MESSTECHNISCHE UND SIMULATIONSBASIERTE ANALYSEN AN EINEM THERMISCHEN MODELLHAUS

Manuel Ljubijankic, Christoph Nytsch-Geusen, Michael Schmidt, Daniel Unterberg
Institut für Architektur und Städtebau, Universität der Künste Berlin,
D-10623 Berlin, Germany
Email: nytsch@udk-berlin.de

SCHLÜSSELWÖRTER:

Thermisches Modellhaus, Messwerterfassung mittels LEGO-Mindstorms, vergleichende CFD-Analyse

KURZFASSUNG

Am Lehrstuhl für Versorgungsplanung und Versorgungstechnik der UdK Berlin wird ein thermisches Modellhaus für Lehr- und Forschungszwecke entwickelt [1]. Mit dieser Versuchseinrichtung soll in Lehrveranstaltungen das Grundprinzip der Raumenergiebilanz (messtechnische Analyse der thermischen Verluste und Gewinne sowie der Lufttemperaturschichtung), die Wärme- und Lufttransportvorgänge im Gebäude (z.B. Kamineffekt) sowie der Grundfunktionalitäten der energetischen Gebäudetechnik (Heizen, Kühlen, Lüften, Fassadenverschattung etc.) im realen physikalischen Prozess erfahrbar gemacht werden. Mittels vergleichender CFD-Simulationsrechnungen sollen die Wärmetransportvorgänge und die Raumluftströmungen innerhalb des thermischen Modellhauses analysiert werden.

ABSTRACT

A thermal model house is being developed at the chair of supply planning and building services engineering of UdK Berlin for the use in education and research [1]. With this testing facility the basic principle of the room energy balance (measurement analysis of the thermal losses and gains as soon as air temperature stratification), the heating transport and air movement phenomena (e.g. stack-effect) and also basic functionalities of energy building technologies (heating, cooling, ventilation, façade shadowing) shall be experienced within the real physical process. In addition, comparative CFD calculations were carried out to analyse the heating transfer processes and the air ventilation effects within the thermal model house.

EINFÜHRUNG

Das thermische Modellhaus wurde mit sehr kompakten Abmessungen konzipiert (Innenmaße: 1m x 0,5m x 0,5m), damit es von zwei Personen noch einfach transportiert werden kann (vgl. Abbildung 1). Die mehrschichtigen Außenwände, der Boden und das Dach bestehen weitgehend aus Holz und Polystyrol und die Fenster aus einer Einfachverglasung.

Das Modellhaus wurde mit einer hohen Flexibilität ausgestattet: Seine Fassade und sein Dach können gegen Typen unterschiedlicher Bauart ausgetauscht werden. Optional lässt sich eine Innenwand ergänzen, welche das Gebäudeinnere in zwei getrennte thermische Zonen aufteilen kann. Jede dieser Zonen kann jeweils über eine Fußbodenheizung beheizt und/oder über eine Kühldecke mittels Peltier-Elemente gekühlt werden.

Abbildung 1 Thermisches Modellhaus mit Kühldeckenvariante

Zwei Zu- und Abluftventilatoren ermöglichen zudem einen kontrollierten Luftaustausch mit der Umgebung. Der thermische Zustand des Modellhauses wird über das *LEGO Mindstorms NXT 2.0 System* [2] messtechnisch erfasst und optional auch geregelt: Über Temperatursensoren werden z.B. die Außen- und Innenluftzustände gemessen und über eine programmierbaren Algorithmus weiterverarbeitet (z.B. Anpassung der Heizleistung zur Einhaltung einer Soll-Raumtemperatur).

DIDAKTISCHES KONZEPT

Bei der Ausbildung von Studierenden der Architektur sowie der fachplanerischen Studiengänge (Gebäudetechnik, Energietechnik, Bauingenieurwesen) werden das Fachwissen über das thermische "Funktionieren" des Baukörpers sowie die Strategien zur Herstellung bestimmter Raumklimata zunächst qualitativ diskutiert. Ergänzend werden bei der Wissensvermittlung bauphysikalische Rechenmodelle genutzt und in Simulationsexperimenten angewandt.

Abbildung 2 Das thermisches Modellhaus im Einsatz bei der studentischen Ausbildung (Durchführung eines Aufheizversuchs mit „künstlicher Sonne")

I.d.R. fehlt aber darüber hinaus die Möglichkeit die bauphysikalischen Effekte in der Gebäudehülle (z.B. thermische Trägheit) oder die einzelnen Anteile in der thermischen Raumenergiebilanz (Wärme-transmission, Lüftungsverluste, kurzwellige Strahlungsgewinne etc.) für ein Gebäude im Experiment direkt messtechnisch erfahrbar zu machen (vgl. Abbildung 2).

Das in diesem Beitrag vorgestellte thermische Modellhaus soll helfen diese Lücke zu schließen, in dem mit ihm eine Versuchseinrichtung zur Verfügung gestellt wird, mit deren Hilfe alle wesentlichen Aspekte der Gebäudeheizung und –klimatisierung im Experiment nachvollzogen werden können. Hierzu gehören u.a.

- die Bestimmung von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten eines Raumes,
- die thermische Zonierung von Gebäuden,
- das Verstehen der thermischen Dynamik eines Raumes,
- die Analyse der thermischen Luftschichtung,
- die Einflüsse natürlicher und erzwungener Lüftung auf das Raumklima,
- der Einfluss kurzwelliger Strahlung auf die transparente Fassade und das Raumklima,
- die Untersuchung und Entwicklung von Regelungsstrategien zur Herstellung eines bestimmten Raumklimas (z.B. gezielte Beeinflussung der Heiz- und Kühlleistungen bzw. der Fassadenverschattungseinrichtung).

BAUKONSTRUKTION

Die Geometrie des Gebäudes ist symmetrisch gehalten (vgl. Abbildung 3): Durch die Spiegelung der linken und der rechten Gebäudehälfte in Wand- und Fensterabmaßen, sowie bzgl. der gedoppelten Fußbodenheizungen und Kühldecken werden klare Voraussetzungen für die Versuchsanordnungen geschaffen. Aus diesem Grund ist auch der Grundaufbau aller Decken und Wände im Sinne der Überprüfbarkeit gleich gehalten: 30mm Kerndämmung wird beidseitig von Holz (6mm / 12mm) bekleidet. Der Einsatz von besonders stabilen und verformungssicheren Multiplex-Sperrholz bietet robuste Stabilität für den Einsatz in der Lehre.

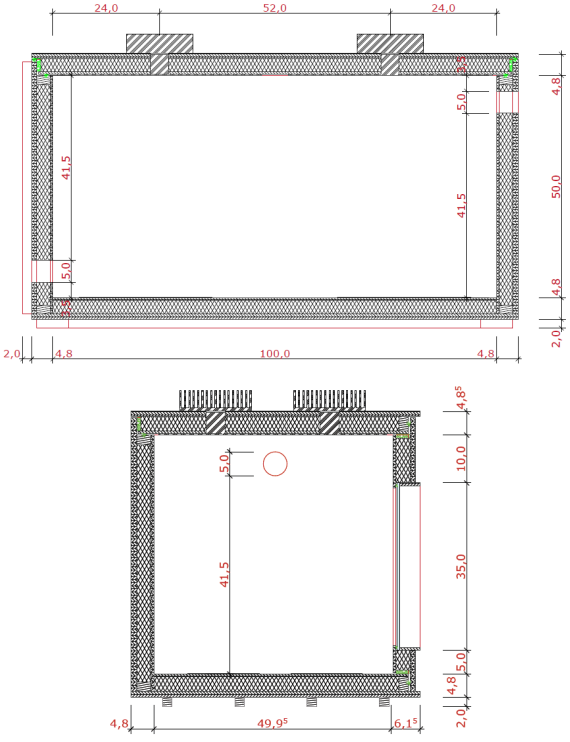

Abbildung 3 Baukonstruktion des thermischen Modellhauses im Längs- und Querschnitt

Alle Fugen sind mit dauerelastischem PU-Leim luftdicht verklebt. An den Doppelfalzen der austauschbaren Deckenteile und Vorderfront sorgen zwei Gummidichtungen für die Luftdichtheit, sodass durch die Ventilatoren ein definierter Luftstrom eingelassen werden kann. Die Fenster sind ebenfalls luftdicht eingebaut - können aber bei Bedarf auch angekippt werden.

Um Wärmebrücken zu vermeiden, wurde die gesamte Verkabelung der elektrischen Versorgung und der Meß- und Regeltechnik in maximal 8mm tiefen Kanälen in der Dämmebene direkt unter der inneren Verkleidung angelegt. Außerdem können einzelne Komponenten wie Stecker oder Kabel so bei Bedarf leicht ausgetauscht werden.

Eine mittig umlaufende Nut ermöglicht das Einsetzen von Innenwänden, welche dann das Modellgebäude in zwei gleich große thermisch getrennte Kammern mit jeweils eigenem Fenster und eigener Heiz- und Kühlfläche aufteilt. Eine Variante dieser Innenwände ist mit zwei klappbaren runden Öffnungen versehen, über welche ein Luftaustausch zwischen den beiden innerern Zonen über einen *LEGO Mindstorms NXT*-Stellmotor gezielt ermöglicht oder unterbunden werden kann.

GEBÄUDETECHNIK

Das thermische Modellhaus kann in seiner jetzigen Ausbaustufe sowohl über eine Flächenheizung als auch über eine Flächenkühlung klimatisiert werden. Zur Energieversorgung dieser beiden Funktionen werden zwei programmierbare Labornetzgeräte genutzt, über welche sich auch Leistungsprofile generieren und so dem Modellhaus als äußere Randbedingungen aufprägen lassen. Die Netzgeräte versorgen zwei „Fußbodenheizungen“ (Heizfolien) mit jeweils max. 70W Heizleistung oder zwei „Kühldecken“ mit jeweils max. 28W Kühlleistung (Peltier-Elemente). Alle Heiz- und Kühldecken lassen sich getrennt schalten, sodass im Versuch auch gleichzeitig geheizt und gekühlt werden kann. Die Verwendung vollflächiger Aluminiumplatten an Decke und Boden sorgt in beiden Fällen für eine gute Wärmeübertragung bei kleinen Temperatur-differenzen.

Ein Zuluft- und ein Abluftventilator werden über ein eigenes regelbares Netzteil versorgt und ermöglichen gemeinsam einen maximalen Luftvolumenstrom von 27m³/h, was einem Luftwechel von $108h^{-1}$ entspricht. Die Ventilatoren sind in den beiden gegenüberliegenden Querseiten des Modellgebäudes eingelassen, wobei im unteren Bereich des Gebäudes die Außenluft einströmt und die Abluft im oberen Bereich das Gebäude verlässt.

MESSTECHNIK

Zur Messwerterfassung und –auswertung wird beim thermischen Modellhaus das *LEGO Mindstorms NXT 2.0* System [2] verwendet. Drei Temperatur-sensoren messen in der Standardversuchsanordnung in der Raummitte die Lufttemperaturen in 7cm, 24cm und 42cm Höhe oberhalb der Fußbodenheizungen. Durch die relativ große geometrische Ausdehnung der derzeit verwendeten NXT-Temperatursensoren kann die horizontale Position der gemessenen Lufttemperaturen nur ungefähr angegeben werden. In Erwartung, dass der Sensor jedoch an der Spitze des Metallstabes am empfindlichsten ist, wurden sie so ausgerichtet, dass die Spitze genau in der Raummitte liegt. Über adaptive Halterungen können die Lufttemperatur-sensoren auch leicht an anderen Punkten im Raum positioniert werden. Ein weiterer Temperatursensor zusätzlich die Umgebungslufttemperatur in etwa einem halben Meter Abstand zum Modellhaus.

Die Messwerte werden über einen NXT-Baustein erfasst, dort zwischengespeichert und zur Darstellung und weiteren Auswertung an das auf LabVIEW basierende NXT-Datenaufzeichnungs-programm weitergeleitet (vgl. Abbildungen 4 und 5).

Abbildung 4 Messwerterfassung über das LEGO Mindstorms NXT 2.0 System (Temperatursensor und NXT-Baustein zur Datenaufzeichnung)

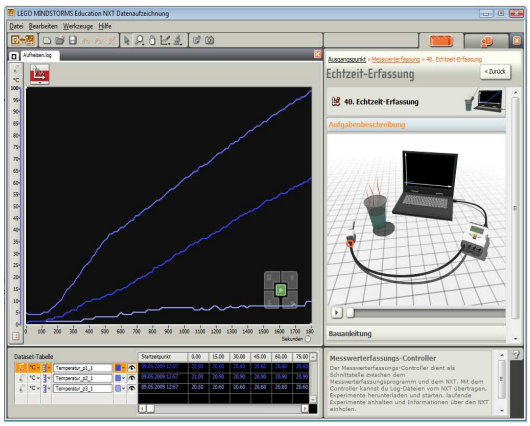

Abbildung 5 Datenaufzeichnungsprogramm des LEGO Mindstorms NXT 2.0 System

MESSTECHNISCHE UNTER-SUCHUNGEN AM MODELLHAUS

Im Rahmen einer Studienarbeit [3] wird das thermische Modellhaus derzeit intensiv vermessen. Das Messprogramm umfasst verschiedene Szenarien zur Gebäudeheizung und zur Gebäudekühlung. Abbildung 6 zeigt den gemessenen Verlauf der Lufttemperaturen für den reinen Aufheizvorgang, bei dem beide Heizflächen mit einer konstanten Leistung (2 x 60W, mit durch das Netzteil bedingte Schwankungen von +/- 2W) betrieben werden und der Luftwechsel mit der Umgebung unterdrückt wird.

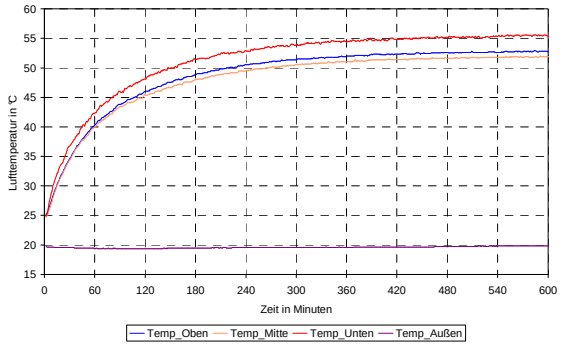

Abbildung 6 Aufheizvorgang ohne Außenluftwechsel bei voller Heizleistung (2 x 60W)

Es stellt sich eine maximale Raumlufttemperatur von ca. 52 bis 56°C bei einer Umgebungstemperatur von knapp 20°C nach ca. 10 Stunden Aufheizzeit ein. Während der gesamten Aufheizphase zeigt der Temperatursensor über der Bodenheizplatte den höchsten Wert an. Im thermisch eingeschwungenen Zustand kann mit dem Aufheizversuch aus der Differenz der Außenlufttemperatur (20,1°C) und der über die drei Sensoren gemittelten Raumluft-temperatur (53,7°C) bei bekannter Heizleistung (120W) für das Modellhaus ein thermischen Verlustfaktor von 3,6W/K bestimmt werden.

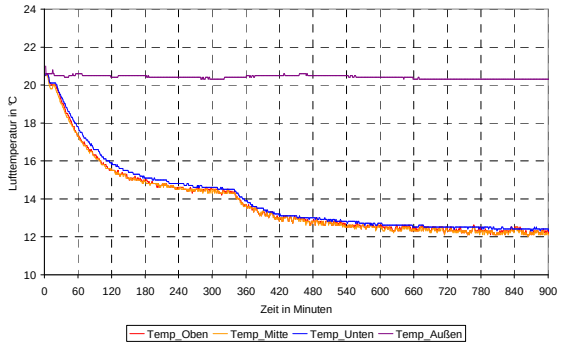

Abbildung 7 Abkühlvorgang ohne Außenluftwechsel bei voller Kühlleistung

Abbildung 7 zeigt den gemessenen Verlauf der Lufttemperaturen für den reinen Abkühlvorgang, bei dem Peltier-Elemente zunächst 340 Minuten mit verminderter elektrischer Leistung und danach mit voller elektrischer Leistung (2 x 40W) betrieben werden. Auch in diesem Versuch ist der Luftwechsel mit der Umgebung unterdrückt.

Bei voller Kühlleistung der Peltier-Elemente stellt sich nach ca. 15 Stunden Abkühlzeit ein stationärer Zustand ein, wobei an den drei Meßpunkten Raumlufttemperaturen von etwas über 12°C bei einer Umgebungslufttemperatur von 20,3°C gemessen werden. Während der gesamten Abkühlphase liegen die Werte aller drei Temperatursensoren dicht beieinander, wobei die Lufttemperatur in Bodennähe stets minimal nach oben abweicht. Auf Grundlage des im Heizversuch ermittelten thermischen Verlustfaktors von 3,6W/K, einer maximal erzielbaren Differenz zwischen der Außenlufttemperatur und der aus den drei Meßpunkten gemittelten Raumlufttemperatur vom 8,0°C ergibt sich für den Gleichgewichtszustand eine aus dem Raum abgeführte Kälteleistung von ca. 29W. Dies entspricht einem mittleren COP (Coefficient of Performance) für die Peltier-Elemente unter realen Betriebsbedingen von

$$COP = \frac{Q_{kühlen}}{P_{elektrisch}} = \frac{29W}{80W} = 0{,}36\,.$$

MODELLIERUNG UND SIMULATION

Für eine vergleichende theoretische thermische Analyse wurde die Gebäudehülle des thermischen Modellhauses als dreidimensionaler wärmeleitender Baukörper und sein Raumluftvolumen als dreidimensionales Strömungsgebiet mittels des Simulationswerkzeugs ANSYS-CFD [4] modelliert (vgl. Abbildung 8).

Die dreidimensionale Modellierung hat den Vorteil, dass die am realen Modellhaus erhobenen Messwerte direkt mit den Simulationsergebnissen des numerischen Modells verglichen werden können.

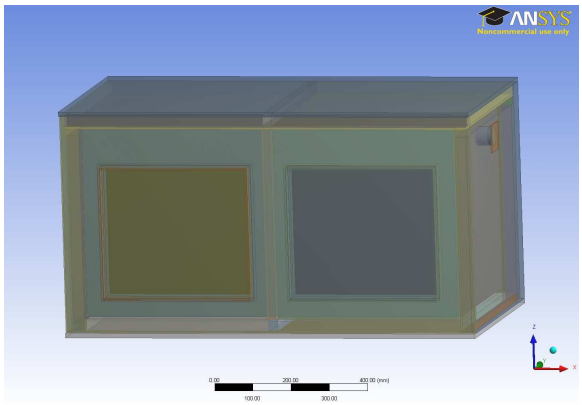

Abbildung 8 Thermischen Modellhauses, modelliert in ANSYS CFD

Darüber hinaus können im numerischen Modell auf diese Weise alle geometrischen und stofflichen Wärmebrücken realitätsnah abgebildet werden. Die detaillierte dreidimensionale Modellierung in ANSYS-CFD erfordert einen hohen Berechnungs-aufwand. Das Berechnungsgebiet der Gebäudehülle (Festkörper) wird für eine ausreichende Berechnungsgenauigkeit in 0,35Mio. Volumen-elemente und die des Raumluftvolumens in 2,14Mio. Volumenelemente diskretisiert.

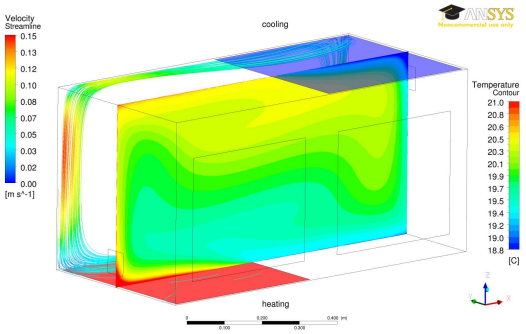

Abbildung 9 CFD-Simulation des kombinierten Heiz- und Kühlfalls (Temperaturfeld und Stromlinien)

Abbildung 9 zeigt eine beispielhafte stationäre Simulation für einen gemischten Heiz- und Kühlfall, bei dem die linke Bodenheizplatte beheizt und die rechte Kühldecke gekühlt wird. Die Außenlufttemperatur wurde hierbei mit 20°C angenommen. Die Heiz- und Kühlleistungen sind vom Betrag her gleich groß (15W), so dass die Energiebilanz des Modellhauses insgesamt ausgeglichen ist. Die Simulationsrechnung zeigt bei dieser Konfiguration für den Raumluftzustand eine maximale Luftgeschwindigkeit von 0,15m/s bei einem vertikalen Temperaturgradient von knapp 2°C.

VERGLEICH MESSUNG / SIMULATION

Für die Variante des reinen Aufheizversuchs ohne Außenluftwechsel (vgl. Abbildung 6) wird ein vergleichendes stationäres CFD-Simulationsexperiment, basierend auf einem k-ε-Modell gegenübergestellt. Hierzu wird dem Simulationsmodell als äußere Randbedingung die gemessene Außenlufttemperatur im thermisch eingeschwungenen Zustand nach 600 Minuten (19,8°C) sowie den Fußbodenheizungen ein Wärmestrom von jeweils 60W aufgeprägt.

Abbildung 10 zeigt die berechneten Geschwindigkeitsvektoren im Längsschnitt in der Gebäudemitte sowie im Querschnitt des Gebäudes auf der Mitte der rechten Gebäudehälfte (vgl. Schnittebenen der Abbildung 12). Es ist deutlich zu erkennen, daß die maximalen Luftgeschwindigkeiten von 0,14m/s, auf Grund der sich einstellenden freien Konvektion, direkt oberhalb der Fußbodenheizung auftreten. Auf Grund der Wärmeverluste durch die Gebäudehülle sinkt die sich abkühlende Luft an den Gebäudeseiten herab, streicht über beide Heizflächen in Richtung Raummitte und steigt dann erwärmt in der Mitte des Modellhauses bis zur Decke, wo sich die warme Luft sammelt. Der erhöhte Transmissionswärmeverlust durch die beiden Fenster bewirkt an der Innenfensteroberfläche eine verstärkte Abwärtsbewegung der abgekühlten Raumluft.

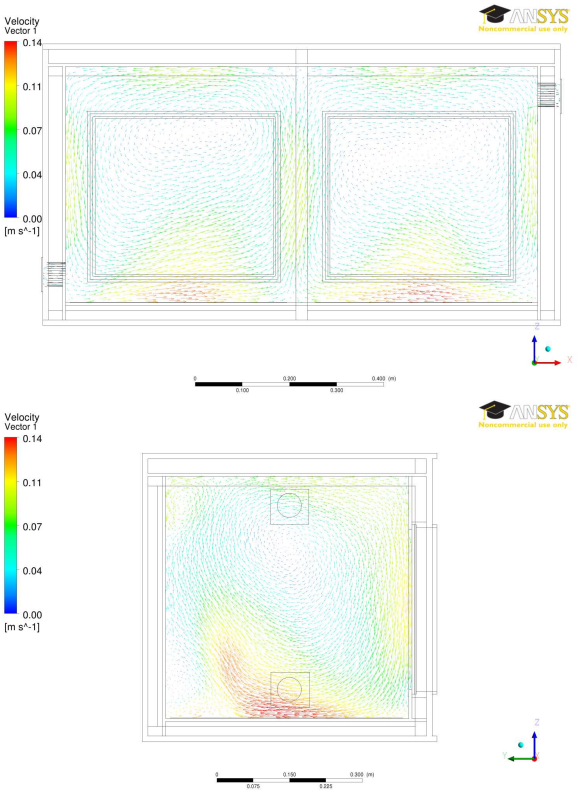

Abbildung 10 CFD-Simulation des Heizfalls (Strömungsfelder der Raumluft im Längs- und Querschnitt)

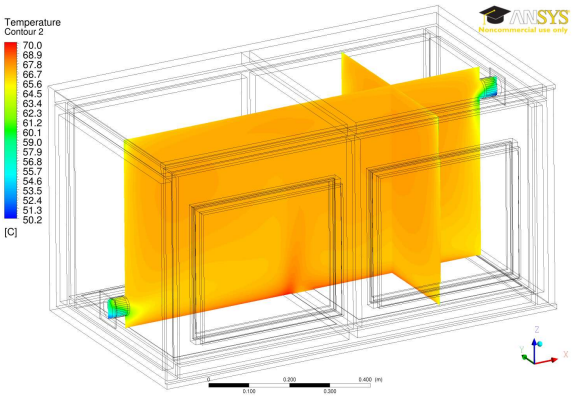

Abbildung 11 CFD-Simulation des Heizfalls (Temperaturfelder der Raumluft)

Aus Abbildung 11 ist zu ersehen, dass sich im Modellhaus ein relativ gering ausgeprägter vertikaler Temperaturgradient bei der Raumluft einstellt. Es wurde eine über das gesamte Raumluftvolumen gemittelte Temperatur von 66,9°C im Simulationsexperiment berechnet. Die geringsten Lufttemperaturen von ca. 5°C finden sich in den Bereichen der mit dicker Pappe und Klebeband abgedichteten Luftein- und auslässe, da diese beiden Orten eine Wärmebrücke darstellen.

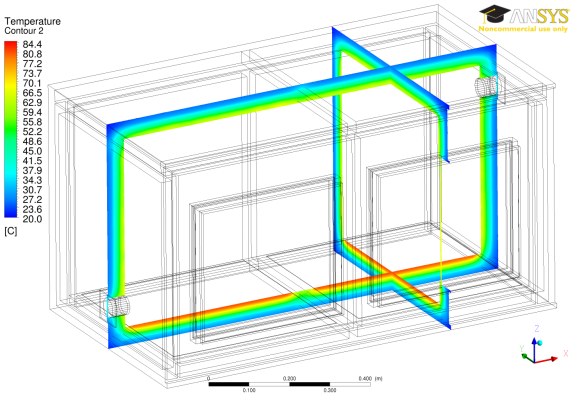

Abbildung 12 CFD-Simulation des Heizfalls (Temperaturfelder in der Gebäudehülle)

In Abbildung 12 ist auf dengleichen Schnittebenen der Temperaturverlauf in der Baukonstruktion des Modellhauses und in den Fußbodenheizplatten dargestellt. Deutlich ist der Wärmebrückeneffekt in den Wand- und Bodenanschlüssen, den Luftein- und auslässen sowie bei den einfach verglasten Fenstern zu sehen. Die höchsten Temperaturen von gut 80°C treten an der Oberfläche der Fußbodenheizungen auf. Die Simulation zeigt aber auch, daß der Fußboden nach unten ausreichend gedämmt ist, so dass die Heizwärme nahezu ausschließlich der Raumluft zugeführt wird.

Der direkte Vergleich von gemessener und simulierter Raumlufttemperatur läßt sich zur Zeit erst ansatzweise durchführen. Werden die Lufttemperaturen im Versuch und in der Simulation an den gleichen Positionen verglichen, stellt sich in bedien Fällen qualitativ die gleiche Abfolge bei den Temperaturniveaus ein (höchste Temperatur über der Heizplatte, zweit höchste Temperatur unter der Decke, gefolgt von der Temperatur in Raummitte).

Allerdings liegen die im Aufheizversuch gemessenen Werte mit ca. 52°C - 56°C insgesamt noch deutlich unterhalb der in der Simulation ermittelten durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 66,9°C. Daher wird nun sowohl auf experimenteller Seite als auch auf CFD-Modellierungsebene versucht die Fehlerquellen für diese erhebliche Abweichung aufzufinden und abzustellen. Als mögliche Ursachen und Abhilfen kommen hierfür in Betracht:

- zusätzlicher Wärmeverlust beim thermischen Modellhaus auf Grund eines unkontrollierten Luftwechsels durch eventuell noch vorhandener Undichtigkeiten an der Gebäudehülle → Verbesserung der Gebäudeabdichtung,
- eventuelle Meßungenauigkeit der Sensoren → derzeit werden die Standard NXT-Temperatursensoren mit hochwertigeren Temperatur-Meßfühlern verglichen,
- eventuell nicht repräsentative Positionen für die Meßfühler → wiederholte Messungen mit alternativen Meßfühleranordnungen,
- Unzulänglichkeiten des numerischen CFD-Modells → Verwendung von noch örtlich besser aufgelöster Diskretisierungen, Berechnungen mit alternativen ANSYS CFD-Strömungsmodellen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der jetzigen Ausbaustufe besitzt das thermische Modellhaus die Grundfunktionen Flächenheizung, und Flächenkühlung sowie Lüften. Mit vergleichenden CFD-Simulatiuonsrechnungen läßt sich zur zeit das experimentell ermittelte Verhalten im reinen Aufheizversuch qualitativ, jedoch noch unzureichend quantitativ nachvollziehen.

Zukünftig soll über eine weiteres Zusatzmodul die beiden Funktionen „Luftheizung“ und „Luftkühlung“ ergänzt werden, wobei die ebenfalls über Peltier-Elemente vorkonditionierte Zuluft über die bisherige Ventilatoröffnungen eingebracht bzw. als Abluft abgeführt werden soll.

Eine weitere Ausbaustufe sollen geregelte Funktionen über das Lego Mindstorms NXT System darstellen, wie z.B. der motorbetriebene Regelung einer Verschattungseinrichtung (Außenrollo) in Abhängigkeit der gemessen Helligkeit im Modellhaus und/oder der Raumlufttemperatur.

LITERATUR

[1] Homepage Thermisches Modellhaus: http://www.thermisches-modellhaus.de

[2] Homepage Lego Mindstorms NXT: http://mindstorms.lego.com

[3] Michael Schmidt: Messtechnische Untersuchung, Modellierung und Simulation des thermischen Modellhauses. Studienarbeit an der TU Berlin (in Bearbeitung), 2010

[4] Homepage ANSYS CFD: http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfd