

LandesSportBund Niedersachsen e.V.



Planung unterschiedlicher Heizwärmezuführungen

im Rahmen des
Neubaus des Sportinternates des Olympiastützpunktes
u. Neubaus einer Sporthalle für die Akademie des Sports

Abschlussbericht der Studie
gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Az: 26549/02

gefördert durch



Erstellt von
Architektur- und Planungsbüro Grobe Passivhaus
Dipl.-Ing. Architekt Carsten Grobe
Boulevard der EU 7, [F]INBOX
30539 Hannover
www.passivhaus.de



Hannover, Dezember 2009

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	26549/02	Referat	25	Fördersumme	22.015,00 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	--------------------

Antragstitel **Planung unterschiedlicher Heizwärmezuführungen im Rahmen des Neubaus des Sportinternats des Olympiastützpunktes und Neubaus einer Sporthalle für die Akademie des Sports**

Stichworte Passivhaus, Heizwärme, Lüftung, Bauteilaktivierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
6 Monate	20.03.2009	20.09.2009	1

Zwischenberichte 06.05.2009

Bewilligungsempfänger	LandesSportBund Niedersachsen e.V. Herr Reinhard Rawe Ferdinand-Wilhelm-Fricke-Weg 10 30037 Hannover	Tel 0511 / 1268-150 Fax 0511 / 1268-153
		Projektleitung Dipl.-Ing. Carsten Grobe
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Markus Behme

Kooperationspartner Architektur- und TGA-Büro Grobe Passivhaus
Boulevard der EU 7
30539 Hannover
Tel. 0511 / 400649-0, Fax -70
www.passivhaus.de

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der LandesSportBund Niedersachsen e.V. plant auf seinem Gelände in Hannover die Erweiterung des Sportinternats um einen Neubau sowie die Neuerrichtung einer Dreifeldsporthalle im Passivhausstandard. Bei jedem Passivhaus-Bauvorhaben stellt sich die Frage, welche Art der Wärmeverteilung zum Einsatz kommen soll.

Gewöhnlich muss bereits im Vorfeld eine Variante ausgewählt werden, die letztendlich realisiert werden soll. Die anschließende Nutzerakzeptanz bestätigt die Variante oder es muss evtl. nachgebessert werden. Ein direkter Vergleich der Systeme bezüglich der Nutzerakzeptanz und der Wirtschaftlichkeit in einem identischen Gebäude in Abhängigkeit von Investition und Energiekosten konnte bisher nur simuliert werden. Bei dem Bauvorhaben des LandesSportBundes Niedersachsen hat man die Möglichkeit, innerhalb eines Gebäudes mit vergleichbarem Nutzerverhalten mehrere Varianten zu installieren, um im Nachhinein die Systeme miteinander vergleichen zu können.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der wesentliche Bestandteil der Passivhaustechnik ist die Lüftungsanlage. Bei dem Neubau des Sportinternates soll in den Bewohnerzimmern ein zusätzliches System zur Betonkernaktivierung eingesetzt werden, welches seit einiger Zeit in Bürogebäuden ausschließlich zur Kühlung eingesetzt wird. Dieses System vereint die herkömmlichen Funktionen kontrollierter Luftversorgung und das Kühlen in einer Bauteilaktivierung. Für das Sportinternat soll dieses System auch zum Heizen eingesetzt werden.

Folgende drei Varianten der Heizwärmezufuhr sollen bei diesem Projekt miteinander verglichen werden:

Wärmeverteilung über das Lüftungsnetz:

Es kann weitestgehend auf ein klassisches Heizungsnetz verzichtet werden, so dass die Investitionskosten relativ gering bleiben. Allerdings hat der Nutzer bei einer Wärmeverteilung über das Lüftungsnetz keinen direkten Einfluss auf die Raumtemperatur. Die individuelle Einzelraumregelung ist nicht möglich, was zu Problemen bei der Nutzerakzeptanz führen kann.

Konventionelles Heizsystem:

Bei der Wärmeverteilung und Bereitstellung über ein konventionelles Heizsystem mit Heizkörpern in jedem Raum kann der Nutzer über Thermostatventile eine individuelle Raumtemperatur einstellen. Das Lüftungssystem stellt die Grundheizlast zur Verfügung und über die Heizkörper werden die individuellen Spitzen gedeckt.

Bei diesem System besteht die große Gefahr der Fehlbenutzung, da z.B. das hohe Wärmeangebot der Heizkörper über die Fenster abgelüftet werden kann. Außerdem entstehen „doppelte“ Investitionen durch die zusätzliche Wärmeverteilung.

Wärmebereitstellung über das Lüftungsnetz mit Nachheizregistern:

Das Lüftungssystem erhält zusätzlich für jede Nutzereinheit ein Nachheizregister, welches individuell eingestellt werden kann. Heizkörper sind hierbei nicht erforderlich. Ein Fehlverhalten der Nutzer ist nicht so gravierend, da dem Raum nur so viel Wärme zugeführt wird, wie über die Luftmenge möglich ist. Die Kosten bewegen sich in ähnlicher Größenordnung wie bei der Variante mit Heizkörpern.

Es wurde eine dynamische Gebäude- und Anlagensimulationsberechnung mit der etablierten Software TRNSYS durchgeführt, die eine gekoppelte Simulation des Gebäudes, der geplanten Anlagentechnik ermöglicht. Als Ergebnis kann die thermische Behaglichkeit in den Räumen beurteilt werden, sowie die jeweiligen Jahresenergieverbräuche der betrachteten Varianten gegenüber gestellt werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die Simulation erbrachte die folgenden Erkenntnisse:

- Eine gemeinsame Zuluft(grund)temperierung für alle drei Zonen ist technisch, energetisch, und für einen gewissen Grundkomfort ausreichend. Die Schwelle von 40 °C als nötige Zulufttemperatur wird nur an wenigen Stunden im Jahr überschritten, eine freie Wahl des Wärmeerzeugers ist möglich.
- Eine bedarfsabhängige Nachttemperierung ist regelungstechnisch einfach zu erreichen.
- Die Betonkernaktivierung über den Zuluftkanal bringt gewisse Vorteile, speziell eine moderate Speicherwirkung, die bei Spitzenlasten den Wärmeerzeuger entlasten kann. Wichtig ist dabei die Dimensionierung der Rohrlänge. Aufgrund der geringen Luftmenge wird die mitgeführte Wärme bereits in den ersten 1-3 Metern fast vollständig abgegeben. Bei der hier vorliegenden geometrischen Situation ist es entscheidend, dass diese (aktiven) Meter möglichst nah an der Raummitte liegen.
- Temperaturregelung durch einfache, lineare Regelungsfunktion ist möglich.
- Gezielte Anpassung der Lüftungsleitungsführung ist mit geringem Mehraufwand möglich.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vorstellung der Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen von Vorträgen durch das Architektur- und TGA-Büro Grobe (z.B. PH-Zertifizierer-Lehrgang in Hamburg am 09.02.2010).

Einbindung in die Öffentlichkeitsarbeit des Gesamtprojekts (AZ 26549/03) nach Fertigstellung des Gebäudes: d.h. Darstellung auf der Internetseite www.passivhaus.de und Projektvorstellung in der Neuauflage des Buches „Planen und Bauen von Passivhäusern“ (Callwey-Verlag) durch das Büro Grobe, Flyer inkl. Einlegen ins Verbandsjournal des LSB, redaktionelle Beiträge für das Verbandsjournal, Führungen (ca. 20 in den ersten 2 Jahren) u.a. zum Tag des Passivhauses.

Fazit

Die Machbarkeit und potenziell gute Energieeffizienz des Konzepts wurden nachgewiesen. Die Funktion der Betonkernaktivierung unterstützt den Komfort und entlastet die Heiz- und Kühlenergieerzeuger zu Spitzenlastzeiten. Angesichts des geringen Wärme/Kältebedarfs pro Fläche ist es nötig, die Auslegung der einbetonierten Lüftungselemente anzupassen: die thermisch effektive Länge des Lüftungsrohrs muss reduziert werden. Da die Erschließung der Räume lüftungstechnisch vom Flur her erfolgt, müssen die ersten Meter im Raum isoliert werden, oder zumindest der Kontakt zum Betonbauteil verhindert werden. Die ursprüngliche Planung wurde aus diesem Grund angepasst, so dass das Rohr jetzt in der abgehängten Decke des Badezimmers bis fast zum Zimmer geführt wird und nicht wie ursprünglich vorgesehen bereits im Vorflur in der Betondecke verlegt wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Thermische Gebäudesimulation	7
2.1	Regelungskonzept	8
2.2	Temperaturdefinitionen	8
2.3	Definition der Eingangsdaten	8
2.4	Bauteildaten	10
2.5	Spezielle Regelungsfunktionen	11
2.6	Simulationsvarianten	12
2.7	Ergebnisse	13
3	Fazit	21
4	Folgerungen für den Betrieb	22
5	Literaturverzeichnis	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 :	Visualisierung des Simulationsmodells (Ausschnitt).	7
Abbildung 2 :	Außenluft- und Innenraumtemperaturen im Jahresverlauf [Stunde im Jahr]	13
Abbildung 3 :	Wärmenutzenergieverbrauch pro Jahr von drei Simulationsvarianten	15
Abbildung 4 :	Wärmenutzenergieverbrauch der Variante „Nachheizung“ in den Zonen (Geschossen) E 0, E 1, E 2	16
Abbildung 5 :	Über die Heizperiode gemittelte Raumtemperatur / operative Temperatur für die Variante „Referenz“	16
Abbildung 6 :	Variante „Nachheizung“: Außentemperatur, Zulufttemperatur (E1), Nachheiztemperatur (E2)	18
Abbildung 7 :	Variante „Referenz“, Raumlufttemperatur und interne Gewinne	19
Abbildung 8 :	Varianten „Referenz“ und „Nachtauskühlung“ während des Überhitzungszeitraums, Außen- und Raumlufttemperaturen (E2)	20
Abbildung 9 :	Leitungsverlegung Entwurfsplanung (links) und Ausführungsplanung nach TRNSYS-Simulation (rechts)	22

1 Zusammenfassung

Der LandesSportBund Niedersachsen e.V. plant auf seinem Gelände in Hannover die Erweiterung des Sportinternats um einen Neubau sowie die Neuerrichtung einer Dreifeldsporthalle im Passivhausstandard. Bei jedem Passivhaus-Bauvorhaben stellt sich die Frage, welche Art der Wärmeverteilung zum Einsatz kommen soll.

Im Vorfeld muss sich immer für eine Variante entschieden werden, die letztendlich realisiert wird. Die anschließende Nutzerakzeptanz bestätigt die Variante oder es muss evtl. nachgebessert werden. Ein direkter Vergleich der Systeme bezüglich der Nutzerakzeptanz und der Wirtschaftlichkeit in einem identischen Gebäude in Abhängigkeit von Investition und Energiekosten konnte bisher nur simuliert werden.

Bei dem Bauvorhaben des LandesSportBundes Niedersachsen hat man die Möglichkeit, innerhalb eines Gebäudes mit vergleichbarem Nutzerverhalten mehrere Varianten zu installieren, um im Nachhinein Systeme miteinander zu vergleichen.

Ein System der Bauteilkühlung der Deckenmasse, das in der Vergangenheit überwiegend als wassergeführte zusätzliche Bauteilaktivierung und zwar fast ausschließlich zur Kühlung eingesetzt wurde, wurde mittels eines dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationsprogramms (TRNSYS) untersucht. Zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass das Kälteverteilungssystem auch eingesetzt werden kann, um zusätzlich die geringe Heizlast im Passivhausbereich komplett abzudecken, und somit nur ein System benötigt wird. Um gleiche Komfortbedingungen in einem üblichen Gebäude zu erhalten, wären früher die Systeme Heizkörper mit Heizverteilsystem, Luftführung durch Luftkanäle sowie zusätzliche Kälteanlagen nötig gewesen. Zu bewerten und kostenmäßig gegenüberzustellen war nun, alle drei Funktionen heizen, lüften, kühlen kostengünstig mit einem Verteilsystem darzustellen. Durch die dynamische Berechnung durch TRNSYS wurde insbesondere die mögliche Wärme- und Kälteabgabe über das Rohrsystem bei niedrigen Luftvolumenströmen, anteilig an Strahlungswärme und Wärmeübertragung über Luft simuliert. Es wurde eine effektive Rohrlänge ermittelt, die geeignet ist, um bei den vorgesehenen kleinen Räumen ausreicht, um benötigte Strahlungswärme und passive Kälte in den Raum einzubringen.

Vorteilhaft ist, dass diese unterschiedlichen konventionellen und innovativen Kältetechniken aus Heizen und Kühlen miteinander kombiniert und verglichen werden können.

Der Vorteil der kombinierten Funktion als Verteilfunktion für Heizen, Kühlen und Lüften liegt in den geringeren Materialkosten. Entgegen einer konventionellen Planung eines Wärmeverteilnetzes sowie einer konventionellen Be- und Entlüftungsanlage entstehen höhere Planungskosten bei der Abstimmung und Auslegung der verschiedenen Systeme der Steuerung sowie der zusätzlichen Messeinrichtung. Ein Kernziel dieses Projekts ist der hier gut mögliche Vergleich zwischen den verschiedenen Funktionen und auch den verschiedenen Detailkombinationen. Hierzu ist ein detailliertes Betriebsmonitoring eingeplant, welches Gesamtenergieeffizienz und Regelungsverhalten dokumentiert und eine gezielte weitergehende Optimierung beinhaltet.

2 Thermische Gebäudesimulation

Um das Konzept der Zuluftheizung, speziell in Verbindung mit der Aktivierung der Betondecke durch die Zuluftkanäle, zu bewerten wurde eine transiente thermische Gebäudesimulation durchgeführt. Primäres Ziel der Untersuchung ist der Vergleich von drei unterschiedlichen Heizmodi bzw. –Kombinationen in vergleichbaren Räumen. Zusätzlich auch der Effekt der Betondeckenaktivierung durch die Zuluftleitungen, speziell im Heizfall.

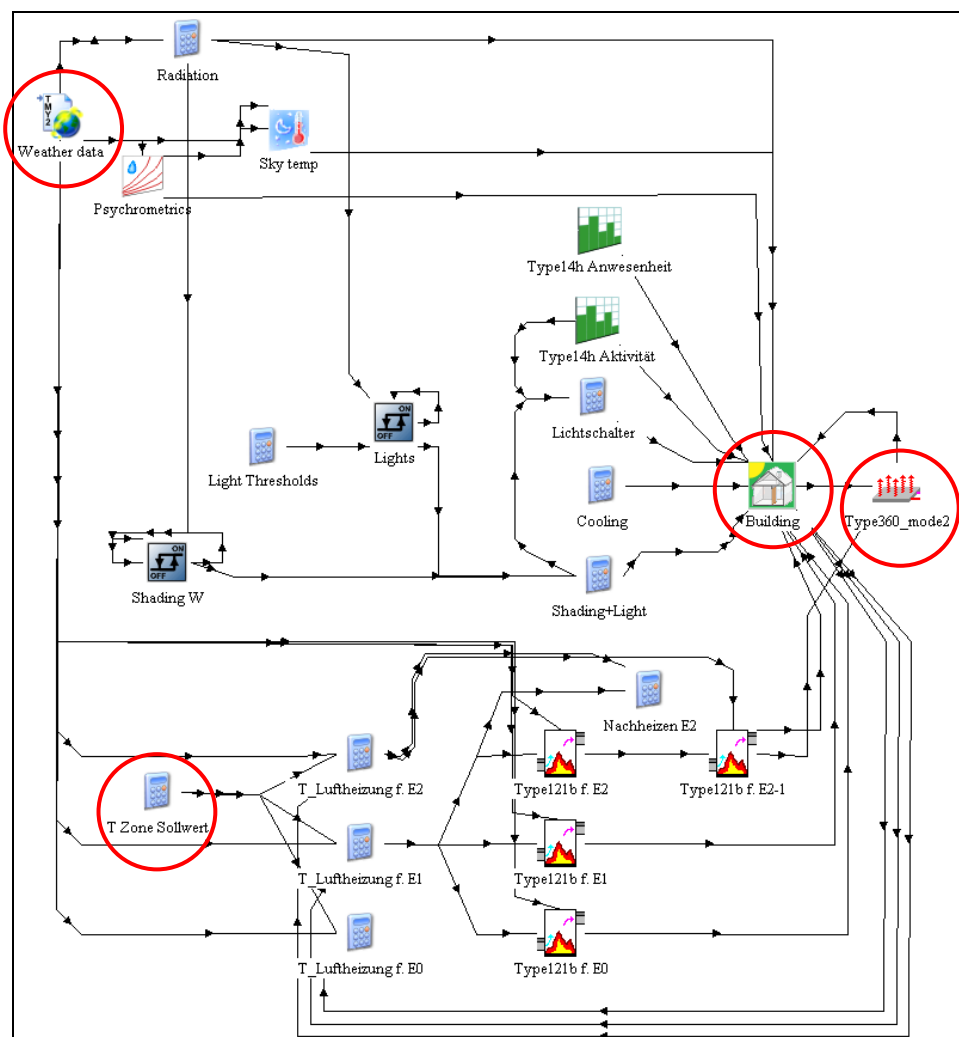


Abbildung 1 : Visualisierung des Simulationsmodells (Ausschnitt).

Kernelement ist das Gebäudemodell „Building“ selbst, es beinhaltet alle geometrischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Besondere Elemente wie die Betonkernaktivierung „Type360_mode2“ werden extern berechnet. Vorgegeben werden die Wetterdaten „Weather data“ und Raumtemperatursollwerte „T Zone Sollwert“. Pfeillinien zeigen Datenverbindung bzw. Abhängigkeiten an.

Betrachtet wurden drei Zonen, konkret drei Wohnräume annähernd gleicher Grundfläche und Nutzung, in den Geschossen E 0, E 1, E 2. Geschoss E 1 gilt als Referenz. Es wird ausschließlich durch Luftheizung (inklusive nicht abschaltbarer Betondeckenaktivierung) temperiert. E 2 und E 0 lassen erhöhten Wärmebedarf

erwarten. Daher ist hier jeweils eine zusätzliche Heizmöglichkeit vorgesehen. E 2 kann die Betondeckenaktivierung bypassen und zugleich eine Nachheizung der Zuluft aktivieren. E 0 hat als Ergänzung statische Heizkörper installiert.

2.1 Regelungskonzept

Die Regelung der Temperatur der gemeinsamen Zuluftversorgung erfolgt nach der gemeinsamen Solltemperatur, der Lufttemperatur in E 1 und der Außentemperatur.

Für die Nachheizung in E 2 wird die Zulufttemperatur rechnerisch erhöht auf eine Regelungstemperatur, die sich nach der gleichen (linearen) Regelungsfunktion, nun allerdings mit der Lufttemperatur von E 2 (statt E 1) als Eingangsgröße. Die Temperaturerhöhung wird als zusätzliche Heizleistung für E 2 bilanziert.

E 0 wird bei Bedarf durch den Heizkörper auf die Solltemperatur nachgeheizt. Hier kommt ein sehr einfaches Modell zur Anwendung. Die (nach Zuluftheizung) noch fehlende Temperaturspanne zum Sollwert der Zone wird mit der Wärmekapazität der Zone multipliziert, das Ergebnis ist die benötigte Nachheizenergie für den aktuellen Zeitschritt. Die Zone wird bei diesem Schritt immer exakt auf die Solltemperatur aufgeheizt, realistische Regelungsmechanismen sind so nicht darstellbar.

Bei dieser mäßig komplexen Modellierung können keine exakten Ergebnisse für die Regelungsgenauigkeit der Raumtemperaturen erwartet werden. Als Folge sind auch die resultierenden Leistungen / Energien u. U. „verschmiert“. Das Ergebnis wird allerdings durchaus auf die Realität zutreffen - im Sinne einer integralen Betrachtungsweise. Es kann jedoch keine exakte Aussage über den genauen Temperaturverlauf oder die Regelungsanforderung der Anlagensteuerung getroffen werden. Hierzu können aber zumindest Tendenzen aufgezeigt werden.

2.2 Temperaturdefinitionen

In regelungstechnischer Hinsicht werden stets Lufttemperaturen betrachtet. Dies erscheint realistisch, da alle handelsüblichen Regelungsmodule die Lufttemperatur messen. Bei im Mittel bestehenden Differenzen zwischen den resultierenden Temperaturen der verschiedenen Zonen soll der Energieverbrauch entsprechend normiert werden. Parallel wird jedoch auch die operative Temperatur der Zonen betrachtet, da diese i. Allg. in höherem Maße für die Behaglichkeit aussagekräftig ist. Die operative Temperatur T_{op} wird in dieser Modellierung stets gemäß $T_{op} = (T_I + T_{surf}) / 2$ gebildet. T_{surf} ist die gewichtete Durchschnittstemperatur aller Rauminnenflächen. T_I ist die Lufttemperatur der Zone.

2.3 Definition der Eingangsdaten

Die folgenden Definitionen sind eng an das Simulationskonzept und die Nomenklatur der Software TRNSYS (Fa. Transsolar), Version 16 angelehnt.

Wetterdaten: Braunschweig „DE-Braunschweig-103460.tm2“

Ausrichtung der betrachteten Räume: Fensterfront nach Westen.
In der abschließenden Kontrollvariante: Fensterfront nach Osten

Verschattung

Eine denkbare geringe Verschattung durch Bäume oder benachbarte Gebäude wird vernachlässigt.

Luftvolumenstrom

Wird mit konstant 60 m³/h für jeden Raum angenommen. Dies entspricht ca. einer Luftwechselrate von 0,85 1/h, bezogen auf den gesamten Rauminhalt der Zone. Regelung nach oben oder unten ist nicht möglich. Die Nasszelle wird nicht als einzelne Zone betrachtet, sondern dem Wohnbereich zugeordnet.

Zulufttemperatur

Im Heizfall: Außenluft wird aufgeheizt auf den Regelungswert (siehe Regelungskonzept)

Außerhalb des Heizfalles: Außenluft, ohne Kühlung

Technisch ist eine Zulufttemperatur von maximal 45 °C vorgesehen. Dies wird in der Simulation regelungstechnisch nicht gesondert berücksichtigt, jedoch werden mögliche Überschreitungen notiert und entsprechend bewertet.

Kühlfunktion

In einer Vergleichsvariante wird Kühlung durch Außenluftinfiltration zugelassen. Es wird vereinfachend angenommen, dass der Nutzer jede Sommernacht seine Fenster öffnet, unabhängig davon, ob bereits Übertemperatur herrschte. Mit dieser Methode kann nur ein Hitzezeitraum betrachtet werden, „normale“ Zeitbereiche müssen für die Statistik ausgeblendet werden. Die Öffnung der Fenster durch den Nutzer wird durch eine zusätzliche Luftwechselrate (Luftwechsel mit untemperierter Außenluft) von +3 1/h angenommen. Die Lüftungsanlage bleibt währenddessen aktiv. Aktive Kühlfunktion gibt es nicht.

Wärmerückgewinnung

Es erfolgt innerhalb der Simulation keine Wärmerückgewinnung aus der Abluft. Da jedoch eine Wärmerückgewinnung vorgesehen ist, müsste diese separat betrachtet werden (WRG verbessert in vielen Betriebszuständen die Energieeffizienz, kann im gegenteiligen Fall jedoch abgeschaltet werden).

Anwesenheit der Bewohner

Anwesenheit: 16.00h – 8.00h, 7 Tage in der Woche

Aktivität: 16.00h – 23.00h, 7.00h – 8.00h, 7 Tage in der Woche

Die betrachteten Zimmer werden von je zwei Bewohnern belegt. Anwesenheits- und Aktivitätszeiten sind für beide Bewohner gleich.

Interne Gewinne

Beleuchtung, Betrieb elektrischer Geräte und die Wärmeabgabe anwesender Personen erzeugen einen Wärmeeintrag in die Zone, der folgendermaßen berücksichtigt wird.

Alle aufgezählten internen Gewinne sind Null, wenn kein Bewohner anwesend ist. Während der *Anwesenheit* werden

- 100 W / Person

berücksichtigt.

Während der *Aktivität* werden

- 3 W/m² Nutzfläche an elektrischer Beleuchtung
- 65 W / Person für Computersysteme

berücksichtigt.

Die Beleuchtung wird nur in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung auf die Horizontalebene aktiv (die Westausrichtung wird also nicht berücksichtigt). Hystereseschwellen sind 120 bzw. 200 W/m².

Zonierung

Das Gebäudemodell besteht nur aus den 3 Räumen, die jeweils eine Zone bilden. Zwischen den Zonen besteht kein Luftaustausch. Thermischer Austausch (Wärmeleitung) erfolgt in geringem Maße über die Boden/Deckenflächen. Es besteht eine Verknüpfung über die Regelungsfunktionen der zonenspezifischen Zulufttemperatur (s.u.).

Nachbarbereiche im realen Gebäude sind je ein Flur und Räume im Untergeschoss. Beide werden als „identisch“ definiert, d. h. deren Raumtemperaturen werden mit denen der benachbarten Zone gleichgesetzt. Somit besteht rechnerisch kein Wärmeaustausch, die Zwischenwände tragen nur mit 50% ihrer Wärmespeicherfähigkeit zur Pufferung der Zone bei.

Die Nasszelle wird mit dem Wohnraum gleichgesetzt, es erfolgt keine separate Zonierung. Formal sollte die Nasszelle mit einem Solltemperaturniveau von 22,0 °C (Wohnraum: 20,0 °C) belegt werden. Die Betriebszeiten sind allerdings so gering, dass sich der erhöhte Aufwand einer separaten Zonierung nicht lohnt. Demgemäß wird auch der Luftwechsel pauschal auf den gesamten Zonenraum angewandt.

Zeitauflösung

Das übergreifende System rechnen mit einer Auflösung von 1 Stunde. D.h., es wird davon ausgegangen, dass die Eingangswerte für diesen Zeitraum konstant sind. Anschließend werden Wärme-, Stoffströme und Temperaturänderungen errechnet. Der neue Zustand bildet die Anfangsbedingung für den nächsten Zeitschritt. Im Rahmen dieser Untersuchung treten keine schnellen Veränderungen im System auf, insofern ist diese Zeitauflösung ausreichend.

Die Wetterdaten liegen nativ ebenfalls in 1-Stunden-Auflösung vor. Anwesenheits- und Aktivitätszeiten wurden an diese Auflösung angepasst und geben die beste Näherung an volle Stunden wieder. Einige interne Rechenmodule, speziell die Bauteilaktivierung durch das Lüftungsrohr (Standard: 5 Minuten) rechnen mit einer höheren internen Zeitauflösung.

Ergebnisdaten werden ebenfalls in 1-h-Auflösung generiert.

2.4 Bauteildaten

Nur die Westfront wird als Außenwand (AW) definiert. Wände zu benachbarten Räumen sind Zwischenwände (ZW). Die Abtrennung zwischen Wohnraum und Nasszelle zählt als Innenwand (IW). Hier wird definitionsgemäß immer die doppelte Fläche angegeben, da beide Oberflächen gleichermaßen mit der Zone korrespondieren. Böden und Decken (B/D) zwischen den Zonen werden je als ein Bauteil betrachtet. Sie werden rechnerisch als Zonengrenze definiert und sind dabei beiden benachbarten Zonen zugeordnet. Die Decke (D) von E 2 und der Boden (B) von E 0 werden nur jeweils einer Zone zugeordnet.

Bezüglich der Größe der Bauteilflächen wurden geringfügige Vereinfachungen getroffen. Alle drei Zonen wurden dahingehend vereinfachend gleich gesetzt.

AW: Fensterelemente; Rahmenanteil 25%.

Daten aus Bibliothek: (ID 4001) $U_f = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_g = 0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0,567$, Rahmenanteil 25%. Solare Absorption = 0,8.

Dieses Fenstermodell aus der in TRNSYS enthaltenen Bibliothek entspricht den projektierten Randbedingungen sehr gut.

AW: Dämmelement oberhalb der Fensterelemente; Dämmstärke 260 mm mit WLG 035. $U = 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$

AW: Betonpfosten 20 cm / 25 cm WDVS (WLG035, $U = 0,129 \text{ W/m}^2\text{K}$)

ZW: Trockenbauwand doppelt beplankt; 2x12,5 mm Gipskarton / 75 mm Ständerwerk mit 60 mm Mineralfaserdämmung WLG040 / 2x12,5 mm Gipskarton.

IW: Baugleich zu ZW. Trockenbauwand doppelt beplankt; 2x12,5 mm Gipskarton / 75 mm Ständerwerk mit 60 mm Mineralfaserdämmung WLG040 / 2x12,5 mm Gipskarton.

B/D: 300 mm Stahlbeton (Lüftungsrohr wird in diesem Bauteil nicht berücksichtigt) / 20 mm Trittschalldämmung 52 mm Zementestrich / 28 mm Holzparkett; 400 mm Gesamtstärke

B: 300 mm Stahlbeton (integriertes Lüftungsrohr 80 mm Durchmesser) / 20 mm Trittschalldämmung 52 mm Zementestrich / 28 mm Holzparkett; 400 mm Gesamtstärke.

TAB: Das (T)hermisch (A)ktiviert (B)auteil wird in den entsprechenden Varianten zusätzlich zu den bereits aufgeführten Böden/Decken eingebracht. Die Böden/Decken werden entsprechend um die äquivalente Fläche gekürzt. Das TAB wird nur einer Zone zugeordnet. Beide Oberflächen sind (rechnerisch) dem Raum zugewandt. Somit wird das TAB überbewertet, da im realen Fall eine Oberfläche durch Trittschalldämmung und Fußbodenaufbau abgeschottet ist. Um diesem Effekt angemessenen Rechnung zu tragen, wurde die Breite des TAB geringer gewählt, als es real effektiv aufgrund des ausgedehnten Temperaturfeldes um das Zentrum (Lüftungsrohr) wäre. Als Breite wird auch aus Symmetriegründen die Höhe des TAB gewählt. In diesem symmetrischen Querschnitt sind die geringsten Rechengenauigkeiten in dem internen Rechenmodell zu erwarten.

300 mm Stahlbeton (integriertes Lüftungsrohr 80mm Durchmesser); weitere Lagen entfallen vereinfachend.

Das Lüftungsrohr wird innen glatt, also unberippt gewählt. Diese Version zeigte sich in den Testvarianten als ausreichend effektiv und ist zudem leichter zu reinigen.

D: 300 mm Stahlbeton (integriertes Lüftungsrohr 80mm Durchmesser) / 360 mm Dämmung WLG035. (Gefälledämmung wurde pauschalisiert)

2.5 Spezielle Regelungsfunktionen

Sonnenschutz

Außen liegend, beweglich, automatisch gesteuert. Die Steuerung reagiert auf die horizontale Einstrahlung und auf die Einstrahlung auf entsprechende Außenwand (hier West). Der Sonnenschutz wird herunter gefahren, sobald die Einstrahlung auf die Fensterfront 300 W/m^2 erreicht. Ein baulicher Sonnenschutz besteht nicht. Geringe Verschattung durch Bäume oder benachbarte Gebäude wird vernachlässigt. Der Sonnenschutz erzeugt in Funktion 70% Verschattung.

2.6 Simulationsvarianten

Zunächst wurden verschiedene Testvarianten entwickelt und untersucht, um das Modell an sich zu prüfen und um spezielle Regelungsparameter anzupassen. So wurden z.B. die verwendbaren Parameter für die Steuerung der Zulufttemperatur ermittelt. Auf diese Testvarianten soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Referenzvariante

Westausrichtung der Fensterfronten

Interne Gewinne : Standard (wie beschrieben)

Gemeinsame Zulufttemperierung (ohne separate Nachheizung)

Infiltration / Nachtauskühlung = AUS

Separate Nachheizung

Temperierung der gemeinsamen Zuluftheizung erfolgt durch die Referenzzone E 1. Jeder Raum erhält eine separate Regelungstemperatur für die Zuluft. E 0 wird per Heizkörper auf Solltemperatur 19,5 °C nachgeheizt (Die separate Regelungstemperatur bleibt hier irrelevant). Für E 2 wird eine Nachheizung aktiv, welche auf die separate Regelungstemperatur aufheizt.

Von allen Heizkreisen werden Leistung und Energie aufgezeichnet.

Überhitzung und Nachtauskühlung

Hier wird eine sommerliche Hitzeperiode von 7 Tagen ausgewählt um nutzergesteuerte Nachtauskühlung zu untersuchen. Hier wird eine Luftwechselrate (durch Fensterlüftung) von +3 angenommen, zusätzlich zur kontrollierten Lüftung. Dieser Luftwechsel findet mit untemperierter Außenluft statt. Es wird angenommen, dass der Nutzer während der Schlafperioden (Anwesenheit, aber keine Aktivität) das Fenster gekippt lässt, in der Annahme, dass die Außenluft im Mittel kühler ist als die sommerliche Raumtemperatur. Diese Annahme wird in der Simulation nicht geprüft.

Diese Modifikation besteht nur in der Zone E 2. Die anderen Zonen werden gemäß der Referenzvariante betrieben.

Ein Vergleich zu anderen Varianten ist nur bezüglich der Raumtemperaturen und nur in der ausgewählten Hitzeperiode sinnvoll!

Fensterorientierung nach Osten

Die Referenzvariante wird übernommen, jedoch die Orientierung der Fensterfront auf Osten gewechselt. Die Regelung der Verschattungsfunktion des automatischen Sonnenschutzes wird ebenfalls auf die östliche Orientierung angepasst.

Betonkernaktivierung ohne Nachheizung

Die explizite Version dieser Variante beinhaltet die sehr komplexe Modellierung und Einbindung eines Rechenmoduls für luftdurchströmte massive Bauteile (Type 360) in den Raum. Aufgrund des hohen rechnerischen Aufwands wurde von dieser expliziten Version abgesehen.

Es wurde stattdessen eine vergleichbare Geometrie für das aktivierte Bauteil erstellt und mit einem vereinfachten Raummodell gekoppelt.

Separate Simulationen für vergleichbare Geometrien zeigen deutlich, dass bei dem auftretenden Luftstrom und den moderaten Temperaturdifferenzen die Wärme innerhalb der ersten wenigen Metern an das Bauteil abgegeben wird.

Somit sollten diese Meter auch möglichst weit im Rauminneren positioniert sein. Eine weitere Rohrverlängerung ist aus thermischer Sicht nicht gewinnbringend)

Die Ergebnisse dieser separaten Simulation bezüglich effektiver Speichermasse und anteilig zeitverzögerter wurden in eine kombinierte „implizite“ Variante eingebracht.

Grundlage hierfür ist die Referenzvariante. Es ist also keinerlei Nachheizung aktiv. Zone E 2 (ausschließlich) wird durch die beschriebene Betonkernaktivierung (thermisch aktiviertes Bauteil „TAB“) ergänzt. Um keine zusätzliche Speichermasse einzubringen wird die Decke um die entsprechende Fläche gekürzt. Somit verringert sich auch die Kontaktfläche zur Außenwelt. Aufgrund der hohen Dämmung und ist dieser Effekt vernachlässigbar.

Die eingeregelt Zulufttemperatur wird in das TAB geleitet. Das TAB gibt eine veränderte Luftauslasstemperatur in den Raum ab. Aufgezeichnet werden hier zusätzlich der Wärmeeintrag von der strömenden Luft in das TAB und die abgegebene Wärme des TAB in den Raum.

Betonkernaktivierung mit Nachheizung

Dies entspricht der Variante Betonkernaktivierung **ohne** Nachheizung

Nur ist hier die Grundlage die Variante „Nachheizung“. Wird die Nachheizung aktiv, wird das TAB bypassed, es kann also keine weitere Wärme mit der Zuluft austauschen. Der Wärmebeitrag der Zuluft kommt somit direkt und ohne Verzögerung dem Raum zugute.

2.7 Ergebnisse

Temperaturstatistik

Die Referenzvariante zeigt durch den ermittelten Raumtemperaturverlauf zunächst die Regelungsgenauigkeit im Heizfall und die Überhitzung im Sommer.

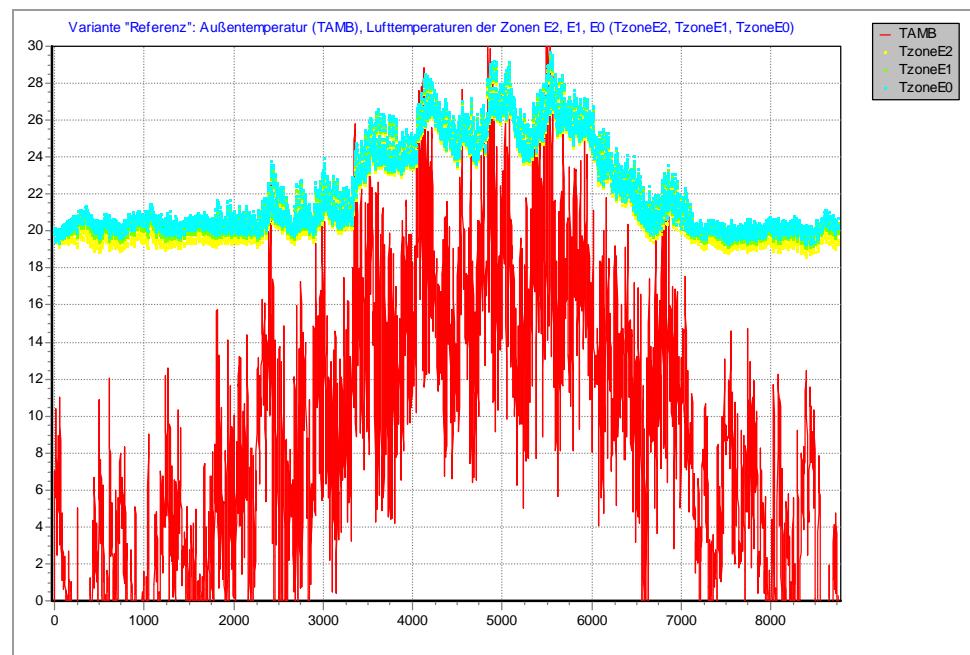


Abbildung 2 : Außenluft- und Innenraumtemperaturen im Jahresverlauf [Stunde im Jahr]

Dargestellt sind Temperaturen [°C]: TAMB = Außenlufttemperatur, TzoneE2 = Lufttemperatur Zone E2, TzoneE1 = Lufttemperatur Zone E1, TzoneE0 = Lufttemperatur Zone E0. Die X-Achse gibt die Stunde im Jahr an.

Um die Güte der Temperaturregelung zu prüfen und um quantitative Aussagen zum temperaturbezogenen Nutzerkomfort treffen zu können, wird für die Raumtemperaturen und operative Temperaturen eine für alle Varianten gleichförmige Statistik erstellt. Zeitbasis ist generell die Einheit „Stunde im Jahr“. 0 stellt den Anfangszustand dar, 1 ist 01.00 h am 01.01. des Jahres.

Für heizungsrelevante Betrachtungen wird nur der Zeitraum der Heizperiode ausgewertet. Die ersten sieben Tage werden ignoriert, da hier noch der willkürlich definierte Anfangszustand der Bauteile vorherrschen kann (i. Allg. T=20 °C). Es werden nur 7-Tages Zeiträume (nicht zwingend Kalenderwochen) in die Zeiträume übernommen.

Für die Heizperiode werden die folgenden Zeiträume ausgewertet:

Startzeit Winter	169
Stopzeit Frühjahr	2184
Startzeit Herbst	6721
Stopzeit Jahr	8760

Für die Hitzeperiode werden die folgenden Zeiträume ausgewertet:

Startzeit Hitzeperiode	4873
Stopzeit Hitzeperiode	5040

Für die genannten Zeiträume werden ausgewertet, bzw. dargestellt: Mittelwerte, Standardabweichungen, Maximalwert, Minimalwert. Dies wird für Raumtemperatur und Regelungstemperaturen der Zuluft durchgeführt. Die relevanten Werte werden in einem Vergleich der verschiedenen Varianten dargestellt.

Variante	Übertemperaturstunden (T > 26 °C während der Hitzeperiode)			Mittlere Raumtemperatur während der Heizperiode			Mittlere Raumtemperatur (Standardabweichung innerhalb einer Zone)		
	E2	E1	E0	E2	E1	E0	E2	E1	E0
Referenz	163	167	167	19.61	20.09	20.29	0.33	0.35	0.37
Nachheizung	163	167	167	19.99	20.12	20.25	0.34	0.36	0.35
Ostausrichtung	134	143	148	19.61	20.09	20.29	0.31	0.34	0.36
Nachtauskühlung E2	23	84	141	/	/	/	/	/	/

Variante	Solltemperaturen Zuluftheizung		
	E2	E1	E0
Referenz	/	31.18	/
Nachheizung	32.93	30.86	29.05
Ostausrichtung	/	31.19	/
Nachtauskühlung E2	/	/	/

Energiebilanzierung, Normierung auf mittlere Raumtemperatur

Alle Energien sind Nutzenergien. Umwandlungsverluste treten in dieser Modellierung nicht auf. Ein hoher Anteil dieser Wärme (ca. 75%) könnte durch einen Abluftwärmetauscher in der Lüftungsanlage zurückgewonnen werden. Dies wird hier nicht berücksichtigt.

Die folgende Darstellung zeigt den Gesamtnutzenergiebedarf für die drei relevanten Varianten. Absolut in [kWh/a] und flächenbezogen in [kWh/(m²a)] auf die Gesamtnutzfläche aller 3 Zonen.

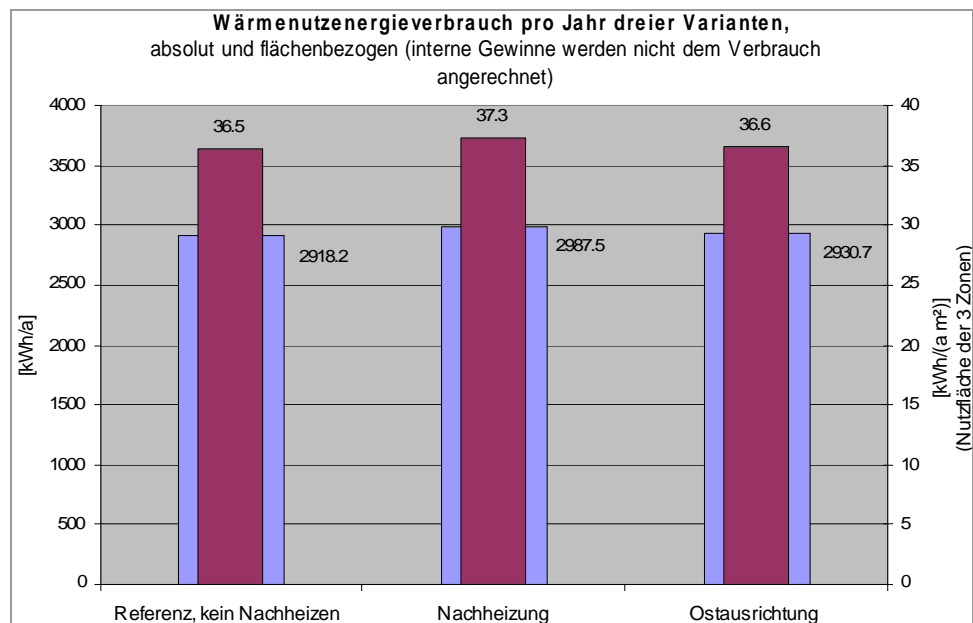


Abbildung 3 : Wärmenutzenergieverbrauch pro Jahr von drei Simulationsvarianten

Wie aus technischer Sicht zu erwarten ist, gibt es nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten. Diese sind zum Großteil auf die nicht exakt gleichen mittleren Raumtemperaturen im Heizfall zurückzuführen. Diese geringen Unterschiede würden im Realfall sicher durch unterschiedliches Nutzerverhalten überlagert werden.

Aufgrund von Regelungsabweichungen sind sowohl die momentanen, als auch die mittleren Zonentemperaturen nicht exakt gleich. Die Zone mit der höheren mittleren Raumtemperatur hat bei sonst gleichen Randbedingungen naturgemäß den höheren Wärmeverbrauch. Insbesondere heizt sie noch die benachbarte Zone und vermindert deren Wärmeverbrauch. Streng genommen müsste dieser Effekt, der die Wärmebedarfsbilanzen verfälscht, im Sinne einer Normierung bzgl. der mittleren Raumtemperaturen und unter Einbeziehung der Außentemperaturen korrigiert werden. Aufgrund des geringen Effekts und des hohen benötigten Aufwand wurde im Rahmen diese Auswertung jedoch auf eine Normierung verzichtet. Der Fehler dürfte bei 1-3% bzgl. der Wärmebilanz liegen und ist damit geringer als viele weitere Einflussgrößen.

Die folgende Abbildung zeigt den Nutzwärmeverbrauch für die Variante „Nachheizung“ jeweils für die einzelnen Zonen.

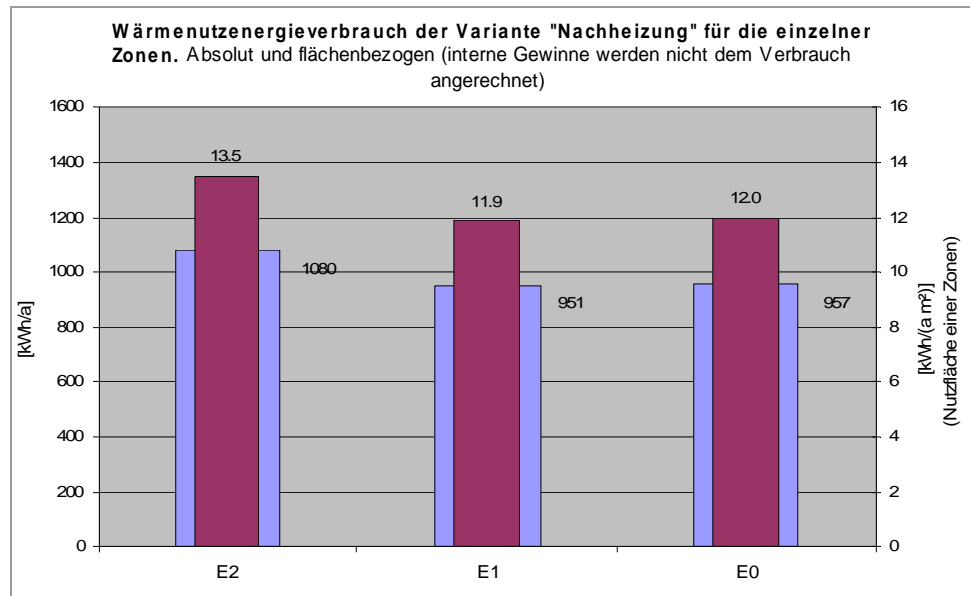


Abbildung 4 : Wärmenutzenergieverbrauch der Variante „Nachheizung“ in den Zonen (Geschossen) E 0, E 1, E 2

Die Regelung sorgt für eine weitgehend gleiche Mitteltemperatur aller Zonen. Der geometrisch unterschiedliche Kontakt zur kälteren Umwelt führt zu leicht unterschiedlichem Wärmebedarf. Die momentanen Heizleistungen für Nachheizungen in E 0 und E 2 liegen bei etwa 10-20% der homogenen Grundheizung (hier nicht gezeigt). Ein entsprechendes Ergebnis erhält man in der Bilanzierung dieser Leistungen zum Gesamtenergiebedarf der Zone (siehe Abbildung)

Behaglichkeit, operative Temperatur

Die folgende Abbildung zeigt die Raumtemperaturen und die operativen Temperaturen für die Variante „Referenz“. Diese Werte sind der zeitliche Mittelwert über die Heizperiode, getrennt für die drei Zonen.

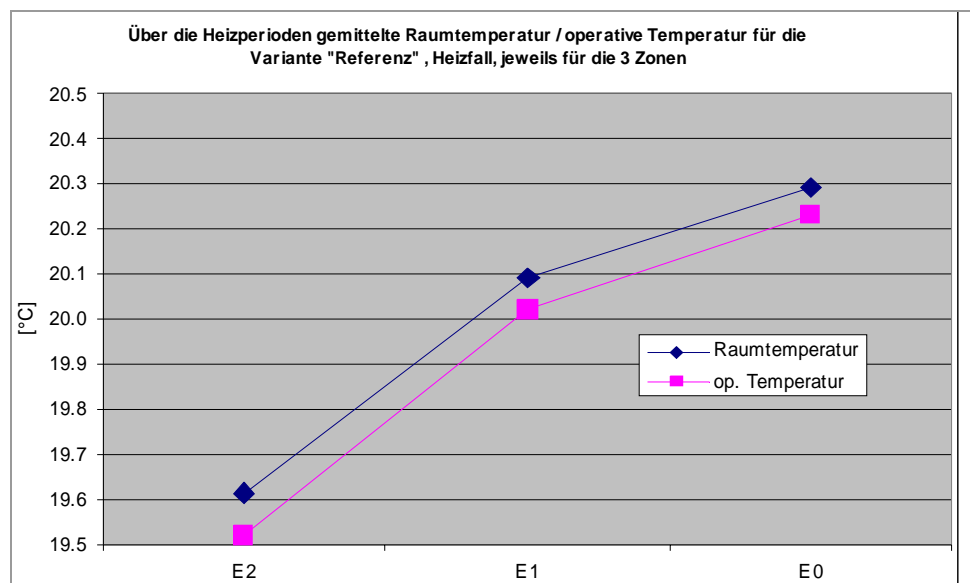


Abbildung 5 : Über die Heizperiode gemittelte Raumtemperatur / operative Temperatur für die Variante „Referenz“

Man erkennt, dass innerhalb einer Zone nur ein geringer Unterschied zwischen Raumtemperatur und operativer Temperatur besteht. Der Unterschied zwischen den Zonen ist auf die gleiche Zulufttemperierung (keine individuelle Nachheizung) bei unterschiedlichen Transmissionsverlusten (insbesondere über die Dachfläche im Fall E2) zurückzuführen.

Im Allgemeinen wird die operative Temperatur, welche neben der Raumlufttemperatur auch einen Strahlungsanteil (Strahlungstemperatur der Rauminnenflächen) beinhaltet, als für die Behaglichkeit aussagekräftiger bewertet, als die Raumlufttemperatur allein. Ein Vergleich der operativen Temperatur mit der (regelungstechnisch herangezogenen) Raumlufttemperatur zeigt folgendes:

- Die Abweichungen sind gering und liegen betragsmäßig zwischen 0 und maximal 0,3 K.
- Die Abweichungen sind systematisch. Im Winter ist die operative Temperatur typischerweise 0,2 K niedriger als die Raumtemperatur. Im Sommer dagegen ist sie 0,1 K höher.

Bei thermisch aktiviertem Deckenbauteil ergibt sich eine leichte Erhöhung der operativen Temperatur (Heizfall). Die Wärme der geheizten Zuluft wird zu einem Großteil an das Deckenbauteil abgegeben und die Auslasstemperatur liegt nur wenige K über der Raumtemperatur. Die Wärmebilanz des Deckenbauteils wird ausgeglichen über die überwiegend über Wärmeabstrahlung über die raumseitige Oberfläche. Diese Strahlung erhöht die operative Temperatur bei gleich bleibender Raumlufttemperatur.

Diese geringen Abweichungen sind auf die gute Wärmeisolation der relevanten Bauteile zurückzuführen. Ein geringer Wärmestrom durch das Bauteil bei gegebener Lufttemperaturdifferenz innen/außen geht immer mit einer moderaten Temperaturdifferenz zwischen innerer Oberfläche und Raumlufttemperatur einher. Dies ist ein bekannter Vorteil von hoch gedämmten Wandaufbauten und insbesondere des Passivhausstandards.

Die unterschiedlichen Vorzeichen in der Abweichung sind auf die unterschiedlichen Einstrahlungen und die unterschiedliche Transmission zwischen Winter- und Sommerfall zurückzuführen. Im Sommer besteht die Tendenz, durch hohe Einstrahlungswerte einen hohen Strahlungsanteil im Gesamtwärmestrom und somit eine erhöhte operative Temperatur zu erhalten. Im Winter besteht eine hohe Transmission (Wärmeleitung) durch die Wände, wodurch die innere Oberflächentemperatur sinkt (hier nicht gezeigt). Nachheizung erfolgt überwiegend durch eine erhöhte Zulufttemperatur, somit liegt in dem Fall die operative Temperatur unter der Lufttemperatur.

Wärmebedarf, Deckung, Zulufttemperatur

Der Wärmebedarf ist für alle drei Zonen annähernd gleich. Die geringen Abweichungen ergeben sich durch die Lage. Im Fall einer gleichen Zulufttemperatur (Reverenzvariante) gilt für die Raumtemperaturen: E 2 ist am kältesten, E 1 liegt dazwischen, E 0 ist am wärmsten. Die Zone E 2 ist im Heizfall durch die angrenzende Dachfläche stärker durch Transmission an die kalte Umwelt belastet. Die Zone E 1 ist von dieser Außenfläche durch die gesamte Zone E 2 geschützt. Die Zone E 0 ist durch E 2 und E 1 geschützt. Nach unten besteht keine thermische Belastung, da die Temperatur des angrenzenden Untergeschosses als „identisch“ definiert wurde.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Verlauf der gemeinsamen Zulufttemperierung („TheatAir1 soll_E1“, basierend auf Zone E1) der Variante „Nachheizung“. Zum Vergleich sind die Nachheiztemperatur für die Zone E2 („TheatAir1 soll_E2“) und die Außenlufttemperatur („TAMB“) aufgetragen. Zeitausschnitt sind sieben kühle Tage im Januar.

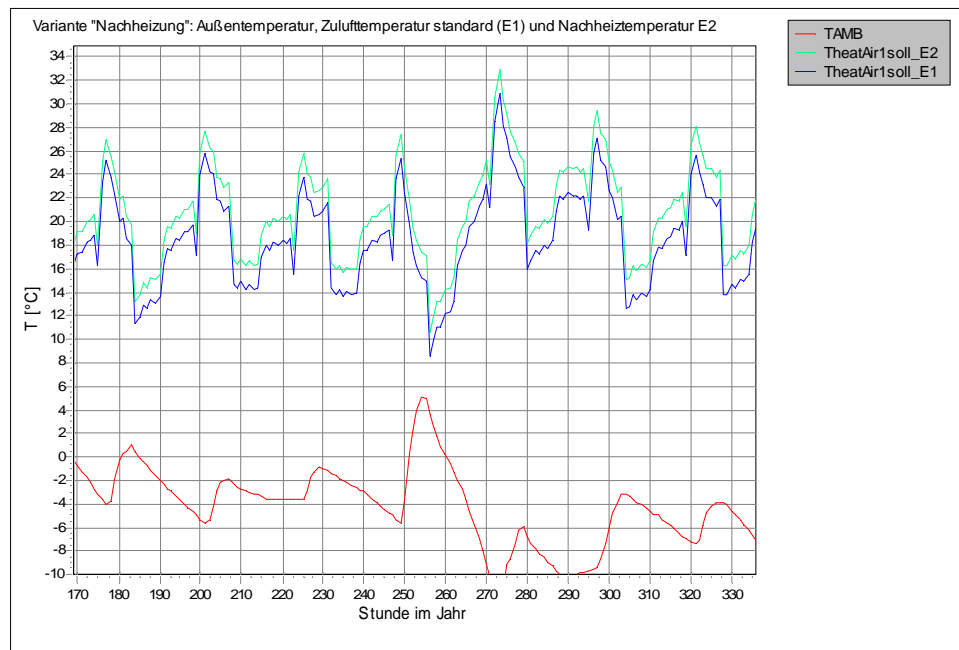


Abbildung 6 : Variante „Nachheizung“: Außentemperatur, Zulufttemperatur (E1), Nachheiztemperatur (E2)

Um E 2 angemessen zu temperieren, ist jedoch nur eine geringfügige weitere Erhöhung der Zulufttemperatur um maximal wenige K notwendig. Die Variante „Nachheizung“ zeigt, dass bereits mit einer primitiven Regelungsstrategie (Linearregelung nach zonenspezifisch gemessenen Istwerten) diese Abweichung aufgefangen werden kann.

Die Zusatzheizung in E 0 durch Heizkörper basiert auf einem stark vereinfachten Modell. Die Solltemperatur wird nie unterschritten, zugleich wird der Luftheizung die „Arbeit abgenommen“. Da keine Vorrangschaltung vorgesehen ist, würde dies bei gleichen Bedingungen tatsächlich tendenziell der Fall sein. Um diesen Effekt zu moderieren, wurde die Solltemperatur für die Heizung auf 19,5 °C statt 20,0 °C eingestellt. Dementsprechend ist die Heizleistung = 0 bei Raumtemperaturen über 19,5 °C und ansonsten exakt so hoch wie der Leistungsbedarf, um die Raumlufttemperatur auf exakt auf 19,5 °C zu heizen. Folglich wird die Heizung nur aktiv in den seltenen Fällen, wenn die Luftheizung allein 19,5 °C nicht erreicht. Dementsprechend ist der Gesamtenergiebeitrag der Heizung gering.

Die Zusatzheizung in E 0 durch Heizkörper ist rechnerisch nicht notwendig, bietet jedoch dem Nutzer die meist gewünschte Einflussmöglichkeit. Insbesondere könnte sie ggf. benötigte Aufheizleistung stellen. Daneben soll sie in diesem Vorhaben auch als experimentelles Element zur Bestimmung von komfortrelevanten Einflussfaktoren Einsatz finden. Derlei Faktoren lassen sich in einer thermischen Simulation kaum abbilden.

Einfluss interner Gewinne

Die folgende Abbildung zeigt den unmittelbaren Einfluss der internen Gewinne auf den kurzfristigen Verlauf der Raumtemperatur in der Variante „Referenz“. Dargestellt sind Raumtemperatur der Zone E1 („TzoneE1“) und alle betrachteten Klassen von internen Gewinnen (siehe Definitionen Eingangsdaten / interne Gewinne). „Lichtschalter“ gibt an, ob die elektrische Beleuchtung aktiv ist (abhängig von äußerer Einstrahlung). Zeitausschnitt sind 7 kühle Tage im Januar.

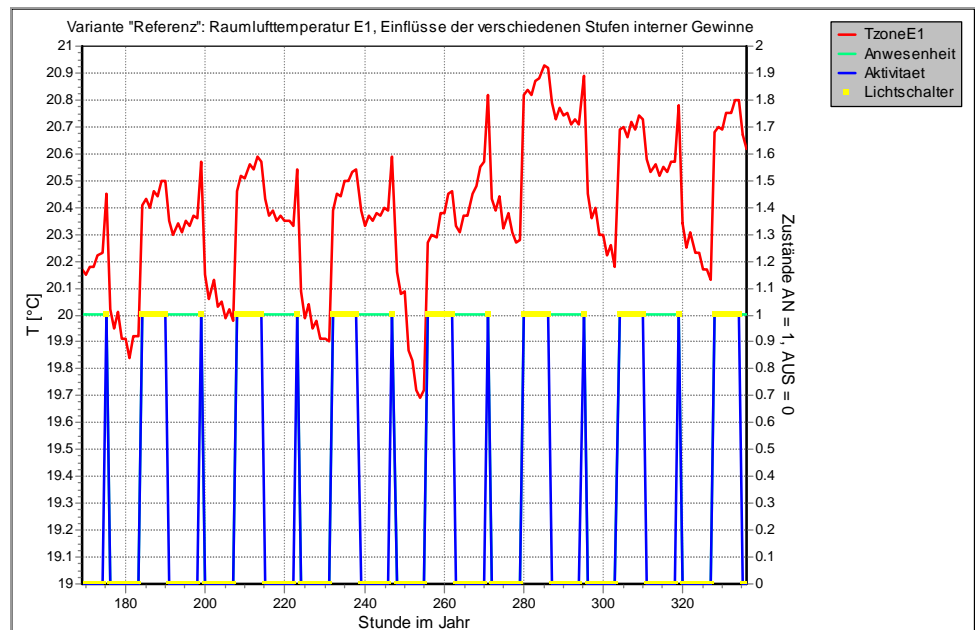


Abbildung 7 : Variante „Referenz“, Raumlufttemperatur und interne Gewinne

Der Einfluss der Anwesenheit der Bewohner und der damit verbundenen internen Wärmegewinne ist sehr deutlich. Bei Anwesenheit und Aktivität tritt eine plötzliche Temperaturerhöhung von ca. 0,5 K gegenüber dem Zustand ohne jegliche interne Gewinne auf. Bei Anwesenheit ohne Aktivität (nachts) bestehen noch ca. 0,3 K. Diese internen Gewinne decken rechnerisch etwa die Hälfte des Nettowärmebedarfs (hier nicht gezeigt). Zugleich haben sie aber auch impulsförmigen Einfluss auf die Raumtemperatur, da sie nicht gleichförmig zeitlich verteilt sind. Hierdurch entsteht eine kaum vermeidliche Bandbreite um eine mittlere einzuregelnde Solltemperatur. Die Zuluftregelung kann nicht schnell genug auf die veränderte interne Last Einfluss nehmen. Die Raumtemperatur bleibt jedoch stets in einer Bandbreite von +/-1 K um die Solltemperatur, meistens liegt sie um die Hälfte besser, die Regelung gilt somit als gut ausreichend.

Einfluss von Kühlung durch Fensterlüftung

Die Anlagentechnik kann während einer Überhitzungsperiode keine Regelungsfunktion leisten. Heizungen sind inaktiv, aufgrund der bereits hohen Raumtemperaturen ohnehin unerwünscht. Aktive Kühlung besteht nicht. Als pauschale Einflussmöglichkeit zur den Nutzer wurde mit der Variante „Nachtauskühlung“ simuliert, welchen Einfluss ein erhöhter nächtlicher Luftwechsel (LWR +3) durch geöffnete Fenster hat.

Die folgende Abbildung zeigt die Raumlufttemperaturen der Zone E2 parallel für die Varianten „Referenz“ („TzoneE2R“) und „Nachtauskühlung“

(„TzoneE2N“) in einem sommerlichen Hitzezeitbereich von gut 7 Tagen. Zusätzlich ist die Außenlufttemperatur aufgetragen.

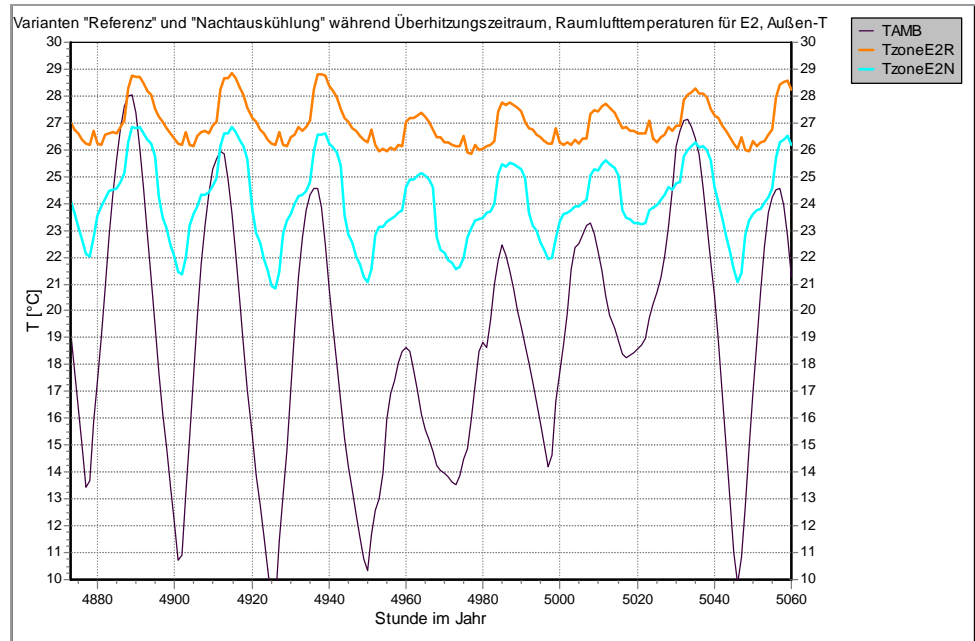


Abbildung 8 : Varianten „Referenz“ und „Nachtauskühlung“ während des Überhitzungszeitraums, Außen- und Raumlufttemperaturen (E2)

Der Einfluss der Nachtauskühlung ist sehr deutlich. Während die mittlere Raumtemperatur bei der „Referenz“ bei etwa 27 °C liegt, ergibt sich bei „Nachtauskühlung“ ca. 24 °C. Somit wird ein Temperaturgewinn von ca. 3 K erreicht, insbesondere wird die als Grenztemperatur geltende Schwelle von 26 °C im Mittel unterboten, wenn auch in Spitzen überschritten. Die Spitzentemperaturen liegen dagegen nur 1,5-2,0 K auseinander. Die Nachtauskühlung als rein passive Kühlungsmethode ohne zusätzlichen Energieaufwand stellt also eine wirkungsvolle Maßnahme dar.

Die Betrachtung der Hitzeperiode generell zeigt auf, dass auch bei nicht allzu extremen Außentemperaturen (Maximum 28 °C) bereits unkomfortable Innentemperaturen entstehen können. Dies ist auf die hohe solare Einstrahlung (hier nicht gezeigt) auf die Fensterfront zurückzuführen, bei gleichzeitiger geringer Kühlwirkung durch Transmission durch die hoch wärmedämmten Außenbauteile und geringer Standard-Luftwechselrate.

Einfluss der Orientierung

Alle bis auf die Variante „Fensterorientierung nach Osten“ sind mit der Fensterfront nach Westen gerechnet worden. Eine Orientierung nach Osten bedeutet rechnerisch keinen großen Unterschied, da die Insolation auf die Fensterfront in der Gesamtmenge sehr ähnlich ist. Allerdings ist die Tageszeit der höchsten Insolation deutlich verschieden, es ergibt sich eine andere Phasenlage zur Anwesenheit und entsprechenden internen Gewinnen. Die stärkste Einstrahlung erfolgt hier vormittags, wo es keine internen Gewinne gibt. Die Raumtemperaturkurve wird folglich glatter (hier nicht gezeigt). Die Folge ist eine etwas weniger häufige, bzw. weniger starke Überhitzung (134 statt 163 Stunden für die Zone E 2; vgl. Darstellung der Temperaturstatistik). Da jedoch noch immer die internen Gewinne maßgeblich sind, ist der Effekt der Orientierung nicht allzu bedeutend.

Für den Heizfall ergibt sich eine unveränderte maximale nötige Zulufttemperatur. Der Gesamtnutzenergiebedarf bleibt ebenfalls fast gleich.

Verhalten der Betonkernaktivierung

Die separate Simulation des Lüftungsrohrs innerhalb der Betondecke zeigt, dass die Wärme des Luftstroms bereits in den ersten Metern fast vollständig abgegeben wird. Speicherverhalten, speziell Phasenverschiebung zwischen Wärmeaufnahme und –Abgabe entsprechen dem von üblichen Bauteilaktivierungen (Decken). Dazu wurden jedoch keine detaillierteren Untersuchungen angestrengt.

3 Fazit

Eine gemeinsame Zuluft(grund)temperierung für alle drei Zonen ist technisch, energetisch, und für einen gewissen Grundkomfort ausreichend. Die Schwelle von 40 °C als nötige Zulufttemperatur wird nur an wenigen Stunden im Jahr überschritten. Es kommt somit auch problemlos ein energetisch effizienter Wärmeerzeuger mit niedriger Vorlauftemperatur in Frage.

Die Raumtemperaturregelung ist mit einfacher Linearregelung unter Einfluss von Raumlufttemperatur und Außentemperatur mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Die unterschiedlichen, bzw. zusätzlichen Heizsysteme sind aus technischer Sicht bei moderatem Komfortanspruch der Nutzer nicht zwingend nötig. Sie bieten jedoch (E 2 und E 0) dem Nutzer die Möglichkeit, die Räume individuell und unkompliziert zu regeln, wenn auch nur in Richtung „wärmer“. Dies kann insbesondere bei unterschiedlichen Randbedingungen (Belegung, Anwesenheitszeiten, welche in dieser Simulation stets als gleich angenommen wurden) ein entscheidendes Komfortmerkmal sein.

Die Betonkernaktivierung über den Zuluftkanal bringt gewisse Vorteile, speziell eine moderate Speicherwirkung, die bei Spitzenlasten den Wärmeerzeuger entlasten kann. Wichtig ist dabei die Dimensionierung der Rohrlänge. Aufgrund der geringen Luftmenge wird die mitgeführte Wärme bereits in den ersten 1-3 Metern fast vollständig abgegeben. Bei der hier vorliegenden geometrischen Situation ist es entscheidend, dass diese Meter möglichst nah an der Raummitte liegen.

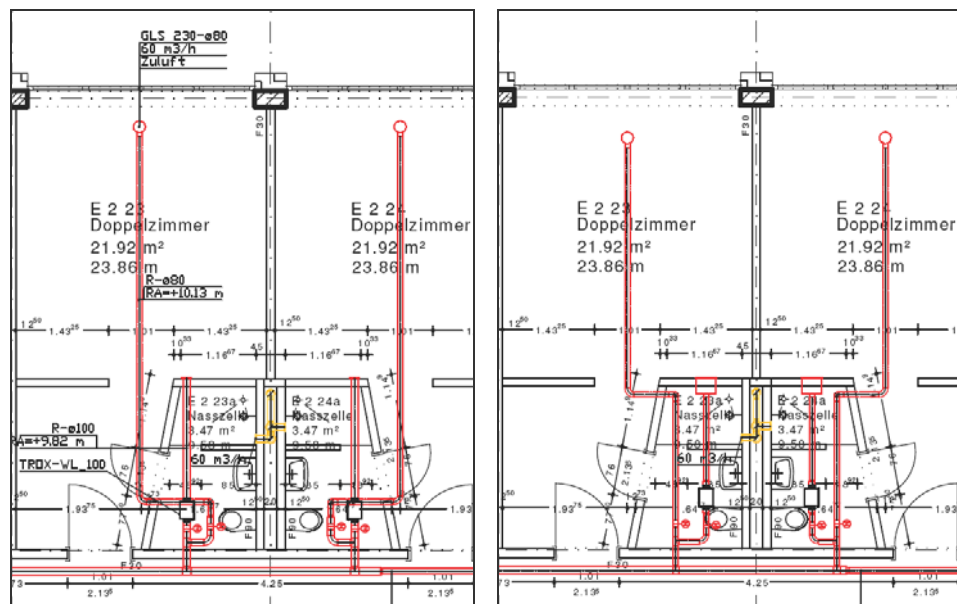


Abbildung 9 : Leitungsverlegung Entwurfsplanung (links) und Ausführungsplanung nach TRNSYS-Simulation (rechts)

Die Lüftungsrohrverlegung von der Flurachse aus macht es nötig, die ersten Meter im Raum entweder zu isolieren, oder außerhalb der Betondecke zu verlegen. Die ursprüngliche Planung wurde aus diesem Grund angepasst, so dass das Rohr jetzt in der abgehängten Decke des Badezimmers bis fast zum Zimmer geführt wird und nicht wie ursprünglich vorgesehen bereits im Vorflur in der Betondecke verlegt wird.

Für diese Anwendung (geringer Wärmestrombedarf) ist bei der zur Verfügung stehenden Rohrlänge ein unberipptes Rohr ausreichend. Ein berippte innere Oberfläche würde einen um den Faktor 3-4 erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten (bezogen auf die Rohraußenfläche) ergeben, wodurch die einzutragende Zuluftwärme bereits im ersten Rohrmeter in das Bauteil eingetragen würde. Es würde sich eine Wärmeinsel bilden, mit gleichem Speichereffekt, jedoch mit erhöhter (unerwünschter) Asymmetrie im Strahlungstemperaturfeld. Die damit korrespondierende Asymmetrie in der operativen Temperatur wird häufig aus Behaglichkeitsdefizit empfunden.

4 Folgerungen für den Betrieb

Die aus der thermischen Simulation ermittelten Ergebnisse bestätigen die Machbarkeit des Anlagenkonzepts und eine Reihe von Eigenschaften, die eine gute Gesamtenergieeffizienz begünstigen. Zudem zeigen sie genauer als die übliche grobe Abschätzungen die tatsächlich benötigten Heiz, und Kühlleistungen auf, so dass eine kostspielige Überdimensionierung von Anlagenteilen vermieden werden kann.

Während ebenfalls die prinzipielle Regelbarkeit des Systems nachgewiesen werden konnte, muss doch auf gewisse Einschränkungen der Simulationsmethode bzw. der getroffenen Annahmen hingewiesen werden.

Bei abweichenden Nutzungszeiten sind ggf. spezielle Regelungsparameter zu verwenden, um auf den erheblichen Einfluss der internen Gewinne reagieren zu

können. Die statischen Heizkörper sind real träger als das idealisierte Simulationsmodell.

Der regelbare Sonnenschutz als starkes Stellglied benötigt gemeinhin eine aufwändigere Ansteuerung als die reine Abhängigkeit von der momentanen Einstrahlung und sollte auch von einer zentralen Regelung beeinflussbar sein. Insbesondere die Bauteilaktivierung mit der prinzipiell beabsichtigten Speicherwirkung und damit jedoch einhergehenden Trägheit kann die Regelung stark fordern. Hier wird eventuell eine entsprechend aufwändigere Regelung notwendig, welche zeitabhängige Regelungsterme (Differential- und Integralbildung) erlaubt. Es sollten verschiedene Regelungsparametersätze, abrufbar je nach Betriebszustand einstellbar sein. Eine Regelungsfunktion, abhängig von der kurzfristigen Witterungsprognose kann ebenfalls hilfreich sein. Derlei Funktionen werden von modernen Regelungskreisen durchaus geboten, erfordern jedoch erhöhte Sorgfalt und Überprüfung bei deren Einbindung. Häufig können durch Optimierung der Regelungen ohne weiteren anlagentechnischen Aufwand 10-20 % an Energieaufwand eingespart werden.

Das relativ aufwändige Gesamtkonzept und speziell die komplexe Regelungstechnik machen ein detailliertes Betriebsmonitoring erforderlich. Hierbei werden nicht nur Verbrauch an Energie und Luftmengen gemessen und archiviert, sondern zugleich eine Reihe von Komfort- und regelungsrelevanten Parametern wie Raumtemperaturen, Zulufttemperaturen, Luftqualität, gespeicherter Wärmeinhalt der aktivierten Bauteile.

Die archivierten Messdaten werden einer systematischen Auswertung unterworfen. Es sollte zumindest ein Satz von Referenzräumen (je ein Raum in E 0, E 1 und E 2) genauer untersucht werden. Gegebenenfalls müssen weitere temporär installierte Sensoren eingesetzt werden.

Die Langzeitarchivierung und regelmäßige halbjährliche Berichte ermöglichen eine Darstellung von möglichen Veränderungen im Anlagenbetrieb und vereinfachen die Kommunikation zwischen Betreiber und Technikfirmen im Fall von Fehlfunktionen oder geplanten Optimierungsmaßnahmen.

In Ergänzung zu dem messtechnisch orientierten Monitoring werden Nutzerbefragungen zur Bedienbarkeit und dem thermischen Komfort durchgeführt.

Das Gebäude eignet sich aufgrund seiner hochisolierenden thermischen Hülle und der hohen thermischen Massen (Stahlbetonbauweise) prinzipiell gut als Wärmespeicher. In Verbindung mit der geplanten umfangreichen Mess- und Regelungstechnik ist es möglich, diese Speichermassen im Rahmen einer Temperaturtoleranz von etwa 1,5 K aufzuwärmen zu einem Zeitpunkt niedriger Energiepreise. In Zeitabschnitten hoher Energiepreise kann eine langsame Abkühlung des Gebäudes toleriert werden, Speicherreichweiten von 24h sind realistisch. Im Zuge künftiger Veränderungen in der Energieversorgung (Strom, Gas und Fernwärme) werden auch kleinere Verbraucher keine mittelfristig konstanten Energiepreise bezahlen, sondern in Abhängigkeit vom viertelstündlich neu bewerteten Energiemarkt. Die Preise werden auch explizit vom veränderlichen Angebot (z.B. Windkraft und Photovoltaik) bestimmt. Dies sollte von zukünftigen Energiekonzepten beachtet werden und wird von der technischen Ausstattung dieses Gebäudes im Ansatz bereits unterstützt.

5 Literaturverzeichnis

[Feist, Dr. Wolfgang] Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser, Darmstadt 2001

[Glück, Bernd] Thermische Bauteilaktivierung, Forschungsbericht der Rud.Otto Meyer Umweltstiftung, 1999

[Grobe, Carsten] Passivhäuser Planen und Bauen, München 2002

[Passivhaus Institut] Passivhaus Projektierungspaket 2007 (PHPP), Darmstadt 2007

[Passivhaus Institut] Protokollband Nr. 22, Lüftungsstrategien für den Sommer, Darmstadt 2003

[Passivhaus Institut] Protokollband Nr. 33, Passivhaus-Schulen, Darmstadt 2006

[Rietschel, Hermann] Raumklimatechnik, Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2008