gebäudemodells werden sämtliche Bauteile (Wände, Decken, Fenster) hinzugefügt. Dabei lässt sich festlegen, welche Zone auf der Innenseite und welche auf der Außenseite als Randbedingung angesetzt werden soll. Auch der Typ wird ausgewählt. Neben opaken und transparenten Bauteilen gibt es auch den Typ Öffnung. Der Anwender hat die Aufgabe, sämtliche luftdurchlässige Bauteile zu identifizieren und diese als Strömungsweg zu aktivieren. Darauf sind die Auswahl des Strömungswegmodells und die Eingabe entsprechender Parameter notwendig. Ein opakes Bauteil wird nach dem Strömungsmodell für luftdurchlässige Wände und Decken berechnet. Eine mögliche gegenläufige Strömung wird mit dem Türen-Strömungsmodell bei Fenstern (transparenten Bauteilen) berücksichtigt. Wie zuvor erwähnt, ist hierbei das Lüftungsverhalten des Nutzers von entscheidender Bedeutung. Es ist möglich, mit Hilfe eines Zeitplans, oder durch Einlesen externer Daten die Zeiten festzulegen, für die ein Fenster geöffnet ist. Für ein Bauteil vom Typ Öffnung stehen die weiteren Strömungsweg-Modelle – Öffnung, Fuge, Leckagefläche, Luftschacht, mechanischer Lüfter – zur Auswahl.

4.2 Simulation

Neben der Wärme- und Feuchtebilanz der hygrothermischen Simulation kommt die Luftmassenstrombilanz hinzu. Alle drei Bilanzen erfordern eine iterative Lösung. Die Luftmassenströme verursachen einen Wärme- und Feuchte-transport zwischen Außen- und Innenklima sowie innerhalb des Gebäudes. Das hat zur Folge, dass für jeden Zeitschritt nun drei voneinander abhängige Bilanzen konvergieren müssen.

Der Lösungsalgorithmus von WUFI®Plus passt mit jedem Iterationsschritt die Innentemperaturen und die Innenfeuchten simulierter Zonen an. Beide genannten Größen benötigt das Gebäudedurchströmungsmodell zur Berechnung der Luftmassenströme, wobei der Lösungsalgorithmus die relativen Luftdrücke – mit deutlich geringerem Rechenaufwand – iterativ berechnet. Alleinstehend sind beide Algorithmen weitestgehend evaluiert. Aus diesen Gründen werden die Lösungsalgorithmen weiterhin getrennt eingesetzt. Das Raumklimamodell von WUFI®Plus stellt die äußere Iteration dar, für die mit jedem Iterationsschritt die relativen Luftdrücke konvergieren müssen. Beschleunigt wird dies mit den Initialisierungswerten der relativen Luftdrücke. Beginnt ein Zeitschritt, werden diese mit einem linearen Gleichungssystem durch Annahme einer völlig laminaren Durchströmung berechnet. Nach dem Lösen der Luftmassenbilanz speichert das Gebäudedurchströmungsmodell die resultierenden relativen Luftdrücke und verwendet diese als Initialisierungswerte für folgende WUFI®Plus-Iterations- oder Zeitschritte. Somit erhält WUFI®Plus für jeden Zeit- und Iterationsschritt die dafür berechneten Luftmassenströme, welche beim Aufstellen der Wärme- und Feuchtebilanzen, der Zonen, diesen entsprechend Wärme und Feuchte zu- oder abführen. Das übliche Zeitschritt-Intervall bei energetischer Gebäudesimu-

lation ist eine Stunde. Dies ist ein langer Zeitraum, in dem die Gebäudedurchströmung als konstant betrachtet wird. Vereinzelt führte die Kopplung zu Konvergenzfehlern, besonders bei sehr hohen entgegengesetzten Luftvolumenströmen zwischen zwei Zonen (Türen-Modell). Kleinere Zeitschritt-Intervalle sind als Lösung denkbar, für die die Iteration des Raumklimas ausgeschaltet wird. Die Wärme- und Feuchtebilanzen dienen dann zur Korrektur von Temperatur und Feuchte eines folgenden Zeitschrittes.

5 Beispiel

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Simulation eines kleinen Einfamilienhauses in Holzkirchen mit und ohne Gebäudedurchströmungsmodell beispielhaft gegenübergestellt. Dabei wird ein mittelmäßig luftdichtes Gebäude, mit einer Luftwechselrate von $n_{50} = 4 \text{ h}^{-1}$ angenommen. Für die hygrothermische Simulation ohne Durchströmungsmodell kann dafür ein natürlicher Luftwechsel, stark vereinfacht, von konstant $0,28 \text{ h}^{-1}$ angenommen werden. Es sind zwei Zonen definiert, Zone 2 stellt ein Badezimmer dar. Die Zone 1 fasst die restlichen Räume zusammen (Bild 3).

Für die Simulation mit dem Gebäudedurchströmungsmodell werden identifizierbare Strömungswege mit dem Wand/Decke-Modell eingegeben. Für jedes geschlossene Fenster ($W = 1,2 \text{ m}$; $H = 1,5 \text{ m}$) sind die Fugen auf einer Höhe von $z = 2,65 \text{ m}$ als Strömungsweg definiert. Sie erhalten einen Strömungsexponenten von $n = 0,6$ und einen Strömungskoeffizienten von $C_L = 0,13 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^n)$ (Nr. 1 in Bild 3). Entnommen sind die Werte aus Tabellen zur Leckagecharakteristik ([7] Anhang E). Mögliche weitere Leckagen der verputzten Ziegelwände (Nr. 2) werden mit einem Strömungsexponenten von $n = 0,85$ und einem Strömungskoeffizienten von $C_A = 0,018 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^n)$ berücksichtigt. Die Haustür ($A = 2,4 \text{ m}^2$) stellt ebenfalls einen Strömungspfad (Nr. 3; $n = 0,6$; $C_L = 0,84 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^n)$) dar. Der Mittelpunkt der Tür befindet sich dabei auf $z = 2,0 \text{ m}$ Höhe. Zwischen den beiden Zonen sind eine Innenwand (Nr. 5; $n = 0,8$; $C_A = 0,043 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^n)$) und eine Tür (Nr. 4; geschlossen: $n = 0,6$; $C_L = 1 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^n)$). Es wird angenommen, dass diese Innentür überwiegend geschlossen ist, jedoch morgens und abends für jeweils eine viertel Stunde geöffnet wird. In dieser Zeit ersetzt das Türen-Modell ($C_d = 0,6$; $H = 2 \text{ m}$; $W = 0,8 \text{ m}$) den Strömungspfad. Zur Plausibilitätskontrolle wurde das Druckdifferenz-Verfahren (Blower-Door-Test) simuliert. Der Luftvolumenstrom eines in der Außentür hinzugefügten konstanten Lüfters wurde iteriert, bis sich eine Druck-

differenz von 50 Pa zwischen Außenzone und Zone 1 einstellte. Für das eingegebene Strömungsnetzwerk resultiert eine simulierte Luftwechselrate von $n_{50} = 4,09 \text{ h}^{-1}$. Betrachtet wird eine Woche im Winter (10. 01. bis 18. 01.) mit relativ konstanter Windgeschwindigkeit und niedrigen Außentemperaturen. Die Innenraumtemperatur wird, per Heizung, in Zone 1 konstant auf 20 °C und in Zone 2 konstant auf 22 °C gehalten. Des Weiteren wird eine Woche im Sommer (11. 07. bis 18. 07.) mit stark ansteigender Windgeschwindigkeit und ausgeschalteter Heizung betrachtet. Die jeweils simulierte natürliche Belüftung in Abhängigkeit zur Windgeschwindigkeit und Außentemperatur ist in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Es soll damit verdeutlicht werden, dass die natürliche Belüftung stark schwanken kann und des Weiteren Auswirkungen auf das Innenklima (Bild 6) im Vergleich zu einer konstant angenommenen Luftwechselrate hat. Die dargestellten Beispiele missachten, dass die Fenster geöffnet sein können. Verschiedene Öffnungsvarianten und -zeiten der Fenster können ausführlich weiter untersucht werden.

6 Zusammenfassung

Das Gebäudedurchströmungsmodell liefert voneinander abhängige Luftmassenströme für identifizierte Strömungswege eines Gebäudes. Sämtliche Teilmodelle zur Berechnung der Strömungswege sind vorhanden. Kleine Öffnungen wie Fugen, Schlitz und Luftdurchlässe sowie große Öffnungen, geöffnete Türen und Fenster lassen sich berücksichtigen. Es wird eine Zwei-Wege-Strömung erfasst, für den Fall gleichzeitiger Ein- und Ausströmung von Luft durch große Öffnungen. Mechanische Lüftungssysteme können ebenfalls berücksichtigt werden. Der Wind sowie das Außen- und Innenklima beeinflussen die Durchströmung. Gekoppelt mit der hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus bietet es dem Anwender eine erweiterte Simulation natürlicher und mechanischer Belüftung.

Es folgt die Validierung der gekoppelten Simulation anhand von Messdaten. Der Vergleich mit Gebäudesimulationssoftware, wie ESP-r, TRNSYS und EnergyPlus mit ebenfalls integriertem Multi-Zonen-Durchströmungsmodell, jedoch vereinfachten Ansätzen zum Feuchteverhalten, ist denkbar.

Zur Kontrolle, ob ein Strömungsnetzwerk inklusive eingegebener Strömungsparameter plausibel ist, kann das Druckdifferenz-Verfahren (Blower-Door-Test) simuliert und die n_{50} -Zahl für das Gebäudemodell ermittelt werden. Mit integriertem Gebäudedurchströmungsmodell ist eine Bearbeitung und Erstellung einer Vielzahl von Inputdaten zur Eingabe der Luftwechselraten oder Volumenströme in WUFI® Plus nicht mehr notwendig – sie werden simuliert.

Danksagung

Diese Studie wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie finanziert (BMW 0329663L).

Literatur

- [1] EnergyPlus Engineering Reference 2010. University of Illinois und Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, pp. 433–454.

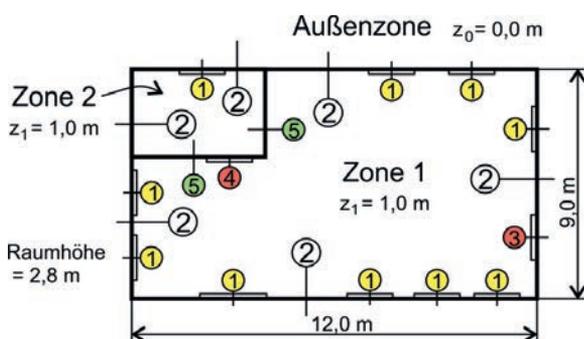


Bild 3. Draufsicht Strömungsnetzwerk
Fig. 3. Flow network plan

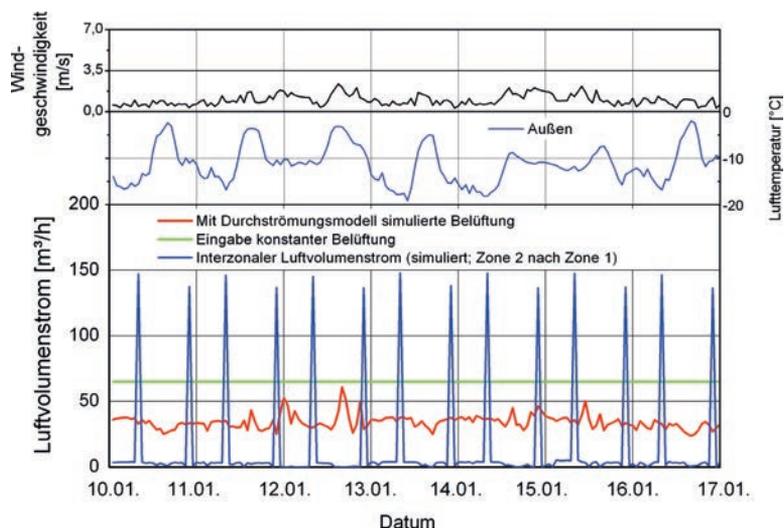


Bild 4. Simulation natürlicher Belüftung (Winterwoche)

Fig. 4. Simulation results natural ventilation (week in the winter)

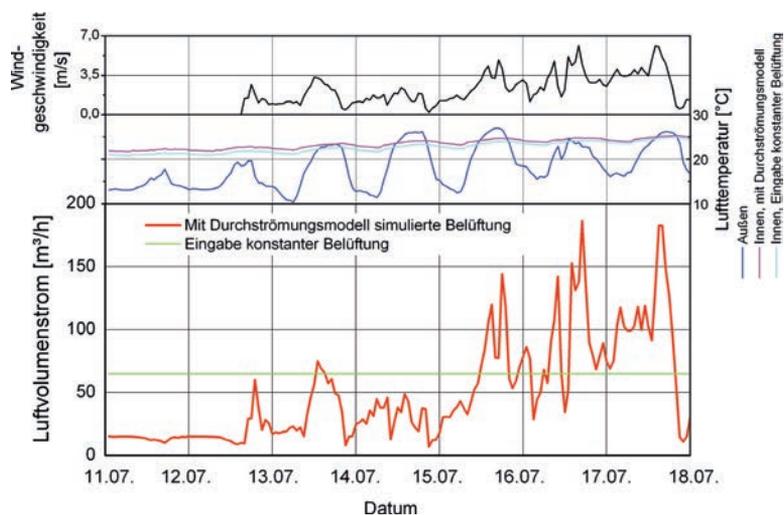


Bild 5. Simulation natürlicher Belüftung (Sommerwoche)

Fig. 5. Simulation results natural ventilation (week in summer)

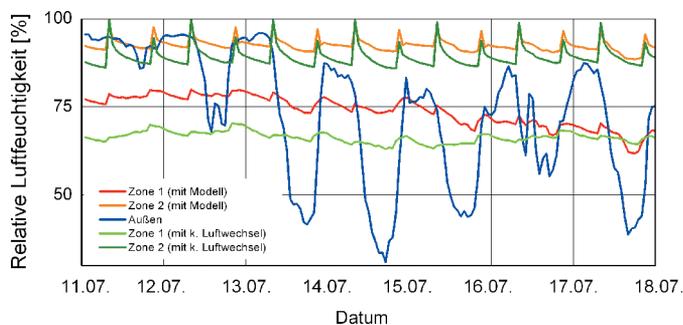


Bild 6. Feuchteverhalten der Zonen (Sommerwoche)

Fig. 6. Humidity within the zones (week in summer)

[2] Holm, A., Radon, J., Künzel, H. M., Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94.
 [3] Künzel, H. M.: Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
 [4] Lengsfeld, K., Holm, A.: Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI®-Plus. Bauphysik 29 (2007), H. 3, S. 178–186.
 [5] Megri, A. C., Haghghat, F.: Zonal Modeling for Simulating Indoor Environment of Building: Review, Recent Developments, and Applications. ASHRAE, Vol. 13 (2007), Number 6, HVAC&R Research.

[6] Norrefeldt, V., Grün, G., Sedlbauer, K.: VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space. Building and Environment 48 (2012), pp. 183–194.
 [7] Orme, M.: Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations. Technical Note AIVC 51, Air Infiltration and Ventilation Centre, International Energy Agency, Oscar Faber Partnership, Great Britain 1999.
 [8] Swami, M. V., Chandra, S.: Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. ASHRAE Transactions 94 (1988), Pt. 1, S. 243–266.
 [9] Walker, I., Wilson, D., Sherman, M.: A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations. Energy and Buildings Vol. 27 (1997), No. 3, June.
 [10] Walton, G. N., Dols, W. S.: CONTAMW 2.4 user manual. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2008.
 [11] Walton, G. N.: AIRNET – A Computer Program for Building Airflow Network Modeling. NISTIR 89-4072, National Institute of Standards and Technology, 04/1989.
 [12] WUFI-wiki 2012. <http://www.wufi-wiki.com>

Autoren dieses Beitrages:

Matthias Pazold, M.Eng.
 Florian Antretter, M.Eng., Gruppenleiter
 Hygrothermische Gebäudeanalyse, Abteilung Hygrothermik
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Institutsteil Holzkirchen
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley