

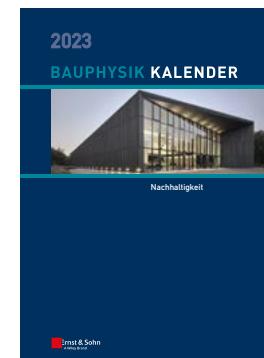
Nabil A. Fouad (Hrsg.)

Bauphysik-Kalender 2023

Schwerpunkt: Nachhaltigkeit

- Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRo)
- Grundsätze des klimagerechten Bauens
- Nachhaltigkeit von Wohngebäuden und Wohnquartieren

Dieser Bauphysik-Kalender behandelt das Themenspektrum rund um Nachhaltigkeit bei der Errichtung von Gebäuden. Lebenszyklusanalyse, Nachhaltigkeitszertifizierung und kreislaufgerechte Verwendung von Bauelementen und Baustoffen werden umfassend und mit Praxisbeispielen erläutert.



4/2023 · ca. 700 Seiten ·
ca. 540 Abbildungen · ca. 200 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03368-5 ca. € 159*

Fortsetzungspreis ca. € 139*

eBundle (Print + ePDF)

ISBN 978-3-433-03389-0 ca. € 194*

Fortsetzungspreis eBundle ca. € 169*

Bereits vorbestellbar.

BESTELLEN

+49 (0)30 47031-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3368

ÜBER DAS BUCH

Die aktuelle Ausgabe des Bauphysik-Kalenders behandelt das gesamte Themenspektrum rund um Nachhaltigkeit bei der Errichtung von Gebäuden. Die Bauindustrie ist der Sektor, der in der Wirtschaft für die höchsten Umweltbelastungen verantwortlich ist. Integrierte Maßnahmen für mehr Klimaschutz und Ressourceneffizienz im Bausektor sind daher ein zentrales Thema der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik.

Die Regulierung zur Energieeinsparung hat bereits dazu geführt, dass der Primärenergiebedarf in der Nutzungsphase von Gebäuden immer weiter reduziert wurde. Es ist nun unabdingbar, die Bewertung von Gebäuden auf die Umweltwirkung und die Auswirkung auf das Klima auszuweiten.

In diesem Buch werden die Lebenszyklusanalyse, die Nachhaltigkeitszertifizierung sowie die kreislaufgerechte Verwendung von Bauelementen, Baustoffen und Anlagenteilen umfassend erläutert. Konkretes Hintergrundwissen für klimagerechtes Bauen, für die Ermittlung der Ressourceneffizienz, das Recycling von Dämmstoffen, die Ökobilanzierung und die Zertifizie-

zung werden anhand von Praxisbeispielen aufgezeigt, um Planenden das nötige Rüstzeug für die aktuellen Aufgaben an die Hand zu geben. Auch die Betrachtung von Klima-Fußabdruck und Ressourcen-Fußabdruck mithilfe eines digitalen Gebäudemodells bereits in der Planungsphase ist enthalten.

Der Bauphysik-Kalender 2023 bietet eine solide Arbeitsgrundlage und ein verlässliches aktuelles Nachschlagewerk für die Planung in Neubau und Bestand, alle Kapitel bewegen sich nahe an der Ingenieurpraxis. Das Buch enthält Planungshinweise, Konzepte und Praxisbeispiele für nachhaltiges Bauen.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03368-5	Bauphysik-Kalender 2023	ca. € 159*
		Fortsetzungspreis	ca. € 139*
	978-3-433-03345-6	Bauphysik-Kalender 2023 (eBundle)	ca. € 194*
		Fortsetzungspreis eBundle	ca. € 169*

Privat

Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

Firma, Abteilung

UST-ID Nr.

Name, Vorname

Telefon

Fax

Straße, Nr.

PLZ/Ort/Land

E-Mail

Datum/Unterschrift

Vorwort

Nachhaltiges Handeln bedeutet, so zu handeln, dass nachfolgenden Generationen eine intakte Umwelt und gesicherte Lebenschancen hinterlassen werden können. Das Leitbild der Nachhaltigkeit mit den drei Kategorien der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Aspekte stellt daher eines der bedeutsamsten Leitbilder für unsere Zukunft dar.

Das Thema Nachhaltigkeit ist im Bauwesen aufgrund der beim Bauen in Anspruch genommenen Ressourcen sowie der entstehenden Umwelteinwirkungen von außerordentlicher Bedeutung. Dementsprechend wird es für den Bausektor, insbesondere auch angesichts des Klimawandels und der knapper werdenden Ressourcen, immer wichtiger, möglichst nachhaltige Gebäude zu errichten, die energiesparende und ressourcenschonende Qualitäten aufweisen. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, dass die Bauphysik wesentliche Aspekte zur Nachhaltigkeitsbetrachtung abdecken kann.

Der Bauphysik-Kalender 2023 widmet sich dem Thema Nachhaltigkeit im Bauwesen und soll für die Planung und Ausführung bei Neubauten sowie im Bestand eine aktuelle, verlässliche und praxisgerechte Arbeitsgrundlage auf diesem Gebiet schaffen. Die folgenden Inhalte werden in den Abschnitten A, B und C vermittelt:

- Überblick über den aktuellen Stand der Technik und Forschung zu den Themen ressourceneffizientes, klimagerechtes und nachhaltiges Bauen,
- Beiträge zu Lebenszyklusanalysen von Bauwerken sowie kreislaufgerechte Verwendung von Baustoffen und Bauelementen,

- Beiträge zu gebräuchlichen und innovativen Dämmstoffen, insbesondere aus nachwachsenden Rohstoffen sowie zum Recycling von Dämmstoffen,
- ausgesuchte Beiträge zum aktuellen Stand der Technik und der Forschung hinsichtlich der Nachhaltigkeit gebräuchlicher und innovativer Baumaterialien sowie zur Bau- und Gebäudetechnik,
- Vorstellung von Ausführungsbeispielen zu innovativen, nachhaltigen und ressourcenschonenden Bauwerken bzw. Gebäuden.

Der Abschnitt D in diesem Bauphysik-Kalender beinhaltet die beiden jährlich aktualisierten Beiträge mit den bauphysikalischen Materialkennwerten und den materialtechnischen Tabellen für den Brandschutz.

Der Bauphysik-Kalender 2023 will mit der dargestellten Beitragsvielfalt den Bogen von der Forschung zur Praxis und vom Planungsbüro zur ausführenden Firma spannen und dabei auf neue Entwicklungen und Tendenzen hinweisen. Er stellt eine solide Arbeitsgrundlage sowie ein aktuelles Nachschlagewerk, nicht nur für die Praxis, sondern auch für die Lehre und Forschung dar. Für kritische Anmerkungen sind die Autoren, der Herausgeber und der Verlag dankbar.

Der Herausgeber möchte an dieser Stelle allen Autoren für ihre Mitarbeit und dem Verlag für die angenehme Zusammenarbeit herzlichst danken.

Hannover, im November 2022

Nabil A. Fouad

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 Nachhaltigkeits- bewertung 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 zukunfts- orientiertes/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

A 2	Lebenszyklus von Gebäuden – die Zukunft des Bauens	25
	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-Wärmegesetz	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 Nachhaltigkeitszertifizierung	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
A 3	Klimagerechtes Bauen	43
	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	Trockenheiße 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 Planungswerzeuge	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
A 4	Die Ermittlung der Ressourceneffizienz und der Klimabelastung von Bauwerken	83
	Clemens Mostert, Husam Sameer, Stefan Bringezu	
1	Einleitung	85
2	Ökologische Bewertung von Gebäuden mit Ressourcen- und Klimafußabdrücken	86
2.1	Ressourcenutzung 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	3.4.3.3	von Recycling-Gesteinskörnung 107
3.2.4	Zusammenfassung 99	3.4.4	Betonherstellung 107
3.3	Technologievergleich	3.5	Zusammenfassung 108
	Heizungssysteme 100	3.5.1	Fußabdruckanalyse mit Building
3.3.1	Einleitung 100	3.5.2	Information Modeling (BIM) 109
3.3.2	Methode 100	3.5.3	Einleitung 109
3.3.3	Ergebnisse 102	3.5.4	Methode 110
3.3.4	Zusammenfassung 104	3.5.5	Ergebnisse 111
3.4	Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft:	3.5.6	Zusammenfassung 112
	Betonrecycling 104	4	Zusammenfassung und Ausblick 112
3.4.1	Einleitung 104		
3.4.2	Methodik 104		Literatur 114

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 λ 123	2.3.4	Zsätze für Brand- und Feuchteschutz 142
1.1.2	Wärmedurchlasswiderstand R 126	2.4	Entwicklung der Dämmschichtdicken in Dach und Wand in den europäischen Ländern 142
1.1.3	Spezifische Wärmekapazität c 126	3	Beschreibung von Dämmstoffen 143
1.1.4	Temperaturleitzahl a 127	3.1	Aerogel 143
1.1.5	Physik der Wärmedämmung 127	3.1.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 143
1.2	Feuchteschutz 128	3.1.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 144
1.2.1	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ 128	3.1.3	Charakteristische Kenngrößen „Aerogel“ 144
1.2.2	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d 129	3.1.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 144
1.2.3	Auswahl der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ für den Nachweis nach Glaser 129	3.2	Baumwolle 144
1.3	Schallschutz 129	3.2.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 144
1.3.1	Schallabsorptionsgrad 129	3.2.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 145
1.3.2	Schallabsorptionsfläche A 130	3.2.3	Charakteristische Kenngrößen „Baumwolle“ 146
1.3.3	Längenbezogener Strömungswiderstand r 130	3.2.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 146
1.3.4	Dynamische Steifigkeit s' 131	3.3	Blähglas 146
1.3.5	Dynamischer Elastizitätsmodul E_{Dyn} 131	3.3.1	Herstellung und Hintergrundinformationen 146
1.4	Brandschutz 131	3.3.2	Anwendungsbereiche und Verarbeitung 147
1.4.1	Baustoffklassen nach DIN 4102-1 131	3.3.3	Charakteristische Kenngrößen „Blähglas“ 147
1.4.2	Benennung des Brandverhaltens nach DIN EN 13501-1 132	3.3.4	Gesundheitliche und ökologische Aspekte 147
1.5	Rohdichte 135	3.4	Blähton 148
2	Dämmstoffe im Bauwesen 136		
2.1	Dämmstoffübersicht 136		
2.2	Aspekte für die Auswahl von Dämmstoffen 136		
2.2.1	Baukonstruktive Aspekte 136		
2.2.2	Bauphysikalische Aspekte 136		
2.2.3	Ökologische Aspekte 136		
2.2.4	Ökonomische Aspekte 140		
2.3	Zusatzstoffe 140		
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 „H WL“ 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 Kieselsäure 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 Kieselsäure“ 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 Hohlraumdämmung	211
2.1	Marktanteile	201	3.3.5	Schwelen und Glimmen	212
2.2	Primärenergieinhalt, CO ₂ -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	Anwendungsbiete	203	4.6	Sonstige Eigenschaften	214
3	Anforderungen und Regelwerke	204	5	Nachhaltige Dämmstoffe	214
3.1	Anforderungen an den Wärmeschutz und äquivalente Dämmsschichtdicken	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 Aufstockungsmaßnahme 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

C 2	Nachhaltiger Betonbau	259
	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	
4.5.2	und bauphysikalische Bemessung von Betonbauteilen	333
4.5.3	Wärmeschutz	333
4.5.3.1	Winterlicher Wärmeschutz	333
4.5.3.2	Thermische Trägheit	333
4.5.3.3	Feuchteschutz	334
4.5.3.4	Schallschutz	335
4.5.4	Anforderungen an den Schallschutz von Gebäuden	335
4.5.5	Luftschallschutz bzw.	
4.5.5.1	Luftschalldämmung	335
4.5.5.2	Trittschalldämmung	336
4.5.5.3	Brandschutz	336
5	CO ₂ -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			
C 3	Ganzheitliche Ökobilanzierung von Wohnquartieren in Holzbauweise	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 zum Errichtungsort	401
2.3.1	Versorgungsvarianten Vorhaben A	375	4.2.3	Ergebnisdiskussion regionaler Einflüsse	401
2.3.2	Versorgungsvarianten Vorhaben B	377	4.3	Potenziale und Auswirkungen einer verstärkten Holznutzung im mehrgeschossigen Wohnungsbau auf die Strukturen des ländlichen Raumes	403
2.3.3	Ermittlung des Endenergiebedarfs der Gebäudetypen	378	5	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	404
2.3.4	Energetische Einordnung der Versorgungsvarianten	378	5.1	Methodik	404
2.4	Übersicht der Untersuchungsvarianten	379	5.1.1	Normative Grundlage	404
3	Ökobilanzierung	380	5.1.2	Ermittlung der Herstellungskosten	404
3.1	Methodik	380	5.1.3	Ermittlung der Nutzungskosten	405
3.1.1	Normative Grundlage	380	5.1.4	Dynamische Investitionsrechnung	407
3.1.2	Systemgrenzen	381	5.1.5	Berücksichtigung möglicher Umweltkosten	407
3.1.2.1	Systemgrenzen der Gebäudeerfassung	381	5.2	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	408
3.1.2.2	Systemgrenzen des Lebenszyklus	381			
3.1.3	Datengrundlage	382			
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
C 4	Bewertung von Bauelementen und Baustoffen für nachhaltiges Bauen	417			
	Jörn Peter Lass, Christoph Seehauser, Jürgen Benitz-Wildenburg				
1	Klimawandel fordert energetisch optimierte Gebäude	419	4.4	CO ₂ -Fußabdruck	431
2	Die Zukunft fordert eine nachhaltige und kreislauffähige Wirtschaft	420	4.4.1	Produkt CO ₂ -Fußabdruck (Product Carbon Footprint – PCF)	433
2.1	Nationale Regelwerke	421	4.4.2	CO ₂ -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 und 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	Umweltproduktdeklaration (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
C 5	Vakuumglasintegration in Bestands- und Neufenster	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			

C 6 Cross Layers Light – Ein ressourceneffizientes und recyclebares Holz-Wandsystem 483

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		Literatur	500
4.3	Plattentragfähigkeit	494			

C 7 Nachhaltige Gebäudetechnologie in Forschung und Entwicklung 503

Marco Wolf, Martin Buchholz, Arno Schlüter, Philipp Geyer

1	Einleitung	505	3.5	Feuchteschutz und Komfort durch Raumlufttechnik	512
2	Anforderungsprofile für Gebäude-energiesysteme	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 Luftfeuchtregulierung	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	524
4.7	Simulation von offenen Absorptionsprozessen	519	6.1	Wärmeabgabe und -aufnahme im Raum	524
5	Design und Integration von LowEx-Gebäudesystemen	520	6.2	Integration durch digitale, modellbasierte Prozesse	526
5.1	Einleitung	520	7	Zusammenfassung und Ausblick	528
5.2	Fallstudie Nest HiLo	521		Literatur	529
5.3	LowEx-Systeme in HiLo	521			
5.4	Übersicht	522			
C 8	Solar Decathlon Europe 2022 – Bauphysikalische Ergebnisse von Demonstrationsgebäuden	531			
	Karsten Voss, Heiko Hansen, Marvin Kaliga, Isil Kalpkirmaz Rizaoglu				
1	Einführung	533	6	Luftdichtheit	544
2	Messen und Bewerten	534	6.1	Konzeption	544
3	Gebäudeeigenschaften	534	6.1.1	Bewertungskriterien und Messtechnik	544
4	Raumklimatische Analysen	536	6.1.2	Präparation des Messvolumens	545
4.1	Außenklima	536	6.2	Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen	545
4.2	Raumklima	536	6.3	Erfahrungen	546
4.2.1	Temperatur	538	7	Schallschutz	546
4.2.2	Luftfeuchte	540	7.1	Konzeption	546
4.2.3	Luftqualität	540	7.1.1	Bewertungskriterien und Messtechnik	546
4.3	Erfahrungen	540	7.1.2	Messdurchführung	547
5	Co-heating Test	541	7.2	Ergebnisse der Messungen der Fassadenschalldämmung	547
5.1	Motivation	541	7.3	Erfahrungen	548
5.2	Durchführung	542	8	Ausblick	549
5.3	Ergebnisse	542		Literatur	549
5.4	Erfahrungen	544			
C 9	Planung, Ausführung und Betriebserfahrung eines Plus-Energie-Bürohochhauses	551			
	Alexander David, Thomas Bednar, Markus Leeb, Helmut Schöberl				
1	Einleitung	553	4.4	Photovoltaik	568
2	Entstehungsgeschichte	554	4.5	Energiemonitoring	572
3	Planung	557	4.6	Inbetriebnahme	574
3.1	Rahmenbedingungen	557	4.7	Begleitung der Nutzer:innen in der Umstellung der EDV	578
3.2	Energiekonzept	557	5	Betriebserfahrung und Monitoringergebnisse	580
3.2.1	Lokales Angebot an Strom und Wärme	557	5.1	Erkenntnisse aus dem Betrieb	580
3.2.2	Energieeffizienz	558	5.2	Ergebnisse des Energiemonitorings	583
3.2.3	Energiebilanz	563	6	Wirtschaftlichkeit	590
3.2.4	Nicht realisierbares Potenzial	564	7	Zusammenfassung	591
3.3	Ausschreibung	564		Literatur	592
4	Ausführung	565			
4.1	Bautechnik	565			
4.2	Gebäudetechnik	566			
4.3	Ausstattung der Räume ohne Arbeitsplatzgeräte	567			

C 10	Energy Design: Gestaltung und Innovation in Bestandsgebäuden 595		
	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
D	Materialtechnische Tabellen		
D 1	Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz 623		
	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		Literatur 658
2.3	Brandausbreitung 633		
D 2	Materialtechnische Tabellen 661		
	Rainer Hohmann		
1	Vorbemerkungen 663	3	Schallschutztechnische und akustische Kennwerte 703
2	Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte 665		Literatur 715
Stichwortverzeichnis 717			

2.3 Ressourcenfußabdrücke

2.3.1 Materialfußabdruck

Der Produkt-Materialfußabdruck (engl. Product Material Footprint PMF) wurde als ökobilanzielles Bewertungsverfahren entwickelt, um die Umweltbelastungen und Beeinträchtigungen natürlicher Systeme aufgrund der Nutzung natürlicher stofflicher Ressourcen abzuschätzen. Das Bewertungsverfahren wurde zunächst für die Nutzung abiotischer Materialien entwickelt [46]. Aktuell erfolgt die Erweiterung des Verfahrens auf Biomasse. Zentrales Element des Bewertungsverfahrens ist die Entnahme von natürlichem Primärmaterial aus dem Naturraum und die Verlagerung des Materials vom Naturraum in die Technosphäre. Das in die Technosphäre transferierte Primärmaterial wird dort getrennt. Der verwertete Teil geht als Rohstoff, z. B. Kupfererz oder Rundholz, in den Wirtschaftsraum über und wird dort zu Material für die Produktion, bspw. Kupfer oder Schnittholz, weiterverarbeitet. Der übrige Teil des Primärmaterials wird als ungenutztes Extraktionsmaterial, z. B. Abraum oder Kronenmaterial, im Naturraum abgelagert. Die Entnahme von Primärmaterial und die Ablagerungen des ungenutzten Anteils verändern den Zustand der betroffenen natürlichen Kompartimente wie Boden, Wasser sowie Luft und führen dort zu direkten und indirekten Umweltwirkungen und Schäden am Schutzwert natürliche Umwelt. Diese Schäden werden in bestehenden ökobilanziellen Bewertungsverfahren bisher noch nicht hinreichend berücksichtigt.

Als Grundlage für die Bewertung verwendet der PMF die beiden Indikatoren Gesamtprimärmaterialaufwand (engl. Total Material Requirement TMR) und Rohstoffeinsatz (engl. Raw Material Input RMI), die in Anlehnung an die ökonomieweite Materialflussanalyse definiert sind [47]. Der TMR schätzt die Umweltbelastung der produktsspezifischen Materialnutzung hinsichtlich der extrahierten Menge an natürlichem Primärmaterial ab, der RMI hinsichtlich der genutzten Menge an primären Rohstoffen. Sie sind damit umsatzbasierte Umweltbelastungsindikatoren bzw. Mid-point-Indikatoren im Sinne der Ökobilanz. Primärmaterial wird von den natürlichen stofflichen Ressourcen mithilfe von Technologie aus der Natur entnommen und in ihr bewegt. Die entsprechenden Prozesse und Materialflüsse zur Messung von TMR und RMI sind in Bild 1 dargestellt.

Abiotisches Primärmaterial wird an den Stellen der Lithosphäre (oder Pedosphäre) entnommen, wo die abiotischen Rohstoffe in Form geogener Lagerstätten bspw. als Erze vorkommen. Entsprechend der räumlichen Verteilung der chemischen Elemente in der Erdkruste und der Anreicherungsdynamik bei der Lagerstättenentstehung gibt es für jeden abiotischen Rohstoff eine statistische Bandbreite von Rohstoffgehalten in den Lagerstätten. Wenn Lagerstätten eine Konzentration an Rohstoffen aufweisen, die ihre wirtschaftliche Verwertung zu Materialien versprechen, werden sie erschlossen und genutzt.

Die biotischen Ressourcen umfassen sowohl Pflanzen als auch Tiere. Sie werden an den Stellen der Biosphäre entnommen, wo sie natürlich gewachsen sind oder kul-

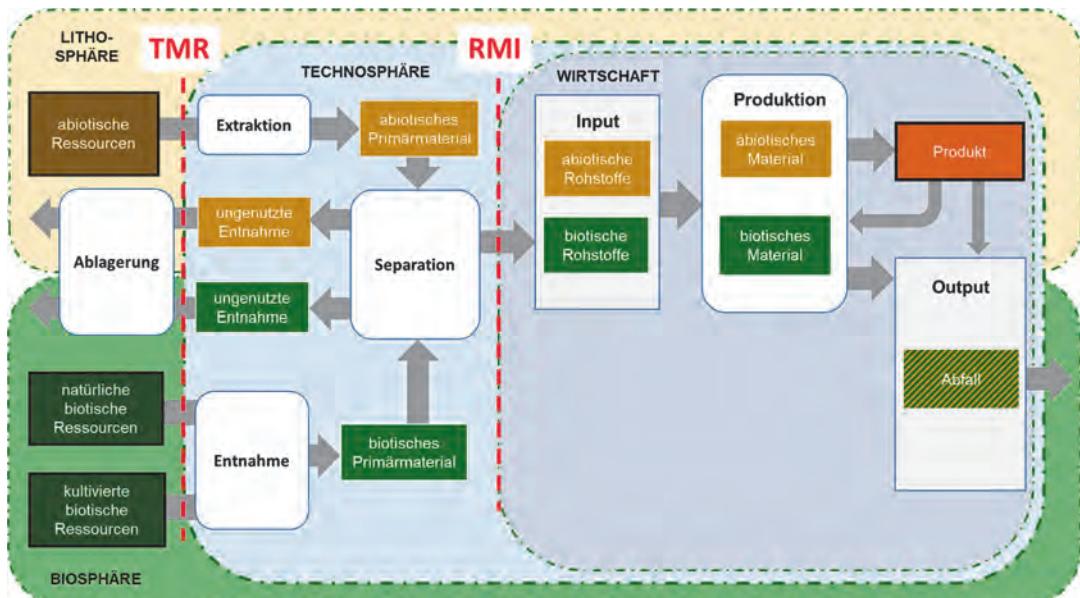


Bild 1. Systemgrenzen zur ökobilanziellen Messung der Indikatoren Gesamtprimärmaterialaufwand (engl. Total Material Requirement TMR) und Rohstoffeinsatz (engl. Raw Material Input RMI)

tiviert (angebaut) wurden (Pflanzen) bzw. gelebt haben (wildgefangene Tiere). Der biotische Anteil des PMF misst die Mengen an Primärmaterial, das im Freiland oder in Gewässern in Form von Pflanzen inkl. Pilzen abgeschnitten, ausgegraben oder von Nutztieren gegessen oder in Form von freilebenden Tieren gefangen oder geschossen wird.

Im Agrarbereich wird die Menge an biotischem Primärmaterial gezählt, die für die Herstellung von Nahrungsmitteln und Tierfutter sowie andere stoffliche und energetische Nutzung entnommen und bewegt wird. Sie umfasst die geerntete Biomasse selbst sowie alle dabei anfallenden biotischen Ernterückstände, die nicht weiterverarbeitet werden. Im Feldanbau können diese Ernterückstände bspw. Stroh (Weizen, Gerste, Reis etc.) oder Stängel (Mais, Soja) umfassen. Weitere Ernterückstände sind bspw. Strukturmaterien, wie Baumschnitte beim Obstbau oder die Rappen und das Blattwerk beim Weinanbau. Wenn Ernterückstände vom Feld entfernt und genutzt werden, wie z. B. Stroh zur energetischen Nutzung, so gelten sie als genutzte Entnahme. Im Forstbereich umfasst die Menge an biotischem Primärmaterial das geerntete Rundholz und ggf. den ausgegrabenen Stumpf sowie die Ernterückstände, d. h. Reisig, Blätter und ggf. Rinde. Im Fischereibereich umfasst die Menge an biotischem Primärmaterial die gefangenen Tiere (Fische, Krebse, Muscheln etc.), einschließlich der Tiere, die nicht Ziel des Fangs waren (Beifang) sowie Wasserpflanzen beispielsweise Algen.

Der TMR misst die gesamte Menge des aus der Natur entnommenen und dort bewegten Primärmaterials (genutzt und ungenutzt) für Produkte, Infrastrukturen oder Dienstleistungen entlang des betrachteten Lebenszyklus. Mit dem Massenumsatz der Extraktion des Primärmaterials einschließlich der Verlagerung des ungenutzten Anteils innerhalb der Natur sind lokale bis regionale Veränderungen der natürlichen Umwelt, wie Landschaftsveränderungen, Zerstörung der Vegetation und Veränderung der Hydrologie, Bodenschädigungen, Biodiversitätsänderungen sowie Verlusten an In-situ-Ökosystemdienstleistungen und lebensunterstützenden Funktionen verbunden. Der RMI misst den genutzten Anteil des aus der Umwelt entnommenen Primärmaterials, d. h. die Menge an eingesetzten abiotischen und biotischen Rohstoffen für Produkte, Infrastrukturen und Dienstleistungen entlang des betrachteten Lebenszyklus. Der Masseneinsatz des Rohstoffs bestimmt die Menge an Abfall, Abwasser und Emissionen, die an anderen Orten entlang der Produktions-Konsum-Recycling-Entsorgungs-Kette anfallen wird und das damit verbundene Bündel an Umweltbelastungen von Luft, Wasser und Boden. Der Materialfußabdruck wird damit in kg Primärmaterial bzw. in kg Rohstoff pro FE angegeben.

2.3.2 Energiefußabdruck

Um den Energieaufwand von Produkten oder Dienstleistungen ökobilanziell zu bestimmen, kann der kumulierte Energieaufwand (KEA) herangezogen werden [48]. Dieser ist laut VDI 4600 definiert als die „Gesamtheit des primärenergetischen Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkts oder Dienstleistung) entsteht...“ [49]. Damit stellt der KEA einen geeigneten Indikator zur Bestimmung des Energiefußabdrucks dar. Da häufig unterschiedliche Energieformen eingesetzt werden, ist es für einen aussagekräftigen Vergleich notwendig, sie auf eine einheitliche Energieform zu beziehen. Für die primärenergetische Berechnung kann auch der sogenannte Bereitstellungs-nutzungsgrad verwendet werden, der das Verhältnis des Energiegehalts eines Energieträgers zu dem KEA für die Bereitstellung dieses Energieträgers angibt und so eine Umrechnung in die Primärenergieform ermöglicht. Als Inputgrößen werden die verwendeten Primärenergieträger sowie der Energiegehalt der primären und sekundären Rohstoffe betrachtet. Nach VDI 4600 werden die schwer zu fassenden energetischen Größen, wie bspw. menschliche Arbeit oder nahrungs-basierte Energie, nicht berücksichtigt. Ihre Bestimmung würde die Berechnung erheblich verkompliziert und auch die technische Vergleichbarkeit beinträchtigen. Das Konzept des kumulativen Energiebedarfs (eng. Cumulated Energy Demand) wird schon lange als Bewertungsverfahren in Ökobilanzen verwendet, kann aber je nach verwendetem Ansatz zu unterschiedlichen Ergebnissen führen [50]. Die verwendeten Daten für den Energiefußabdruck sind in *Hirschier et al. (2010)* dokumentiert [51] und werden entsprechend in MJ pro FE angeben.

2.3.3 Wasserfußabdruck

Der Wasserfußabdruck wird nach der Konsensmethode zur Ökobilanzierung von Wasserknappheit auf Grundlage der WULCA-Arbeitsgruppe (Water Use in LCA) [52] in Übereinstimmung mit der ISO 14046 [53] berechnet. Danach werden die Auswirkungen der menschlichen Wassernutzung (engl. Water Use) unter Berücksichtigung des Wasserbedarfs der Ökosysteme und der hydrologischen Wasserverfügbarkeit in dem betrachteten Wassereinzugsgebiet über das noch verbleibende und verfügbare Wasser (engl. Available Water Remaining AWARE) bestimmt. AWARE zielt somit darauf ab, das Risiko der Wasserknappheit für jeden Wassernutzer im jeweiligen Wassereinzugsgebiet zu berücksichtigen. Der verwendete Indikator, Verfügbarkeit-Minus-Bedarf (engl. Availability-Minus-Demand AMD) wird dazu mit dem Welt durchschnitt in Beziehung gesetzt, um regionalisierte Ergebnisse vergleichend berechnen zu können. Die berechneten Daten stellen damit einen relativen Wert für die Auswirkung des Wasserverbrauchs im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt in dem Einzugsgebiet dar. Die-

ser wird als Wichtungsfaktor mit der verbrauchten Wassermenge multipliziert, um der Wasserverfügbarkeit Rechnung zu tragen. Die aktuellen AWARE-Werte von verschiedenen Gebieten oder Ländern, wie zum Beispiel von Deutschland, werden von der WULCA-Arbeitsgruppe veröffentlicht (<https://wulca-waterlca.org/aware/download-aware-factors>). So beträgt der durchschnittliche Wert von Deutschland 1,3. Dieser Wert bedeutet, dass bei einem Wasserverbrauch in Deutschland etwa 1,3-mal weniger Wasser verbleibt als im Welt-Durchschnitt. Hinsichtlich der Wirkungsabschätzung wird der Wasserverbrauch mit dem deutschen Wert multipliziert und somit gewichtet, wenn der betrachtete Prozess in Deutschland erfolgt. Der Wasserfußabdruck wird demnach in m^3 gewichtetem Wasser pro FE angegeben.

2.4 Klimafußabdruck

International sind die Grundsätze zur ökobilanziellen Berechnung des Klimafußabdrucks, der häufig vereinfacht als CO_2 -Fußabdruck (engl. Carbon Footprint) bezeichnet wird, in der DIN EN ISO 14067 [54] geregelt. Er ist das Ergebnis einer Treibhausgasbilanz eines Produktes und wird entsprechend als Product Carbon Footprint (PCF) bezeichnet. Der Klimafußabdruck wird in der Ökobilanz in der Wirkungskategorie Klimaänderung bestimmt. Die Wirkungskategorie berücksichtigt den Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen durch die zusätzlichen Emissionen von Treibhausgasen. Der Grund dafür ist eine damit verbundene, erhöhte Wärmeabsorption in der Atmosphäre, die auch als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet wird [55].

Die Berechnung der Klimawirkung (engl. Global Warming Impact GWI) erfolgt mit dem Treibhauspotenzial in CO_2 -Äquivalenten. Dadurch wird ermöglicht, das Treibhauspotenzial verschiedener Gase mit dem Potenzial von Kohlendioxid zu vergleichen. Die CO_2 -Äquivalente werden über die Menge des jeweiligen THG multipliziert mit dessen Treibhauspotenzial berechnet [54]. In der Regel wird dieses Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren (engl. Globale Warming Potential GWP_{100}) betrachtet. Mit dem GWP_{100} kann die Wirkung unterschiedlicher THG über die Menge an CO_2 abgeschätzt werden, die diese für eine äquivalente Klimawirkung über einen Zeitraum von 100 Jahren haben [56]. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlicht in seinen Sachstandsberichten regelmäßig die aktualisierten GWP_{100} -Werte der einzelnen Treibhausgase. Die hier vorgestellten Berechnungen basieren auf den Werten aus dem fünften Sachstandsbericht des IPCC [56]. Der Klimafußabdruck wird damit in $kg\ CO_2\text{-eq.}$ pro FE angegeben.

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Beton

3.1.1 Einführung

Die Rohstoffe Sand, Kies, Kalkstein und Splitt, die zu großen Teilen für die Herstellung von Beton eingesetzt werden, machen etwa die Hälfte der globalen Rohstoffextraktion aus [5]. Die Betonherstellung, und in diesem Zusammenhang vor allem die Zementproduktion, ist für bis zu 8 % der weltweiten THG-Emissionen verantwortlich [57]. Der Grund dafür ist der intensive Einsatz von Energie für die Erhitzung der Rohstoffe während des Herstellungsprozesses von Zement [58, 59]. Die Zementproduktion geht aber auch mit einem hohen Wasserverbrauch z. B. für die Kühlung einher, sodass auch diese wichtige Ressource zunehmend kritische Aufmerksamkeit im Bausektor erhält [60].

Die Erforschung alternativer Betontechnologien erfolgt insbesondere auch vor dem Hintergrund, einen Beitrag zur Verringerung der Umweltauswirkungen zu leisten [17, 61]. Der ultrahochfeste Beton (UHFB) findet zunehmend Verwendung im Baubereich [62], da er eine hohe Druckfestigkeit von mehr als 150 MPa bei geringerer Masse und eine hohe Biegefestigkeit von mehr als 10 MPa aufweist [63]. Der experimentelle Vergleich von UHFB mit Normalbeton (NB) zeigt, dass die Festigkeit des verwendeten UHFB drei- bis viermal höher ist als die von NB [64]. Darüber hinaus hat UHFB einen höheren Elastizitätsfaktor, eine höhere Zugfestigkeit und Duktilität. Auch wenn UHFB aus einem energieintensiven Herstellungsprozess stammt [65], könnte er im Vergleich zu NB eine längere Lebensdauer ohne zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen aufweisen [66]. Die Frage nach der Umweltverträglichkeit von UHFB im Vergleich zu NB wurde bisher noch nicht umfassend beantwortet.

UHFB ermöglicht eine deutliche Reduzierung des Verhältnisses von Masse zu Tragfähigkeit [65] und bietet damit ein großes Potenzial für die effiziente Nutzung von Ressourcen. Die tatsächliche Einsparung an natürlichen Ressourcen kann nur durch eine lebenszyklusweite Betrachtung analysiert werden [67]. Während die Umweltwirkungen der unterschiedlichen Mischungen für NB bereits intensiv erforscht wurden [68] bis [70], sind wesentliche Umweltaspekte von UHFB wie der Rohstoffbedarf und der Wasserverbrauch noch unzureichend untersucht [71].

3.1.2 Methode

In diesem Anwendungsbeispiel werden zwei Entwurfsvarianten einer Brücke (Obertiefenbachbrücke) miteinander verglichen [72, 73]. Die erste Entwurfsvariante sieht eine ausschließliche Verwendung von Normalbeton vor (NB-Variante) und die zweite Variante eine Kombination aus NB und ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante). Dazu werden zunächst die Klima-, Material- und Wasserfußabdrücke von UHFB im Ver-

Tabelle 2. Referenzmischungen von ultrahochfestem Beton (UHFB) und Normalbeton (NB)

Material	Einheit	UHFB		NB	
		Transportbeton	Fertigteilbeton	Transportbeton	Fertigteilbeton
		M3Q	M2Q	C35/45	C50/60
Zement/CEM I 52,5	kg/m ³	775	832		
Zement/CEM II/A	kg/m ³			356	405
Quarzsand	kg/m ³	946	975		
Sand	kg/m ³			640	654
Kies	kg/m ³			806	827
Splitt	kg/m ³			362	371
Wasser	kg/m ³	183	166	165	141
Quarzmehl	kg/m ³	193	207		
Silicatstaub	kg/m ³	164	135		
Flugasche	kg/m ³			47	25
Fließmittel	kg/m ³	23,50	29,40	1,80	4,60
Mikrostahlfasern	kg/m ³	192	192		
Gesamt	kg/m ³	2476,50	2536,40	2377,80	2427,60

gleich zu NB ökobilanziell bestimmt. Die Spezifikationen von Beton sind in der DIN EN 206 [74] festgelegt. Aus den Ergebnissen eines Forschungsvorhabens [65] wurden die beiden UHFB-Mischungen, M3Q und M2Q, ausgewählt, wobei für den Transportbeton die UHFB-Mischung M3Q und für den Fertigteilbeton die UHFB-Mischung M2Q betrachtet wird. Die Umweltanalyse wird im Vergleich mit zwei Mischungen von Transportbeton (C35/45) und Fertigteilbeton (C50/60) durchgeführt. Dabei beziehen sich 35 und 50 auf die Mindestdruckfestigkeit in MPa eines zylindrischen Probekörpers aus Beton mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge, 45 und 60 auf die Mindestdruckfestigkeit in MPa eines Würfelprobekörpers aus Beton mit 150 mm Kantenlänge nach 28 Tagen bei Prüfung nach DIN EN 206 [74]. Die untersuchten Betonmischungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Für die NB-Mischungen wird die durchschnittliche Betonmischung in Deutschland verwendet, wie sie für die EPD des Betons durch den Bundesverband Beton beschrieben wurde [75]. Für den Vergleich wird eine Gesteinskörnung vollständig aus Primärrohstoffen betrachtet. Für den Zement wird ein durchschnittlicher Klinkeranteil von 85 % angesetzt, was der Zementart CEM II/A nach DIN EN 197-1 [76] entspricht.

Für die Analyse auf Tragwerksebene wird in der UHFB-Variante der NB in der obersten Schicht der Fahrbahnplatte, im Scharnier über den mittleren Pfeilern und im Bordstein durch UHFB ersetzt. Alle anderen Brückenelemente, z. B. die Hauptträger, Widerlager und Mittelpfeiler, werden weiterhin mit NB ausgeführt. Eine Übersicht der in den beiden Ent-

wurfsvarianten verwendeten Baumaterialien einschließlich Mengen ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Material-, Wasser- und Klimafußabdrücke werden für die beiden Entwurfsvarianten der Brücke Lebenszyklusweit bestimmt. Als FE wird das Brückenbauwerk definiert. Beide Entwurfsvarianten haben den gleichen Produktnutzen, da sie zwei identische Orte verbinden, der gleichen Brückenklasse zugeordnet sind und die gleiche Tragfähigkeit und Länge haben. Die Nutzungsdauer wird mit 90 Jahren angenommen. In Bild 2 ist das Prozesskettendiagramm mit den benötigten Material-, Energie- und Wasserflüssen als auch den Abfällen und Emissionen schematisch dargestellt. Die Ökobilanzsoftware *openLCA* wurde zusammen mit der Ökobilanzdatenbank *GaBi* für die Modellierung der Prozesse verwendet. Eine Ausnahme ist der Produktionsprozess von Stahlfasern, der in *GaBi* nicht verfügbar ist. Daher wurde für die Modellierung von Stahlfasern die Ökobilanzdatenbank *ecoinvent 3.1* herangezogen. Soweit möglich wurden Prozessdaten mit dem Bezugsraum Deutschland oder Europa verwendet. Für nicht bekannte Daten, wie z. B. die Transportentfernung von Quarzsand zum Betonwerk, wurden Annahmen getroffen. Flugasche ist ein Nebenprodukt aus dem Kohlekraftwerk. Silikastaub fällt als Nebenprodukt bei der Herstellung von Siliziummetall- oder Ferrosilizium-Legierungen an. Daher werden ihre Umweltwirkungen nur für den Transport zum Betonwerk berücksichtigt.

Tabelle 3. Baumaterialien für die beiden Entwurfsvarianten der Brücke (Obertiefenbachbrücke): Normalbeton (NB-Variante) und ultrahochfester Beton (UHFB-Variante)

Bauteil	UHFB-Variante	Menge	NB-Variante	Menge
Querträger	C35/45	25,00 m ³	C35/45	40,00 m ³
	Baustahl	6,50 t	Baustahl	27,00 t
Betongelenke	M2Q	1,10 m ³	–	–
Längsträger	C50/60	180,00 m ³	C50/60	142,00 m ³
	Bau- und Spannstahl	54,80 t	Bau- und Spannstahl	33,00 t
	Polyurethan Kitt	0,12 t	C35/45	119,00 m ³
	M3Q	7,00 m ³	–	–
Abdichtung	M3Q	20,50 m ³	Epoxidharz	0,56 t
	–	–	Quarzsand	0,84 t
	–	–	Bitumenschweißbahnen	3,10 t
Belag	Gussasphalt	1,73 t	Gussasphalt	56,45 t
	Splittmastixasphalt	28,80 t	–	–
	Fugenmasse	0,09 t	Fugenmasse	0,16 t
	Edelsplitt	0,90 t	Lieferkörnung (2/5), (5/8)	1,95 t
Fahrbahnkappen	Epoxidharz	1,24 t	–	–
	M2Q	33,00 m ³	C25/30	59,00 m ³
	Spannstahl	0,6 t	Betonstahl	8,00 t

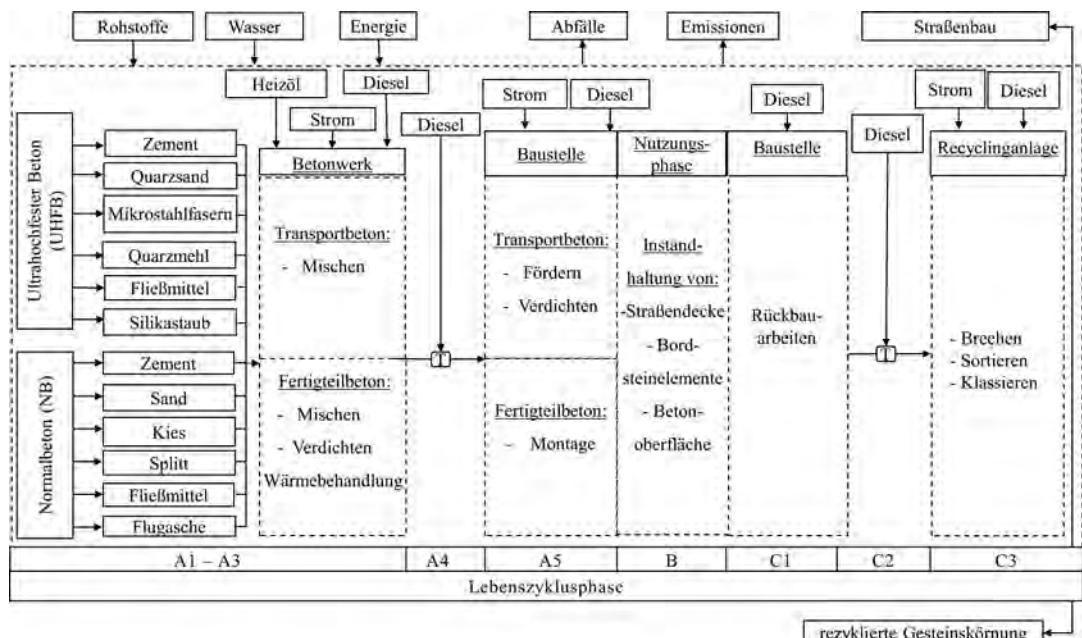


Bild 2. Diagramm der Ökobilanzierung von ultrahochfestem Beton (UHFB) und Normalbeton (NB) für die Lebenszyklusphasen A1–C3; T: Transport

3.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Ressourcen- und Klimafußabdrücke für UHFB und NB pro m³ sind in Tabelle 4 dargestellt.

Es wird deutlich, dass UHFB (M3Q, M2Q) bezogen auf einen Kubikmeter Beton einen etwa vierfach höheren Klimafußabdruck aufweist als NB (C35/45, C50/60). Die Herstellung der Materialien (Lebenszyklusphasen A1–A3) trägt dabei zu mehr als 90% zum Klimafußabdruck aller betrachteten Betonmischungen bei. Beim UHFB sind die THG-Emissionen aus der Produktion der Stahlfasern für 40% des Klimafußabdrucks verantwortlich. Die Zementproduktion trägt zu mehr als 80% der THG-Emissionen des NB bei. Der RMI des UHFB ist etwa 60% höher als der von NB; der TMR beträgt sogar ca. das 2,5-fache des NB. Die deutlich höheren Werte für den TMR von M3Q und M2Q sind vor allem auf den hohen Anteil der ungenutzten Extraktion bei der Stahlherstellung für die verwendeten Fasern zurückzuführen. In den Lebenszyklusphasen A1–A3 wird der Materialfußabdruck von NB zu mehr als 65% aus dem Produktionsprozess der Gesteinskörnung und zu mehr als 30% aus dem Pro-

duktionsprozess des Zements bestimmt. Der Wasserfußabdruck von UHFB ist etwa dreimal so groß wie der von NB. Den höchsten Wert weist die M2Q-Betonmischung aus. Auch der Wasserverbrauch wird durch die Lebenszyklusphasen A1–A3 dominiert, wobei die Herstellung von Zement den höchsten Beitrag leistet. Die Ergebnisse für den Klimafußabdruck für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante sind in Bild 3 dargestellt.

Der Klimafußabdruck der UHFB-Variante ist im Vergleich zur NB-Variante um ca. 40 t CO₂-Äquivalente reduziert. In der NB-Variante entfallen 63% des Klimafußabdrucks auf die Lebenszyklusphasen A1–A3. Bei der UHFB-Variante sind A1–A3 sogar für 92% des Klimafußabdrucks verantwortlich. Eine genaue Analyse von A1–A3 zeigt, dass die Produktionsprozesse von NB und Stahl hauptsächlich zum Klimafußabdruck der NB-Variante beitragen. In der UHFB-Variante hat die Produktion des UHFB einen Anteil von etwa 45% am Klimafußabdruck. In Bild 4 sind die Ergebnisse für den Materialfußabdruck, gemessen in RMI und TMR, für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante dargestellt.

Tabelle 4. Ressourcen- und Klimafußabdrücke für die Referenzmischungen von ultrahochfestem Beton (M3Q, M2Q) und Normalbeton (C35/C45, C50/60)

Fußabdruck	Klima	Material	Material	Wasser
Indicator	GWI	RMI	TMR	AWARE
Unit	kg CO ₂ -eq./m ³ Beton	kg Rohstoff/m ³ Beton	kg Primärmaterial/m ³ Beton	m ³ gewichtetes Wasser/m ³ Beton
M3Q	1616	6,6	9,7	405
M2Q	1703	6,8	10,0	449
C35/45	354	3,4	3,4	145
C50/60	421	3,6	3,7	177

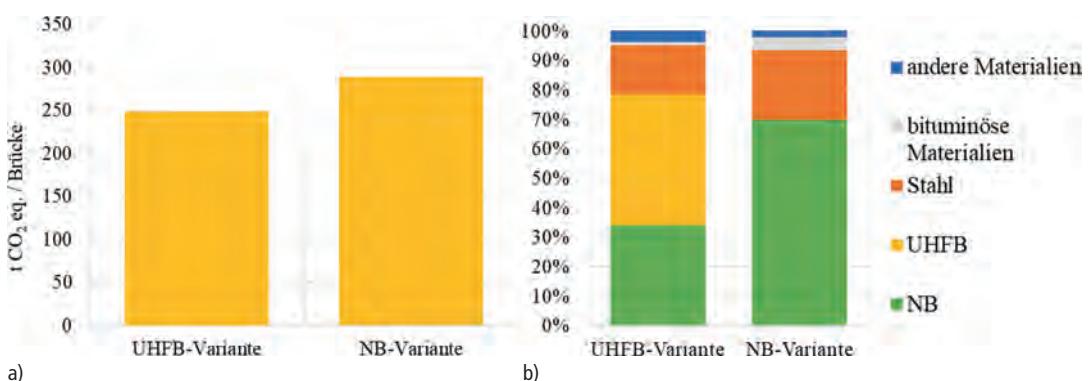


Bild 3. Ergebnisse für den Klimafußabdruck für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante; a) Klimafußabdruck der Entwurfsvariante mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–C3, b) Anteile der Prozesse am Klimafußabdruck der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–A3

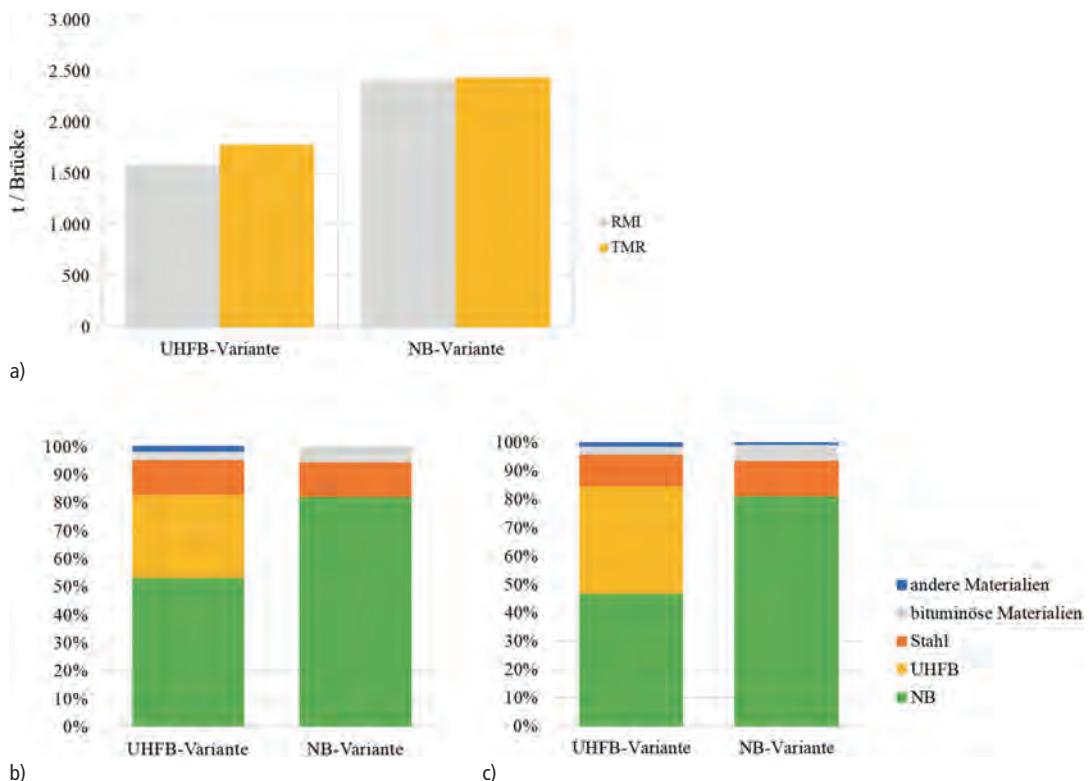


Bild 4. Ergebnisse für den Materialfußabdruck für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante; a) Materialfußabdruck der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–C3, RMI: Raw Material Input, TMR: Total Material Requirement; b) Anteile der Prozesse am RMI der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–A3; c) Anteile der Prozesse am TMR der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–A3

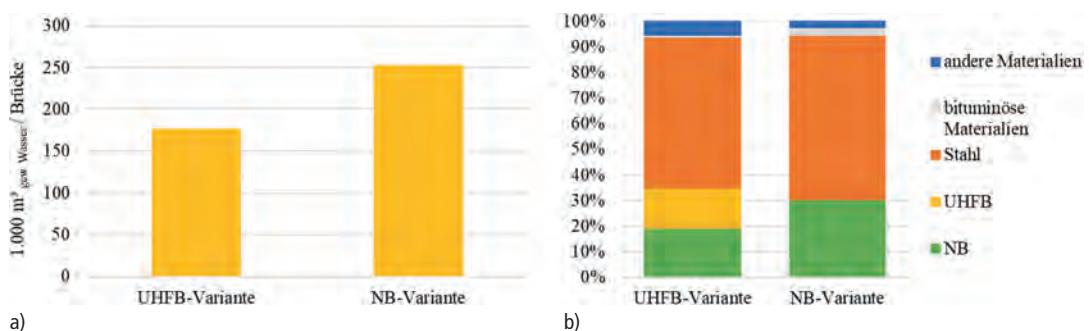


Bild 5. Ergebnisse für den Wasserfußabdruck für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante; a) Wasserfußabdruck der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–C3; b) Anteile der Prozesse am Wasserfußabdruck der Entwurfsvarianten mit Normalbeton (NB-Variante) und mit ultrahochfestem Beton (UHFB-Variante) für die Lebenszyklusphasen A1–A3

Der Materialfußabdruck der UHFB-Variante ist im Vergleich zur NB-Variante um mehr als 800 Tonnen Rohstoff und mehr als 650 Tonnen Primärmaterial reduziert. Die Beton- und Stahlproduktion machen in beiden Varianten mehr als 90% des Materialfußabdrucks aus. Bei der UHFB-Variante liegt der Anteil der Herstellung von NB bei 47% und von UHFB bei 38%. Die Ergebnisse für den Wasserfußabdruck für die UHFB-Variante im Vergleich zur NB-Variante sind in Bild 5 dargestellt.

Für die UHFB-Variante zeigt sich ein um 30 % reduzierter Wasserfußabdruck im Vergleich zur NB-Variante. Bei beiden Entwurfsvarianten dominiert der Produktionsprozess von Stahl den Wasserfußabdruck mit 64% für die NB-Variante und 59% für die UHFB-Variante.

3.1.4 Zusammenfassung

In diesem Anwendungsbeispiel wurden die Klima-, Material- und Wasserfußabdrücke von UHFB und NB für Fertigteil- und Transportbeton anhand einer ökobilanziellen Berechnung bestimmt. Die Ökobilanzsoftware *openLCA* wurde zusammen mit der Ökobilanzdatenbank *GaBi* verwendet, was die Quantifizierung der Fußabdrücke erheblich erleichtert.

Tabelle 5. Verzeichnis der Baustoffe für die untersuchten Varianten von Außenwandaufbauten: PBB: Porenbetonblock; LBB: Leichtbetonblock; PGZ: Perlitgefüllter Ziegel; UGZ: Ungefüllter Ziegel; EPS: Expandiertes Polystyrol; XPS: Extrudiertes Polystyrol; SW: Steinwolle; WDVS: Wärmedämmverbundsystem

	Gemeinsamer Baustoff	Verwendung im Gebäude	Dicke [mm]	Dichte [kg/m ³]	Lambda λ [W/(m K)]
	Innenfarbe	Gesamtes Gebäude	0,3	1350	–
	Gips-Innenputz	Gesamtes Gebäude	15	1000	0,4
	Mörtel (Dünnbettmörtel)	Gesamtes Gebäude	365	1500	1
	Zementmörtel	Erdgeschoss/1. Stock	15	1000	0,38
	Bitumenemulsion	Keller	0,2	1050	0,17
	Bitumenbahn	Keller	4,5	1100	0,23
Außenwand-alternative	Bau- und/oder Dämmelement	Verwendung im Gebäude	Dicke [mm]	Dichte [kg/m ³]	Lambda λ [W/(m K)]
PBB	Porenbetonblock	Gesamtes Gebäude	365	472	0,1
LBB	Leichtbetonblock	Gesamtes Gebäude	365	800	0,24
PGZ	Perlitgefüllter Ziegel	Gesamtes Gebäude	365	806	0,09
UGZ	Ungefüllter Ziegel	Erdgeschoss/1. Stock	240	1200	0,45
	WDVS mit EPS	Erdgeschoss/1. Stock	160	13,8	0,035
	Ungefüllter Ziegel	Keller	240	1200	0,45
	WDVS mit XPS	Keller	120	16,14	0,029
KSS	Kalksandstein	Erdgeschoss/1. Stock	175	1800	0,99
	WDVS mit SW	Erdgeschoss/1. Stock	160	30,84	0,035
	Kalksandstein	Keller	240	1800	0,99
	WDVS mit XPS	Keller	120	16,14	0,029

Es zeigt sich, dass die Umweltwirkungen von einem Kubikmeter UHFB im Vergleich zu NB deutlich höher sind, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse keine vergleichende Fußabdruckanalyse darstellen, da die Baustoffe nur hinsichtlich quantitativer Aspekte verglichen wurden. Für einen direkten Vergleich mit UHFB müssen Baustoffe herangezogen werden, die auch die gleichen qualitativen Eigenschaften aufweisen. Die Werte der Fußabdrücke liefern jedoch wichtige Informationen für weitere ökobilanzielle Analysen, in dem sie eine Bewertung auf Gebäude- bzw. Bauwerksebene unter Berücksichtigung aller quantitativen und qualitativen Aspekten ermöglichen.

In allen betrachteten Fußabdrücken weist die UHFB-Variante des Brückenbauwerks eine ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber der NB-Variante auf. Es zeigt sich, dass die Bewertung von innovativen Baumatrerialien hinsichtlich Ressourceneffizienz und Klimawirkung nur möglich ist, wenn für den konkreten Anwendungsfall die qualitativen Eigenschaften der Baumatrerialien berücksichtigt werden.

3.2 Außenwandaufbauten

3.2.1 Einführung

In diesem Anwendungsbeispiel werden fünf unterschiedliche Varianten von Aufbauten von Außenwänden untersucht und hinsichtlich ihrer Klima- und Materialfußabdrücke verglichen. Dabei werden zwei unterschiedliche Arten von Mauerwerk betrachtet:

1. Mauerwerk mit gedämmten und tragenden Bauteilen: Außenwände mit Porenbetonblock (PBB-Variante), mit Leichtbetonblock (LBB-Variante) und mit perlitegefülltem Ziegel (PGZ-Variante) und
2. Mauerwerk mit tragenden Bauteilen und Wärmedämmverbundsystem (WDVS): ungefüllter Ziegel mit WDVS aus expandiertem Polystyrol (UGZ-Variante) und mit Kalksandstein mit WDVS aus Steinwolle (KSS-Variante).

Die Varianten unterscheiden sich in der Dämmung und den konstruktiven Elementen. Die Spezifikationen der gemeinsamen Baustoffe (Innenanstrich, Gipsputz, Bitumenemulsion und Bitumenbahn) entsprechen der DIN EN ISO 10456 [77], Dünnbettmörtel und Zementmörtel der DIN 4108-4 [78]. Die Details der verwendeten Baustoffe der betrachteten Außenwandaufbauten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die Wärmeleitfähigkeit und Tragfähigkeit des Porenbetonsteins wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen [79], die Werte für den Leichtbetonstein wurden nach den Vorgaben des Deutschen Leichtbetonverbandes und DIN V 18151-100 ermittelt [80]. Die technischen Spezifikationen für den betrachteten perlitegefüllten Ziegel sind einer Veröffentlichung des deutschen Poroton-Verbands entnommen [81].

Die Varianten UGZ und KSS, d. h. Außenwände mit WDVS, bestehen im Wesentlichen aus Innenfarbe, Innenputz, Mauerwerk, Dämmstoff, Dämmstoffbefestigung und Außenputz. Die Werte für den ungefüllten Ziegel sind einer Veröffentlichung der Arbeitsgruppe Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie entnommen [82]. Die Werte für den Kalksandstein entsprechen der DIN EN 771-2 [83] und der DIN 2000-402 [84] und stammen aus Herstellerangaben [85]. Die Breite des Kalksandsteins wurde mit 24 cm angenommen, um die entsprechenden Anforderungen an die Druckfestigkeit zu gewährleisten. Bei allen Varianten wurden Bitumenemulsion und -bahnen für die Kelleraußenwände eingesetzt, um die Anforderungen an die Abdichtung zu erfüllen. Andere Daten, wie z. B. Kleber und Oberputz, stammen aus der Ökobilanzdatenbank *GaBi*. Die Struktur der Wandaufbauten ist in Bild 6 dargestellt.

3.2.2 Methode

In einem ersten Schritt werden die Material- und Klimafußabdrücke der untersuchten Varianten für die Lebenszyklusphase A1–A3 bestimmt. Die Berechnung erfolgt pro Quadratmeter Nutzfläche eines Referenzgebäudes. In einem zweiten Schritt wird zusätzlich der

Energieaufwand für die Gebäudeenergie (Lebenszyklusphase B6) berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr, bei einer angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren.

3.2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Material- und Klimafußabdrücke für die untersuchten Varianten von Außenwandaufbauten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Materialfußabdruck, gemessen als RMI, bspw. für die Innenfarbe mehr als das 14-fache ihres Eigengewichts beträgt. Dies ist vor allem auf den Gehalt an Titan in Höhe von 48 % und die rohstoffintensive Herstellung von Titan in Höhe von 60 kg Rohstoff pro kg Titan zurückzuführen. Der Hauptbestandteil von Dünnbettmörtel und Außenputz ist Zement, der im Wesentlichen über die Energierohstoffe zum RMI beiträgt. Der Porenbetonblock hat den höchsten RMI der untersuchten Varianten, obwohl seine Masse geringer ist als die Masse des Leichtbetonblocks und die Masse des perlitegefüllten Ziegels. Der Materialfußabdruck von perlitegefüllten Ziegeln und ungefüllten Ziegeln, gemessen als TMR, ist relativ hoch, da der Anteil der ungenutzten Extraktion das 1,2-fache bei dem perlitegefüllten Ziegel und das 1,7-fache bei dem ungefüllten Ziegel im Vergleich zu ihrer Masse beträgt. Die Herstellung des WDVS mit SW weist ebenfalls einen vergleichsweise hohen Materialfußabdruck auf, der sich aus den Werten für den Kleber, Dämmstoff, das Glasfasergewebe und den Oberputz zusammensetzt. Der Gips-Innenputz hat einen hohen Wasseranteil, der über den Materialfußabdruck jedoch nicht ausgewiesen wird.

Die PBB- und UGZ-Variante weisen den höchsten Klimafußabdruck auf, wobei der Produktionsprozess den größten Beitrag leistet. Auch die Herstellung der Porenbetonsteine hat eine hohe Klimawirkung, die sich hauptsächlich durch das Mischen, Gießen, Schneiden und Aushärten ergibt. Die THG-Emissionen bei der Herstellung des WDVS mit SW sind im Vergleich zur Herstellung mit EPS mehr als doppelt so hoch. Die Produktionsprozesse des Kalksandsteins und des WDVS verursachen 86 % der THG-Emissionen der KSS-Variante.

Auch für die betrachteten Außenwandaufbauten gilt, dass der konkrete Anwendungsfall und damit auch die qualitativen Eigenschaften berücksichtigt werden müssen, um eine verbesserte Vergleichbarkeit hinsichtlich Ressourceneffizienz und Klimawirkung zu erzielen. Dazu werden die unterschiedlichen Varianten für den Einsatz in einem Gebäude, das mit einem Gas-Brennwertkessel über einen Zeitraum von 50 Jahren versorgt wird, miteinander verglichen. In Bild 7 sind die Ergebnisse für den Materialfußabdruck der untersuchten Außenwandaufbauten für die Herstellungsphase (A1–A3) und für die Energie zur Deckung des Heizbedarfs in der Nutzungsphase (B6) des Gebäudes pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr dargestellt.

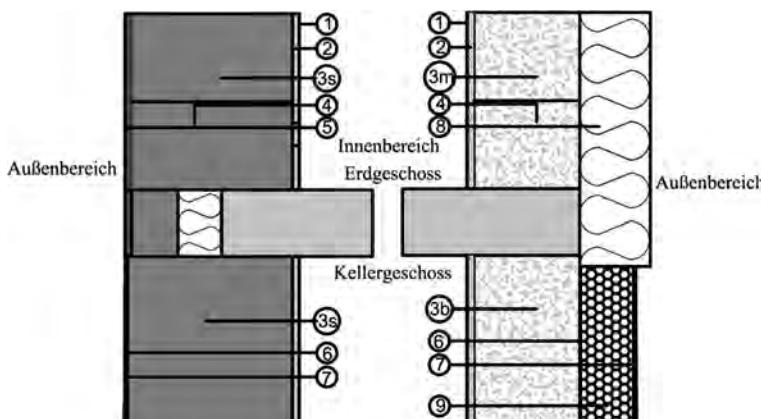


Bild 6. Schematische Darstellung der untersuchten Wandaufbauten; a) Porenbetonblock und Leichtbetonblock und perlitgefüllter Ziegel; b) ungefüllter Ziegel und Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem

Tabelle 6. Materialfußabdruck, gemessen in Rohstoffeinsatz (RMI) und Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) und Klimafußabdruck, gemessen in Global Warming Impact (GWI) der untersuchten Varianten von Außenwandaufbauten pro Quadratmeter Nutzfläche eines Referenzgebäudes: PBB: Porenbetonblock; LBB: Leichtbetonblock; PGZ: Perlitgefüllter Ziegel; UGZ: Ungefüllter Ziegel; EPS: Expandiertes Polystyrol; XPS: Extrudiertes Polystyrol; SW: Steinwolle; WDVS: Wärmedämmverbundsystem

	Baustoff	Nr. siehe Bild 6	Masse [kg/m ²]	RMI [kg/m ²]	TMR [kg/m ²]	GWI [kg CO ₂ eq./m ²]
	Gemeinsame Baustoffe					
	Innenfarbe	1	0,32	4,74	5,31	0,58
	Gips-Innenputz	2	11,83	9,70	10,01	1,50
	Dünnbettmörtel	4	3,47	7,16	7,33	1,34
	Zementmörtel	5	7,45	15,02	15,44	2,82
	Bitumenemulsion	6	0,07	0,11	0,12	0,02
	Bitumenbahn	7	1,46	3,61	3,64	0,54
Außenwand-alternative	Bau- und/oder Dämmelement	Nr. siehe Bild 6	Masse [kg/m ²]	RMI [kg/m ²]	TMR [kg/m ²]	GWI [kg CO ₂ eq./m ²]
PBB	Porenbetonblock	3s	135,88	302,49	308,14	60,57
LBB	Leichtbetonblock	3s	230,28	273,81	277,16	29,88
PGZ	Perlitziegel	3s	232,01	259,01	541,88	36,78
UGZ	Ungefüllter Ziegel	3m	227,12	392,32	781,46	54,90
	WDVS mit EPS	8	6,86	24,34	25,34	7,78
KSS	Kalksandstein	3m	156,54	230,62	231,28	18,48
	WDVS mit SW	8	15,33	71,97	74,92	17,23
	Kalksandstein (Keller)	3b	126,00	185,63	186,16	14,87
	XPS	9	1,12	7,32	7,44	3,12
	WDVS für XPS (Haftvermittler und Silikonharzputz)	9	3,59	10,56	11,04	1,86

2.1 Marktanteile

Laut einer Umfrage, die die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) Ende 2020 unter Unternehmen des Bausektors und Verbänden durchgeführt hat, dominieren in Deutschland noch konventionelle, d. h. synthetische Dämmstoffe den Markt [1]. Das größte Absatzvolumen erreichen demnach Dämmstoffe, die aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, wie beispielsweise Polystyrolschäume (EPS, XPS). Ihr Absatzvolumen betrug im Erhebungszeitraum (2019) 18,5 Mio. Kubikmeter, was einem Marktanteil von ca. 48 % entspricht. Dicht dahinter rangieren Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen wie Mineralfaser (Glaswolle, Steinwolle), die auf ein Absatzvolumen von 16,5 Mio. Kubikmeter kommen, entsprechend einem Anteil von ca. 43 %. Dagegen ist der Absatz von nachhaltigen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (nawaRo) mit lediglich 3,5 Mio. Kubikmeter relativ gering. Sie kommen lediglich auf einen Marktanteil von ca. 9 % gemessen am gesamten Volumen. Von diesen 9 %, den die Dämmstoffe aus nawaRo ausmachen, überwiegen Produkte aus Holzfasern (ca. 58 %), gefolgt von Zellulose (ca. 32 %). Die anderen nawaRo-Dämmstoffe wie beispielsweise Flachs, Hanf, Schafwolle, Reet, Stroh, Kokosfasern usw. teilen sich die verbleibenden 10 %. Sie spielen somit nur eine untergeordnete Rolle und machen nicht einmal 1 % des gesamten Absatzes aus (Bild 2). Allerdings ist positiv zu bewerten, dass der Marktanteil der Dämmstoffe aus nawaRo in Deutschland von 2011 bis 2019 um ca. 2 % gestiegen ist. Die Branche erwartet hier in Zukunft weitere Steigerungen, auch durch die Sensibilität der Öffentlichkeit für nachhaltiges und umweltgerechtes Bauen.

Allerdings bestehen nach wie vor verschiedene Hindernisse in Form von Bauvorschriften und Anforderungen, die die Anwendung von Dämmstoffen aus nawaRo erschweren. Beispielhaft seien hier die Anforderungen an den Brandschutz genannt, die den Einsatz von Dämmstoffen aus nawaRo aufgrund ihres Brandverhaltens für verschiedene Anwendungsgebiete nicht ermöglichen; siehe hierzu die Abschnitte 2.7 und 3.3.

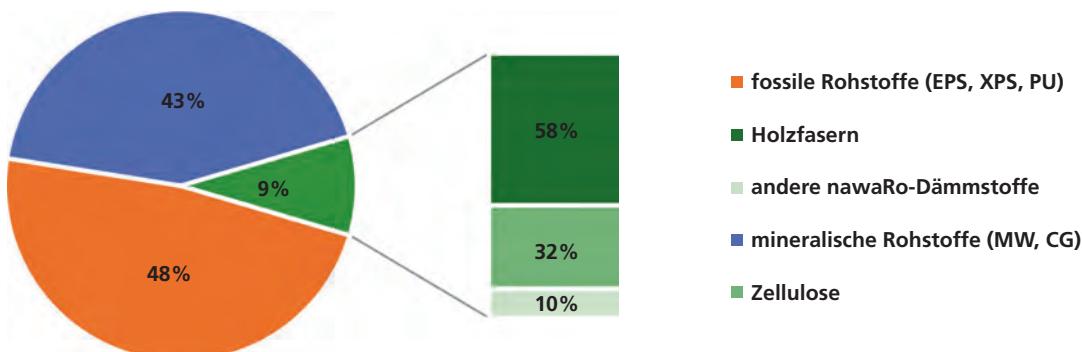


Bild 2. Absatzvolumen von Dämmstoffen in Deutschland auf Grundlage einer Umfrage der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) für den Erhebungszeitraum 2019

2.2 Primärenergieinhalt, CO₂-Emissionen

Der Primärenergieinhalt (PEI) gibt die zur Herstellung des Dämmstoffs erforderliche Energiemenge an. Er ist unmittelbar von der Art und vom Umfang der Verarbeitungsprozesse abhängig. Prozesse, bei denen die Rohstoffe erhitzt werden müssen, benötigen viel Energie und führen somit zu einem hohen Primärenergieinhalt. Typische Dämmstoffe mit einem hohen PEI sind beispielsweise Polystyrolschäume (insbesondere extrudiertes Polystyrol, XPS), Polyurethanschäume (PU), Schaumglas (CG) und Glaswolle. Auch Holzwolleleichtbauplatten (HWL) zählen zu den Dämmstoffen mit einem vergleichsweise hohen PEI, obwohl sie zu einem überwiegenden Teil aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz hergestellt werden. Hinsichtlich des Primärenergieinhalts sind sie daher als ungünstig zu bewerten. Dagegen benötigen Herstellungsprozesse, bei denen die Ausgangsmaterialien nur mechanisch zerkleinert und ggf. noch weiter ohne Erhitzung behandelt werden müssen, deutlich weniger Energie. Typische Vertreter mit einem niedrigen PEI sind Dämmstoffe, die aus nachwachsenden und natürlichen Rohstoffen bei geringem Energieaufwand hergestellt werden. Hierzu zählen beispielsweise Materialien aus Flachs, Hanf, Holzfasern oder Schafwolle. Auch Dämmstoffe aus Recyclingmaterialien weisen einen niedrigen PEI auf, wie beispielsweise Zellulosefasern. Dies wird damit begründet, dass für ihre Herstellung ebenfalls nur Prozesse erforderlich sind, die relativ wenig Energie benötigen wie z. B. Zerkleinerung und ggf. Imprägnierung. Allerdings ist bei dieser Betrachtungsweise kritisch anzumerken, dass der Energieaufwand, der ursprünglich für die Herstellung dieser Recyclingstoffe aufgewendet wurde, bei der Berechnung des Primärenergieinhalts nicht berücksichtigt wird (Bild 3). Für die Bewertung von Dämmstoffen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit sind auch die CO₂-Emissionen, die beim Herstellungsprozess entstehen, eine entscheidende Einflussgröße. Außerdem sollten auch anfallende Emissionen infolge des Transports und ggf. weiterer Prozesse (z. B. Montage, Rückbau) bei der Bewertung berücksichtigt werden.

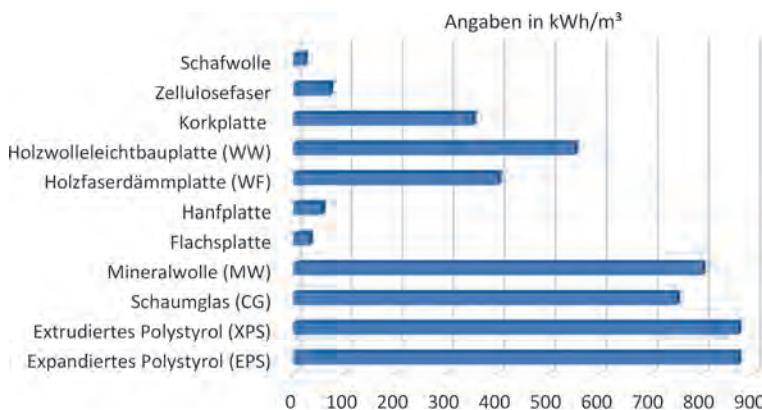


Bild 3. Primärenergieinhalt (PEI) verschiedener Dämmstoffe

tung berücksichtigt werden. Grundsätzlich schneiden hierbei Dämmstoffe aus heimischen, nachwachsenden Rohstoffen (wie z. B. Holzfasern) besser ab als Produkte, für deren Herstellung fossile Energieträger aufgewendet werden und bei denen lange Transportwege anfallen (siehe Abschnitt 2.3).

2.3 Rohstoffe, Transport

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Dämmstoffen spielen neben dem Primärenergieinhalt auch Kriterien wie die Art der Rohstoffe sowie ihr An- und Abbau, ihre Herkunft und die Transportwege eine entscheidende Rolle. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen gelten zwar als nachhaltig gegenüber konventionellen Dämmmaterialien, allerdings ist hierbei zu beachten, dass durch den Anbau von nachwachsenden pflanzlichen Rohstoffen wie zum Beispiel Flachs und Hanf teilweise große Bodenflächen benötigt werden, die für Pflanzen für Nahrungsmittel nicht mehr zur Verfügung stehen. Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen, die bei der Herstellung von Bauprodukten oder anderen Gütern anfallen, wie z. B. Holzfasern, sind daher besser zu bewerten. Bei mineralischen Rohstoffen, z. B. Gesteine zur Herstellung von Mineralwolle, sind dagegen umweltschonende Abbauverfahren für die Bewertung der Nachhaltigkeit relevant. Ein weiteres Kriterium für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Dämmstoffen sind die Transportwege für die Rohstoffe. Besonders gut schneiden hierbei Rohstoffe ab, die regional verfügbar sind und nur über kurze Entfernung transportiert werden müssen wie z. B. Holz und Zellulose. Bei Schafwolle hingegen ist zu beachten, dass für deren Transport je nach Herkunftsland erhebliche Transportwege anfallen können, wenn diese von anderen Kontinenten importiert wird, wie beispielsweise bei Schafwolle aus Australien. Auch Kokosfasern sind aufgrund des langen Transports aus Übersee eher ungünstig zu bewerten.

2.4 Schädliche Inhaltsstoffe

Nachhaltige Dämmstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine für die Umwelt oder den Menschen bzw. andere Lebewesen schädlichen Inhaltsstoffe oder Substanzen enthalten. Entscheidend ist, ob schädliche Substanzen im Dämmstoff gebunden sind und somit keine Gefahr darstellen oder frei vorhanden sind und daher beispielsweise ausdiffundieren können. Als schädliche Substanzen gelten beispielsweise Borsalze, die in vielen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen als Flammenschutzmittel zur Verbesserung des Brandschutzes eingesetzt werden. Dagegen ist Formaldehyd in Mineralwolle und Styrol in Polystyrolen unbedenklich, da es in der Regel in chemisch gebundener Form vorliegt.

2.5 Entsorgung, Rückführung in die natürlichen Stoffkreisläufe, Wiederverwertung

Nachhaltige Dämmstoffe lassen sich beim Rückbau oder Abbruch problemlos in die natürlichen Stoffkreisläufe zurückführen. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können beispielsweise kompostiert werden, wenn sie keine künstlichen Bestandteile wie synthetische Fasern enthalten oder mit Flammenschutzmitteln imprägniert sind. Dämmstoffe aus aufgeblähten mineralischen Stoffen können als Zuschläge für Beton und Mörtel wiederverwendet werden, sofern sie keine schädlichen Substanzen wie z. B. Borsalze (Flammenschutzmittel) enthalten. Dagegen sind Dämmstoffe aus Mineralwolle in der Regel nicht ohne Weiteres für eine Rückführung in die Stoffkreisläufe geeignet und müssen deponiert werden. Dämmstoffe aus Polystyrolen (EPS, XPS) lassen sich thermisch verwerten, sodass ein großer Teil ihres Energieinhalts genutzt werden kann.

2.6 Zertifizierung und Gütesiegel

Der Nachweis der Qualität der umweltschonenden Eigenschaften nachhaltiger Dämmstoffe wird durch eine entsprechende Zertifizierung erbracht. Beispielsweise existieren das Zertifikat „natureplus“ des gleichna-

migen Vereins [2], das Gütesiegel „Blauer Engel“ [3] und das RAL-Gütezeichen [4].

Das Zertifikat von „natureplus“ bestätigt die Einhaltung hoher Anforderungen auf allen relevanten Gebieten der Nachhaltigkeit von Bauprodukten und genießt sowohl bei Baufachleuten und Verbrauchern als auch bei Umweltverbänden, Regierungsinstitutionen und Systemen der Gebäudebewertung eine hohe Anerkennung. Maßgebende Kriterien für die Zertifizierung sind die Ökobilanz des Herstellungsprozesses (z. B. Primärenergieverbrauch, CO₂-Emissionen), produkt-spezifische Laboruntersuchungen (auf schädliche Substanzen wie Formaldehyd-Emissionen, Schwermetalle, Biozide) sowie die Analyse des Produktkreislaufs hinsichtlich umweltverträglicher Ressourcengewinnung und Wiederverwertung. Mit dem Umweltzeichen von natureplus werden nur solche Dämmstoffe ausgezeichnet, die mindestens zu 85 % aus nachwachsenden oder mineralischen Rohstoffen bestehen. Außerdem dürfen die Dämmstoffe einen bestimmten Primärenergieinhalt nicht überschreiten (dieser ist abhängig vom Rohstoff) und keine Stoffe enthalten, die gesundheits- oder umweltschädlich sind. Eine Datenbank enthält eine umfangreiche Liste aller zertifizierten Dämmstoffe aus nachwachsenden und mineralischen Rohstoffen; siehe www.natureplus-database.org.

Das Gütezeichen „Blauer Engel“ wird für Bauprodukte verliehen, die umweltschonend sind, als gesundheitlich unbedenklich gelten und keine Schadstoffe enthalten. Mit diesem Gütezeichen werden Dämmstoffe aus Steinwolle und Glaswolle sowie Holzwolleprodukte zertifiziert.

Das RAL-Gütezeichen dient zur Zertifizierung von Dämmstoffen aus Mineralwolle und gibt an, dass diese Stoffe keine krebsverursachenden Mineralfasern enthalten, die in die Lunge gelangen können.

2.7 Vor- und Nachteile

Allen Dämmstoffen aus nawaRo ist gemeinsam, dass ihre Rohstoffe organischen Ursprungs sind. Dadurch ergeben sich die bereits genannten Vorteile wie ein geringerer PEI, geringere CO₂-Emissionen, teilweise CO₂-Speicher, gute Umweltverträglichkeit und problemlose Rückführbarkeit in die Stoffkreisläufe.

Neben diesen Vorteilen dürfen allerdings einige Nachteile gegenüber konventionellen Dämmstoffen nicht unberücksichtigt bleiben.

Beispielhaft seien hier Defizite beim Brandschutz genannt. Da Dämmstoffe aus nawaRo aus organischen Rohstoffen hergestellt werden, gelten sie als brennbar und werden nach der Klassifizierung der DIN 4102-1 [5] in Baustoffklasse B (brennbar) eingestuft. Dabei werden die meisten Dämmstoffe aus nawaRo der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zugeordnet. Auch nach der europäischen Baustoffklassifizierung nach DIN EN 13501-1 [6] erfolgt eine Einstufung in die Klassen D und E (normalentflammbar, brennendes Abtropfen/Abfallen). Aus diesen Gründen

ist die Anwendung von Dämmstoffen aus nawaRo zurzeit im Regelfall auf die Gebäudeklassen 1 bis 3 (Gebäude geringer Höhe bis 7 m) begrenzt. Die Anforderungen an den Brandschutz ergeben sich aus der Musterbauordnung (MBO) [7], die hier stellvertretend für die Landesbauordnungen herangezogen wird. Nach MBO § 28 müssen die Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe schwerentflammbar oder nichtbrennbar sein. Dies entspricht Baustoffklasse B1 nach der Klassifizierung der DIN 4102-1. Außerdem wird gefordert, dass Dämmstoffe nicht brennend abfallen oder abtropfen dürfen. Diese Regeln gelten allerdings nicht für die Gebäudeklassen 1 bis 3, d. h. für Gebäude niedriger Höhe bis 7 m. Hier dürfen auch normalentflammbar Dämmstoffe (Baustoffklasse B2 nach DIN 4102) eingesetzt werden. Bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 (bis 13 m) und 5 (bis 22 m) sind zwingend nichtbrennbare Dämmstoffe vorgeschrieben. Gleiches gilt für Hochhäuser (Höhe > 22 m).

Hinweis: Die angegebenen Maße beziehen sich auf den Abstand zwischen der Oberkante Fertigfußboden des höchstgelegenen Geschosses mit Aufenthaltsräumen und der Geländeoberfläche. Als Fazit kann festgehalten werden, dass Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen aus Gründen des Brandschutzes zurzeit nur für Gebäude niedriger Höhe (bis 7 m) zugelassen sind, sofern sie der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zugeordnet sind. Für eine breitere Anwendung sind Verbesserungen des Brandverhaltens erforderlich, um die aktuellen Anforderungen an den Brandschutz gemäß LBO zu erfüllen.

Weiterhin ist zu beachten, dass einige Dämmstoffe aus nawaRo im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen etwas schlechtere Kennwerte für die Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Ein Beispiel hierfür sind Strohplatten, für die ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,090 bis 0,102 W/(m K) angegeben wird. Dagegen erreichen die meisten anderen nawaRo-Dämmstoffe ähnliche Werte für die Wärmeleitfähigkeit wie konventionelle Dämmstoffe und sind daher als gleichwertig anzusehen. Beispielhaft seien hier Dämmstoffe aus Flachs und Hanf (jeweils 0,040 W/(m K)) sowie Holzfasern (0,034 bis 0,063 W/(m K)) genannt. Positiv hervorzuheben ist Schafwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von nur 0,035 W/(m K).

2.8 Anwendungsgebiete

Dämmstoffe aus nawaRo eignen sich sowohl als Wärmedämmung zur Verbesserung der energetischen Qualität als auch als Hohlräumdämmung oder biegeweiche Zwischenschicht bei Vorsatzkonstruktionen zur Verbesserung der Schalldämmung von Bauteilen.

Als Wärmedämmstoff kommen nawaRo-Dämmstoffe allerdings nur für die Dämmung von luftberührten Außenbauteilen wie Außenwände und Dachflächen in Frage. Dabei können sie außenseitig hinter einer Bekleidung oder auch als Innendämmung ange-

wendet werden. Zusammendrückbare Dämmstoffe wie z. B. Hanf eignen sich auch als Gefachdämmung (z. B. als Zwischensparrendämmung). Für Anwendungen im Erdreich als Perimeterdämmung sind nawaRo-Dämmstoffe aufgrund der organischen und nicht resistenten Grundstoffe grundsätzlich nicht geeignet.

Weiterhin können Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zur Verbesserung der Schalldämmung von Bauteilen eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind nichttragende Innenwände in Trockenbauweise sowie Holzbalkendecken. Hierbei wird im Schalenzwischenraum bzw. in den Gefachen Dämmstoff eingebracht, wodurch die Luftschalldämmung des Bauteils deutlich verbessert wird. Der Dämmstoff darf hierbei nicht den gesamten Schalenzwischenraum ausfüllen, sondern sollte nur einseitig angeordnet werden. Er darf außerdem keine zu große Steifigkeit aufweisen. Geeignete nawaRo-Dämmstoffe für diesen Anwendungszweck sind beispielsweise Hanf und Flachs. Ein weiteres Anwendungsgebiet ergibt sich als Trittschalldämmung von schwimmenden Estrichen. Eine Übersicht über die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen sowie wichtige Kenndaten und Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Zum Vergleich enthält diese Tabelle auch die Daten der beiden in Deutschland am häufigsten verwendeten konventionellen Dämmstoffe – Mineralwolle (MW) nach DIN EN 13162 [8] und expandiertes Polystyrol (EPS) nach DIN EN 13163 [9].

3 Anforderungen und Regelwerke

Für die Anwendung von Wärmedämmstoffen aus nawaRo bei Neubauten und im Bestand sind im Wesentlichen folgende Anforderungen und Regelwerke zu beachten:

- **Wärmeschutz:** Gebäudeenergiegesetz (GEG) [10] sowie mitgeltende Normen und Vorschriften (u. a. DIN 4108 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“ [11]),
- **Anwendung und Eigenschaften von Wärmedämmstoffen:** DIN 4108-10 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe“ sowie Produktnormen und bauaufsichtliche Zulassungen,
- **Brandschutz:** Landesbauordnungen (LBO) sowie mitgeltende Normen und Vorschriften (u. a. DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ [12], DIN EN 13501 „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“ [13]),
- **Weitere Anforderungen:** z. B. Denkmalschutz, Abstandflächen (LBO), Regelungen zur Duldung der Überbauung fremder Grundstücke mit Wärmedämmsschichten.

3.1 Anforderungen an den Wärmeschutz und äquivalente Dämmschichtdicken

An beheizte Bereiche von Gebäuden werden Anforderungen an den Wärmeschutz gestellt. Hierbei ist zwischen Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz nach den Regeln des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) sowie den Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 [14] zu unterscheiden. Der energiesparende Wärmeschutz umfasst sämtliche Maßnahmen, die eine Einsparung der Energieaufwände für Raumwärme (und ggf. Kühlung) sowie Warmwasser bewirken. Maßnahmen des Mindestwärmeschutzes zielen darauf ab, einerseits ein behagliches und hygienisches Raumklima sicherzustellen und andererseits das Risiko des Schimmelpilzwachstums zu

Tabelle 1. Anwendungsgebiete sowie wärme- und brandschutztechnische Kennwerte von verschiedenen Dämmstoffen

Dämmstoff	Regelung/ Zulassung	Rohstoffe	Wärmeleitfähigkeit λ_B [W/(m K)]	Baustoffklasse nach DIN 4102	Anwendungs- gebiete	Bemerkung
Flachsplatte (nawaRo)	ETA	Flachsfasern Stärke als Bindemittel Borsalze (als Flammschutzmittel)	0,040	B2	Zwischensparrendämmung, Hohlräum-dämmung	Borsalze schwach wassergefährdend
Hanfplatte (nawaRo)	ETA	Hanffasern, synthetische Fasern als Verstärkung, Flammschutzmittel	0,040	B2	oberste Ge- schossdecken, Außenwände, Dächer	druckbelastbar Flammschutzmittel
Holzfaserplatte (WF) (nawaRo)	DIN EN 13171 [7]	Holzfasern (Holzhackschnitzel), Paraffin als Hydrophobierungsmittel, Bindemittel	0,034 bis 0,063 (nach DIN 4108-4)	B2 (B1)	Außenwände, Zwischensparrendämmung, Aufsparrendämmung, Decken	druckbelastbar

Tabelle 1. Anwendungsgebiete sowie wärme- und brandschutztechnische Kennwerte von verschiedenen Dämmstoffen (Fortsetzung)

Dämmstoff	Regelung/ Zulassung	Rohstoffe	Wärmeleitfähigkeit λ_B [W/(m K)]	Baustoffklasse nach DIN 4102	Anwendungs- gebiete	Bemerkung
Holzwolleleicht- bauplatte (WW) (nawaRo)	DIN EN 13168 [5]	Holzwolle, Bindemittel (zementgebunden)	0,063 bis 0,105 (nach DIN 4108-4)	B1	Wände in Holzbauweise (u. a. als Putzträger)	druckbelastbar hoher PEI
Kokosfaserplatte (nawaRo)	k. A.	Fasern aus Kokosbast	0,040 bis 0,045	B2	Außenwände, Dächer, Dämmung unter Estrich	druckbelastbar
Korkplatte (nawaRo)	DIN EN 13170 [6]	Korkrinde Hydrophobierungs- mittel	0,040 bis 0,045	B2		druckbelastbar
Schafwolleplatte (nawaRo)	k. A.	Schafwolle, synthetische Fasern zur Verstärkung, Flammschutzmittel	0,035	B2	Zwischenspar- rendämmung	hoher Feuchtegehalt beeinträchtigt Wärmeleitfähigkeit kaum
Strohplatte (nawaRo)	abZ	Stroh, Kaschierung aus Glasgewebe, Pappe	0,090 bis 0,102	B2	Außen-/Innen- dämmung Gefach- dämmung	regionaler Rohstoff
Seegras (nawaRo)	abZ	Seegras	0,046	B2	Hohlräum- dämmung, Dachdecken	bei Einbau in Außenbauteile sind Voraussetzungen in der abZ zu beachten (u. a. Einbaufeuchte)
Zellulose (nawaRo)	abZ	Papier (Altpapier), synthetische Fasern aus Polyester, Borsalze (Flammschutzmittel)	0,040	B2	DAD, DI, DZ WH, WI	gering druckbelastbar Borsalze schwach wassergefährdend
Expandiertes Polystyrol (EPS) (konventioneller Dämmstoff)	DIN EN 13163	Styrol, Treibmittel, Flammschutzmittel	0,031 bis 0,052	B1	Dämmung von Wänden, WDVS, Decken	beständig gegen Verrottung
Mineralwolle (MW) (konventioneller Dämmstoff)	DIN EN 13162	Glaswolle: Altglass, Quarzsand, Mineralöl	0,031 bis 0,052	A	Dämmung von Dächern, Zwischenspar- rendämmung, Außenwand- dämmung	nichtbrennbar

Erläuterungen:

Baustoffklassen: A: nicht brennbar; B1: schwer entflammbar; B2: normal entflammbar (nach DIN 4102-1)

abZ: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt, Berlin))

ETA: European Technical Approval (europäische Zulassung; s. DIBt)

Anwendungsgebiete (nach DIN 4108-10):

DAD: Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen

DI: Innendämmung der Decke (unterseitig)/des Daches

DZ: Zwischensparrendämmung

DEO: Innendämmung der Decke (oberseitig)

WH: Dämmung von Holzrahmen- oder Holztafelbauweise

WI: Innendämmung der Wand

minimieren. Beide Forderungen, d. h. der energiesparende Wärmeschutz sowie der Mindestwärmeschutz, erfordern bei Außenbauteilen im Regelfall die Anordnung einer Wärmedämmeschicht, sofern nicht die Bauteile selbst in der Lage sind, den Wärmedurchgang ausreichend zu begrenzen.

3.1.1 Energiesparender Wärmeschutz für zu errichtende Gebäude nach GEG

Für zu errichtende Gebäude werden die Anforderungen an den energiesparenden Wärmeschutz mithilfe eines Referenzgebäudes definiert, dessen technische Ausführung im GEG getrennt für Wohngebäude und Nichtwohngebäude festgelegt ist. Hier sind jeweils auch konkrete Angaben zu den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von Bauteilen der wärmeübertragenden Umfassungsfläche enthalten (Tabelle 2).

Beispielsweise ist für Außenwände von Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden mit Raum-Solltemperaturen im Heizfall von mindestens 19 °C ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für das Referenzgebäude festgelegt. Für Nichtwohngebäude mit niedrigen Raum-Solltemperaturen (mind. 12 °C) beträgt der Referenzwert dagegen $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Für Dächer von Wohn- und Nichtwohngebäuden ($\geq 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$) beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient des Referenzgebäudes $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Für Wände und Decken, die an unbeheizte Räume grenzen, ist für Wohn- und Nichtwohngebäude ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ festgelegt.

Bei der Bewertung der U-Werte des Referenzgebäudes ist zu beachten, dass der Jahres-Primärenergiebedarf des nachzuweisenden Gebäudes nicht größer als der 0,75fache Wert des zugehörigen Referenzgebäudes sein darf. Das bedeutet, dass die U-Werte

des Referenzgebäudes für eine Bemessung der Dämmeschicht von Außenbauteilen nicht ohne Weiteres geeignet sind. Vielmehr wird empfohlen, für die Ermittlung der erforderlichen Dämmeschichtstärke einen niedrigeren U-Wert anzusetzen als es dem jeweiligen Referenzwert entspricht. Für eine überschlägige Ermittlung der erforderlichen Dämmeschichtdicke können die U-Werte des Referenzgebäudes vereinfachend ebenfalls mit dem Faktor 0,75 vermindert werden. Damit wird sichergestellt, dass der Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfs erfüllt wird.

Beispielsweise ergibt sich für Außenwände von zu errichtenden Wohn- und Nichtwohngebäuden ($\geq 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ein modifizierter U-Wert von $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ($U_{\text{mod}} = 0,75 \times U_{\text{Ref}} = 0,75 \times 0,28$). Dies entspricht einer äquivalenten Dämmeschichtdicke von etwa 18 cm bis 20 cm, sofern der Einfluss anderer Bauteilschichten nicht berücksichtigt wird, die Wärmeübergangswiderstände nicht angesetzt werden und für den Dämmstoff ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 0,04 \text{ W}/(\text{m K})$ zugrunde gelegt wird. Für andere Bauteile ergeben sich die äquivalenten Dämmeschichtdicken analog.

Zusätzlich zu den Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf werden nach dem GEG Forderungen an den baulichen Wärmeschutz gestellt, indem ein energetischer Mindeststandard für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle (wärmeübertragende Umfassungsfläche) definiert wird. Bei zu errichtenden Wohngebäuden darf der Höchstwert des auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts den 1,0fachen Wert des Referenzgebäudes nicht überschreiten. Bei Nichtwohngebäuden sind Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile einzuhalten. Beispielsweise darf für opake Außenwände von

Tabelle 2. Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) des Referenzgebäudes bei zu errichtenden Gebäuden nach GEG (Auszug) und äquivalente Dämmeschichtdicken

Bauteil	Parameter	Wohngebäude	Nichtwohngebäude	
			Raum-Solltemperaturen im Heizfall $\geq 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Raum-Solltemperaturen im Heizfall $\geq 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $< 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Außenwände	U-Wert	$U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
	Dicke	$d = 16 \dots 20 \text{ cm}$	$d = 16 \dots 20 \text{ cm}$	$d = 12 \dots 16 \text{ cm}$
Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	U-Wert	$U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
	Dicke	$d = 20 \dots 28 \text{ cm}$	$d = 20 \dots 28 \text{ cm}$	$d = 12 \dots 16 \text{ cm}$
Wände und Decken zu unbeheizten Räumen, Wände gegen Erdreich, Bodenplatte	U-Wert	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
	Dicke	$d = 12 \dots 16 \text{ cm}$	$d = 12 \dots 16 \text{ cm}$	$d = 12 \dots 16 \text{ cm}$

Erläuterungen:

U-Wert: Wärmedurchgangskoeffizient

Randbedingungen für die Berechnung der äquivalenten Dämmeschichtdicke: Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs 0,040 W/(m K); keine Berücksichtigung anderer Bauteilschichten sowie der Wärmeübergangswiderstände; Aufrundung auf übliche Dämmstoffschichtdicken

Unterer Wert der Dämmeschichtdicke: Berechnung für U-Wert des Referenzgebäudes

Oberer Wert der Dämmeschichtdicke: Berechnung für 0,75fachen U-Wert des Referenzgebäudes wegen Verschärfung der Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf um 25 % gegenüber dem Wert des Referenzgebäudes (vereinfachte Annahme)

Nichtwohngebäuden mit einer Raum-Solltemperatur $\geq 19^\circ\text{C}$ ein U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ nicht überschritten werden. Dieser Wert wird eingehalten, wenn die Dämmschicht im Mittel eine Dicke mindestens 14 cm bis 16 cm aufweist (Rechenannahmen wie vorher, Tabelle 2).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Dämmschichtdicken von ca. 16 cm bis 20 cm bei Außenwänden und ca. 20 cm bis 28 cm beim Dach vorgesehen werden müssen, um die Anforderungen an den Wärmeschutz nach GEG bei Neubauten zu erfüllen.

3.1.2 Bestehende Gebäude

Auch bei bestehenden Gebäuden sind Anforderungen zu beachten, sofern Änderungen an Außenbauteilen durchgeführt werden und diese mindestens 10 % der jeweiligen Bauteilgruppe betreffen. Die Anforderungen an bestehende Gebäude sind wie für zu errichtende Gebäude im GEG festgelegt. Bekanntlich stehen zum Nachweis zwei Verfahren zur Verfügung:

- Bauteilverfahren
- Referenzgebäudeverfahren

Beim Bauteilverfahren erfolgt der Nachweis über Wärmedurchgangskoeffizienten, für die im GEG Höchstwerte festgelegt sind, die vom geänderten Außenbau teil nicht überschritten werden dürfen. Beim Referenzgebäudeverfahren ist dagegen eine energetische Gesamtbilanzierung unter Einbeziehung von Bauteilen der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik vorzunehmen. Dabei darf der Jahres-Primärenergiebedarf sowie der Transmissionswärmeverlust des geänderten Gebäudes nicht größer als der 1,4fache Wert des Referenzgebäudes sein. Der Nachweis mithilfe des Bauteilverfahrens ist wesentlich einfacher und weniger aufwendig als das Referenzgebäudeverfahren und sollte daher immer dann angewendet werden, wenn dies möglich ist, d. h. wenn lediglich Änderungen an den Außenbau teilen vorgenommen werden. Dagegen ist der Nach-

weis mithilfe des Referenzgebäudeverfahrens zwingend erforderlich, wenn beispielsweise Erweiterungen eines Gebäudes erfolgen und/oder die Anlagentechnik geändert wird. Nachfolgend wird nur das Bauteilverfahren näher betrachtet, da aus den Höchstwerten der Wärmedurchgangskoeffizienten direkt die erforderlichen Dämmschichtdicken ermittelt werden können. Diese Information ist für die energetische Sanierung der Außenbauteile von großem Interesse, beispielsweise um ein geeignetes Wärmedämmverbundsystem (WDVS) auszuwählen.

Die Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderungen sowie äquivalente Dämmschichtdicken sind auszugweise in Tabelle 3 angegeben. Beispielsweise darf der Wärmedurchgangskoeffizient von Außenwänden von Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden mit Raum-Solltemperaturen von mindestens 19°C nach einer durchgeführten Sanierungsmaßnahme nicht größer als $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ sein. Dieser Wert wird mit einer Dämmschichtdicke von ca. 16 cm bis 18 cm eingehalten, sofern unterstellt wird, dass andere Bauteilschichten vernachlässigt werden. Für Außenwände von Nichtwohngebäuden mit Raum-Solltemperaturen von 12°C bis unter 19°C wird als Höchstwert $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ gefordert. Dies entspricht einer äquivalenten Dämmsstärke von ca. 12 cm. An Dächer ohne Abdichtung, d. h. solche mit Dachdeckung, werden die gleichen Anforderungen wie an Außenwände gestellt. Höhere Anforderungen müssen Dachflächen mit einer Abdichtung (Flachdächer) erfüllen, wenn die Abdichtung ersetzt wird. In diesem Fall darf der Wärmedurchgangskoeffizient bei Wohn- und Nichtwohngebäuden ($\geq 19^\circ\text{C}$) nicht größer als $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ sein. Diese Anforderung ist mit Dämmsstärken von ca. 20 cm zu erreichen. Für weitere Bauteile wird auf das GEG verwiesen.

Aufgrund der Anforderungen an bestehende Gebäude ergeben sich bei Wohn- und Nichtwohngebäuden

Tabelle 3. Einzuhaltende Wärmedurchgangskoeffizienten (Höchstwerte) von Außenbauteilen bei bestehenden Gebäuden nach GEG (Auszug) und äquivalente Dämmschichtdicken

Bauteil	Art der Maßnahme	Parameter	Wohngebäude und Nichtwohngebäude mit Raum-Solltemperaturen $\geq 19^\circ\text{C}$	Nichtwohngebäude mit Raum-Solltemperaturen im $\geq 12^\circ\text{C}$ und $< 19^\circ\text{C}$
Außenwände	Ersatz, erstmaliger Einbau, Anbringen von Bekleidungen, Erneuerung des Außenputzes	U-Wert	$U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
		Dicke ¹⁾	$d \geq 16 \text{ cm}$	$d \geq 12 \text{ cm}$
Dach (mit Dachdeckung), oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	Ersatz, erstmaliger Einbau, Neuaufbau einer Dachdeckung	U-Wert	$U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Dach mit Abdichtung	Ersatz einer Abdichtung	U-Wert	$U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	$U \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
		Dicke ¹⁾	$d \geq 20 \text{ cm}$	$d \geq 12 \text{ cm}$

1) Randbedingungen für die Berechnung der äquivalenten Dämmschichtdicke: Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs $0,040 \text{ W}/(\text{m K})$; die bestehenden Bauteilschichten werden nicht angesetzt; Aufrundung auf übliche Dämmschichtdicken

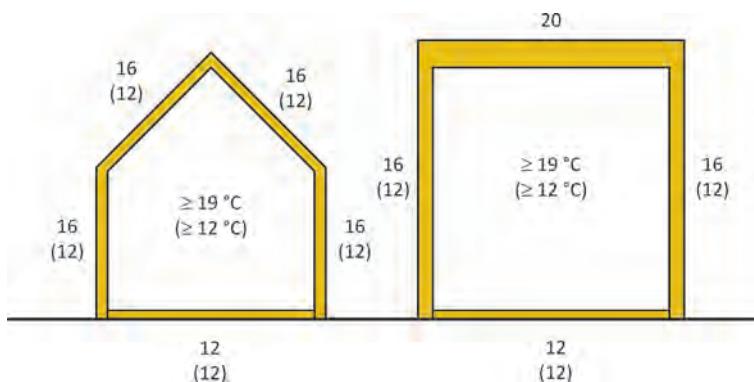


Bild 4. Erforderliche Dämmsschichtdicken in cm zur Erfüllung der Anforderungen an den Wärmeschutz nach GEG für bestehende Gebäude bei Änderungen der Außenbauteile; Randbedingungen: Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs 0,040 W/(m K); Vernachlässigung bestehender Bauteilschichten; keine Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände

($\geq 19^{\circ}\text{C}$) Dämmsschichtdicken von mindestens 16 cm für Außenwände und Dächer mit Dachdeckung (d. h. geneigte Dächer und Steildächer) sowie mindestens 20 cm bei Dachflächen mit Abdichtung (Flachdächer), wenn Änderungen vorgenommen werden. Für Nichtwohngebäude mit Raum-Solltemperaturen von mindestens 12°C bis unter 19°C sind die Anforderungen geringer. Hier reichen Dämmstärken von etwa 12 cm aus, um die Anforderungen des GEG zu erfüllen. Siehe hierzu auch die schematische Übersicht in Bild 4.

3.1.3 Mindestwärmeschutz

Anforderungen an den Mindestwärmeschutz sind in DIN 4108-2 „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“ geregelt. Die Forderungen zielen darauf ab, ein behagliches und hygienisches Raumklima zu gewährleisten und sicherzustellen, dass kritische Oberflächentemperaturen nicht unterschritten werden. Die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 sind für Regelquerschnitte deutlich geringer als die des energiesparenden Wärmeschutzes nach GEG, sodass mit den genannten Dämmsschichtdicken der Mindestwärmeschutz in der Regel gewährleistet ist. Allerdings sind auch im Bereich von Wärmebrücken Mindestanforderungen an den Wärmeschutz einzuhalten. Nach DIN 4108-2 gelten die Anforderungen als erfüllt, wenn die raumseitige Oberflächentemperatur im Bereich einer Wärmebrücke mindestens $12,6^{\circ}\text{C}$ beträgt bzw. der dimensionslose Temperaturfaktor mindestens 0,7 beträgt ($f_{Rsi} \geq 0,7$). Wärmebrücken, die den Planungs- und Ausführungsbeispielen des Beiblattes 2 zur DIN 4108 [15] entsprechen, erfüllen diese Anforderung ohne weiteren Nachweis. Ansonsten ist der Mindestwärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken durch einen Gleichwertigkeitsnachweis oder durch eine genaue Berechnung (Modellierung und Berechnung der raumseitigen Oberflächentemperaturen) zu erbringen.

3.2 Anwendungsbezogene Anforderungen, Produktnormen und bauaufsichtliche Zulassungen

Während die anwendungsbezogenen Anforderungen und Eigenschaften von konventionellen, d. h. synthetisch hergestellten Dämmstoffen im Allgemeinen in Normen umfassend geregelt sind, existieren für die meisten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bauaufsichtliche Zulassungen in Form einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer europäischen Zulassung (ETA). Beispielsweise werden in DIN 4108-10 [16], in der die anwendungsbezogenen Anforderungen an Wärmedämmstoffe geregelt sind, nur einige Dämmstoffe aus nawaRo behandelt. Im Einzelnen sind dies Holzwolle-Leichtbauplatten (WW) nach DIN EN 13168 [17], expandierter Kork (ICB) nach DIN 13170 [18] und Holzfaserdämmstoff (WF) nach DIN EN 13171 [19]. Für alle anderen nawaRo-Dämmstoffe sind die jeweils geltenden bauaufsichtlichen Zulassungen zu beachten. Für konventionelle Dämmstoffe (wie Polystyrol und Polyurethanschäume sowie Mineralwolle) steht dagegen ein umfassendes Regelwerk in Form von europäischen und nationalen Produktnormen zur Verfügung (Normenreihe DIN EN 13162 bis DIN EN 13171), in der die Anforderungen und Eigenschaften geregelt sind.

Auch wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, die für die Nachweise des Wärme- und Feuchteschutzes benötigt werden, werden in den zuständigen Normen DIN 4108-4 [20] und DIN EN ISO 10456 [21] mit wenigen Ausnahmen hauptsächlich für konventionelle Wärmedämmstoffe angegeben. Dagegen finden sich dort für die meisten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen keine entsprechenden Angaben. Stattdessen müssen die bauphysikalischen Kennwerte der nawaRo-Dämmstoffe (Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit, Richtwerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und weitere Daten,

Wärmekapazität usw.) aus den Zulassungen entnommen werden.

Durch diese teilweise historisch bedingte Vorgehensweise bei der Regelung und Normung von Wärmedämmstoffen wird die Anwendung von Dämmstoffen aus nawaRo in der Praxis erschwert. Hierbei ist zu beachten, dass bauaufsichtliche Zulassungen in der Regel zeitlich begrenzt sind und nur auf Antrag des Herstellers vom DIBT (Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin) erteilt werden. Die Geltungsdauer einer bauaufsichtlichen Zulassung beträgt i. d. R. fünf Jahre. Nach Ablauf ist ein erneuter Antrag auf Erteilung einer bauaufsichtlichen Zulassung zu stellen. Genormte Dämmstoffe haben hier einen Wettbewerbsvorteil, da die Normung unabhängig von der Initiative des Herstellers erfolgt und darüber hinaus für diesen keine Kosten verursacht.

3.3 Anforderungen an den Brandschutz

Anforderungen an den Brandschutz sind in den jeweils geltenden Landesbauordnungen (LBO) geregelt. Da die Regelungen in den verschiedenen Landesbauordnungen leicht voneinander abweichen können, wird für die folgenden Ausführungen die Musterbauordnung (MBO) in der Fassung vom November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 25.09.2020 [7] zugrunde gelegt. Die MBO wird von der Bauministerkonferenz herausgegeben und dient als Rahmenvorgabe für die einzelnen Landesbauordnungen der Bundesländer.

Regeln zur baulichen Umsetzung der Anforderungen an den Brandschutz finden sich in den einschlägigen Normen. Dies sind im Wesentlichen folgende Normenreihen:

- DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“,
- DIN EN 13501 „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“,
- DIN 18234 „Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer“ [22].

Darüber hinaus sind zusätzliche Vorschriften zu beachten, wie beispielsweise die Industriebaurichtlinie [23], die Mindestanforderungen an den Brandschutz von Industriebauten regelt.

Nachfolgend werden kurz die wichtigsten Regeln erläutert, die aus bauaufsichtlicher Sicht in Bezug auf den Brandschutz bei der Anwendung von Dämmstoffen aus nawaRo zu beachten sind. Hierbei wird auch auf etwaige Einschränkungen für nawaRo-Dämmstoffe eingegangen.

3.3.1 Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen

Nach der MBO § 26 werden Baustoffe aufgrund ihres Brandverhaltens in nichtbrennbare und brennbare Baustoffe eingeteilt. Dabei wird bei den brennbaren Baustoffen eine Unterscheidung in schwerent-

flammbare, normalentflammbare und leichtentflammbare Baustoffe vorgenommen. Normalentflammbare Baustoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass sie mit Hilfe eines Streichholzes oder Feuerzeugs entzündet werden können. Nach Entzündung brennen sie selbstständig weiter (wie z. B. Holz). Schwerentflammbare Baustoffe lassen sich dagegen erst nach längerer Dauer entzünden. Außerdem verbrennen sie nicht vollständig und erlischen wieder, wenn die Zündquelle entfernt wird. Leichtentflammbare Baustoffe können sehr leicht entzündet werden, sie brennen außerdem schnell ab. Aus diesem Grund dürfen leichtentflammbare Baustoffe nach MBO § 26 (1) nicht verwendet werden; einzige Ausnahme siehe MBO.

Die bauaufsichtliche Einteilung der Baustoffe hinsichtlich ihres Brandverhaltens in nichtbrennbar, schwerentflammbar, normalentflammbar und leichtentflammbar entspricht der Klassifizierung nach der nationalen DIN 4102-1. Dagegen wird in der europäischen Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 eine feinere Abstufung vorgenommen, indem auch weitere Eigenschaften wie brennendes Abtropfen bzw. Abfallen sowie die Rauchentwicklung berücksichtigt werden. In der europäischen Norm werden daher 7 Baustoffklassen (A1, A2, B, C, D, E und F) unterschieden und außerdem zusätzliche Klassen für brennendes Abtropfen/Abfallen (Klassen d0, d1, d2; d: droplets) und Rauchentwicklung (Klassen s1, s2, s3; s: smoke) vorgesehen. Die Zuordnung der europäischen und nationalen Baustoffklassen in die bauaufsichtlichen Bezeichnungen nach MBO erfolgt durch die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) [24]. Eine vereinfachte Zuordnung ist in Tabelle 4 angegeben; für genauere Informationen wird auf die genannten Normen sowie die MVV TB verwiesen.

Dämmstoffe aus nawaRo sind aufgrund ihrer organischen Bestandteile als brennbar einzustufen. Nach nationaler Klassifizierung nach DIN 4102-1 werden nawaRo-Dämmstoffe in der Regel der Baustoffklasse B2 (normalentflammbar) zugeordnet (Tabelle 1). Nach der europäischen Klassifizierung gehören die meisten Dämmstoffe aus nawaRo den Klassen D und E an, d. h. aus bauaufsichtlicher Sicht gelten sie ebenfalls als normalentflammbar. Als problematisch gilt die Schwelneigung, die für Dämmstoffe aus nawaRo eine typische Erscheinung beim Abbrand ist (siehe Abschnitt 3.3.3). Unter Schwelen wird die unvollständige Verbrennung eines Stoffes ohne Flammenbildung verstanden; eine weitere Bezeichnung hierfür ist Glimmen. Aufgrund der Schwelneigung vieler nawaRo-Dämmstoffe ist eine Einstufung in die europäische Klasse C (schwerentflammbar) nicht möglich, da in der MVV TB geregelt ist, dass schwerentflammbare Baustoffe generell nicht zum Schwelen neigen dürfen.

Tabelle 4. Mindestanforderungen an Baustoffe hinsichtlich ihres Brandverhaltens nach nationaler und europäischer Normung und entsprechende Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Bezeichnungen nach MBO

Norm	Bauaufsichtliche Bezeichnung nach MBO			
	nichtbrennbar	schwerentflammbar	normalentflammbar	leichtentflammbar
DIN 4102-1	A1, A2	B1	B2	B3
DIN 13501-1	A2-s1,d0	C-s2,d2	E-d2	F

Erläuterungen:

Angegeben sind jeweils die Mindestanforderungen nach MVV TB

Klassifizierung nach DIN 4102-1:

A1, A2: nichtbrennbar

B1: schwerentflammbar, B2: normalentflammbar, B3: leichtentflammbar

Klassifizierung nach DIN EN 13501-1:

A2-s1,d0: nichtbrennbar, geringe Rauchentwicklung, kein brennendes Abtropfen/Abfallen

C-s2,d2: schwerentflammbar, begrenzte Rauchentwicklung, brennendes Abtropfen/Abfallen

E-d2: normalentflammbar, brennendes Abtropfen/Abfallen

F: leichtentflammbar

Hinweis: Für Rohrisolierungen gelten gesonderte Regelungen und Anforderungen; siehe DIN EN 13501-1 sowie MVV TB

3.3.2 Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen

Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen werden in § 26 der MBO geregelt. Dabei werden Bauteile hinsichtlich ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit in feuerbeständige (fb), hochfeuerhemmende (hfh) und feuerhemmende (fh) Bauteile eingeteilt. Diese bauaufsichtlichen Bezeichnungen werden Mindestwerte der Feuerwiderstandsdauer zugeordnet (Tab. 5). Weiterhin werden die Bauteile hinsichtlich des Brandverhaltens ihrer Baustoffe unterteilt in:

- Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen,
- Bauteile mit nichtbrennbaren tragenden und aussteifenden Teilen; bei raumabschließenden Bauteilen durchgehende nichtbrennbare Schicht,
- Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und die allseitig eine Brandschutzbekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen sowie nichtbrennbare Dämmstoffe haben,
- Bauteile aus brennbaren Baustoffen.

Bauteile, die als *feuerbeständig* im Sinne der MBO gelten, müssen mindestens aus nichtbrennbaren tragenden und aussteifenden Bauteilen bestehen und bei Raumabschluss zusätzlich eine durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen aufweisen.

Bauteile, die als *hochfeuerhemmend* gelten, müssen mindestens allseitig eine Brandschutzbekleidung auf-

weisen und dürfen nur nichtbrennbare Dämmstoffe enthalten, wenn die tragenden und aussteifenden Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen. Sofern die tragenden und aussteifenden Teile nichtbrennbar sind, gibt es keine Einschränkungen. In diesem Fall können auch brennbare Dämmstoffe eingesetzt werden.

Bei *feuerhemmenden* Bauteilen gibt es keine Einschränkungen, hier können sowohl nichttragende und aussteifende Bauteile als auch alle anderen Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen. Das Bauteil muss lediglich eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 30 Minuten erreichen.

Daraus folgt, dass brennbare Dämmstoffe (wie z. B. alle Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen) nur bei hochfeuerhemmenden Bauteilen nicht zulässig sind, wenn deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen. Gemeint sind hiermit beispielsweise hochfeuerhemmende Bauteile aus Holz wie Holzbalkendecken oder Wände in Holzrahmenbauweise. Dagegen dürfen hochfeuerhemmende Bauteile mit nichtbrennbaren tragenden und aussteifenden Teilen (z. B. Trockenbauwände mit Metallständern) durchaus brennbare Dämmstoffe enthalten, wenn diese Anforderungen an den Brandschutz erfüllen müssen. Die gleiche Regelung gilt für feuerbeständige Bauteile, bei denen ebenfalls brennbare Dämmstoffe, d. h. auch Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden dürfen (Bild 5). Siehe hierzu auch die MVV TB, A2.

Tabelle 5. Bauaufsichtliche Einteilung von Bauteilen sowie zugehörige Feuerwiderstandsdauer und Kurzzeichen

Bauaufsichtliche Bezeichnung nach MBO § 26 (2)	Feuerwiderstandsdauer in Minuten	Kurzzeichen	
		nationale Normung (nach DIN 4102)	europäische Normung (nach DIN EN 13501)
feuerbeständig (fb)	≥ 90	F 90-A, F 90-AB	REI 90, EI 90, R 90
hochfeuerhemmend (hfh)	≥ 60	F 60-A, F 60-AB	REI 60, EI 60, R 60
feuerhemmend (fh)	≥ 30	F 30-B	REI 30, EI 30, R 30