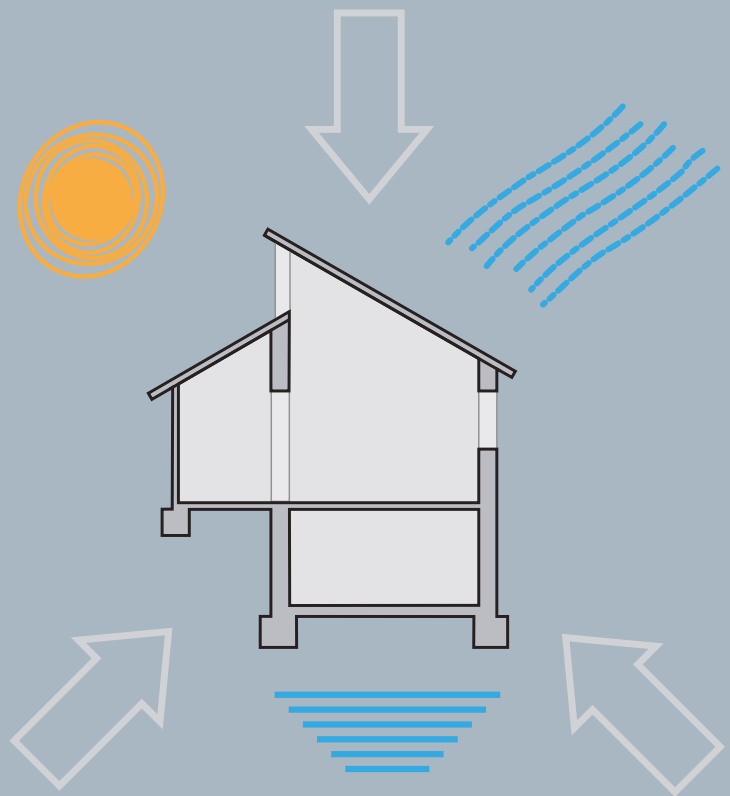


Thomas Duzia | Norbert Bogusch

# Basiswissen Bauphysik

Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes

3., überarbeitete und erweiterte Auflage



Fraunhofer IRB  Verlag

---

Dr.-Ing. Thomas Duzia  
Dipl.-Ing. (FH) Norbert Bogusch

## Basiswissen Bauphysik



---

Dr.-Ing. Thomas Duzia  
Dipl.-Ing. (FH) Norbert Bogusch

# Basiswissen Bauphysik

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

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): 978-3-7388-0419-5

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0420-1

Satz, Herstellung, Layout: Gabriele Wicker

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH + Co.KG, Stuttgart

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

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 Fraunhofer IRB 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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2020

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## Vorwort

Klimaschutz und Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf möglichst »unter 2 Grad C« steht in Europa und in Deutschland auf der politischen Top-Agenda und beeinflusst den Ausgang von Wahlen wie nie zuvor. Namhafte Großstädte wie etwa Köln beschließen den Klimanotstand. Der alarmierende Tenor wissenschaftlicher Studien für den weltweiten Klimarat (IPCC) nimmt seit Jahren zu. Der Jugend platzt der Kragen (Fridays4Future), weil ihr die Zukunft gestohlen wird. Mehr als 23 000 Wissenschaftler von Scientist4Future unterstützen sie. Eine derartige Einmütigkeit und Solidaritätserklärung gab es noch nie in der deutschsprachigen Wissenschaft. Die Extremwetterereignisse der letzten Jahre signalisieren, was wissenschaftlich nicht mehr bestritten werden kann: Der Klimawandel ist sichtbar, fühlbar, messbar und er beschleunigt sich. Nur wenige Ignoranten und Lobbyisten leugnen dies.

Die ambitionierteste Energiewende der Welt hat Deutschland in den Jahren 2010/2011 mit einem quantifizierten Zielkanon für 2050 beschlossen. Ein Jahrhundertprojekt ohne Vorbild: Halbierung des Energieverbrauchs, raus aus Kohle, Öl, Erdgas und Uran! Einen solchen staatlich forcierten Strukturwandel hat es ebenfalls noch nie gegeben. Bei der Stromwende gibt es wurden beeindruckende Fortschritte gemacht: 47 % der Nettostromerzeugung stammten inzwischen im 1. Halbjahr 2019 aus erneuerbaren Quellen. Einen gleichzeitigen Atomausstieg (bis 2022) und ein Kohle-Ausstiegjahr (bis spätestens 2038) hat noch kein vergleichbares Industrieland beschlossen. Diese Erfolge sollte man nicht kleinreden. Aber der anspruchsvollste und schwierigste Teil der Energiewende liegt noch vor uns. Vor allem bei der energetischen Sanierung und Dekarbonisierung des Gebäudebestands steht die deutsche Energiewende- und Klimapolitik vor der Herausforderung eines epochalen Gemeinschaftswerkes – vielleicht nicht so spektakulär wie der nachhaltige Umbau des Verkehrssystems, dafür aber umso komplexer.

Im Klimaschutzplan hat die Bundesregierung 2015 Sektorziele für 2030 beschlossen. Für den Gebäudebereich bedeutet dies eine Reduktion um fast 67 % (d.h. etwa um 70 Mio t CO<sub>2</sub>equiv.) im Vergleich zu 2014, nur dann wird bis 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht. Es gibt Szenarien, die zeigen, dass das durch ein Zukunftsinvestitionsprogramm wirtschaftlich machbar wäre. Notwendig ist eine milliarden schwere, kontinuierliche jährliche Anschubfinanzierung, deren volkswirtschaftlichen Effekte überwiegend positiv sind. Was bei solchen gesamtwirtschaftlichen Analysen aber oft vernachlässigt ist wird, sind die nur scheinbar einfachen Fragen: Wer setzt das alles um? Gibt es freie Baukapazitäten? Brauchen wir nicht zuallererst eine Qualifikationsoffensive? Ohne einen gewaltigen Schub bei Fachkräften und bei der fachlichen Fundierung von Breiten- und Systemwissen wird es keinen dekarbonisierten Gebäudebereich geben.

Hier kommt der neu aufgelegte Band »Basiswissen Bauphysik« genau zum richtigen Zeitpunkt. Es ist ein perfektes Nachschlagewerk und wie ein Lexikon der Bauphysik differenziert gegliedert und nutzbar. Es ist so geschrieben, dass nicht nur Fachleute, Ingenieure und Architekten, Wissenslücken auffüllen können. Selbst Bauherren oder Investoren können nach der Lektüre einzelner Kapitel verstehen, wie energetischer Wärmeschutz funktioniert, warum er notwendig ist, wie Brandgefährdung und Schimmelbildung vermieden werden können und warum – angesichts der Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen – auch in unseren Breiten der sommerliche Wärmeschutz an Bedeutung gewinnt.

Die fachlichen Anforderungen und die Systemintegration bei der beschleunigten Implementierung der Energiewende im Gebäudebereich werden in Zukunft sprunghaft zunehmen. Sektorkopplung durch grünen Strom und nachhaltige Mobilität werden als neue Herausforderungen dazukommen. Daher ist dem Band heute und in Zukunft eine starke Verbreitung zu wünschen. Die nächste Auflage in Richtung »Zukünftige Anforderungen« sollte bereits geplant werden.

**Prof. Dr. Peter Hennicke**

Ehemaliger Präsident des Wuppertal Instituts; Full Member of the Club of Rome

## Vorwort zur zweiten Auflage

Die neue Energieeinsparverordnung vom Mai 2014 reiht sich in eine ganze Folge an gesetzlichen Vorgaben ein, die 1977 mit der ersten Wärmeschutzverordnung begann. Die Bundesregierung verbindet mit diesen Vorgaben das langfristige Ziel eines »nahezu klimaneutralen Gebäudebestands« im Jahr 2050. Von diesem hehren Ziel ist man allerdings trotz der Verordnungen noch weit entfernt. Derzeit ist allein die Beheizung des Gebäudebestands für etwa ein Drittel des deutschen Gesamtenergieverbrauchs – zu großen Teilen nicht »klimaneutral« gewonnene Energie – verantwortlich. Dies zeigt, welche Bedeutung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten der zum Bereich der Bauphysik zählende Wärmeschutz einnehmen wird. Daher ist es nur folgerichtig, dass diesem Thema im vorliegenden Buch eine dominierende Stellung zugeteilt wird.

Des Weiteren gehen die Autoren unter Berücksichtigung der novellierten DIN 4108-2 auf den sommerlichen Wärmeschutz ein. Dieser gewinnt zunehmend an Bedeutung, nicht zuletzt bedingt durch die in der modernen Architektur häufig anzutreffenden großzügig dimensionierten Fensterflächen, die einen hohen solaren Eintrag zur Folge haben können. Hinzu kommt die mitunter geringe Wärmekapazität solcher Gebäude, die eine sommerliche Überhitzung in hohem Maße fördert. Ein weiterer Fokus des vorliegenden Buches ist dem Feuchteschutz gewidmet. Auch hier haben die Autoren die richtige Wahl getroffen, da Feuchteschäden jeglicher Couleur in deutschen Gebäuden sehr häufig anzutreffen sind. Abgerundet werden die genannten Themen durch das Aufzeigen verschiedener Schadensbilder, mit denen die beiden Autoren als anerkannte Sachverständige sehr häufig konfrontiert werden.

Diese Hintergründe verdeutlichen, dass möglichst viele am Bau Beteiligte über ein bauphysikalisches Basiswissen verfügen sollten. In diese Lücke stößt das vorliegende Buch, in dem die Grundlagen des Wärmeschutzes, der aktuellen Energieeinsparverordnung sowie das Thema Feuchteschutz aufbereitet dargestellt werden. Damit bietet das Buch eine hervorragende grundlegende Orientierung im Bereich der Bauphysik, sowohl für Anfänger als auch Fortgeschrittene. Dies ist notwendig, weil die immer größer werdende Zahl zu berücksichtigender Normen und anderer Vorgaben nur schwer zu durchdringen ist. Zudem hat sich der Stand von Wissenschaft und Technik kontinuierlich weiterentwickelt, was Planer selbstverständlich berücksichtigen müssen.

Zielgruppe des Buches sind deshalb sowohl Einsteiger, die sich einen bauphysikalischen Überblick verschaffen wollen als auch Bauingenieuren und Architekten, deren bauphysikalische Ausbildung an den Universitäten und Fachhochschulen eine Weile zurückliegt und die sich beruflich weiterbilden wollen. Darüber hinaus sollen alle Leser herzlich eingeladen sein, diese »Basis« als Ausgangspunkt für einen vertiefenden Einstieg in die Bauphysik zu verstehen.

**Jun.-Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker**  
TU Kaiserslautern

## Vorwort zur ersten Auflage

Als die Autoren mich gebeten haben, ein Vorwort zu ihrer Veröffentlichung »Basiswissen Bauphysik« zu verfassen, habe ich spontan zugesagt. Der Grund dafür liegt nicht zuletzt darin, dass sich das Bauwesen in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert hat und damit neue Maßstäbe und Anforderungen gestellt werden, denen die Baupraxis nicht immer zeitnah gerecht werden kann. Die Ursachen dafür sind in erster Linie darin zu finden, dass sich auf der einen Seite die Richtlinien, Vorschriften und Normen immer schneller und öfter verändern und dass auf der anderen Seite die Entwicklung neuer Baustoffe, Instandsetzungssysteme und Verfahrenstechniken ebenfalls rasant zugenommen hat. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Ausbildung in Lehre und Praxis diesem Tempo häufig nicht schritthalten kann. Um diese Lücken zu schließen, ist die berufliche Weiterbildung gefordert, ohne die der Wissensstand der Technik nicht gehalten werden kann.

Wenn sich nun zwei erfahrene Sachverständige und Architekten des Themas Bauphysik mit dem Schwerpunkt des Wärmeschutzes unter Berücksichtigung des Einflusses der Feuchtigkeit annehmen und ein für die eigenen Berufskollegen bestimmtes Fachbuch erarbeiten, ist dies zweifelsohne ein Schritt in die richtige Richtung. In verständlicher Form werden in elf Kapiteln die Anforderungen der EnEV an den Wärmeschutz von Gebäuden vermittelt. Dabei werden nicht nur die gesetzlichen oder normativen Vorschriften berücksichtigt, sondern auch die Grundlagen und Grundbegriffe des Wärmeschutzes definiert und erläutert. Die Darstellung von Problemen mit schadensrelevanter Bedeutung kommt dabei ebenfalls nicht zu kurz. Am Wichtigsten ist jedoch, dass die Probleme mit angemessenen Lösungsvorschlägen kombiniert werden. Besonders hilfreich sind dabei die zahlreichen Tabellen und Abbildungen, die die notwendige Anschaulichkeit und Verständlichkeit gewährleisten.

Das Buch schließt eine Lücke in der Fachliteratur für die Ausbildung und Weiterbildung von Planern, Sachverständigen und Fachberatern.

**Prof. Dr. Helmut Weber**

## Anmerkung der Autoren

Die einzelnen Kapitel sind nach den Kompetenzbereichen von jeweils einem Autor verfasst worden. Norbert Bogusch ist Verfasser der Kapitel 3.1, 3.2, 3.5, 4.4.1 und 7. Verfasser der Kapitel 1, 2, 3.3, 3.4, 6, 8, 9 und 11 ist Thomas Duzia. Die Kapitel 4, 5, 8.9.1, 8.9.2, 8.9.3 und 10 entstanden gemeinschaftlich.

Selbstverständlich sind beide Autoren zusätzlich für den gesamten zu vermittelnden Stoff verantwortlich, da die Ausführung aus einer gemeinschaftlichen Konzeption entstanden ist.

Die Überarbeitungen zur zweiten und dritten Auflage wurden von Dr.-Ing. Thomas Duzia vorgenommen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die historische Entwicklung des Wärme- und Feuchteschutzes</b>	13
<b>2</b>	<b>Übersicht geltender Regelwerke zum Wärme- und Feuchteschutz</b>	17
2.1	DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden	18
2.2	Wärmeschutzverordnung – WSchV	19
2.3	Energieeinsparverordnung – EnEV	19
2.3.1	Verbrauchsausweis zur EnEV	21
2.3.2	Bedarfsausweis zur EnEV	24
2.3.3	DIN V 18599	24
2.3.4	Die Zonierung von Nichtwohngebäuden	26
2.3.5	Sonderfälle und Probleme zur Auslegung nach EnEV	28
2.3.6	Verordnung zur Umsetzung der Energieeinsparverordnung – EnEV-UVO	30
2.4	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG	31
2.5	Europäische Union – Richtlinie der Gesamteffizienz von Gebäuden	31
2.6	Entwicklung der Anforderungen an den Wärmeschutz	32
2.7	Anforderungen aus der EnEV 2014: Fassung 2016	34
<b>3</b>	<b>Wärmeschutz: Definition und Erläuterung der wesentlichen Fachbegriffe</b>	37
3.1	Energie	37
3.2	Einheiten und physikalische Größen	39
3.3	Allgemeine Begriffe der Wärmelehre	40
3.3.1	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	41
3.3.2	Wärmedurchlasswiderstand R	43
3.3.3	Wärmeübergangswiderstand und Wind	45
3.3.4	Wärmestromdichte $q$ , Wärmestrom und Isotherme	48
3.3.5	U-Wert oder Wärmedurchgangskoeffizient	49
3.3.6	Der k-Wert	51
3.3.7	Wärmemenge Q oder spezifische Wärmekapazität c	51
3.3.8	Der Wärmeeindringkoeffizient b und die Kontakttemperatur	52
3.3.9	Emissionsgrad $\epsilon$	52
3.4	Mechanismen des Wärmetransports	54
3.4.1	Wärmestrahlung	55
3.4.2	Konvektion	55
3.4.3	Wärmeleitung	56
<b>4</b>	<b>Energetischer Wärmeschutz</b>	59
4.1	Vorgaben und Gliederung der Energieeinsparverordnung	60
4.1.1	Wohngebäude	62
4.1.2	Nichtwohngebäude	63
4.1.3	Bestandsbauten und Denkmäler	63

4.2	Die energetische Bewertung der Hüllfläche	65
4.2.1	Transmissionswärmeverluste $H_T$	66
4.2.2	Der $F_x$ -Temperatur-Korrekturfaktor	67
4.3	Wärmebrücken und energetische Nachweise	67
4.3.1	Randbedingungen der Wärmebrückenbetrachtungen	70
4.3.2	Arten der Wärmebrücke	71
4.3.3	Wärmebrücken nach DIN 4108 Beiblatt 2	76
4.3.4	Thermische Trennungen	78
4.3.5	Wärmeverluste gegen Erdreich	82
4.4	Luftdichtheit und Wärmeschutz	87
4.4.1	Luftdichtheitskonzept	89
4.4.2	Verarbeitung und Anschlüsse von Folien	90
4.4.3	Luftdichte Anschlüsse von Fensterkonstruktionen	91
4.4.4	Luftdichtheit von üblichen Baumaterialien	92
4.4.5	Luftdichtheitsmessungen nach »Blower-Door-Messverfahren«	94
4.5	Thermografie	95
<b>5</b>	<b>Rechenverfahren und Nachweise</b>	99
5.1	Beispiele zu U-Wert-Berechnungen	101
<b>6</b>	<b>Hygienischer Wärmeschutz</b>	107
6.1	Schimmelpilz und Bakterien im Innenraum	107
6.1.1	Grundlagen zur Bewertung	110
6.1.2	Grenzwerte von Oberflächentemperaturen	111
6.1.3	Vermeidung von Schimmelpilzwachstum	111
6.1.4	Sporengehalt, Indikatoren und gesundheitliche Risiken	112
6.1.5	Bewertung des Befalls	113
6.1.6	Ablauf der Untersuchungen	114
6.1.7	Einfluss des pH-Werts auf das Schimmelpilzwachstum	115
6.1.8	Sanierungsmaßnahmen	116
6.1.9	Rechnerische Nachweise nach DIN 4108-2	117
6.1.10	Sorptionsfähigkeit von Baustoffen – Die Ausgleichsfeuchte	119
6.1.11	Nutzerverhalten und Raumluftfeuchte	120
6.1.12	Lüftungskonzepte nach DIN 1946-6	124
6.1.13	Sommerkondensat	127
6.2	Behaglichkeit	128
6.2.1	Luftfeuchtigkeit und Behaglichkeit	130
6.2.2	Wärmeableitung über den Fußboden	131
6.2.3	Asymmetrische Strahlungstemperatur	132
6.2.4	Zugerscheinung an Wänden	133
6.2.5	Der Prozentsatz der Unzufriedenen (PPD)	133
<b>7</b>	<b>Entscheidungskriterien bei der Beurteilung von Schimmelpilzschäden</b>	135

<b>8</b>	<b>Feuchteschutz</b>	143
8.1	Feuchteschutz nach DIN 4108-3	144
8.2	Feuchteschutz nach DIN EN ISO 13788	146
8.3	Grundlagen zum Glaser-Nachweis	146
8.3.1	Randbedingungen Winter und Sommer	147
8.3.2	Beispiele	148
8.3.3	Feuchteschutz und Tauwasser	151
8.3.4	Trocknungsverhalten	152
8.4	Schutz der Konstruktion	154
8.4.1	Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$	155
8.4.2	$s_d$ -Wert	157
8.5	Konstruktionen und Nachweise	158
8.5.1	Nachweisfreie Wandkonstruktionen	159
8.5.2	Nachweisfreie Bodenplatten	160
8.5.3	Nachweisfreie Dachkonstruktionen	160
8.5.4	Feuchteschutz und Fenster	161
8.5.5	Feuchteschutznachweise bei Gründächern	161
8.6	Hinterlüftete Bauteile	163
8.7	Feuchteschutz bei Holzkonstruktionen	163
8.8	Feuchteschutz bei Stahlkonstruktionen	166
8.9	Mechanismen der Aufnahme von Feuchtigkeit	167
8.9.1	Adsorption	169
8.9.2	Absorption	169
8.9.3	Desorption	170
8.9.4	Ausgleichsfeuchte	171
<b>9</b>	<b>Sommerlicher Wärmeschutz</b>	173
9.1	Nachweispflicht nach DIN 4108-2	173
9.2	Nachweisfreie Räume	175
9.3	Grundlagen der Berechnung	175
9.3.1	Sommerklimaregionen	176
9.3.2	Sonneneintragskennwert $s$	177
9.3.3	Gesamtenergiedurchlass $g_{\text{tot}}$	178
9.3.4	Sonnenschutzverglasung	179
9.3.5	Abminderungsfaktor $F_C$ und Teilbestrahlungsfaktor $F_S$	180
9.3.6	Ausrichtung des Gebäudes	181
9.3.7	Konstruktionsart und nächtliches Lüften	182
9.3.8	Beispiel: Berechnung Sonneneintragskennwert	186
9.4	Das Klima der Wände	187
9.4.1	Individuelles Wohlbefinden	188

<b>10</b>	<b>Typische bauliche Problemfelder und Schadensbilder</b>	189
10.1	Grundlagen zur Dämmung	189
10.2	Außendämmung	190
10.2.1	Algen-, Pilzbefall und gedämmte Fassaden	191
10.2.2	Algen und Pilze	194
10.2.3	Biozide	195
10.2.4	Dämmung und Brandschutz	195
10.3	Innendämmung	198
10.4	Dämmung gegen Erdreich	202
10.5	Solare Erwärmung von Bauteilen	203
10.6	Maßnahmen gegen Feuchtigkeit	208
10.6.1	Baufeuchte	208
10.6.2	Ausgleichsfeuchte	211
10.6.3	Porensysteme und ihre Eigenschaften	212
10.6.4	Mauerwerk	214
10.6.5	Porenbeton	215
10.6.6	Auswirkungen der Trocknungsprozesse auf Holzbauteile	215
<b>11</b>	<b>Zukünftige Anforderungen und nachhaltiger Wärmeschutz</b>	219
<b>12</b>	<b>Quellen, Abbildungen, Sachregister</b>	223
12.1	Literatur	223
12.2	Normen und Verordnungen	226
12.3	Abbildungen	228
12.4	Akronyme	229
12.5	Sachregister	230