

# **Adaptive Gebäudehüllen und ihr Potential zur Energieeinsparung im Gebäudebereich**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde ei-  
nes Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhand-  
lung

vorgelegt von

**Tobias Henzler**

aus Ostfildern

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:

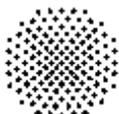
Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß

Tag der Einreichung:

20.07.2016

Tag der mündlichen Prüfung:

16.02.2017



Universität Stuttgart

**IGE**  
2017

Institut für Gebäudeenergetik

## **Kurzfassung**

In dieser Arbeit wird ein Raumsimulationsmodell entwickelt, mit dem das thermische und energetische Verhalten von adaptiven Gebäudehüllen abgebildet werden kann. Adaptive Gebäudehüllen besitzen eine Wandschicht, die ihre Wärmeleitfähigkeit verändern und an den thermischen Leistungsbedarf des Raums anpassen kann.

Da die bisher verfügbaren Raummodelle eine Gebäudehülle mit adaptiven Eigenschaften nicht abbilden können, wird ein neues Raummodell erstellt. Dieses basiert auf dem Rechenkern der VDI 6007, der um den Berechnungs- und Regelungsalgorithmus für eine veränderbare Wärmeleitfähigkeit erweitert wird. Anhand von instationären Jahressimulationen und quasi-stationären Testfällen wird die Plausibilität der Ergebnisse, der Temperaturverläufe und des energetischen Verhaltens überprüft und die Eignung des Simulationsmodells aufgezeigt.

Für einen typischen Einzelbüroraum am Standort Stuttgart mit einer Grundfläche von 17,5 m<sup>2</sup>, dessen Bauteile die Anforderungen der EnEV 2014 erfüllen, werden Vergleichssimulationen jeweils mit statischer und adaptiver Gebäudehülle durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse mit einer statischen Gebäudehülle zeigen, dass bei Büroräumen nach derzeitigem energetischem Standard der Kühlenergiebedarf weitaus höher als der Heizenergiebedarf ist. Beim Heizenergiebedarf bietet eine adaptive Gebäudehülle nur sehr geringe energetische Einsparpotentiale, während der Kühlenergiebedarf eines Raums durch die adaptive Gebäudehülle wesentlich reduziert werden kann. Zu den größten Einflussfaktoren für das energetische Einsparpotential zählen die klimatischen Verhältnisse am Standort des Gebäudes und der Flächenanteil der adaptiven Gebäudehülle an der Gesamtaußenwand. Daneben hat die Raumnutzung einen deutlichen Einfluss auf das absolute Einsparpotential.

Beim Kühlenergiebedarf lassen sich Einsparungen von etwa 70%, mit optimierter Regelungsstrategie von mehr als 80% erreichen. Damit ist es möglich, der Überwärmung von hochgedämmten Gebäuden entgegenzuwirken und den Kühlenergiebedarf deutlich zu senken.

## **Abstract**

In this work a room simulation model is developed which enables mapping the thermal and energetic behavior of adaptive building envelopes. These building envelopes consist of a wall layer which is capable of changing its thermal conductivity and adapting it to the thermal power demand of a room.

A new room model is compiled because existing room models are not capable of simulating building envelopes with adaptive features. It is based on the calculation principles of VDI 6007, which is extended by calculation principles and control algorithms for a variable thermal conductivity. The plausibility of the results, the temperature profiles and the energetic behavior is checked using transient yearly simulations and quasi-stationary test cases.

Comparative simulations are performed for a typical cellular office in Stuttgart, which has a floor space of 17.5 m<sup>2</sup> and components fulfilling the energy standard of the EnEV 2014, both with static and adaptive building envelopes.

The simulation results regarding a static building envelope in office buildings according to the current energy standard show that the cooling energy demand is much higher than the heating energy demand. Considering the heating demand, an adaptive building envelope provides very little energy savings, while the cooling demand of a room can be reduced substantially by an adaptive building envelope. The main influencing factors for the energy savings include the climatic conditions at the building location and the area ratio of the adaptive part of the total building envelope. In addition, the use of the room has a significant impact on the total energy savings.

Cooling demand energy savings can reach about 70%, but by using an optimized control strategy, more than 80% can be achieved. Thus, it is possible to counteract overheating of highly insulated buildings and to significantly reduce cooling energy demands.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Potential von adaptiven Gebäudehüllen .....	2
1.2 Abgrenzung gegenüber Lüftungskühlung .....	5
<b>2 Stand der Forschung und der Technik</b> .....	<b>7</b>
2.1 Gebäudehüllen .....	7
2.1.1 Vakuumdämmung .....	7
2.1.2 Konzepte für adaptive Gebäudehüllen.....	7
2.2 Simulation von adaptiven Gebäudehüllen .....	10
2.2.1 Anforderungen für die Simulation .....	10
2.2.2 Häufig verwendete Simulationsprogramme.....	11
2.2.3 Simulationsmodelle für adaptive Gebäudehüllen.....	14
<b>3 Grundlagen</b> .....	<b>17</b>
3.1 Thermische Materialkennwerte .....	17
3.1.1 Wärmedurchgangskoeffizient.....	17
3.1.2 Speicherkapazität.....	19
3.2 Thermische Behaglichkeitskriterien .....	20
3.2.1 Physikalische Größen .....	20
3.2.2 Temperatur .....	20
3.2.3 Strahlungsasymmetrie .....	20
3.3 Ermittlung des Energiebedarfs im Raum .....	22
<b>4 Modellbeschreibung</b> .....	<b>23</b>
4.1 Modell nach VDI 6007.....	23
4.1.1 Raummodell.....	23
4.1.2 Wandmodell .....	24
4.1.3 Temperatur- und Leistungsberechnung.....	27
4.1.4 Strahlungsmodell.....	29
4.2 Annahmen für die adaptive Gebäudehülle.....	31
4.2.1 Änderung der Wärmeleitfähigkeit .....	31
4.2.2 Speicherverhalten .....	31
4.2.3 Feuchte .....	32
4.2.4 Wandoberflächentemperatur auf der Innenseite.....	32
4.2.5 Regelung der adaptiven Gebäudehülle .....	34

4.3	Modellierung mit adaptiver Gebäudehülle .....	37
4.3.1	Wandmodell .....	37
4.3.2	Speicherkoefizienten.....	38
4.3.3	Regelungsalgorithmus .....	39
4.3.4	Einbindung in die Simulationsumgebung TRNSYS .....	42
4.4	Modellüberprüfung .....	43
4.4.1	Raummodell nach VDI 6007 .....	43
4.4.2	Strahlungsmodell.....	44
4.4.3	Raummodell für adaptive Gebäudehüllen .....	45
<b>5</b>	<b>Randbedingungen und Simulationsvarianten .....</b>	<b>51</b>
5.1	Raumgeometrie .....	51
5.2	Wetterdaten.....	52
5.3	Raumnutzung.....	52
5.3.1	Solltemperaturen .....	52
5.3.2	Wärmeabgabe im Raum.....	52
5.3.3	Luftwechsel .....	53
5.3.4	Sonnenschutz.....	53
5.4	Heiz- und Kühllast .....	54
5.5	Modellierung der Anlagentechnik .....	54
5.6	Simulationsvarianten.....	54
5.6.1	Grundvariante .....	55
5.6.2	Veränderung der Orientierung der Außenwand .....	55
5.6.3	Veränderung des Gebäudestandorts .....	55
5.6.4	Veränderung der Lage des Raums im Gebäude .....	56
5.6.5	Steuerungsstrategie des Sonnenschutzes .....	57
5.6.6	Veränderung des Fensterflächenanteils .....	58
5.6.7	Veränderung der Nutzung des Raums.....	59
5.6.8	Veränderung der Betriebszeiten und Raumtemperatursollwerte	59
5.6.9	Veränderung des Luftwechsels.....	60
5.6.10	Veränderung der Wärmeleitfähigkeit der adaptiven Wandschicht .....	61
5.6.11	Veränderung der Speicherkapazität der Gebäudehülle .....	63
5.6.12	Regelung mit Temperaturbändern.....	63
<b>6</b>	<b>Simulationsergebnisse und Ergebnisdiskussion .....</b>	<b>65</b>
6.1	Grundvariante .....	65
6.2	Orientierung der Außenwand .....	73
6.3	Gebäudestandort.....	77

6.4	Lage des Raums im Gebäude .....	80
6.5	Steuerungsstrategie des Sonnenschutzes .....	82
6.6	Fensterflächenanteil .....	85
6.7	Nutzung des Raums.....	87
6.8	Betriebszeiten und Temperatursollwerte.....	88
6.9	Luftwechsel .....	89
6.10	Variation der Wärmeleitfähigkeit .....	91
6.11	Speicherkapazität der Gebäudehülle .....	94
6.12	Regelung mit Temperaturbändern.....	95
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>108</b>
9.1	Simulationsmodell .....	108
9.2	Standardwerte für Simulationen.....	119
9.3	Materialkenndaten für die Bauteile .....	119
9.3.1	Wandflächen.....	119
9.3.2	Aufbau der Innenbauteile .....	120
9.3.3	Aufbau „extrem leichtes“ Bauteils ( $\rho=10 \text{ kg/m}^3$ ).....	121
9.3.4	Aufbau „schweres“ Bauteils ( $\rho=1.000 \text{ kg/m}^3$ ) .....	121
9.3.5	Außenwand nach EnEV 2014.....	121
9.3.6	Außenwand nach Passivhausstandard.....	122
9.3.7	Außenwand mit zukünftigen Materialien .....	122
9.3.8	Massive Außenwand nach EnEV 2014.....	122
9.3.9	Dach nach EnEV 2014 .....	122
9.4	Modellüberprüfung .....	123
9.5	Ergebnisse für den Gebäudestandort .....	125

