

## Inhaltsübersicht

### A Allgemeines und Normung

- A 1 Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Hochbau – vom Energieverbrauch in der Nutzung zur Lebenszyklusanalyse 1  
Özlem Özdemir, Carina Hartmann, Karina Krause, Annette Hafner
- A 2 Lebenszyklus von Gebäuden – die Zukunft des Bauens 25  
Gunnar Clemenz, Thomas Putscher
- A 3 Klimagerechtes Bauen 43  
Thorsten Schütze
- A 4 Die Ermittlung der Ressourceneffizienz und der Klimabelastung von Bauwerken 83  
Clemens Mostert, Husam Sameer, Stefan Bringezu

### B Dämmstoffe

- B 1 Dämmstoffe im Bauwesen 119  
Wolfgang M. Willems, Kai Schild
- B 2 Nachhaltige Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen 197  
Peter Schmidt, Saskia Windhausen
- B 3 Recycling von Wärmedämmstoffen 223  
Wolfgang Albrecht

### C Konstruktionen und Baustoffe

- C 1 Aufstockung versus Abriss und Neubau – Vergleich von ökologischen und ökonomischen Auswirkungen 245  
Annette Hafner, Michael Stork
- C 2 Nachhaltiger Betonbau 259  
Michael Halst, Konrad Bergmeister, Nabil A. Fouad, Manfred Curbach, Macielle Vivienne Deiters, Patrick Forman, Jesko Gerlach, Tobias Hatzfeld, Jannik Hoppe, Benjamin Kromoser, Peter Mark, Christoph Müller, Harald S. Müller, Christoph Scope, Tobias Schack, Matthias Tietze, Klaus Volt
- C 3 Ganzheitliche Ökobilanzierung von Wohnquartieren in Holzbauweise 365  
Sven Steinbach, Carolin Schulze, Christoph Kunde
- C 4 Bewertung von Bauelementen und Baustoffen für nachhaltiges Bauen 417  
Jörn Peter Lass, Christoph Seehauser, Jürgen Benitz-Wildenburg
- C 5 Vakuumglasintegration in Bestands- und Neufenster 447  
Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss
- C 6 Cross Layers Light – Ein ressourceneffizientes und recyclebares Holz-Wandsystem 483  
Markus Duffner, Thomas Ulbel, Leif A. Peterson, Wilfried Moorkamp
- C 7 Nachhaltige Gebäudetechnologie in Forschung und Entwicklung 503  
Marco Wolf, Martin Buchholz, Arno Schlüter, Philipp Geyer
- C 8 Solar Decathlon Europe 2022 – Bauphysikalische Ergebnisse von Demonstrationsgebäuden 531  
Karsten Voss, Helko Hansen, Marvin Kaliga, Isil Kalpkirmaz Rizaoglu

- C 9 Planung, Ausführung und Betriebserfahrung eines Plus-Energie-Bürohochhauses 551  
Alexander David, Thomas Bednar, Markus Leeb, Helmut Schöberl
- C 10 Energy Design: Gestaltung und Innovation in Bestandsgebäuden 595  
Bernhard Sommer, Ulrich Pont, Małgorzata Sommer-Nawara,  
Galo Patricio Moncayo Asan

**D    Materialtechnische Tabellen**

- D 1 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz 623  
Nina Schjerve
- D 2 Materialtechnische Tabellen 661  
Rainer Hohmann

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** III

**Autor:innenverzeichnis** XXI

### A Allgemeines und Normung

#### A 1 Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Hochbau – vom Energieverbrauch in der Nutzung zur Lebenszyklusanalyse 1

Özlem Özdemir, Carina Hartmann, Karina Krause, Annette Hafner

1	Einführung – jetzt handeln 3	3.3	Aktuelle Trends 11
1.1	Hintergrund 3	3.3.1	Nachhaltigkeitsbewertung (QNG) 11
1.2	Klimaschutz und Ressourcenschonung 3	3.3.2	Umsetzung im GEG 11
2	Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau 4	4	Beispielhafte Bewertung im Wohnungsbau 12
2.1	Begriffsdefinition und Entwicklung des Begriffs 4	4.1	Rahmenbedingungen 12
2.2	Nachhaltigkeitszertifizierung 5	4.1.1	Lebenszyklusanalyse von Gebäuden 12
2.2.1	Zertifizierungssysteme der ersten Generation „Green Buildings“ 6	4.1.2	Gebäuderahmenbedingungen 12
2.2.2	BREEAM 6	4.1.3	Umweltindikatoren 13
2.2.3	LEED 6	4.2	Gebäudeübersicht 13
2.3	Zertifizierungssysteme der zweiten Generation DGNB, NaWoh, BNB, BNK 6	4.3	Einbezug von Nutzerstrom und Einbezug/Bewertung der Photovoltaikanlage 13
2.3.1	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) 6	4.4	Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoß“ 14
2.3.2	Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens (BNB) 7	4.4.1	Repräsentative Gebäude 14
2.3.3	Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh) 7	5	Ergebnisse 14
2.3.4	Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau (BNK) 7	5.1	LCA-Ergebnisse GWP 14
3	Klimaschutzaspekte in der Nachhaltigkeitsbewertung 8	5.2	LCA-Ergebnisse PENRT 16
3.1	Bewertung der ökologischen Qualität im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung 8	5.3	Sensitivitätsanalyse zum Energieverbrauch im Betrieb einschließlich Modul B6.3 17
3.1.1	Energie 8	5.4	Ergebnisse Sonderthema „Gebäude mit Kellergeschoß“ 18
3.1.2	Emissionen 8	5.4.1	LCA-Ergebnisse GWP 18
3.1.3	Schadstoffe 8	5.4.2	Vergleich der Ergebnisse zukunftsorientiertes/konventionelles Gebäude 18
3.1.4	Flächeneinsparung/Flächenversiegelung 9	5.4.3	Vergleich der Ergebnisse BGF/NRF 18
3.1.5	Wasser 9	5.4.4	Vergleich mit/ohne Keller 19
3.1.6	Nachwachsende Rohstoffe 10	5.4.5	Schlussfolgerung 20
3.2	Kernthema Lebenszyklusbetrachtung (LCA) 10	6	Diskussion und Schlussfolgerung 20
3.2.1	LCA Normung 10	7	Fazit 21
3.2.2	Lebenszyklusphasen 10		Literatur 21

<b>A 2</b>	<b>Lebenszyklus von Gebäuden – die Zukunft des Bauens</b>	<b>25</b>
Gunnar Clemenz, Thomas Putscher		
1	Einleitung	27
2	Regulierung zur Energieeinsparung von Gebäuden	27
2.1	Wärmeschutzverordnung	27
2.2	Heizungsanlagen- und Heizungsbetriebs-Verordnung	28
2.3	Energieeinsparverordnung	28
2.4	Erneuerbare-Energien-Wärmegegesetz	28
2.5	Gebäudeenergiegesetz	28
2.6	Auswirkungen von Energiestandards in der Nutzungsphase eines Gebäudes	29
3	Umweltwirkung im Lebenszyklus von Gebäuden	30
3.1	Grundlagen der Gebäude-Ökobilanzierung	31
3.2	Ökobilanz im Rahmen der Nachhaltigkeits-zertifizierung	33
3.2.1	LEED – Leadership in Energy and Environmental Design	33
3.2.2	BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method	34
3.2.3	DGNB/BNB	34
3.2.4	TQB – Total Quality Building Assessment	36
3.2.5	MINERGIE-ECO	36
3.3	Eingabedaten für die Ökobilanz	36
3.4	Relevanz der Grauen Emissionen	39
4	Ausblick	39
	Literatur	40
<b>A 3</b>	<b>Klimagerechtes Bauen</b>	<b>43</b>
Thorsten Schütze		
1	Einleitung	45
2	Grundlagen des klimagerechten Bauens	46
2.1	Klimafaktoren	46
2.2	Klimazonen und bauliche Anforderungen	47
2.2.1	Feuchtwarme Klimazonen	47
2.2.2	Trockenheiß Klimazonen	50
2.2.3	Gemäßigte Klimazonen	54
2.2.4	Kalte Klimazonen	56
3	Klimagerechte Nullemissionsgebäude	59
3.1	Baustoffe und Komponenten	60
3.2	Gebäudebetrieb	61
3.2.1	Energieeffizienz	61
3.2.2	Erneuerbare Energieproduktion	63
3.2.3	Wassereffizienz und Nährstoffrecycling	67
3.2.4	Vegetation und Begrünung	70
4	Informationen und Planungswerkzeuge	72
4.1	Nichtklimatische Informationen	72
4.2	Klimadaten	73
4.3	Planungsinstrumente	73
4.3.1	Analoge Planungsinstrumente	74
4.3.2	Digitale Planungsinstrumente	77
	Literatur	79
<b>A 4</b>	<b>Die Ermittlung der Ressourceneffizienz und der Klimabelastung von Bauwerken</b>	<b>83</b>
Clemens Mostert, Husam Sameer, Stefan Bringezu		
1	Einleitung	85
2	Ökologische Bewertung von Gebäuden mit Ressourcen- und Klimafußabdrücken	86
2.1	Ressourcennutzung in Bewertungssystemen für Nachhaltigkeit im Baubereich	86
2.1.1	BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method	86
2.1.2	CASBEE – Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency	86
2.1.3	DGNB – Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen	86
2.1.4	LEED – Leadership in Energy and Environmental Design	87
2.1.5	BNB – Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen	87
2.1.6	EPD – Umweltproduktdeklaration	87
2.2	Ökobilanzielle Bestimmung von Fußabdrücken	87
2.3	Ressourcenfußabdrücke	89
2.3.1	Materialfußabdruck	89
2.3.2	Energiefußabdruck	90
2.3.3	Wasserfußabdruck	90
2.4	Klimafußabdruck	91
3	Anwendungsbeispiele	91
3.1	Beton	91
3.1.1	Einführung	91
3.1.2	Methode	91
3.1.3	Ergebnisse	94
3.1.4	Zusammenfassung	96

3.2	Außenwandaufbauten	97	3.4.3	Ergebnisse	106
3.2.1	Einführung	97	3.4.3.1	Entsorgungsphase (C1–C3)	106
3.2.2	Methode	97	3.4.3.2	Herstellung	
3.2.3	Ergebnisse	97		von Recycling-Gesteinskörnung	107
3.2.4	Zusammenfassung	99	3.4.3.3	Betonherstellung	107
3.3	Technologievergleich		3.4.4	Zusammenfassung	108
	Heizungssysteme	100	3.5	Fußabdruckanalyse mit Building	
3.3.1	Einleitung	100		Information Modeling (BIM)	109
3.3.2	Methode	100	3.5.1	Einleitung	109
3.3.3	Ergebnisse	102	3.5.2	Methode	110
3.3.4	Zusammenfassung	104	3.5.3	Ergebnisse	111
3.4	Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft:		3.5.4	Zusammenfassung	112
	Betonrecycling	104	4	Zusammenfassung und Ausblick	112
3.4.1	Einleitung	104		Literatur	114
3.4.2	Methodik	104			

## B Dämmstoffe

### B 1 Dämmstoffe im Bauwesen 119

Wolfgang M. Willems, Kai Schild

1	Physikalische Grundlagen	123	2.3.2	Bindemittel	141
1.1	Wärmeschutz	123	2.3.3	Stützfasern	141
1.1.1	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	123	2.3.4	Zusätze für Brand- und	
1.1.2	Wärmedurchlasswiderstand R	126		Feuchteschutz	142
1.1.3	Spezifische Wärmekapazität c	126	2.4	Entwicklung der Dämmschichtdicken in	
1.1.4	Temperaturleitzahl a	127		Dach und Wand in den europäischen	
1.1.5	Physik der Wärmedämmung	127		Ländern	142
1.2	Feuchteschutz	128	3	Beschreibung von Dämmstoffen	143
1.2.1	Wasserdampf-Diffusionswiderstands-		3.1	Aerogel	143
	zahl $\mu$	128		Herstellung und Hintergrund-	
1.2.2	Wasserdampfdiffusionsäquivalente		3.1.1	informationen	143
	Luftschichtdicke $s_d$	129	3.1.2	Anwendungsbereiche und	
1.2.3	Auswahl der Wasserdampf-Diffusions-			Verarbeitung	144
	widerstandszahl $\mu$ für den Nachweis		3.1.3	Charakteristische Kenngrößen	
	nach Glaser	129		„Aerogel“	144
1.3	Schallschutz	129	3.1.4	Gesundheitliche und ökologische	
1.3.1	Schallabsorptionsgrad	129		Aspekte	144
1.3.2	Schallabsorptionsfläche A	130	3.2	Baumwolle	144
1.3.3	Längenbezogener Strömungs-		3.2.1	Herstellung und Hintergrund-	
	widerstand r	130		informationen	144
1.3.4	Dynamische Steifigkeit s'	131	3.2.2	Anwendungsbereiche und	
1.3.5	Dynamischer Elastizitätsmodul $E_{Dyn}$	131		Verarbeitung	145
1.4	Brandschutz	131	3.2.3	Charakteristische Kenngrößen	
1.4.1	Baustoffklassen nach DIN 4102-1	131		„Baumwolle“	146
1.4.2	Benennung des Brandverhaltens nach		3.2.4	Gesundheitliche und ökologische	
	DIN EN 13501-1	132		Aspekte	146
1.5	Rohdichte	135	3.3	Blähglas	146
2	Dämmstoffe im Bauwesen	136	3.3.1	Herstellung und Hintergrund-	
2.1	Dämmstoffübersicht	136		informationen	146
2.2	Aspekte für die Auswahl von		3.3.2	Anwendungsbereiche und	
	Dämmstoffen	136		Verarbeitung	147
2.2.1	Baukonstruktive Aspekte	136	3.3.3	Charakteristische Kenngrößen	
2.2.2	Bauphysikalische Aspekte	136		„Blähglas“	147
2.2.3	Ökologische Aspekte	136	3.3.4	Gesundheitliche und ökologische	
2.2.4	Ökonomische Aspekte	140		Aspekte	147
2.3	Zusatstoffe	140	3.4	Blähton	148
2.3.1	Treibmittel	140			

3.4.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 148	3.10.3	Charakteristische Kenngrößen „Kalziumsilikat“ 158
3.4.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 148	3.10.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 158
3.4.3	Charakteristische Kenngrößen „Blähton“ 149	3.11	Kokos 159
3.4.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 149	3.11.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 159
3.5	Flachs 149	3.11.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 159
3.5.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 149	3.11.3	Charakteristische Kenngrößen „Kokos“ 159
3.5.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 150	3.11.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 159
3.5.3	Charakteristische Kenngrößen „Flachs“ 150	3.12	Kork 160
3.5.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 150	3.12.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 160
3.6	Getreidegranulat 150	3.12.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 160
3.6.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 150	3.12.3	Charakteristische Kenngrößen „Kork“ 161
3.6.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 151	3.12.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 161
3.6.3	Charakteristische Kenngrößen „Getreidegranulat“ 151	3.13	Melaminharzschaum 161
3.6.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 151	3.13.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 161
3.7	Hanf 152	3.13.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 162
3.7.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 152	3.13.3	Charakteristische Kenngrößen „Melaminharz“ 162
3.7.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 152	3.13.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 162
3.7.3	Charakteristische Kenngrößen „Hanf“ 153	3.14	Mineralschaum 162
3.7.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 153	3.14.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 162
3.8	Holzfaser 153	3.14.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 163
3.8.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 153	3.14.3	Charakteristische Kenngrößen „Mineralschaum“ 163
3.8.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 154	3.14.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 163
3.8.3	Charakteristische Kenngrößen „Holzfaser“ 154	3.15	Mineralwolle 164
3.8.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 154	3.15.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 164
3.9	Holzwolle-Leichtbauplatten und Holzwolle-Mehrschichtplatten 155	3.15.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 165
3.9.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 155	3.15.3	Charakteristische Kenngrößen „Mineralwolle“ 165
3.9.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 156	3.15.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 165
3.9.3	Charakteristische Kenngrößen „HWL“ 157	3.16	Perlite 166
3.9.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 157	3.16.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 166
3.10	Kalziumsilikat 157	3.16.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 166
3.10.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 157	3.16.3	Charakteristische Kenngrößen „Perlite“ 167
3.10.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 158	3.16.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 167
		3.17	Phenolharz 167

3.17.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 167	3.23.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 177
3.17.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 167	3.24	Schaumglas 177
3.17.3	Charakteristische Kenngrößen „Phenolharz“ 168	3.24.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 177
3.17.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 168	3.24.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 178
3.18	Polyesterfaser 168	3.24.3	Charakteristische Kenngrößen „Schaumglas“ 178
3.18.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 168	3.24.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 179
3.18.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 168	3.25	Schilfrohr 179
3.18.3	Charakteristische Kenngrößen „Polyesterfaser“ 169	3.25.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 179
3.18.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 169	3.25.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 179
3.19	Polystyrol, expandiert (EPS) 169	3.25.3	Charakteristische Kenngrößen „Schilfrohr“ 180
3.19.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 169	3.25.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 180
3.19.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 170	3.26	Seegras 180
3.19.3	Charakteristische Kenngrößen „EPS“ 171	3.26.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 180
3.19.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 171	3.26.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 180
3.20	Polystyrol, extrudiert (XPS) 171	3.26.3	Charakteristische Kenngrößen „Seegras“ 180
3.20.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 171	3.26.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 181
3.20.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 172	3.27	Stroh 181
3.20.3	Charakteristische Kenngrößen „XPS“ 173	3.27.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 181
3.20.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 173	3.27.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 181
3.21	Polyurethan (PUR, Hartschaum und Ortschaum) 173	3.27.3	Charakteristische Kenngrößen „Stroh“ 182
3.21.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 173	3.27.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 182
3.21.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 174	3.28	Transparente Wärmedämmung 182
3.21.3	Charakteristische Kenngrößen „PUR“ 174	3.28.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 182
3.21.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 175	3.28.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 182
3.22	Pyrogene Kieseläsüre 175	3.28.3	Charakteristische Kenngrößen „TWD“ 183
3.22.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 175	3.28.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 183
3.22.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 175	3.29	Vacuum Insulating Sandwich (VIS) 183
3.22.3	Charakteristische Kenngrößen „Pyrogene Kieseläsüre“ 175	3.29.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 183
3.22.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 176	3.29.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 185
3.23	Schafwolle 176	3.29.3	Charakteristische Kenngrößen „VIS“ 185
3.23.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 176	3.29.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 185
3.23.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 176	3.30	Vakuumisolationspaneele (VIP) 185
3.23.3	Charakteristische Kenngrößen „Schafwolle“ 177	3.30.1	Herstellung und Hintergrund-informationen 185
		3.30.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 187

3.30.3	Charakteristische Kenngrößen „VIP“	188	3.32.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung	189
3.30.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte	188	3.32.3	Charakteristische Kenngrößen „Zellelastomere“	190
3.31	Vermiculite	188	3.32.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte	190
3.31.1	Herstellung und Hintergrund-informationen	188	3.33	Zellulose	190
3.31.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung	188	3.33.1	Herstellung und Hintergrund-informationen	190
3.31.3	Charakteristische Kenngrößen „Vermiculite“	189	3.33.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung	191
3.31.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte	189	3.33.3	Charakteristische Kenngrößen „Zellulose“	191
3.32	Zellelastomere	189	3.33.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte	192
3.32.1	Herstellung und Hintergrund-informationen	189		Literatur	192

**B 2 Nachhaltige Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen** 197

Peter Schmidt, Saskia Windhausen

1	Einleitung	199	3.3.3	Schwelverhalten	211
2	Eigenschaften nachhaltiger Dämmstoffe	200	3.3.4	Anforderungen an Dämmstoffe als Hohlräumdämmung	211
2.1	Marktanteile	201	3.3.5	Schwelen und Glimmen	212
2.2	Primärenergieinhalt, CO <sub>2</sub> -Emissionen	201	4	Physikalische Grundlagen und Kennwerte	212
2.3	Rohstoffe, Transport	202	4.1	Rohdichte	212
2.4	Schädliche Inhaltsstoffe	202	4.2	Wärmeschutztechnische Kennwerte	212
2.5	Entsorgung, Rückführung in die natürlichen Stoffkreisläufe, Wiederverwertung	202	4.3	Feuchteschutztechnische Kennwerte	213
2.6	Zertifizierung und Gütesiegel	202	4.4	Brandschutztechnische Eigenschaften	213
2.7	Vor- und Nachteile	203	4.5	Schallschutztechnische Eigenschaften	213
2.8	Anwendungsgebiete	203	4.6	Sonstige Eigenschaften	214
3	Anforderungen und Regelwerke	204	5	Nachhaltige Dämmstoffe	214
3.1	Anforderungen an den Wärmeschutz und äquivalente Dämmschichtdicken	204	5.1	Dämmstoffe aus Flachfasern	214
3.1.1	Energiesparender Wärmeschutz für zu errichtende Gebäude nach GEG	206	5.2	Dämmstoffe aus Hanffasern	214
3.1.2	Bestehende Gebäude	207	5.3	Holzfaserdämmplatten	215
3.1.3	Mindestwärmeschutz	208	5.4	Holzwolle-Leichtbauplatten	216
3.2	Anwendungsbezogene Anforderungen, Produktnormen und bauaufsichtliche Zulassungen	208	5.5	Kokosfaserplatten	217
3.3	Anforderungen an den Brandschutz	209	5.6	Korkplatten	217
3.3.1	Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen	209	5.7	Schafwolle	218
3.3.2	Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen	210	5.8	Schilfrohrplatten	218
			5.9	Strohplatten	219
			5.10	Zellulose	219
			6	Zusammenfassung	220
				Literatur	221

**B 3 Recycling von Wärmedämmstoffen** 223

Wolfgang Albrecht

1	Einführung	225	2.2	Europäische Ebene	225
2	Rahmenbedingungen	225	2.2.1	EU-Abfallrichtlinie	225
2.1	Politische Ziele	225	2.2.2	Europäische Bauproduktverordnung	225

2.2.3	Europäische Chemikalienverordnung REACH 226	5.3.1.2	Wärmedämmplatten mit bis zu 100 % rückgeführten EPS-Abfällen 235
2.2.4	Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention) 226	5.3.1.3	Dämmestrich und sogenannter Styroporbeton 235
2.3	Nationale Gesetze und Verordnungen 226	5.3.2	Mechanisches Recycling 235
2.3.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) 226	5.3.2.1	Selektive Extraktion 235
2.3.2	Abfallverzeichnisverordnung (AVV) 227	5.3.2.2	PolyStyreneLoop 236
3	Recyclingquote und Kreislaufwirtschaft am Bau 228	5.3.2.3	Rückbaumethoden für EPS an der Fassade 236
3.1	Abfallaufkommen Bau 228	5.3.2.4	Mechanisches Abschälen 237
3.2	Verarbeitungsmenge Kunststoffe am Bau 229	5.3.2.5	Maschinelles Abschälen 237
3.3	Recycling der Kunststoffabfälle aus Bau- und Abbruchabfällen 230	5.3.2.6	Prognose über Rückbaumengen von EPS aus WDVS 238
4	Dämmstoffmarkt 230	5.3.3	Chemisches Recycling von EPS durch Pyrolyse 239
5	Recycling von Dämmstoffen 231	5.4	Extrudiertes Polystyrol (XPS) 240
5.1	Steinwolle 232	5.4.1	Baustellenabfälle 240
5.1.1	Rückgeführte Steinwolle von Baustellen 232	5.4.2	Abfälle aus Dachsanierungen und Abbruchabfälle 240
5.1.2	Verwertung von Steinwolle-Abfällen als Bergversatz 233	5.4.3	PolyStyreneLoop 240
5.2	Glaswolle 233	5.5	Polyurethan-Hartschaum (PU) 241
5.2.1	Rückgeführte Glaswolle von Baustellen 233	5.5.1	PU-Recyclingplatten 241
5.2.2	Rücknahme von Glaswolle-Abfällen von Kleinunternehmen und Do-it-Yourself-Kunden 234	5.5.2	PU-Dosenrecycling 241
5.3	Expandierte Polystyrol (EPS)-Dämmstoffe 234	5.5.3	Baustellen-Verschnittabfälle 241
5.3.1	Werksstoffliche Verwertung 234	5.5.4	Biomasse-Bilanz-Ansatz als Sekundärrohstoff 241
5.3.1.1	Wärmedämmplatten mit kleiner 25 % rückgeführten EPS-Abfällen 234	5.6	Phenolharz-Hartschaum (PF) 242
		5.7	Holzfaserdämmstoffe (WF) 242
		5.8	Mineralische Dämmplatten 242
		6	Weitere Entwicklung und Ausblick 242
			Literatur 243

## C Konstruktionen und Baustoffe

### C 1 Aufstockung versus Abriss und Neubau – Vergleich von ökologischen und ökonomischen Auswirkungen 245

Annette Hafner, Michael Storck

1	Aufstockungen aus Sicht des nachhaltigen Bauens 247	6	Beschreibung der Vergleichsvarianten 251
1.1	Flächeninanspruchnahme 247	6.1	Beschreibung der Aufstockungs- maßnahme 251
1.2	Energetische Sanierung des Bestandes 247	6.2	Beschreibung der Neubaumaßnahme 252
1.3	Weiternutzung von bestehenden Strukturen 248	7	Vergleich der Ökobilanzergebnisse 252
2	Wohnraumpotenziale von Aufstockungen 248	7.1	Ökobilanzergebnisse Aufstockung 252
3	Problemstellung Abriss-Neubau gegenüber Aufstockung 248	7.2	Ökobilanzergebnisse Abriss-Neubau 254
4	Ökologische Bilanzierung von Aufstockungsmaßnahmen 249	8	Vergleich der Lebenszykluskosten 256
5	Lebenszykluskostenrechnung von Aufstockungsmaßnahmen 250	8.1	Lebenszykluskostenergebnisse Aufstockung 256
		8.2	Lebenszykluskostenergebnisse Abriss-Neubau 256
		9	Zusammenfassende Bewertung 257
			Literatur 258

<b>C 2</b>	<b>Nachhaltiger Betonbau</b>	<b>259</b>
Michael Haist, Konrad Bergmeister, Nabil A. Fouad, Manfred Curbach, Macielle Vivienne Deiters, Patrick Forman, Jesko Gerlach, Tobias Hatzfeld, Jannik Hoppe, Benjamin Kromoser, Peter Mark, Christoph Müller, Harald S. Müller, Christoph Scope, Tobias Schack, Matthias Tietze, Klaus Voit		
1	Einführung	263
2	Nachhaltigkeitsbewertung	265
2.1	Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauwerken	265
2.1.1	Methoden der Ökobilanzierung	265
2.1.2	Gewichtung von Indikatoren	268
2.2	Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme	268
2.3	Umweltverträglichkeit	271
2.4	Bauphysikalische Aspekte der Nachhaltigkeitsbewertung	271
3	Nachhaltigkeit auf der Baustoffebene	271
3.1	Einführung	271
3.2	Beton	272
3.2.1	Grundsätze zur Herstellung umwelt- und ressourceneffizienter Betone	272
3.2.2	Betonausgangsstoffe und deren Verfügbarkeit	274
3.2.2.1	Bindemittel und Betonzusatzstoffe	274
3.2.2.2	Normalschwere Gesteinskörnungen	283
3.2.2.3	Leichte Gesteinskörnungen	286
3.2.2.4	Betonzusatzmittel	288
3.2.3	Mischungsentwicklung umwelt- und ressourceneffizienter Betone	288
3.2.4	Eigenschaften ökologisch optimierter Normalbetone	289
3.2.4.1	Frischbetoneigenschaften	289
3.2.4.2	Mechanische Eigenschaften	294
3.2.4.3	Dauerhaftigkeit	296
3.2.4.4	Umweltwirkungen	300
3.2.5	Eigenschaften von Leicht- und Wärmedämmbetonen	302
3.2.5.1	Überblick	302
3.2.5.2	Planung von Projekten mit Leicht- und Wärmedämmbetonen	304
3.2.5.3	Ökobilanzielle Bewertung von Leicht- und Wärmedämmbetonen	305
3.3	Bewehrung	305
3.3.1	Einführung	305
3.3.2	Betonstahl	305
3.3.3	Carbonfasern für Carbonbeton	308
3.3.3.1	Eigenschaften von Carbonfasern	309
3.3.3.2	Ökobilanzielle Betrachtungen von carbon-basierten Bewehrungen	309
3.3.3.3	Einordnung und Vorteilhaftigkeit der Carbonbewehrung	309
3.4	Einflüsse aus Herstellung, Transport und Einbau des Betons	310
4	Nachhaltigkeit auf der Bauteil- und Bauwerksebene	312
4.1	Einführung	312
4.2	Optimierungsgestütztes Entwerfen und Bemessen	314
4.2.1	Einführung	314
4.2.2	Topologische Optimierung	314
4.2.3	Materialgerechte Steuerung	316
4.2.4	Innere Bewehrungsfindung	317
4.2.5	Hohlkörper in Platten und Wänden	318
4.3	Aspekte der Herstellung und Bauverfahren	
4.3.1	materialeffizienter Bauteile	318
4.3.2	Produktivität des Bausektors	319
4.3.2.1	Herstellungsmethoden	319
4.3.2.2	Massenfertigung von Betonfertigteilen	319
4.3.2.3	Herstellung von individuellen Betonfertigteilen und Kleinserien	320
4.3.2.4	Stationäre Verfahren mit fester Einzelschalung	320
4.3.2.5	Fließfertigung oder Umlauffertigung	320
4.3.2.6	Extrusionsverfahren	321
4.3.3	Additive Fertigungsverfahren	322
4.3.4	Herstellungsort von Betonfertigteilen	323
4.4	Automatisierte Herstellung von struktur-optimierten Betonfertigteilen	323
4.4.1	Materialeffiziente Bauteile aus Carbonbeton	324
4.4.2	Einführung in die Carbonbetonbauweise	324
4.4.3	Abgrenzung Carbonbeton zu Stahl- und Faserbetonen	325
4.4.4	Regulatorischer Druck	325
4.4.5	Ausgewählte Fallstudienergebnisse für Carbonbeton	326
4.4.6	Carbonbeton als kreislauffähiges Material	330
4.5	Multifunktionalität von Carbonbeton	331
4.5.1	Bauphysikalische Eigenschaften und bauphysikalische Bemessung von Betonbauteilen	333
4.5.1.1	Wärmeschutz	333
4.5.1.2	Winterlicher Wärmeschutz	333
4.5.2	Thermische Trägheit	333
4.5.3	Feuchteschutz	334
4.5.3.1	Schallschutz	335
4.5.3.2	Anforderungen an den Schallschutz von Gebäuden	335
4.5.3.3	Luftschallschutz bzw. Luftschalldämmung	335
4.5.3.4	Trittschalldämmung	336
4.5.4	Brandschutz	336
5	CO <sub>2</sub> -Bilanzierung über den Bauwerkslebenszyklus	337

5.1	Nutzungsdauer eines Bauwerks	338	6	Zusammenfassung	348
5.2	Ermittlung des GWP über den Bauwerkslebenszyklus	338		Literatur	350
5.3	Beispiel: Autobahnbrücke	340			
<b>C 3</b>	<b>Ganzheitliche Ökobilanzierung von Wohnquartieren in Holzbauweise</b> 365				
	Sven Steinbach, Carolin Schulze, Christoph Kunde				
1	Hintergrund	367	3.1.4.4	Ergebnisdarstellung nach QNG	385
2	Charakterisierung der Untersuchungsvarianten	367	3.2	Ergebnisse der Ökobilanzierung	385
2.1	Architekturkonzepte	367	3.2.1	Ökobilanzierung der Baukonstruktion	385
2.1.1	Gebäudetypen des Vorhabens A	368	3.2.2	Ökobilanzierung der technischen Anlagen	387
2.1.2	Gebäudetyp des Vorhabens B	368	3.2.3	Ökobilanzierung der Energieversorgung	388
2.2	Konstruktionsvarianten	369	3.2.4	Gesamtbilanzierung der Untersuchungsvarianten	391
2.2.1	Charakterisierung der Konstruktionsvarianten	369	3.2.5	Ergebnisdiskussion und Ausblick	395
2.2.1.1	Vollholz-Bauweise (VH)	369	4	Einfluss von Forstwirtschaft und Regionalität auf das Treibhauspotenzial	396
2.2.1.2	Holz-Hybrid-Bauweise (HY)	369	4.1	Einfluss forstwirtschaftlicher Produktionsvarianten	396
2.2.1.3	Massivbauweise Kalksandstein (KS)	370	4.1.1	Methodik	396
2.2.2	Charakterisierung der Bauteile	370	4.1.2	Vergleich forstwirtschaftlicher Produktionsvarianten	397
2.2.2.1	Außenwände	371	4.1.2.1	Effizienzvariante	397
2.2.2.2	Innenwände	372	4.1.2.2	Ineffizienzvariante	397
2.2.2.3	Zwischendecken	372	4.1.2.3	Standardvariante	398
2.2.2.4	Dächer	372	4.1.2.4	Vergleich der forstlichen Produktionsvarianten	399
2.2.2.5	Bodenplatte	374	4.1.2.5	Ergebnisdiskussion der forstwirtschaftlichen Einflüsse	399
2.2.2.6	Kellerbauteile	374	4.2	Einfluss der Regionalität	400
2.2.2.7	Sonstige Bauteile	374	4.2.1	Methodik	400
2.3	Versorgungsvarianten der untersuchten Bauvorhaben	375	4.2.2	Vergleich unterschiedlicher Transportdistanzen	
2.3.1	Versorgungsvarianten Vorhaben A	375	4.2.3	zum Errichtungsort	401
2.3.2	Versorgungsvarianten Vorhaben B	377	4.3	Ergebnisdiskussion regionaler Einflüsse	401
2.3.3	Ermittlung des Endenergiebedarfs der Gebäudetypen	378		Potenziale und Auswirkungen einer verstärkten Holznutzung im mehrgeschossigen Wohnungsbau auf die Strukturen des ländlichen Raumes	403
2.3.4	Energetische Einordnung der Versorgungsvarianten	378	5	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	404
2.4	Übersicht der Untersuchungsvarianten	379	5.1	Methodik	404
3	Ökobilanzierung	380	5.1.1	Normative Grundlage	404
3.1	Methodik	380	5.1.2	Ermittlung der Herstellungskosten	404
3.1.1	Normative Grundlage	380	5.1.3	Ermittlung der Nutzungskosten	405
3.1.2	Systemgrenzen	381	5.1.4	Dynamische Investitionsrechnung	407
3.1.2.1	Systemgrenzen der Gebäudeerfassung	381	5.1.5	Berücksichtigung möglicher Umweltkosten	407
3.1.2.2	Systemgrenzen des Lebenszyklus	381	5.2	Ergebnisse	
3.1.3	Datengrundlage	382		der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	408
3.1.3.1	Ökobilanzierung der Materialien	382			
3.1.3.2	Ökobilanzierung der Energieversorgung	382			
3.1.3.3	Nutzungsdauer der Bauteile	383			
3.1.4	Besonderheiten nach Vorgehen des QNG	384			
3.1.4.1	Bilanzierung der technischen Anlagen	384			
3.1.4.2	Einbeziehung des Nutzerstroms in die Ökobilanz	384			
3.1.4.3	Bilanzierung der Photovoltaik	385			

5.2.1	Herstellungskosten der Untersuchungsvarianten	408	5.2.4	Einfluss möglicher Umweltkosten	411
5.2.2	Nutzungskosten der Untersuchungsvarianten	409	5.2.5	Ergebnisdiskussion und Ausblick	413
5.2.3	Dynamischer Investitionsvergleich der Untersuchungsvarianten	411	6	Fazit	414
				Literatur	415
<b>C4</b>	<b>Bewertung von Bauelementen und Baustoffen für nachhaltiges Bauen</b> 417				
	Jörn Peter Lass, Christoph Seehäuser, Jürgen Benitz-Wildenburg				
1	Klimawandel fordert energetisch optimierte Gebäude	419	4.4	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck	431
2	Die Zukunft fordert eine nachhaltige und kreislauffähige Wirtschaft	420	4.4.1	Produkt CO <sub>2</sub> -Fußabdruck (Product Carbon Footprint – PCF)	433
2.1	Nationale Regelwerke	421	4.4.2	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck für Unternehmen (Corporate Carbon Footprint – CCF)	433
2.2	Vorgaben und Strategien der EU (Green Deal)	422	4.5	Flüchtige organische Verbindungen (VOC – volatile organic compound)	434
3	Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden	422	4.6	Zertifizierung von Holzprodukten aus nachhaltigen Wäldern (FSC und PEFC)	435
3.1	BNB – Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen	422	4.7	Produktpass Nachhaltigkeit	436
3.2	DGNB – Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen	423	5	Nachhaltigkeitsberichte	438
3.3	LEED – Leadership in Energy and Environmental Design	424	6	Bessere Material- und Ressourceneffizienz durch „Lean and Green“	438
3.4	BREEAM – BRE Environmental Assessment Method	424	7	Schutz vor Klimaextremen (Resilienz)	439
4	Anforderungen und Nachweise an Bauprodukte	424	7.1	Hochwasserschutz	439
4.1	Product Category Rules (PCR)	425	7.2	Hitzeschutz	441
4.2	Ökobilanz (LCA)	425	7.2.1	Sonnenschutz	441
4.3	Umweltpunktdeklaration (EPD)	427	7.2.2	Nachtauskühlung	442
4.3.1	Muster-EPD	430	7.3	Schutz vor Stürmen, Tornados und Starkwindereignissen	443
4.3.2	Produktspezifische EPD	431	8	Fazit	444
				Literatur	445
<b>C5</b>	<b>Vakuumglasintegration in Bestands- und Neufenster</b> 447				
	Ulrich Pont, Peter Schober, Magdalena Wölzl, Matthias Schuss				
1	Einleitung	449	2	Angewandte Methoden	458
1.1	Überblick	449	2.1	Baukonstruktives Wissen aus dem Fensterbau	458
1.2	Begriffsdefinition Vakuumglas	450	2.2	Thermische Simulation und Berechnung	458
1.3	Geschichte der Vakuumglas-Entwicklung	451	2.2.1	Eingangswerte	458
1.4	Aktuelle Vakuumgläser am Glasmarkt	453	2.2.2	Indikatoren	459
1.5	Herausforderungen und Fragestellungen bei der Vakuumglasintegration in Bestandsfenster und neue Fenster	453	2.3	U-Wert-Berechnungen (im Projekt FIVA)	460
1.5.1	Einfluss von Abstandhaltern und Randverbund auf die thermische Performance der Vakuumglasscheiben	453	2.4	Labor-Messungen (mechanische, akustische, thermische Performance)	461
1.5.2	Beobachtungen und Voraussetzungen für erfolgreiches Zusammenwirken unterschiedlicher Stakeholder	456	2.4.1	Gebrauchstauglichkeitsmessungen	461
1.6	Forschungsprojekte zum Thema Vakuumglas-Integration in Fenster	457	2.4.2	Differenzklimauntersuchung	461
			2.4.3	Schalltechnische Performance	461
			2.5	In-situ-Monitoring (thermische Performance)	461
			3	Vakuumgläser für Bestandsfenster	462

3.1	Das Sondierungsprojekt VIG-SYS-RENO 462	4.2.2.1	Thermohygrische und Gebrauchstauglichkeits-Performance Typ A 475
3.2	Das kooperative Forschungs- und Entwicklungsprojekt VAMOS 464	4.2.2.2	Thermohygrische und Gebrauchstauglichkeits-Performance Typ B 476
4	Vakuumgläser für neue Fensterkonstruktionen 467	4.2.2.3	Thermohygrische Performance Typ C 477
4.1	Das Sondierungsprojekt MOTIVE 467	4.2.2.4	Thermohygrische und Gebrauchstauglichkeits-Performance Typ D 477
4.2	Das kooperative Forschungs- und Entwicklungsprojekt FIVA 468	4.2.2.5	Zusammenfassung thermische Performance der Prototypen 478
4.2.1	Die vier Fensterprototypen 468	4.2.3	Subjektive Evaluierung der Fensterprototypen 478
4.2.1.1	Typ A – raumseitig flächenbündiges, nach innen öffnendes Dreh-Fenster 469	5	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick 479
4.2.1.2	Typ B – nach außen öffnendes Parallel-Abstell-Dreh-Fenster 470	6	Disclaimer 480
4.2.1.3	Typ C – Schwing-Klapp-Fenster 472		Literatur 480
4.2.1.4	Typ D – Abstell-Schiebe-Fenster 474		
4.2.2	Performanceaspekte der Fensterprototypen 475		
<b>C 6</b>	<b>Cross Layers Light – Ein ressourceneffizientes und recyclebares Holz-Wandsystem 483</b>		
	Markus Duffner, Thomas Uibel, Leif A. Peterson, Wilfried Moorkamp		
1	Einleitung 485	4.4	Horizontale Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit 494
2	Entwurf der Wandelemente 485	4.5	Parameterstudie 495
2.1	Randbedingungen 485	4.6	Experimentelle Untersuchungen an Wandelementen 495
2.2	Konstruktionsprinzip 485	4.6.1	Material und Methode 495
2.3	Ermittlung der Tragfähigkeit und Steifigkeit der Wandelemente 486	4.6.2	Ergebnisse 496
3	Untersuchungen der Verbindungen 486	4.6.3	Diskussion und Schlussfolgerung 496
3.1	Verbindungsvarianten 486	5	Brandschutz 497
3.2	Experimentelle Untersuchungen 487	6	Bauphysikalische Eigenschaften 498
3.2.1	Material und Methode 487	6.1	Luftdichtigkeit 498
3.2.2	Ergebnisse und Diskussion 488	6.2	Wärmedurchgangskoeffizient 498
4	Trag- und Verformungsverhalten der Wandelemente 489	6.3	Feuchteschutz 499
4.1	Varianten der Wandelemente 489	7	Zusammenfassung und Ausblick 500
4.2	Vertikale Tragfähigkeit 494		
4.3	Plattentragfähigkeit 494		Literatur 500
<b>C 7</b>	<b>Nachhaltige Gebäudetechnologie in Forschung und Entwicklung 503</b>		
	Marco Wolf, Martin Buchholz, Arno Schlüter, Philipp Geyer		
1	Einleitung 505	3.5	Feuchteschutz und Komfort durch Raumlufttechnik 512
2	Anforderungsprofile für Gebäudeenergiesysteme 505	3.6	Offene Absorptionsprozesse 512
2.1	Europäisches Anforderungsprofil 505	4	Forschungsschwerpunkte und Anwendungsszenarien offener Absorptionsprozesse 514
2.2	Technologisch resultierendes und zu erwartendes Anforderungsprofil 508	4.1	Anwendungsfall Luftfeuchteregulierung 514
3	Techniken zur Wärme-, Kälte- und Feuchtekonditionierung 508	4.2	Anwendungsfall präzise Steuerung eines Feuchtesollwertes 515
3.1	Klimatische Behaglichkeit 508	4.3	Anwendungsfall Raumheizung 515
3.2	Exergetische Optimierung 509	4.4	Anwendungsfall Wärmeversorgung 516
3.3	Wärmepumpen 509	4.5	Anwendungsfall Kühlung 517
3.4	Grenzen der Energiebereitstellung 511		

4.6	Demonstrator zur sorptionsgestützten Klimatisierung von Gebäuden	519	6	Wärme-/Kälteerzeugung und Verteilung Übersicht
4.7	Simulation von offenen Absorptionsprozessen	519	6.1	Wärmeabgabe und -aufnahme im Raum
5	Design und Integration von LowEx-Gebäudesystemen	520	6.2	Integration durch digitale, modellbasierte Prozesse
5.1	Einleitung	520	7	Zusammenfassung und Ausblick
5.2	Fallstudie Nest HiLo	521		Literatur
5.3	LowEx-Systeme in HiLo	521		
5.4	Übersicht	522		
<b>C8</b>	<b>Solar Decathlon Europe 2022 – Bauphysikalische Ergebnisse von Demonstrationsgebäuden</b> 531			
	Karsten Voss, Heiko Hansen, Marvin Kaliga, Isil Kalpkirmaz Rizaoglu			
1	Einführung	533	6	Luftdichtheit
2	Messen und Bewerten	534	6.1	Konzeption
3	Gebäudeeigenschaften	534	6.1.1	Bewertungskriterien und Messtechnik
4	Raumklimatische Analysen	536	6.1.2	Präparation des Messvolumens
4.1	Außenklima	536	6.2	Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen
4.2	Raumklima	536	6.3	Erfahrungen
4.2.1	Temperatur	538	7	Schallschutz
4.2.2	Luftfeuchte	540	7.1	Konzeption
4.2.3	Luftqualität	540	7.1.1	Bewertungskriterien und Messtechnik
4.3	Erfahrungen	540	7.1.2	Messdurchführung
5	Co-heating Test	541	7.2	Ergebnisse der Messungen der Fassadenschalldämmung
5.1	Motivation	541	7.3	Erfahrungen
5.2	Durchführung	542	8	Ausblick
5.3	Ergebnisse	542		Literatur
5.4	Erfahrungen	544		
<b>C9</b>	<b>Planung, Ausführung und Betriebserfahrung eines Plus-Energie-Bürohochhauses</b> 551			
	Alexander David, Thomas Bednar, Markus Leeb, Helmut Schöberl			
1	Einleitung	553	4.4	Photovoltaik
2	Entstehungsgeschichte	554	4.5	Energiemonitoring
3	Planung	557	4.6	Inbetriebnahme
3.1	Rahmenbedingungen	557	4.7	Begleitung der Nutzer:innen in der Umstellung der EDV
3.2	Energiekonzept	557	5	Betriebserfahrung und Monitoringergebnisse
3.2.1	Lokales Angebot an Strom und Wärme	557	5.1	Erkenntnisse aus dem Betrieb
3.2.2	Energieeffizienz	558	5.2	Ergebnisse des Energiemonitorings
3.2.3	Energiebilanz	563		
3.2.4	Nicht realisierbares Potenzial	564	6	Wirtschaftlichkeit
3.3	Ausschreibung	564	7	Zusammenfassung
4	Ausführung	565		Literatur
4.1	Bautechnik	565		
4.2	Gebäudetechnik	566		
4.3	Ausstattung der Räume ohne Arbeitsplatzgeräte	567		

---

<b>C 10</b>	<b>Energy Design: Gestaltung und Innovation in Bestandsgebäuden 595</b>		
	Bernhard Sommer, Ulrich Pont, Małgorzata Sommer-Nawara, Galo Patricio Moncayo Asan		
1	Einleitung 597	2.6	Errichtung des Mock-ups 607
1.1	Hintergrund und Motivation 597	2.6.1	Einrichten des Monitorings 607
2	Das Projekt EVA – Evaluierung Visionärer Architekturkonzepte 599	2.6.2	Kalibrierung der Räume 608
2.1	Stand der Technik und Begriffe 599	2.6.3	Entwicklung und Ausführung MU1 609
2.2	Auswahl eines Ansatzes für eine Sanierungsaufgabe 600	2.7	Durchführen von Testreihen zum klimatischen Verhalten 612
2.3	Umsetzungsplanung 601	2.8	Testreihe mit inaktiven Elementen 613
2.4	Site-Analysis, Data-Visualisation, Interaction-Design 603	2.9	Testreihe mit aktiven Elementen 615
2.5	Konzeptionelle Grundlagen der Umsetzungsplanung 605	3	Erkenntnisse 619
		4	Ausblick 619
			Literatur 621
<b>D</b>	<b>Materialtechnische Tabellen</b>		
<b>D 1</b>	<b>Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz 623</b>		
	Nina Schjerve		
1	Einleitung 625	2.4	Heizwerte 634
1.1	Relevanz von Materialdaten 625	2.5	Lagerungsdichte und m-Faktoren 641
1.2	Prüfverfahren ausgewählter Materialdaten 625	2.6	Luftbedarf 644
1.3	Einheiten und Einheiten-Konvertierung 626	2.7	Verbrennungseffektivität und Verbrennungsanteile 645
2	Stoffdaten 626	2.8	Zusätzliche Stoffdaten für Kunststoffe 649
2.1	Zündtemperaturen und Entzündungskriterien 626	2.9	Flächenbezogene Brandleistung und Brandentwicklung 652
2.2	Abbrand 631		
2.3	Brandausbreitung 633		Literatur 658
<b>D 2</b>	<b>Materialtechnische Tabellen 661</b>		
	Rainer Hohmann		
1	Vorbemerkungen 663	3	Schallschutztechnische und akustische Kennwerte 703
2	Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte 665		Literatur 715

**Stichwortverzeichnis 716**