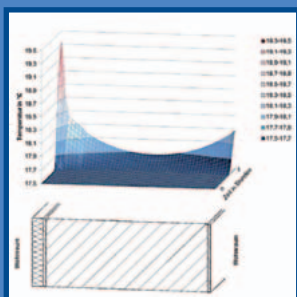
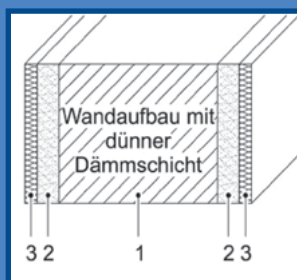
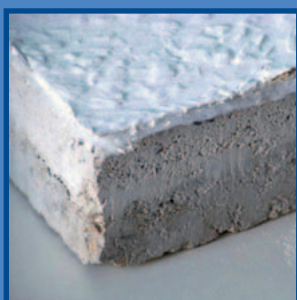


Alexander Siebel

### Effiziente Anheizung von Gebäuden in massiver Bauweise bei intermittierender Beheizung



BAUKONSTRUKTIONEN + BAUPHYSIK | BAND 3

Wolfgang M. Willems (Hrsg.), Alexander Siebel

# Effiziente Anheizung von Gebäuden in massiver Bauweise bei intermittierender Beheizung

Fraunhofer IRB Verlag

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9063-1

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9064-8

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **Fraunhofer IRB Verlag**, 2013  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Fax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
URL [www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

# **Effiziente Anheizung von Gebäuden in massiver Bauweise bei intermittierender Beheizung**

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur  
an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
der technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

von  
Alexander Siebel  
Aachen

- |               |   |
|---------------|---|
| 1. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems   |
| 2. Gutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt,<br>Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität Siegen |

Tag der Einreichung: 27. September 2012

Tag der mündlichen Prüfung: 5. März 2013

Aachen 8. März 2013



## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung der Technischen Universität Dortmund. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt für die Betreuung, Unterstützung und Geduld während der Erstellung dieser Arbeit. Sie waren bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit konstruktive Diskussionspartner und es fand ein praxisnaher Gedankenaustausch statt. Für die Unterstützung bei den technischen Darstellungen danke ich Frau Kerstin Hübner vom Lehrstuhl Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung an der Technischen Universität Dortmund.

Die Erstellung der Arbeit erfolgte begleitend zu meiner Berufstätigkeit als Ingenieur bei der SWA GmbH in Aachen. Die SWA GmbH ist unter anderem im Bereich der Baustoff- und Bauproduktprüfung tätig. Hierdurch konnten viel Praxiswissen und messtechnische Erfahrung in die Arbeit einfließen. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich bei meinem Vater, der mir stets ein konstruktiver und kritischer Diskussionspartner war.

Besondere Hilfe wurde mir zudem durch Herrn Dipl.-Ing. Stefan Braun von der Firma Smart-CAE aus München zuteil, welcher mich bei der Simulationsberechnung dünner Schichten unterstützte. Mit der Software „HeatTransmission“ konnten auch Temperaturfelder zu den durchgeführten Labor- und Objektmessungen simuliert werden. Dank der sehr guten Unterstützung durch Herrn Dipl.-Ing. Stefan Braun wurde das Programm auf die in der vorliegenden Arbeit benötigten Bedingungen angepasst.

Letztlich möchte ich noch allen danken, welche mir Räume für messtechnische Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben und Unannehmlichkeiten während der Messungen in ihren normal benutzen Räumen in Kauf genommen haben.



## Inhaltsverzeichnis

---

<b>Vorwort.....</b>	<b>1</b>
<b>Nomenklatur.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>8</b>
1.1. Problemstellung .....	8
1.2. Zielsetzung .....	11
<b>2. Wärmetransport .....</b>	<b>13</b>
2.1. Konvektion .....	13
2.2. Wärmestrahlung.....	15
2.3. Stationäre Wärmeleitung.....	17
2.4. Instationäre Wärmeleitung.....	18
2.5. Der instationäre eingeschwungene Zustand .....	21
<b>3. Wärmespeicherfähigkeit.....</b>	<b>22</b>
3.1. Baustoffeigenschaften.....	22
3.2. Bauteileigenschaften unter instationären Randbedingungen.....	26
3.2.1. Thermische Eindringtiefe.....	26
3.2.2. Wirksame Wärmespeicherfähigkeit .....	27
<b>4. Thermische Behaglichkeit in Innenräumen .....</b>	<b>28</b>
4.1. Kriterien .....	28
4.2. Thermische Behaglichkeit in Innenräumen .....	28
4.3. Empirische Bewertungsgrundlagen .....	33
<b>5. Beheizung .....</b>	<b>35</b>
5.1. Nutzerverhalten.....	35
5.2. Intermittierender Heizbetrieb .....	37
5.3. Die Aufheizphase.....	38
<b>6. Messtechnische Untersuchung der thermischen Entwicklung in Räumen während einer Heizperiode.....</b>	<b>41</b>
6.1. Vorgehensweise und Randbedingungen .....	41



6.2.	<i>Raumbeheizung in Wohngebäuden</i> .....	43
6.3.	<i>Raumbeheizung in Bürogebäuden</i> .....	55
6.4.	<i>Zusammenfassung der vorgefundenen Verhältnisse</i> .....	58
<b>7.</b>	<b>Messtechnische Untersuchung dünner Dämmschichten an massiven Wandkonstruktionen</b> .....	<b>59</b>
7.1.	<i>Anheizphase einer massiven Wandkonstruktion unter Laborbedingungen</i> .....	59
7.1.1.	<i>Anheizphase im Labor-Prüfstand für eine einmalige Anheizung</i> .....	63
7.1.2.	<i>Anheizphase im Labor-Prüfstand bei einer intermittierenden Beheizung</i> .....	64
7.2.	<i>Anheizphase in einem Wohngebäude</i> .....	65
7.3.	<i>Einfluss von solarer Strahlung auf eine Innenwand</i> .....	69
7.4.	<i>Lüftungseinfluss auf die operative Temperatur</i> .....	72
7.5.	<i>Energieeinsparung bei einem Wohngebäude</i> .....	74
7.5.1.	<i>Amortisationsbetrachtung für das Pilotobjekt</i> .....	78
7.6.	<i>Ergebnisdiskussion</i> .....	80
<b>8.</b>	<b>Rechnerische Untersuchung</b> .....	<b>81</b>
8.1.	<i>Vorgehensweise</i> .....	81
8.2.	<i>Validierung der Berechnungen mit der Messergebnissen</i> .....	81
8.3.	<i>Thermisches Verhalten von Innenwandkonstruktionen</i> .....	84
8.3.1.	<i>Innenwandkonstruktionen bei instationärem Heizbetrieb</i> .....	85
8.4.	<i>Thermisches Verhalten von Außenwandkonstruktionen</i> .....	96
8.5.	<i>Berechnung der gespeicherten Energie bei intermittierendem Heizbetrieb</i> .....	102
8.5.1.	<i>Gespeicherte Energiemenge bei intermittierendem Heizbetrieb</i> .....	107
8.6.	<i>Ergebnisdiskussion</i> .....	108
<b>9.</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>109</b>
9.1.	<i>Temperierung von realen Wohn- und Büroräumen</i> .....	109
9.2.	<i>Messtechnisch und rechnerisch untersuchter Einfluss dünner Dämmschichten an Wandkonstruktionen</i> .....	110
<b>10.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>113</b>
10.1.	<i>Untersuchungsergebnisse</i> .....	113
10.2.	<i>Vorteile für das Raumklima bei entsprechenden Maßnahmen</i> .....	113

10.3.	<i>Möglichkeiten der Energieeinsparung</i> .....	113
10.4.	<i>Empfehlung zur Anwendung in der Praxis</i> .....	114
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>115</b>
	<b>Lebenslauf</b> .....	<b>118</b>