



Kapitel 14

Stand: 09/2017

UMWELT UND GESUNDHEIT

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Ulrich Vogdt,
Dipl.-Ing. Juliane Nisse, TU Berlin



1. Nachhaltigkeit

1.1 Veranlassung

Durch die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ [1] des Deutschen Bundestages wurde für Deutschland das Leitbild einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung erarbeitet. Dieses Leitbild basiert insbesondere auf dem Abschlussbericht „Our Common Future“ der Brundtland-Kommission der Vereinten Nationen aus dem Jahr 1987 und der Konferenz der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Jahre 1992. Anlässlich des Erdgipfels von Rio haben 178 Staaten auf den dringenden Handlungsbedarf zur Erhaltung der Lebensgrundlagen hingewiesen. Sie haben sich dazu bekannt, das Leitbild „Sustainable Development“ auszufüllen und deshalb weitere Maßnahmen in der Umwelt-, Entwicklungs-, Sozial- und Wirtschaftspolitik gefordert. Seit 1995 finden jährliche Treffen der so genannten Vertragsstaatenkonferenz (engl. Conference of Parties/COP) statt, zuletzt im November 2017 in Bonn, in denen Bilanz gezogen wird, Ziele definiert bzw. angepasst und Wege aufgezeigt werden, um die ehrgeizigen Klimaschutzziele umzusetzen.

Das Handlungsprinzip einer nachhaltigen Entwicklung ist es, die Bedürfnisse der jetzigen Generation zu erfüllen, ohne die Möglichkeit späterer Generationen einzuschränken, ihre Bedürfnisse ebenfalls befriedigen zu können. Hieraus ergeben sich vielfältige ökonomische, ökologische und soziokulturelle Anforderungen. Beispielhaft soll dies im Folgenden für die Bereiche

- Ressourcenschonung und
- Klimaschutz

dargestellt werden.

1.2 Entwicklung

1.2.1 Ressourcenschonung Energieverbrauch

Die Notwendigkeit der Ressourcenschonung lässt sich am Beispiel des Energieverbrauchs veranschaulichen. Allein in Deutschland betrug der Primärenergieverbrauch 2016 insgesamt 539,6 Mio. t Steinkohleeinheiten SKE das entspricht 13.383 PJ (Petajoule) bzw. 3,7175 Bill. Kilowattstunden oder in Zahlen

3.717.500.000.000 kWh.

Damit ist der Primärenergieverbrauch gegenüber dem Vorjahr um 1,1 % angestiegen. Dies liegt im Wesentlichen an der kühlen Witterung im Jahr 2016. Bereinigt um den Klimaeinfluss erhöhte sich der Primärenergieverbrauch gegenüber dem Vorjahr um 0,6 % [2].

Dieser Verbrauch verteilt sich auf die verschiedenen Energieträger – Mineralöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Kernenergie, Erneuerbare Energien und sonstige Energieträger (Bild 1).

Die erneuerbaren Energieträger haben dabei derzeit in Deutschland noch einen vergleichsweise geringen Anteil an der Energieversorgung. Dieser Anteil betrug im Jahr 2011 10,9 % am gesamten Primärenergieverbrauch und stieg bis zum Jahr 2016 auf 12,6 %. Wie Prognosen zeigen, wird er im Jahr 2020 auf

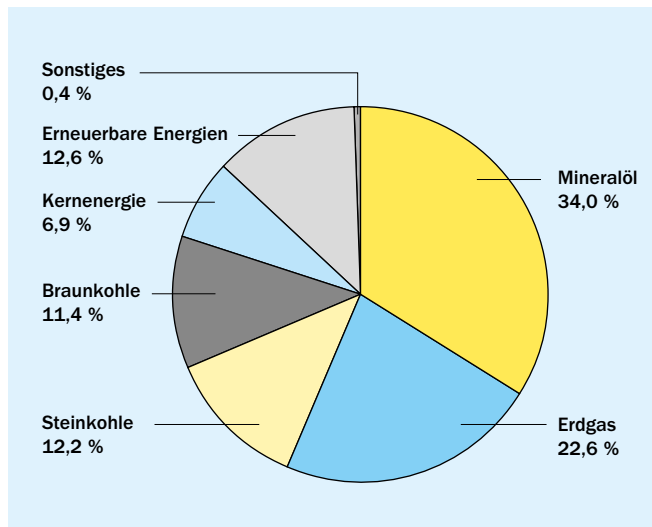


Bild 1 Primärenergieverbrauch in Deutschland: Anteile der Energieträger im Jahr 2016 [2]

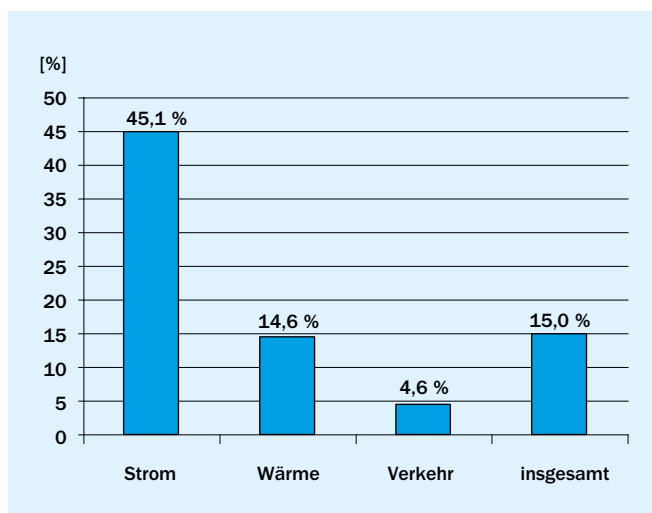


Bild 2 Primärenergieverbrauch in Deutschland: Prognose der Anteile der Erneuerbaren Energien im Jahre 2020 für die Bereiche Strom, Wärme und Verkehr [3]

insgesamt 15,0 % geschätzt (Bild 2), insbesondere getragen durch den Bereich der Stromerzeugung [3].

Die Bundesregierung strebt auf der Grundlage der EU-Richtlinie für Erneuerbare Energien eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs gegenüber dem Verbrauch von 2008 bis zum Jahr 2030 um 30 % und bis zum Jahr 2050 um 50 % an. Dies betrifft alle Sektoren der Energienutzung: die Energiegewinnung, -umwandlung, den -transport sowie die Nutzung durch den Endverbraucher [3].

Reserven und Ressourcen

Die fossilen Energiereserven sind begrenzt. Legt man die derzeitige Förderung als statische Größe zugrunde, ergeben sich bezogen auf die Energiereserven – das sind die nach derzei-

tigem Stand der Technik technisch und wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte – folgende Angaben zur Reichdauer [4]:

- Braunkohle: 317 Jahre
- Steinkohle: 106 Jahre
- Uran: 22 Jahre
- Erdgas: 55 Jahre
- Erdöl: 50 Jahre

Unter Hinzuziehung der Ressourcen (Bild 3), also den nachgewiesenen, aber derzeit technisch oder wirtschaftlich nicht gewinnbaren Vorräten oder den nicht nachgewiesenen, aber geologisch möglichen Vorräten, erhöht sich die Reichdauer erheblich. Die Gewinnung dieser Ressourcen führt jedoch in jedem Falle zu einer deutlichen Erhöhung der Kosten. Ein Beispiel: Während die Förderkosten konventioneller Öle derzeit zwischen 10 und 40 Dollar je Barrel liegen, ist bei Ölsanden und Ölschiefer von Förderkosten von bis zu 100 Dollar je Barrel auszugehen [5].

Energieeinsparpotenzial

Aus dem Energieflussbild für Deutschland (Bild 4) ergibt sich eine erste Aufschlüsselung der Verbraucher für 2016. Es zeigt sich dabei insbesondere auch die Importabhängigkeit Deutschlands im Hinblick auf die Versorgungssicherheit.

Der Endenergieverbrauch in Deutschland für 2015 lässt sich entsprechend Bild 5 differenzieren.

Einen hohen Anteil am Endenergieverbrauch haben die Haushalte, ganz besonders der Bereich Raumwärme sowie Warmwasserversorgung (Bild 6). Vorsichtige Schätzungen gehen von einem wirtschaftlich realisierbaren Einsparpotenzial für den Sektor private Haushalte – insbesondere im Gebäudebestand – von bis zu 40 % aus [6].

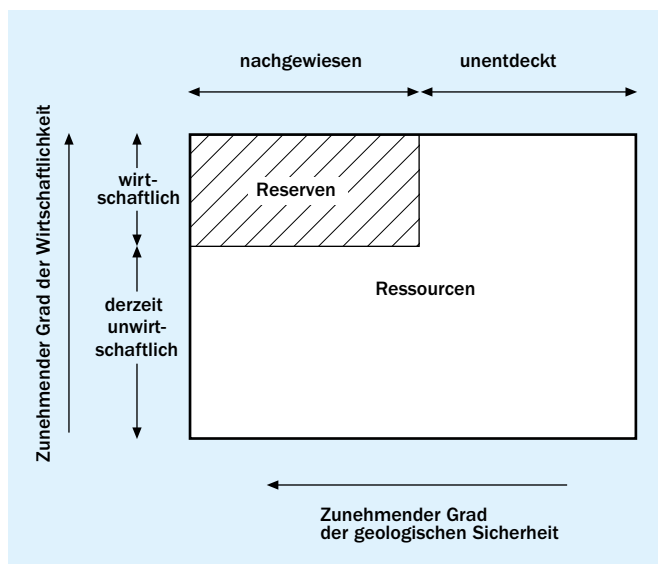


Bild 3 Reserven und Ressourcen [7]

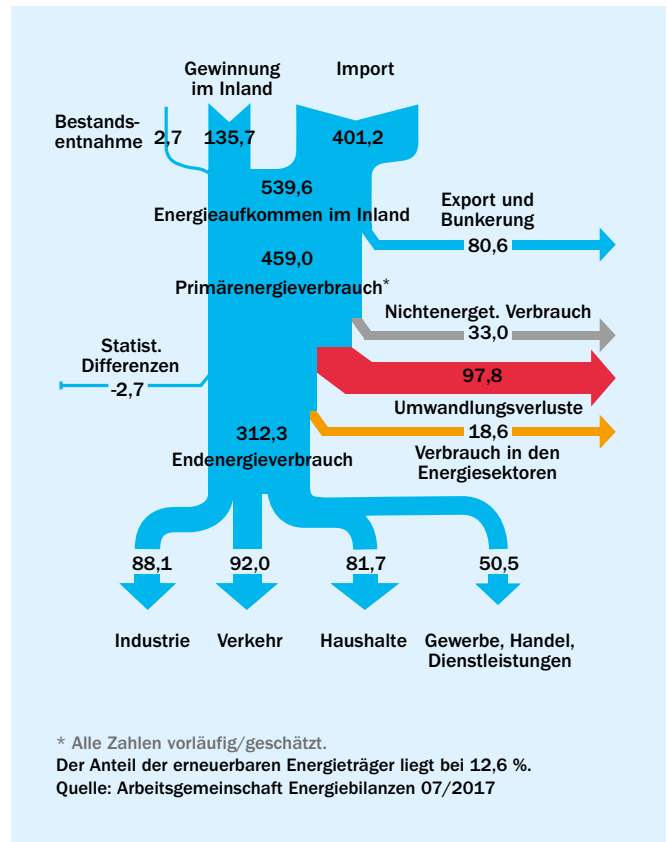


Bild 4 Energieflussbild 2016 für Deutschland in Mio. t SKE (Steinkohleeinheiten) [8]

1.2.2 Klimaschutz

Auf dem 21. Klimagipfel wurde das Paris-Abkommen beschlossen, das die weltweiten Klimaschutzziele nach Auslaufen des Kyoto-Protokolls im Jahr 2020 regeln soll. Hier haben sich die Vertragsstaaten darauf geeinigt, ihre Minderungsverpflichtungen in nationalen Klimaschutzplänen zu formulieren, im Fünf-Jahres-Rhythmus ihre Prognosen zu verifizieren und ggf. Anpassungen in ihrer nationalen Klimaschutzpolitik vorzunehmen [9].

Die EU hat sich in diesem Zusammenhang ehrgeizige Klimaschutzziele gesetzt. So sollen europaweit die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2030 um mindestens 40 % und bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 gemindert werden [10]. In Anlehnung daran hat sich Deutschland als mittelfristiges Ziel eine CO₂-Minderung von mindestens 55 % bis 2030 bzw. mindestens 70 % bis 2040 gegenüber dem Niveau vom Jahr 1990 auferlegt, um zur Erfüllung der europäischen Klimaschutzziele einen erheblichen Beitrag zu leisten [10].

Vergleicht man die Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen ausgewählter Länder bezogen auf das Jahr 1990, zeigt sich im internationalen Vergleich trotz Wirtschaftswachstum eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen in Deutschland (Bild 7). In den Bereichen Wohngebäude und Verkehr ist jedoch ein Anstieg der CO₂-Emissionen im Vergleich zum Ausgangsjahr 1990 zu verzeichnen. Dies ist bei Wohngebäuden auf den Zuwachs an zu beheizender Fläche und beim Verkehr auf den höheren PKW-Bestand zurückzuführen (Bild 8).

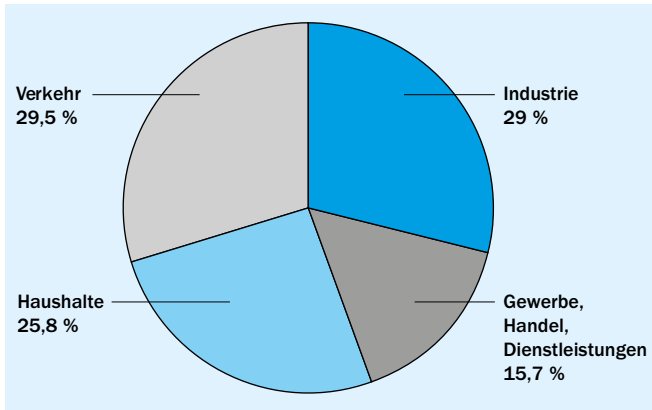


Bild 5 Endenergieverbraucher 2015 [11]

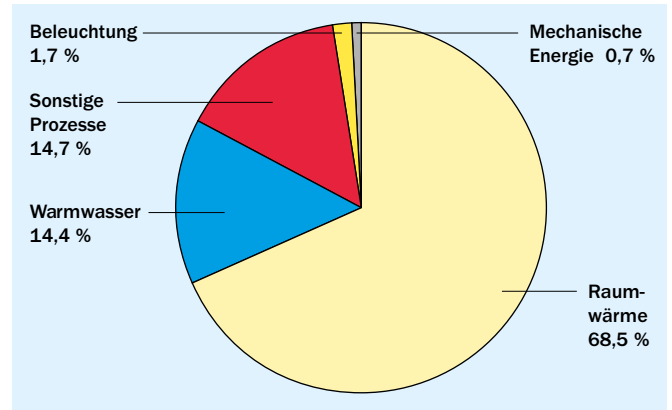


Bild 6 Anteile der Anwendungsbereiche des Endenergieverbrauchs im Haushalt 2015 [15]

1.2.3 Politische Rahmenbedingungen

Die energetischen Anforderungen an Gebäude werden mit der Energieeinsparverordnung EnEV fortschreitend dem Stand der Technik und der Energiepreisentwicklung angepasst. Ab 2020 soll die Wärmeversorgung von Neubauten weitgehend unabhängig von fossilen Energieträgern sein [12].

So wurde beispielsweise die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2016 im Vergleich zur EnEV 2014 um durchschnittlich 25 % verschärft. Weitere Reduzierungen sind im Rahmen des wirtschaftlich Vertretbaren mit folgenden Eckpunkten geplant: Nach dem derzeitigen Stand der Diskussion sollen das Energieeinsparungsgesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) im Gebäudeenergiegesetz GEG 2018 zusammengefasst werden. Dazu gibt es derzeit einen noch nicht verabschiedeten Entwurf, in dem neu zu errichtende Gebäude der öffentlichen Hand ab 2019 und neu zu errichtende Gebäude der Privatwirtschaft ab 2021 den energetischen Standard eines Niedrigenergie-Hauses aufweisen sollen [13]. Diese Forderung basiert auch auf der EU-Gebäuderichtlinie von 2010, die vorgibt, dass neu zu errichtende Gebäude ab dem Jahr 2020 den energetischen Standard von Niedrigst- oder Nahezu-Null-Energie-Häusern aufweisen sollen.

Die Novellierung der Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (kurz EU-Gebäuderichtlinie) sieht mit ihrer „langfristigen Renovierungsstrategie“ vor, bis zum Jahr 2050 die CO₂-Emissionen auch für den Gebäudebestand deutlich zu reduzieren [14].

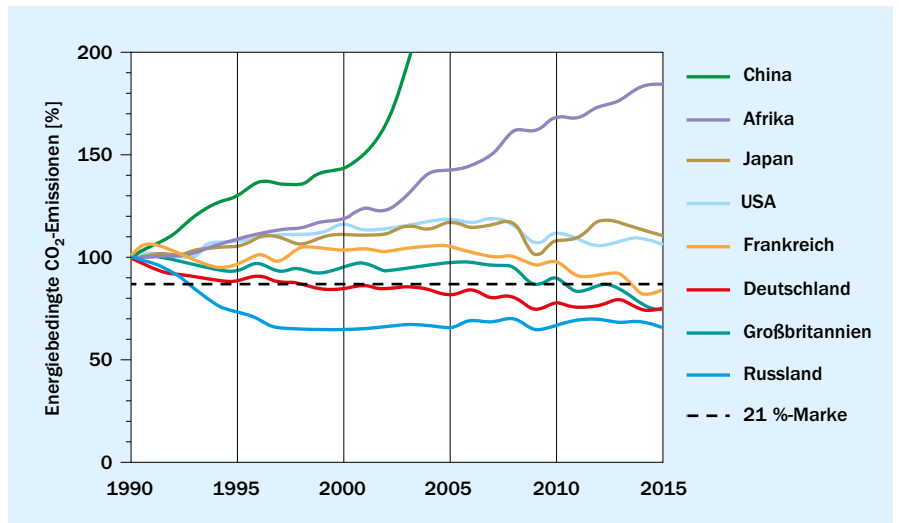


Bild 7 Entwicklung der energiebedingten CO₂-Emissionen im Vergleich zum Ausgangsjahr 1990 [16]

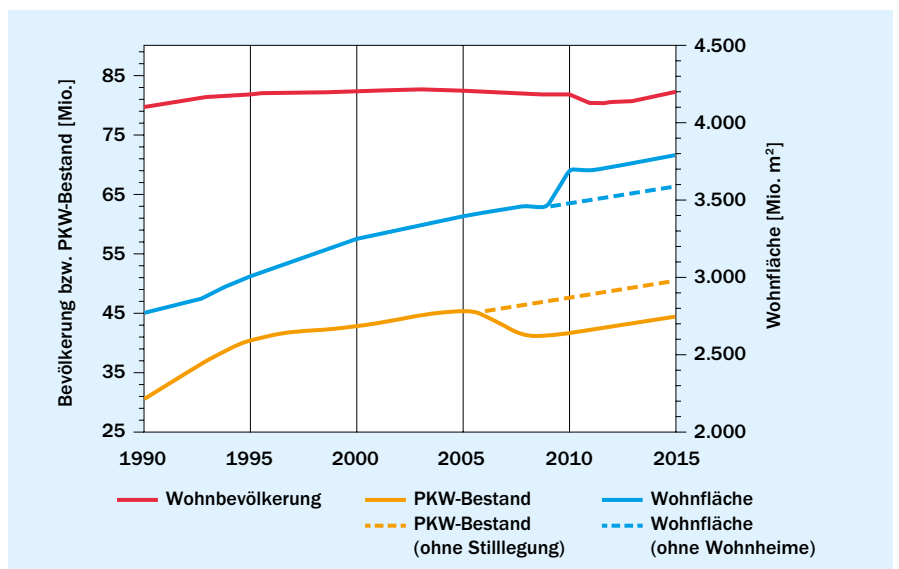


Bild 8 Zunahme der zu beheizenden Wohnfläche sowie des PKW-Bestands in Deutschland [17, 18, 19]

1.3 Dimensionen der Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeit setzt sich aus den drei klassischen Dimensionen zusammen (Bild 9):

- Ökonomie,
- Ökologie und
- Sozio-Kulturelles.

Dabei sind die drei Dimensionen als gleichwertig zu betrachten. Kaum ein anderer Bereich macht die Wechselbeziehungen zwischen den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit derart deutlich, wie der Bereich Bauen und Wohnen.

INFO

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit sind die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Sozio-Kulturelles immer als gleichwertig zu betrachten.

Bereits im Jahr 2001 wurde der Leitfaden Nachhaltiges Bauen durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) für die Bauvorhaben im Verantwortungsbereich des BMVBS verbindlich eingeführt. Auf Initiative der Deutschen Bauindustrie wurde der Runde Tisch Nachhaltiges Bauen eingerichtet, der durch das BMUB (ehemals BMVBS) moderiert wird und bei dem es in regelmäßigen Sitzungen zum fachlichen Austausch seiner Mitglieder kommt. In den Jahren 2011, 2013 und 2015 wurde der Leitfaden Nachhaltiges Bauen mit Neuaufgaben fortgeschrieben [20]. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS (heute das BMUB) hat in einer zweijährigen Zusammenarbeit mit der Deut-

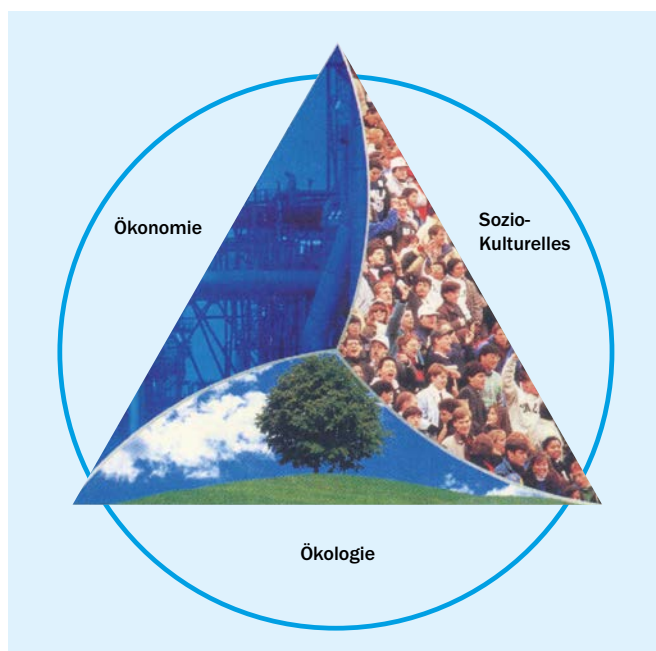


Bild 9 Dimensionen der Nachhaltigkeit [1]

schen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) einen ersten Kriterienkatalog zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für Gebäude entwickelt. Die Steckbriefe und Indikatoren werden in regelmäßigen Abständen konsolidiert, um so einen aktuellen Stand der Technik für die Nachhaltigkeitsbewertung abzubilden. Mit Einführung des Leitfadens von 2011 wurde für den Neubau von Bundesbaumaßnahmen das „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Büro- und Verwaltungsgebäude BNB“ verbindlich eingeführt. Bei der Anwendung des BNB gilt es, die im Leitfaden Nachhaltiges Bauen gestellten Anforderungen einzuhalten.

1.4 Schutzziele und Indikatoren

Die Schutzziele des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen lassen sich mit folgenden Indikatoren beschreiben [21]:

1.4.1 Ökologische Qualität

Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt

- Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP) zur Beschreibung des Beitrags von Emissionen zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten (Klimawandel)
- Ozonschichtabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential – ODP) zur Beschreibung der Bildung des Ozonlochs
- Ozonbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential – POCP) zur Beschreibung der bodennahen Ozonbildung (Sommersmog)
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential – AP) zur Beschreibung des Einflusses von saurem Regen (Waldsterben)
- Überdüngungspotenzial (Eutrofication Potential – EP) zur Beschreibung der Überdüngung von Böden und Gewässern
- Risiken für die lokale Umwelt (Grundwasser, Oberflächenwasser, Boden, Luft)
- Nachhaltige Materialgewinnung und Biodiversität, z.B. zur Sicherstellung einer nachhaltigen Gewinnung tropischer Hölzer

Ressourceninanspruchnahme

- Primärenergiebedarf (PE) zur weiteren Reduzierung des Primärenergieverbrauchs bei gleichzeitiger Entkopplung vom Wirtschaftswachstum, Senkung des Gesamtprimärenergiebedarfs bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Primärenergie
- Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen mit dem Ziel der Minimierung des Trinkwasserbedarfs durch effiziente Wassereinsparungstechniken und -maßnahmen
- Flächeninanspruchnahme im Hinblick auf die Minimierung der Landschaftszersiedlung sowie zusätzlicher Bodenversiegelung

1.4.2 Ökonomische Qualität

Lebenszykluskosten

- Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus zur Minimierung der Lebenszykluskosten (für Erstellung, ausgewählte Nutzungskosten, Instandhaltung, Wartung, etc.)

Wirtschaftlichkeit und Wertstabilität

- Flächeneffizienz zur Einschränkung der Inanspruchnahme neuer Flächen und Steigerung der effizienten Nutzung bereits versiegelter Flächen
- Anpassungsfähigkeit zur Aufrechterhaltung der Nutzbarkeit und Flexibilität hinsichtlich möglicher Umnutzungen

1.4.3 Soziokulturelle Qualität

Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit

- Thermischer Komfort als Grundlage für effizientes und leistungsförderndes Arbeiten sowohl in der Winter- als auch in der Sommerperiode
- Innenraumlufthygiene zur Sicherstellung einer guten Innenraumluftqualität, z.B. in Bezug auf flüchtige organische Verbindungen, Formaldehyd sowie den CO₂-Gehalt
- Akustischer Komfort zur Sicherstellung eines geringen resultierenden Stör- und Fremdgeräuschpegels sowie der Sprachverständlichkeit in Räumen
- Visueller Komfort als Grundlage für effizientes und leistungsförderndes Arbeiten einschließlich einer ausreichenden und störungsfreien Beleuchtung sowie Reduktion des Energiebedarfs für künstliche Beleuchtung
- Einflussnahmemöglichkeiten durch Nutzer zur Erhöhung der Behaglichkeit, Nutzerzufriedenheit und Akzeptanz des Raumklimas
- Aufenthaltsqualitäten zur Schaffung von individuellen Kommunikations-, Ausweichts- und Rückzugsmöglichkeiten für unterschiedliche Nutzergruppen und -bedürfnisse
- Sicherheit zur Erhöhung des subjektiven Sicherheitsgefühls beim Nutzer

Funktionalität

- Barrierefreiheit mit dem Ziel der uneingeschränkten Nutzbarkeit eines Gebäudes für alle Menschen
- Zugänglichkeit zur Erhöhung der Integration und Akzeptanz eines öffentlichen Gebäude in der Gemeinschaft
- Mobilitätsinfrastruktur mit dem Ziel der Unterstützung und besseren Vernetzung verschiedener Verkehrsträger und somit Verminderung von CO₂-Emissionen



Sicherung der Gestaltungsqualität

- Gestalterische und städtebauliche Qualität durch die Vergabe von Planungsleistungen über architektonischen Wettbewerb
- Kunst am Bau zur Stärkung der baukulturellen Verantwortung und Vorbildfunktion von öffentlichen Bauherren

Neben den drei klassischen Dimensionen der Nachhaltigkeit werden für den Bereich des nachhaltigen Bauens die technische Qualität sowie die Prozessqualität hervorgehoben. Die Standortmerkmale werden separat ausgewiesen und gehen beim BNB-System nicht in die Gesamtbewertung des Gebäudes mit ein, sondern gelten vielmehr als zusätzliche informative Nachhaltigkeitsmerkmale.

1.4.4 Technische Qualität

Technische Ausführung

- Schallschutz zur Sicherstellung der Vertraulichkeit zu benachbarten Wohnungen und einer hohen akustischen Behaglichkeit
- Wärme- und Tauwasserschutz zur Minimierung des Wärmebedarfs, bei Sicherstellung einer hohen thermischen Behaglichkeit und Vermeidung von Bauschäden
- Reinigung und Instandhaltungsfreundlichkeit des Baukörpers zur Reduktion der Lebenszykluskosten und zur Erhöhung der technischen Lebensdauer
- Rückbau, Trennung und Verwertung zur Einsparung von Deponieraum, wertvollen Rohstoffen und Energiebedarf im Herstellungsprozess
- Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren zur Abschätzung und Adaption der Widerstandsfähigkeit von Gebäuden gegenüber in der Natur vorkommenden Extremwetterereignissen
- Bedienungs- und Instandhaltungsfreundlichkeit der TGA zur Verringerung des Instandhaltungsaufwands und der Beeinträchtigung der Nutzer

1.4.5 Prozessqualität

Planung

- Projektvorbereitung
- Integrale Planung
- Komplexität und Optimierung der Planung
- Ausschreibung und Vergabe
- Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung

Bauausführung

- Baustelle/Bauprozess
- Qualitätssicherung der Bauausführung
- Systematische Inbetriebnahme

1.4.6 Standortmerkmale

- Risiken am Mikrostandort durch von Menschen induzierte Katastrophen und natürliche Gefahren
- Verhältnisse am Mikrostandort zur Begrenzung von Verkehrslärm und anderen Umwelteinwirkungen (Feinstaub, ozonbildende Stickoxide und andere Emissionen)
- Quartiersmerkmale zur Erhöhung des Images eines Standorts und zur Minimierung von Synergie- und Konfliktpotenzialen
- Verkehrsanbindung zur Berücksichtigung der Erreichbarkeit für die Objekt-Nutzer sowie der Anbindung der Objekt-Nutzer an das Umfeld, z.B. durch öffentlichen Personennahverkehr
- Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen der Nahversorgung, Gastronomie und anderen anliegenden Medien
- Anliegende Medien/Erschließung

Diese Indikatoren bilden die Grundlage des BNB. Mit dem BNB stellt das BMUB für alle interessierten Kreise eine Methode zur Bewertung von Büro- und Verwaltungsbauten frei zur Verfügung. Die Bewertungsmethodik wurde auch auf Gebäude anderer Nutzungsszenarien übertragen, indem Kriteriensteckbriefe und Bewertungsmaßstäbe an die jeweilige Nutzungsart angepasst wurden. Somit ist eine Bewertung nach BNB inzwischen auch für Wohn-, Unterrichts- und Laborgebäude sowie für Außenanlagen möglich. Für die Bewertung nach dem BNB-Prinzip wird das Gebäude unabhängig vom Nutzungsszenario im Hinblick auf die Ökonomie und die Ökologie über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bewertet [21].

Die Qualitäten der Ökologie, der Ökonomie, des Soziokulturellen sowie der technischen Qualität werden jeweils mit einem Anteil

von 22,5 % und die Prozessqualität mit einem Anteil von 10 % in der Gesamtbewertung berücksichtigt. Die Standortqualität wird lediglich zur Information mitgeführt, ohne in die Bewertung einzufließen. Auf der Grundlage des daraus resultierenden Gesamterfüllungsgrads kann dann ein Gebäude gemäß BNB zertifiziert werden. Ab einem Erfüllungsgrad von 80 % wird das Zertifikat Gold, ab 65 % Silber und ab 50 % Bronze erreicht. Diese Aggregation auf einen Einzahlwert ist politisch gewollt, wissenschaftlich jedoch derzeit nicht begründbar [21].

1.5 Lebenszyklusbetrachtung

Jedes Bauen, jedes Betreiben eines Gebäudes greift in die Dimension der Nachhaltigkeit ein. Somit ergeben sich folgende Fragen:

- Welche Bauten sind nachhaltig?
- Wie kann eine Bewertung objektiviert werden?

Zur Objektivierung einer Bewertung müssen insbesondere die ökonomischen und ökologischen Einflussfaktoren über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes von der Wiege bis zur Bahre (cradle to grave) erfasst werden (Bild 10).

Die Zielsetzung ist es, die Lebenszyklusaufwendungen – seien sie ökonomischer oder ökologischer Natur – zu minimieren. Insbesondere durch die Senkung der Lebenszykluskosten bietet sich die Chance, ggf. höhere Investitions- oder Planungskosten durch Einsparungen bei den Betriebskosten refinanzieren zu können (Win-Win-Situation). Die Einbeziehung der Lebenszyklusbetrachtung ist als eine neue Stufe der Qualität des Bauens zu sehen.

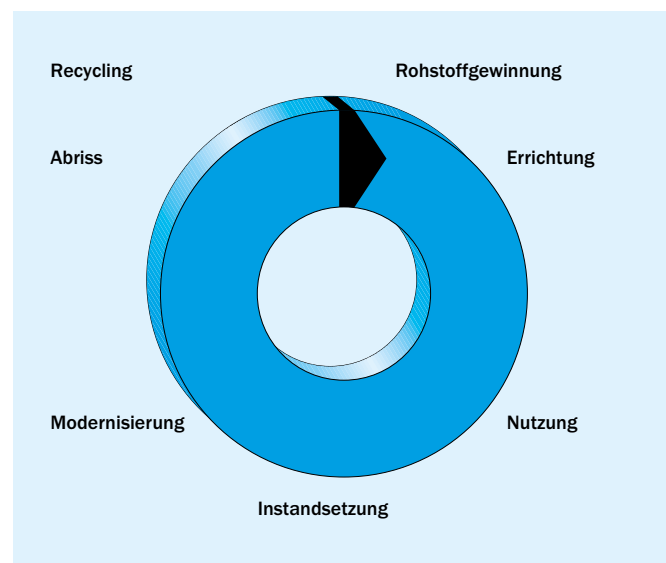


Bild 10 Lebenszyklus [22]

2. Planungsphase

In der Planungsphase kommen der ökonomischen Lebenszyklusbetrachtung (Life-Cycle-Costing – LCC) und der ökologischen Lebenszyklusbewertung (Life-Cycle-Assessment – LCA) besondere Bedeutung zu. Ziel ist es, die Aufwendungen und Wirkungen des Gebäudes über seine gesamte Nutzungsdauer zu minimieren.

2.1 Ökonomische Lebenszyklusanalyse

2.1.1 Eingangswerte

Bei der ökonomischen Lebenszyklusanalyse werden die Investitionskosten, die nach DIN 276 in Kostengruppen zusammengefasst werden (Tafel 1), sowie die Baunutzungskosten nach DIN 18960 ermittelt (Tafel 2).

Mit zunehmender Planungstiefe werden die Investitionskosten von einer Kostenschätzung über eine Kostenberechnung so-

wie einen Kostenanschlag bis zur Kostenfeststellung berechnet. Für die Investitionskostenermittlung liegen bereits für die frühe Planungsphase langjährige Erfahrungen sowie umfangreiche Instrumente und Tabellenwerke vor, um diese mit relativ hoher Genauigkeit und Sicherheit ermitteln zu können. Auf der Grundlage des Endenergiebedarfs eines Gebäudes und den Angaben im Steckbrief 2.1.1 „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ des BNB für die verschiedenen Energieträger können die Energiekosten in der Betriebsphase eines Gebäudes bestimmt werden. Des Weiteren können anhand der Nutzungsdauern von Bauteilen, die seitens des BMUB veröffentlicht sind (www.nachhaltigesbauen.de), die Instandsetzungszeitpunkte und -kosten ermittelt werden. Für die Berechnung des Kapital- bzw. Barwerts enthält der Steckbrief 2.1.1 vorgegebene Preissteigerungsraten und den anzusetzenden Kalkulationszinssatz.

Tafel 1 Investitionskosten nach Kostengruppen der DIN 276-1: 2008-12-00

Kostengruppe	Zu berücksichtigen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)
100 Grundstück	✗
200 Herrichten und Erschließen	✗
300 Bauwerk, Baukonstruktionen	✓
400 Bauwerk, Technische Anlagen	✓
500 Außenanlagen	✓ teilweise
600 Ausstattung und Kunstwerke	✗
700 Baunebenkosten	✗

2.1.2 Verfahren

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Investitions- und Baunutzungskosten stehen die Kapital-(Barwert)-Methode sowie das Annuitätsverfahren zur Verfügung. Bei der Kapital-Barwert-Methode werden Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten unter Berücksichtigung der Verzinsung auf einen bestimmten Zeitpunkt auf- oder abgezinst. Bei dem Annuitätsverfahren werden die in unterschiedlichen Perioden anfallenden Zahlungen mit Hilfe des Annuitätenfaktors in eine durchschnittliche Zahlung transformiert.

2.1.3 Ergebnisse

In Bild 11 ist beispielhaft die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Außenwandkonstruktion aus Kalksandstein-Mauerwerk mit Wärmedämm-Verbundsystem (Polystyrol-Hartschaum, Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(m·K)) bei Variationen der Wärmedämmstoffdicke dargestellt. Dabei wurden drei Szenarien der Endenergiekosten (Wärmegestehungskosten 0,02 €/kWh,

Tafel 2 Baunutzungskosten nach DIN 18960: 2008-02-00

Nutzungskostengruppe	Zu berücksichtigen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)	
100 Kapitalkosten	110 Fremdmittel 120 Eigenmittel 130 Abschreibung 190 Sonstiges	✗ ✗ ✗ ✗
200 Objektmanagementkosten	210 Personalkosten 220 Sachkosten 230 Fremdleistungen 290 Sonstiges	✗ ✗ ✗ ✗
300 Betriebskosten	310 Versorgung 320 Abwasser und Wasser 330 Gebäudereinigung 330 Reinigung von Außenanlagen 350 Bedienung, Wartung und Inspektion 360 Sicherheits- und Überwachungsdienste 370 Abgaben und Beiträge 390 Sonstiges	✓ ✓ ✓ ✗ ✓ ✗ ✗ ✗
400 Instandsetzungskosten	410 Instandsetzung der Baukonstruktionen 420 Instandsetzung der Technischen Anlagen 430 Instandsetzung der Außenanlagen 440 Instandsetzung der Ausstattung 490 Sonstiges	✓ ✓ ✗ ✗ ✗

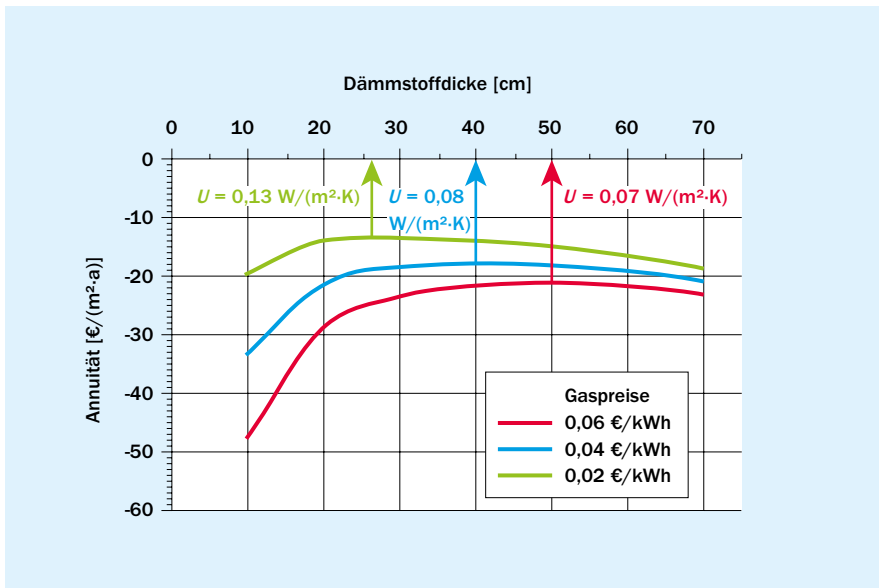


Bild 11 Bestimmung der optimalen Dämmstoffdicke eines WDVS auf KS-Mauerwerk in Abhängigkeit ökonomischer Gesichtspunkte (Annuitätsverfahren)

0,04 €/kWh und 0,06 €/kWh) unter Annahme einer Heizenergieversorgung mit einem verbesserten Gas-Brennwertkessel (Standort Berlin) dargestellt.

Bei der Barwertberechnung wurden die Investitionskosten für die Herstellung und Instandsetzung sowie die Betriebskosten unter Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren berücksichtigt. Als Kalkulationszinssatz wurde 1,5 %, als Preissteigerung für die Energie 7,0 % angesetzt. Das Maximum des in Bild 11 dargestellten annuitätischen Gewinns zeigt die optimale Wärmedämmstoffdicke an. Hervorzuheben ist, dass der Kurvenverlauf des annuitätischen Gewinns im Bereich des Maximums einen sehr flachen Verlauf hat.

INFO

Eine maßvolle Erhöhung der Wärmedämmstoffdicke über das Optimum hinaus führt lediglich zu einer geringfügigen Änderung der Annuität. Im Hinblick auf die Unsicherheit der Energiekostenpreisentwicklung bieten somit höhere Wärmedämmstoffdicken zusätzliche Sicherheit.

2.1.4 Lebensdauer, Nutzungsdauer, Betrachtungszeitraum

Dem Ansatz der Lebens- bzw. Nutzungsdauer kommt im Rahmen einer Lebenszyklusbewertung besondere Bedeutung zu. Dabei ist zwischen der technischen und wirtschaftlichen Lebensdauer, der Nutzungsdauer und dem Betrachtungszeitraum zu differenzieren.

Unter dem Betrachtungszeitraum versteht man den Ansatz der Nutzungsdauer des Gesamtgebäudes im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung. Dabei können für Gebäude unterschiedlicher Nutzung die Ansätze nach Tafel 3 und Tafel 4 zugrunde

gelegt werden. Für eine Bewertung nach BNB ist jedoch für das zu zertifizierende Gebäude ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren vorgeschrieben. Dieser Ansatz wird in Fachkreisen kritisch gesehen und führt auch nach Jahren der Bewertungspraxis immer wieder zu Diskussionen. Zum einen werden Hochbauten selten für lediglich 50 Jahre errichtet, zum anderen werden langlebige Konstruktionen beim Ansatz kurzer Betrachtungszeiträume benachteiligt, da die Vorteilhaftigkeit der langen Standzeit des Gebäudes oder auch der langlebigen Baukonstruktionen nach 50 Jahren abgeschnitten wird. Eine Studie der Technischen Universität Berlin hat ergeben, dass die Berücksichtigung eines „Ökologischen Restwerts“ oder aber der Ansatz eines 80- oder 100-jährigen Betrachtungszeitraums diesem Umstand Abhilfe schaffen könnte [23].

In [20] sind darüber hinaus Angaben zur technischen Lebensdauer von Baukonstruktionen nach dem Ordnungsprinzip der DIN 276 angegeben. Dabei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Lebensdauer der Bauteile oder Bauteilschichten vor allem von den Bauteileigenschaften, der Ausführungsqualität, der konkreten Beanspruchung und den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst wird. Die technische Lebensdauer ist deshalb in der angegebenen Spanne unter Berücksichtigung folgender Einflussgrößen sinnvoll abzuschätzen:

- Materialqualität
- Komplexität des Bauteils
- Ausführungsqualität
- Anforderungen an das handwerkliche Geschick
- Exposition (Klima, Umwelt etc.)
- Nutzungsintensität
- Inspektions- und Wartungsintervalle
- Reparaturfreundlichkeit
- Nutzungsflexibilität
- Technischer Fortschritt
- Ästhetischer Verschleiß

Als Beispiel für ästhetischen Verschleiß sind Fliesenbeläge und Sanitärobjekte zu nennen, deren technische Lebensdauer durchaus 100 Jahre betragen kann, die aber bereits deutlich früher – aufgrund des sich ändernden Geschmacks – einen Austausch erfahren können.

Tafel 3 Nutzungsdauer von Gebäuden nach [24] bzw. [20] (Bundesbauten)

Nutzungsart	Gesamtnutzungsdauer [a]
Wohnen	60
Verwaltung	50
Gewerbe	40
Industrie	20
Forschung	30
Lehre und Ausbildung	40
Bundesbauten	100

Tafel 4 Nutzungsdauer von anderen Gebäuden nach [24]

Bauweise	Gesamtnutzungsdauer [a] bei		
	geringem Installationsgrad	mittlerem Installationsgrad	hohem Installationsgrad
Massiv	60	50	40
Gemischt	50	40	30
Leicht	40	30	20

Kalksandsteine erfüllen seit mehr als 100 Jahren alle konstruktiven Anforderungen – sei es z.B. als dauerhafte Steine für ein Grundmauerwerk oder im Tunnelbau – auch wenn sie unter Dauerfeuchte stehen. Sie erfüllen ihre Funktion als Verblender bei häufigem Frost-Tau-Wechsel genauso wie bei landwirtschaftlichen Bauten mit einer Beanspruchung aus der Tierhaltung. Durch eine turnusmäßige Instandhaltung von klimatisch oder anderweitig beanspruchten KS-Sichtflächen durch Beschichtungen o.Ä. lässt sich die Lebensdauer noch weiter erhöhen. Mauerwerkswände aus Kalksandstein erreichen somit eine sehr hohe Lebensdauer, die die Gesamtnutzungsdauer von Gebäuden weit übersteigt. In [20] wird für Wärmedämm-Verbundsysteme von einer technischen Lebensdauer von 40 Jahren ausgegangen. Andere Literaturstellen [25, 26] wiederum geben die Lebensdauer mit 40 bzw. 60 Jahren an. Dies deckt sich auch mit Erfahrungen aus der Praxis.

2.2 Ökologische Lebenszyklusbewertung

2.2.1 Verfahren

Die ökologische Lebenszyklusbewertung – auch Ökobilanz genannt – stellt eine Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und der produktspezifischen potenziellen Umwelteinwirkungen dar. Eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff. [27] gliedert sich in folgende Schritte:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (Systemgrenzen)
- Sachbilanz von relevanten In- und Output-Strömen eines Produktsystems
- Wirkungsabschätzung zur Beurteilung der mit diesen In- und Outputs verbundenen potenziellen Umweltwirkungen
- Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung hinsichtlich der Zielstellung

Zunächst ist die Zielsetzung zu formulieren. Eine Lebenszyklusbewertung im Sinne eines Baustoffrankings, bei dem ein Kilogramm oder ein Kubikmeter des einen Stoffes mit einem anderen Stoff verglichen wird, greift zu kurz. Wie bereits beschrieben, spielt insbesondere die technische Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer eine maßgebende Rolle. Deshalb kann frühestens auf Baukonstruktionsebene ein sinnvoller erster Variantenvergleich erfolgen. Eine technische Gleichwertigkeit der untersuchten Konstruktionen – z.B. im Hinblick auf Wärme-, Brand- oder Schallschutz – ist eine weitere wichtige Voraussetzung. Bei einer ökologischen Lebenszyklusbewertung sollte der Variantenvergleich auf Gebäudeebene erfolgen, da viele Einflussfaktoren – z.B. der Reinigungsaufwand, Energieeffizienz oder der Wasserbedarf bzw. das Abwasseraufkommen – nicht allein von einer Baukonstruktion abhängig sind und erst auf Gebäudeebene berücksichtigt werden können.

Als Systemgrenze ist das Gesamtgebäude festzulegen. Darüber hinaus müssen Abschneidekriterien definiert werden, um zu einer einheitlichen Bewertung zu kommen. Hier können beispielsweise Stoffströme unberücksichtigt bleiben, wenn der Einfluss auf die Sachbilanz kleiner als 1 % der gesamten Masse des Gebäudes ist [28].

Bei einer Sachbilanz werden sämtliche In- und Outputströme aus allen Prozessketten von der Rohstoffgewinnung bis zur Fertigstellung des Produkts – also von der Wiege bis zum Werkstor (cradle to gate) – erfasst. Bei der Wirkungsabschätzung wird die Wirkung verschiedener Substanzen bezüglich eines Wirkungsindikators durch einen gewichteten Summenwert bestimmt. So werden alle Substanzen, die z.B. eine Auswirkung auf den Treibhauseffekt zur Folge haben, mithilfe der so genannten Äquivalenzziffer in die Leitsubstanz Kohlendioxid (CO₂) übertragen. Das Treibhauspotenzial (GWP) umfasst demnach alle am Treibhauseffekt beteiligten Treibhausgase und wird als CO₂-Äquivalent angegeben. Dabei errechnet sich das CO₂-Äquivalent wie folgt:

$$GWP = \sum_i (m_i \cdot GWP_i) \quad (2.1)$$

Der Faktor GWP_i gibt an, um wie viel höher oder niedriger die Auswirkung eines Stoffes mit der Masse m_i im Vergleich zur Leitsubstanz CO₂ hinsichtlich des Treibhauseffektes ist.

2.2.2 Eingangswerte

Die Wirkungsabschätzungen unterschiedlicher Bauprodukte werden in den Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration EPD) unter Ansatz einheitlicher Systemgrenzen ermittelt. Die Kalksandsteinindustrie hat als einer der ersten Hersteller für Bauprodukte bereits Mitte der 1990er Jahre beispielhaft gehandelt, indem die Anfertigung einer Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein vorangetrieben wurde [29]. Andere Bauproduktehersteller zogen nach, und zum heutigen Zeitpunkt ist die Ökobilanz aus der Bereitstellung von Informationsgrundlagen von Baustoffen und -materialien durch den Hersteller nicht mehr wegzudenken. Der Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. stellt für sein Produkt eine Umweltkennzeichnung vom Typ III zur Verfügung [30].

2.2.3 Ergebnisse

Beispielhaft erfolgt in Bild 12 die Bestimmung der optimalen Wärmedämmstoffdicke einer Kalksandstein-Außenwand im Hin-

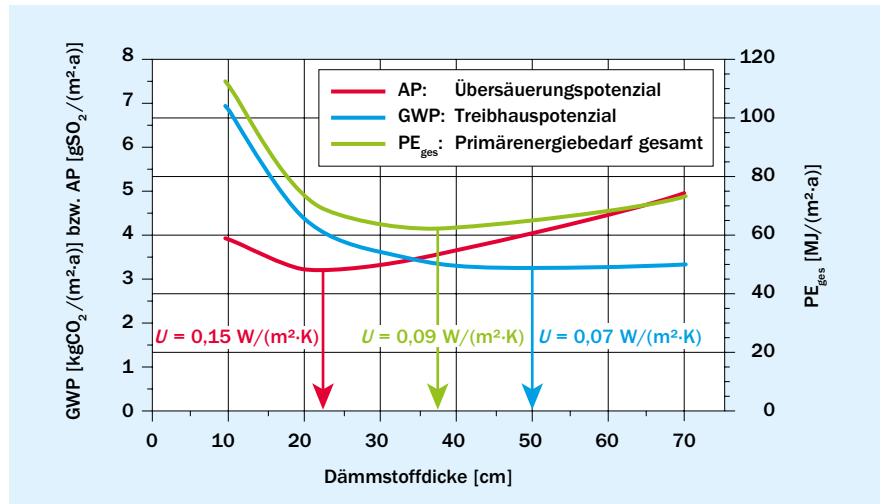


Bild 12 Bestimmung der optimalen Dämmstoffdicke eines WDVS auf KS-Mauerwerk in Abhängigkeit ökologischer Wirkungskategorien

blick auf die Minimierung des Primärenergiebedarfs (Primary Energy PE), des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential GWP) sowie des Versauerungspotenzials (Acidification Potential AP). Dabei sind die Aufwendungen und Wirkungen aus der Rohstoffgewinnung bis zur Errichtung und die Instandsetzung der Konstruktion sowie der Energiebedarf in der Nutzungsphase infolge von Transmissionswärmeverlusten durch die Außenwandkonstruktion berücksichtigt. Im Vergleich zur ökonomischen Optimierung der Konstruktion zeigt sich, dass beim wirtschaftlichen Optimum (vgl. Bild 11) das ökologische Optimum noch nicht gleichermaßen erreicht wird.

INFO

Bei zukünftig steigenden Energiekosten und höheren Wärmedämmstoffdicken zeigen Kalksandsteinwände mit Wärmedämm-Verbundsystemen weiterhin eine ökologisch positive Bilanz.

3. Errichtungsphase

3.1 Rohstoffgewinnung

Kalksandsteine bestehen aus den rein natürlichen Inhaltstoffen Kalk, Sand und Wasser. Es werden keine chemischen Zusätze beigemischt.

Der Sand wird meist in der Nähe des jeweiligen Kalksandsteinwerks gewonnen. Aufgrund des Mischungsverhältnisses von 1:12 (Kalk zu Sand) werden bei der Produktion große Mengen dieses Zuschlagstoffes benötigt. Kurze Transportwege führen somit zu einer sehr günstigen Ökobilanz.

Die Lagerstätten werden nach dem umweltschonenden Abbau der Rohstoffe rekultiviert und stehen zur Nutzung, z.B. als Naherholungsgebiete oder als Biotope für Flora und Fauna, wieder zur Verfügung. Oftmals entstehen nach der Rekultivierung landschaftsschutztechnisch höherwertige Gebiete als vor dem Abbau.

Kalksandsteine enthalten darüber hinaus im Vergleich zu anderen Baustoffen nur sehr geringe Konzentrationen an radioaktiven Isotopen (Tafel 5). Die Strahlenexposition bei mine-

ralischen Baustoffen ergibt sich im Wesentlichen aus unterschiedlichen Konzentrationen von Radionukleiden und deren Folgeprodukten. Dabei spielen die Edelgase Radon und Thoron als Zerfallsprodukte von Radium und Thorium eine Rolle. Alle natürlichen mineralischen Produkte enthalten radioaktive Zerfallsprodukte dieser beiden Radionukleiden und emittieren eine gewisse Strahlungsmenge. Dabei ist die abgesandte Menge auch abhängig vom Porengefüge und Feuchtegehalt des jeweiligen Baustoffes.

INFO

Regelmäßige durchgeführte Messungen vom Bundesamt für Strahlenschutz zeigen, dass Kalksandsteine hinsichtlich ihrer radioaktiven Strahlungsmenge völlig unbedenklich sind.

Ein größeres Problem als die natürliche Radioaktivität der Baustoffe kann die Radonbelastung im Erdboden sein. Radon ist ein natürlich vorkommendes radioaktives Edelgas. Es entsteht beim radioaktiven Zerfall aus Radium. Es kann aus dem Untergrund in Gebäude eindringen und zur Innenraum-Luftbelastung

Tafel 5 Natürliche Radioaktivität von Baustoffen [31]: Kalksandstein ist ein unbedenklicher Baustoff

Baustoff	Konzentration der Radionuklide [Bq/kg]		Exhalationsrate [Bq/(m ² · h)]	
	²²⁶ Ra	²³² Th	²²² Rn	²³⁰ Rn
Natursandstein	10	10	1,0	170
Porphyr	40	22	3,3	150
Kalksandstein	10	15	0,9	90
Ziegel/Klinker	50	15	0,2	30
Naturbims	60	50	1,5	180
Hüttenschlacke	75	20	0,6	110
Stein mit Flugaschezusatz	80	60	1,2	190
Beton	50	10	1,1	70
Gasbeton	20	15	1,0	60
Naturgips	5	15	0,2	30
Chemiegips				
■ Apatit	20	15	0,4	150
■ Phosphorit	260	15	24,1	80
Empfohlener Grenzwert	≤ 130	≤ 130	≤ 5,0	≤ 1.850

führen. Die Radonkonzentration in der Bodenluft ist den geologischen Formationen entsprechend sehr unterschiedlich. Angaben zu regionalen Radonbelastungen können [32] entnommen werden. Bei hoher Radonkonzentration sind präventive Maßnahmen empfehlenswert. Dazu gehören z.B. der Einbau einer durchgehenden Bodenplatte statt der Anordnung von Streifenfundamenten, ein dichtes Kellermauerwerk, ein sorgfältiges Abdichten von Leitungsdurchführungen im Erdreich und eine natürliche oder mechanische Belüftung der Kellerräume.

3.2 Herstellung

Kalksandsteine erweisen sich im Vergleich zu anderen Wandbildnern in ökologischer Hinsicht als besonders günstig. Kalk und Sand werden nach Zugabe von Wasser gepresst und durch Dampfdruck gehärtet. Emissionen entstehen lediglich bei der Dampferzeugung für die Dampfhärtekessel (Autoklaven), die mit einer vergleichsweise niedrigen Temperatur von ca. 200 °C betrieben werden.

INFO

Das Produkt Kalksandstein ist umwelt-neutral und unschädlich für das Grundwasser.

Da in sehr vielen Fällen das emissionsarme Erdgas verwendet wird, sind der Energiebedarf und die damit gekoppelten Emissionen von Luftschadstoffen für die Produktion von Kalksandsteinen gering.

Des Weiteren wurde durch Beregnungsversuche im Rahmen eines Forschungsvorhabens nach [33] festgestellt, dass bei der Auslaugung von Kalksandsteinen stets sehr geringe Konzentrationen an Salzen und Schwermetallen auftreten.

3.3 Transport

Kalksandsteine werden in Deutschland in knapp 80 Produktionsstätten regional hergestellt. Hieraus ergibt sich ein dichtes Netz von Kalksandstein-Werken und damit kurze Transportwege mit Entfernungen von ca. 40 bis 60 km vom jeweiligen KS-Werk. Kurze Transportwege bedeuten geringe Umweltbelastungen sowie niedrige Transportkosten und eine sichere Terminierung der Anlieferung.

3.4 Verarbeitung

Für den modernen Kalksandstein-Mauerwerksbau gibt es vielfältige Rationalisierungsansätze, die auch die Verarbeitung erleichtern. Dazu zählen für das kräfteschonende Mauern von Hand die Griffhilfen, um gesundheitlichen Schäden vorzubeugen, das Nut-Feder-System sowie entsprechende Mörtelschlitzen für Dünn-

bett- und Normalmauermörtel. Die Ausformungen der Kalksandstein-Zweihandsteine erweisen sich als ergonomisch besonders günstig. Durch diese Griffhilfen „hängen“ die Steine an den Fingern.

Kalksandsteine mit einer bauüblichen Feuchte und einem Gewicht von mehr als 25 kg werden entsprechend den Anforderungen der Berufsgenossenschaft mit Versetzgeräten verarbeitet. Hier bieten die Kalksandsteine mit Nut-Feder-System besondere Vorteile, da sie ein passgenaues oberflächenebenes Mauern gewährleisten.

Kalksandsteine werden entweder werkseits passgerecht zugeschnitten oder bauseits durch Knacken oder Nass-Sägen angepasst. Hierdurch wird die Staubentwicklung für den Arbeiter deutlich reduziert.

Auch beim Anmischen des Mörtels lässt sich die Staubbildung minimieren, indem zunächst das Anmachwasser eingebracht und der Trockenmörtel anschließend beigefügt wird. Näheres ist den Verarbeitungshinweisen der Mörtelanbieter zu entnehmen. Neue Entwicklungen setzen in der Mörteltechnologie gänzlich auf staubarme Produkte.

Für das nachträgliche Bearbeiten, wie z.B. das Anlegen von Kabelkanälen, sind Fräsen mit Staubabsaugung zu verwenden. Darüber hinaus ist auf Kalksandstein-Bausysteme hinzuweisen, die mit einer durchgehenden Lochung für die Elektrokabelverlegung versehen sind.

INFO

Das Kalksandstein-Bausystem erfüllt alle Anforderungen an den Arbeitsschutz.

4. Nutzungsphase

4.1 Minimierung von Energieaufwendungen und Emissionen

Ca. 50 % des Gesamtjahresprimärenergiebedarfs in Deutschland fallen für die Konditionierung von Gebäuden an [21]. Hierzu gehören das Heizen, die Warmwasserversorgung, das Kühlen, die Lüftung sowie die Beleuchtung.

Die diesbezüglichen Energieaufwendungen sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen werden entsprechend der Energieeinsparverordnung (EnEV) für Wohngebäude und für Nichtwohngebäude anhand der jeweils vorgeschriebenen Berechnungsverfahren ermittelt. Die Ergebnisse der Energiebilanz werden mithilfe von Energieausweisen dargestellt.

INFO

Zielsetzung eines Energiekonzepts muss es sein, durch passive baukonstruktive Maßnahmen den Energiebedarf zu reduzieren, um auf aufwändige Anlagentechnik verzichten zu können. Nach dem Erneuerbare-Energie-Wärme-Gesetz EEWärmeG 2011 ist zur Deckung des Heizwärme- bzw. Kühlbedarfs beim Neubau bis zu einem bestimmten Prozentsatz die Nutzung Erneuerbarer Energie vorgeschrieben. Dabei gilt stets das Wirtschaftlichkeitsgebot.

4.1.1 Heizenergiebedarf

Gedämmte Außenwandkonstruktionen aus Kalksandstein sind in besonderem Maße geeignet, alle Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz zu erfüllen. Hierdurch kann der Heizwärmebedarf bis auf einen Passivhausstandard – mit weniger als 15 kWh/(m²·a) – oder auf einen Nullheizenergie-Standard reduziert werden.

4.1.2 Warmwasserversorgung

Die Unterstützung der Warmwasserversorgung mit solarthermischen Anlagen ist in vielen Fällen wirtschaftlich.

4.1.3 Kühlung

Gebäude aus Kalksandstein-Mauerwerk weisen aufgrund der hohen speicherfähigen Masse bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes besonders günstige Eigenschaften auf. Die Temperaturamplitude im Tag-Nacht-Rhythmus einer Hitzeperiode wird erheblich reduziert. So werden Übertemperaturgradstunden minimiert, und man kann vielfach auf eine Klimatisierung verzichten. Positiv wirkt sich hier eine möglichst effektive Nachtlüftung aus.

4.1.4 Lüftung

Hauptsächlich aus hygienischen Gründen ist ein Mindestluftwechsel bei Hochbauten unbedingt erforderlich. Dieser Mindestluftwechsel kann in Form einer freien oder ventilatorgestützten Lüftung sichergestellt werden.

Eine luftdichte Gebäudehülle ist Grundvoraussetzung, um ungewollte Lüftungswärmeverluste zu vermeiden. Hierzu werden die Anforderungen in der EnEV mit der Begrenzung des Gebäudeluftwechsels n₅₀ auf 2/h bei freier Lüftung und auf 1/h bei Vorhandensein einer raumlufttechnischen Anlage festgelegt.



Ein vollflächiger Innenputz erfüllt die Funktion der Luftdichttheitsebene auch bei Kalksandstein-Mauerwerk ohne Stoßfugenvermörtelung.

INFO

Baukonstruktionen atmen nicht: Die auf dem Wege der Diffusion abführbare Feuchtigkeitsmenge beträgt weniger als ein Hundertstel derjenigen Feuchtemenge, die durch einen Luftwechsel abgeführt werden kann.

Geregelte Außenwandluftdurchlässe (ALD) sorgen für einen Mindestluftwechsel und begrenzen gleichzeitig den Luftvolumenstrom. Ist eine maschinelle Lüftung vorgesehen, sollte im Variantenvergleich der Einsatz von Anlagen mit Wärmerückgewinnung geprüft werden.

4.1.5 Beleuchtung

Die Energieaufwendungen für eine künstliche Beleuchtung können durch eine Optimierung der Tageslichtnutzung minimiert werden. Für eine ausreichende Tageslichtversorgung in die Tiefe des Raums hinein sind insbesondere die oberen Fensterflächen von Bedeutung. Durch die Ausbildung deckengleicher Unterzüge kann auf die Stürze verzichtet werden.

Lichtlenksysteme, automatisch dimmende Regeltechnik oder präsenzabhängige Steuerungstechnik führen darüber hinaus zu einer weiteren Reduzierung des Strombedarfs.

INFO

Lebenszyklusanalysen zeigen: Mit gedämmten Wandkonstruktionen aus Kalksandstein-Mauerwerk lassen sich Energieaufwand und Emissionen minimieren.

4.2 Behaglichkeit

Gebäude müssen den Bedürfnissen ihrer Nutzer entsprechen und sollen ein hohes Maß an Wohlbefinden gewährleisten [20]. Dies ist ein wesentlicher Aspekt der soziokulturellen Dimensi-

on der Nachhaltigkeit. Die Erhaltung der menschlichen Gesundheit und die Behaglichkeit bestimmen in hohem Maße die Leistungsfähigkeit des Menschen.

Dabei können folgende Arten der Behaglichkeit differenziert werden:

- Thermische hygrische Behaglichkeit (Wahrnehmung durch Wärme- und Tastsinn)
 - Temperatur der Raumluft
 - Temperatur der Begrenzungsflächen
 - Luftfeuchte
 - Luftgeschwindigkeit
 - Bekleidung
 - Aktivität
- Akustische Behaglichkeit (Wahrnehmung durch Hörsinn)
- Optische und visuelle Behaglichkeit (Wahrnehmung durch Sehsinn)
 - Beleuchtungsniveau
 - Gleichmäßigkeit der Beleuchtung
 - Farbe
- Olfaktorische Behaglichkeit (Wahrnehmung durch Geruchssinn)
- Psychologische Behaglichkeit
 - Persönliche Bedürfnisse
 - Sichtkontakt mit der Außenwelt
 - Bewegungsmöglichkeit im Raum
 - Alter
 - Gesundheitszustand
 - Gewöhnung und Einstellung zu Situationen
- Motorische Behaglichkeit
 - Bewegung
 - Gleichgewicht
 - Tätigkeit
 - Aktivität
- Haptische Behaglichkeit (Wahrnehmung unter Einbeziehung des Tast-, Wärme- und Sehsinns bei der Beurteilung der Oberflächenwirkung von gegenständlicher Materie)

Im Folgenden sollen die Bereiche der thermisch-hygrischen Behaglichkeit und der akustischen Behaglichkeit vertiefend behandelt werden.

4.2.1 Thermisch-hygrische Behaglichkeit

Der menschliche Körper ist nur begrenzt in der Lage, seine Körpertemperatur unabhängig von den ihn umgebenden Luftzuständen und seiner Muskelaktivität konstant zu halten. Ein völlig entspannter Körper benötigt im Behaglichkeitszustand beim Sitzen die zur Gewährleistung des Lebens erforderliche Mindestwärmebildung von etwa 60 W/m^2 Körperoberfläche. In diesem Zustand herrscht ein energetisches Gleichgewicht zwischen der im Körper erzeugten und von ihm abgegebenen bzw. gespeicherten Wärme. Thermorezeptoren in der Haut und im Gehirn regeln die Körpertemperatur und sind für das Wärmeempfinden verantwortlich. Die innere Wärmeerzeugung erfolgt durch Verbrennungsprozesse in den Organen und durch körperliche Tätigkeit, wie Muskelbewegung. Die äußere Wärmeabgabe erfolgt durch:

- Konvektion der an der Haut- bzw. Bekleidungsoberfläche vorbei streichenden Luft
- Wärmeleitung an berührten Flächen, z.B. Füßen, Händen und Gesäß
- Wärmestrahlung von der Körperoberfläche an die umgebenden kälteren Bauteiloberflächen
- Verdunstung von Wasser auf der Haut, z.B. durch Schwitzen
- Atmung
- Ausscheidung, Einnahme von Speisen, Diffusion und anderem

Um die Gehirntemperatur weitestgehend konstant zu halten, erfolgt bei sinkender Umgebungstemperatur vornehmlich eine Durchblutung des Kopfes; die Temperatur der Extremitäten sinkt.

Neben den beschriebenen Einflussgrößen ist auch das subjektive Empfinden des Einzelnen von Bedeutung. Deshalb kann das Wärmeempfinden lediglich als Erwartungswert vorausgesagt werden.

Predicted Mean Vote (PMV)

Nach DIN EN ISO 7730 erfolgt eine Vorhersage der Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe, die einem gemäßigtem Umgebungsklima ausgesetzt ist. Die Beurteilungsskala nach Tafel 6 ergibt sich aus dem rechnerischen Ansatz der körperlichen Tätigkeit, der Bekleidung, der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der relativen Luftgeschwindigkeit und des Wasserdampfpartialdrucks.

Aus dem erwarteten durchschnittlichen Votum (Predicted Mean Vote PMV) kann entsprechend Bild 13 auf den Prozentsatz an Unzufriedenen mit einem bestimmten Umgebungsklima (Predicted Percentage of Dissatisfied PPD) geschlossen werden.

Tafel 6 Beurteilungsskala nach DIN EN ISO 7730 für gemäßigtes Umgebungsklima

+3	Heiß
+2	Warm
+1	Etwas warm
0	Neutral
-1	Etwas kühl
-2	Kühl
-3	Kalt

Es zeigt sich, dass auch bei einer neutralen durchschnittlichen Bewertung einer großen Personengruppe ein Anteil an Unzufriedenen verbleibt.

Operative Temperatur

Wesentliche Randbedingung für das Behaglichkeitsempfinden ist die operative Temperatur. Die operative Temperatur ergibt sich als arithmetisches Mittel der Lufttemperatur und der mittleren Temperatur der umgebenden Bauteiloberflächen.

$$\theta_o = \frac{\theta_i + \bar{\theta}_{si}}{2} \quad (4.1)$$

mit:

θ_o = Operative Temperatur [°C]

θ_i = Lufttemperatur [°C]

$\bar{\theta}_{si}$ = Mittlere Temperatur der umgebenden Bauteiloberflächen [°C]

Die Beziehung gilt unter der Voraussetzung, dass die relative Luftgeschwindigkeit am Körper weniger als 0,2 m/s beträgt und dass der Unterschied zwischen der mittleren Strahlungstemperatur und der Lufttemperatur geringer als 4 K ist. Der zulässige Bereich der operativen Temperatur ist in Bild 14 dargestellt.

Gedämmte Kalksandstein-Außenwände führen in der kalten Jahreszeit zu einer hohen minimalen Bauteilinnenoberflächentemperatur, so dass die Behaglichkeit in besonderem Maße gegeben ist.

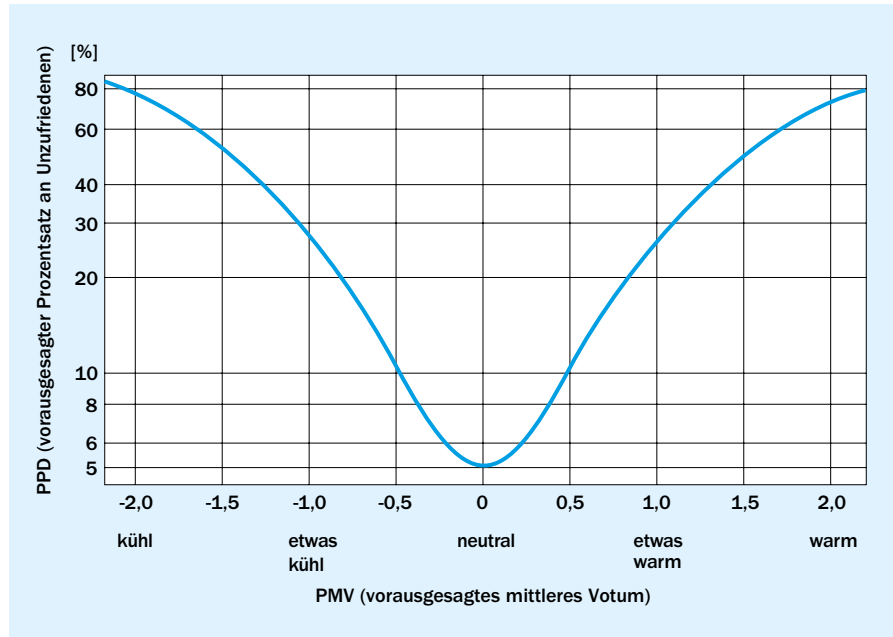


Bild 13 Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) in Abhängigkeit vom mittleren Votum PMV

INFO

Durch die hohe speicherfähige Masse erweisen sich massive Bauarten, wie mit Kalksandstein-Mauerwerk, gegenüber leichten Bauarten auch beim sommerlichen Wärmeschutz als deutlich günstiger. Die Tag-Nacht-Temperaturamplituden werden reduziert. Damit wird auch die Überhitzung in den Tagesstunden verringert.

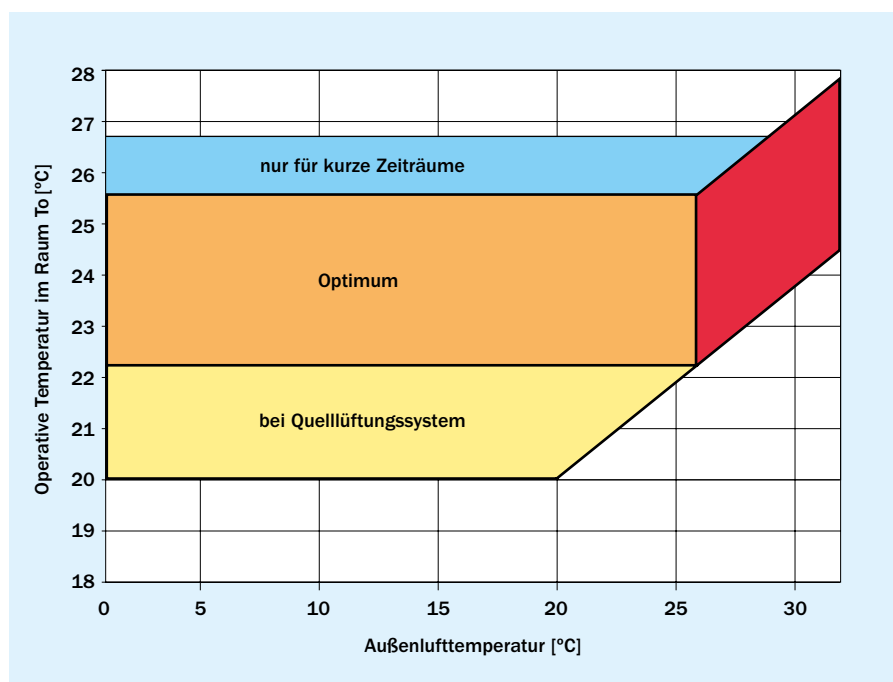


Bild 14 Zulässigkeitsbereich der operativen Temperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur nach DIN 1946-2

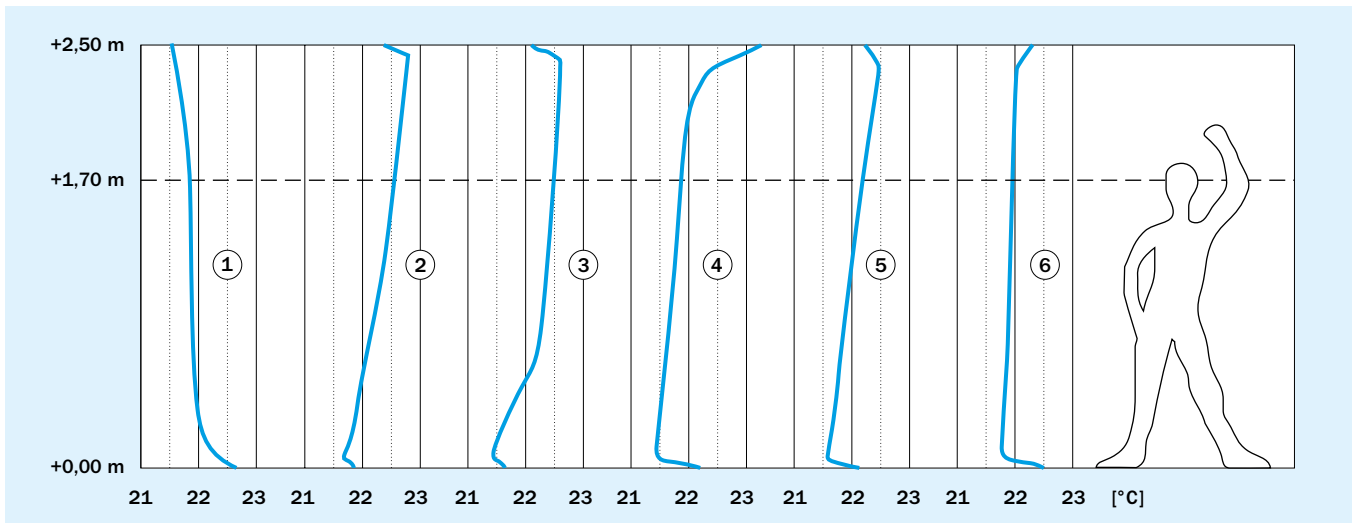


Bild 15 Beispiele für vertikale Temperaturprofile bei verschiedenen Heizsystemen nach [34]: ① Idealer Temperaturverlauf, ② Radiator an Innenwand, ③ Radiator an Außenwand, ④ Deckenheizung, ⑤ Wandheizung, ⑥ Fußbodenheizung

Lufttemperaturschichtung

Eine Lufttemperaturschichtung bzw. ein ungewöhnlich großer vertikaler Lufttemperaturgradient zwischen Nackenhöhe und Fußgelenkhöhe sitzender Personen kann zur Beeinträchtigung der thermischen Behaglichkeit führen. Eine von unten nach oben zunehmende Temperatur wird dabei als unangenehmer empfunden, als eine von oben nach unten zunehmende Temperatur. Im ersten Fall sollte die Temperaturdifferenz zwischen Knöchelhöhe 0,1 m und Kopfhöhe eines Sitzenden 1,1 m nach DIN 1946-2 nicht mehr als 2 K bzw. nach DIN EN ISO 7730 nicht mehr als 3 K betragen.

In Bild 15 sind Beispiele für vertikale Temperaturprofile bei verschiedenen Heizsystemen angegeben.

Strahlungstemperatur-Asymmetrie

Die Behaglichkeit eines Menschen hängt auch von der Strahlungstemperatur-Asymmetrie ab. Am empfindlichsten reagiert der Mensch auf Strahlungstemperaturunterschiede, die durch warme Decken und kalte Wände verursacht werden. Demgegenüber werden kühle Decken und warme Wände innerhalb gewisser Grenzen als angenehm empfunden.

Bild 16 gibt den Prozentsatz von Menschen an, die sich bei einer Strahlungstemperatur-Asymmetrie unzufrieden fühlen.

Durch eine hohe Wärmespeicherkapazität der Bauteile, wie sie bei Kalksandsteinen gegeben ist, wird die Strahlungstemperatur-Asymmetrie vermindert.

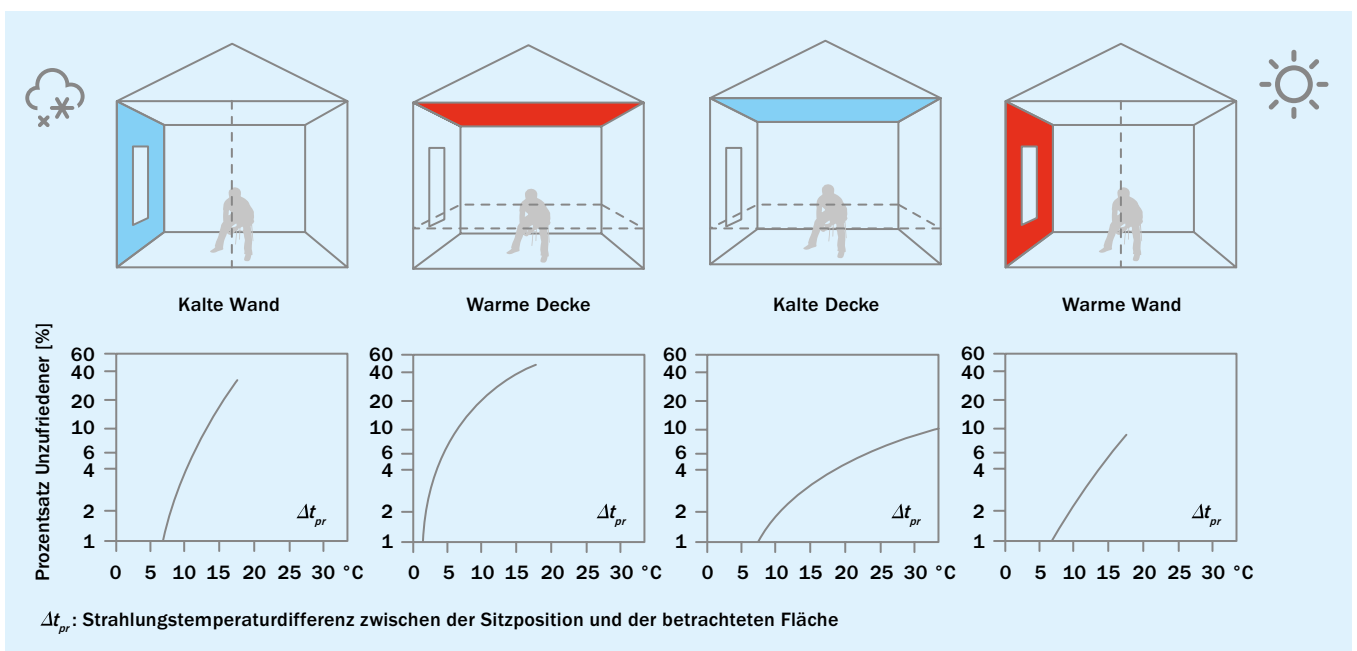


Bild 16 Prozentsatz Unzufriedener in Abhängigkeit der Strahlungstemperatur-Asymmetrie [35]

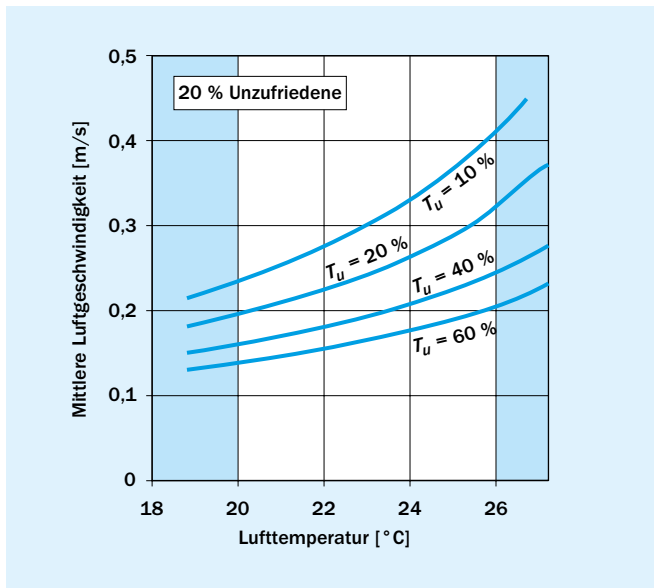


Bild 17 Maximal zulässige Raumlufthgeschwindigkeit bei 20 % Unzufriedenen in Abhängigkeit von der Raumlufthtemperatur und dem Turbulenzgrad der Raumlufthströmung [36]

Beeinträchtigung durch Zugluft

Zugluft führt zu einer unerwünschten lokalen Abkühlung des menschlichen Körpers infolge Konvektion. Nach DIN EN ISO 7730 kann die Beeinträchtigung durch Zugluft (Draft Risk – DR) als vorausgesagter Prozentsatz von Menschen ausgedrückt werden, die sich infolge Zugluft unbehaglich fühlen. Diese Abschätzung erfolgt in Abhängigkeit von der lokalen Lufttemperatur, der mittleren Luftgeschwindigkeit und dem Turbulenzgrad, der als

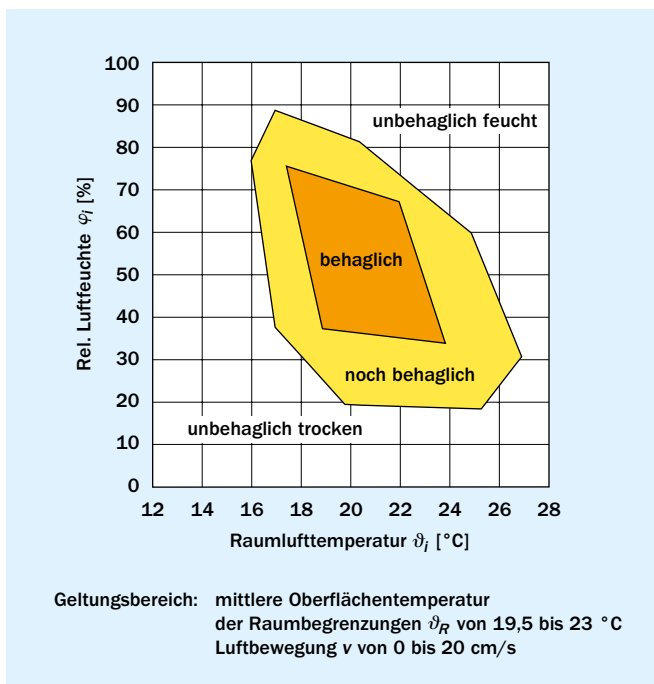


Bild 18 Behaglichkeitsbereich von relativer Luftfeuchte und Raumlufthtemperatur bei sitzender Beschäftigung sowie einer Luftgeschwindigkeit < 20 cm/s nach [37]

Verhältnis der Standardabweichung der lokalen Luftgeschwindigkeit zur mittleren Luftgeschwindigkeit ermittelt wird (Bild 17).

Luftfeuchte

Neben der Raumlufthtemperatur bestimmt die relative Luftfeuchtigkeit das Behaglichkeitsempfinden (Bild 18). Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von unter 35 % trocknen die Schleimhäute der Atmungsorgane aus. Hohe Luftfeuchten werden ebenfalls als unbehaglich empfunden. Zudem besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung oder gar der Bildung von Tauwasser an Bauteilinnenoberflächen.

Kalksandstein-Mauerwerk weist ein hohes Absorptionsvermögen von Wasserdampf auf, so dass ein erhöhter nutzungsbedingter Feuchteanfall gepuffert werden kann.

Wärmeableitung

In Bädern, Kindergärten und anderen Räumen mit direktem Fußkontakt ist die Wärmeableitung von Fußböden nach ISO ITS 13732-2 wie folgt klassifiziert:

- Wärmeableitstufe I (besonders fußwarm):

$$W_1 < 38 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad W_{10} < 188 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (4.2)$$

- Wärmeableitstufe II (ausreichend fußwarm):

$$38 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \leq W_1 \leq 50 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (4.3)$$

$$188 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \leq W_{10} \leq 293 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (4.4)$$

- Wärmeableitstufe III (nicht ausreichend fußwarm):

$$W_1 > 50 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad W_{10} < 293 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \quad (4.5)$$

Die Wärmeableitung W_1 bzw. W_{10} gibt die flächenbezogene Wärmemenge an, die in einem Zeitraum von 1 bzw. 10 Minuten von einer Prüfwärmequelle auf einen Fußbodenaufbau übertragen wird.

Im Moment der Berührung stellt sich an der Grenzschicht zwischen Haut und der Materialoberfläche die Kontakttemperatur Θ_k ein:

$$\Theta_k = \frac{b_M \cdot \Theta_M + b_H \cdot \Theta_H}{b_M + b_H} \quad (4.6)$$

mit:

Θ_k = Kontakttemperatur [°C]

Θ_M = Materialtemperatur [°C]

Θ_H = Hauttemperatur [°C]

b_M = Wärmeeindringkoeffizient des Materials [J/(m² · K · s^{1/2})]

b_H = Wärmeeindringkoeffizient der Haut [J/(m² · K · s^{1/2})]
 $b_H \approx 580 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}\text{)}$

Die Wärmemenge, die bei kurzer Berührung in das berührte Medium – z.B. den Bodenbelag – zu- bzw. abfließt, wird durch den Wärmeeindringkoeffizienten b beschrieben – auch Wärmebeharrungsvermögen oder Temperaturträchtigkeit genannt:

$$\beta = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda} \tag{4.7}$$

- c = Spezifische Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]
- ρ = Rohdichte [kg/m³]
- λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

Kategorien des Umgebungsklimas

Zusammenfassend lassen sich nach DIN EN ISO 7730 drei Kategorien des Umgebungsklimas A bis C definieren, die die Höhe des Komforts widerspiegeln. Dabei bietet Kategorie A den höchsten Komfort. In Tafel 7 sind die verschiedenen Temperaturrandbedingungen nach DIN EN 7730 definiert. Für neu zu errichtende Gebäude wird das Umgebungsklima B, für Bestandsgebäude Umgebungsklima C empfohlen. Für Sonderbauten ist Umgebungsklima A als Empfehlung zu verstehen.

In Abhängigkeit von der Nutzung können hieraus für Räume in unterschiedlichen Gebäudetypen Gestaltungskriterien abgeleitet werden. Beispiele hierfür bietet die DIN EN ISO 7730. Mit massiven Bauarten – wie Gebäude mit Kalksandstein-Mauerwerk – lassen sich diese Kriterien aufgrund der hohen speicherfähigen Masse problemlos erreichen.

4.2.2 Akustische Behaglichkeit

Die akustische Behaglichkeit wird durch das damit erzielte Wohlbefinden charakterisiert, das hauptsächlich über den Gehörsinn vermittelt wird. Etwa 76 % der Deutschen fühlen sich durch Lärm gestört (Bild 19), wobei als Hauptlärmquelle von den meisten Deutschen der Straßenverkehr angegeben wird, gefolgt vom Nachbarschaftslärm (Bild 20). Die Art der akustischen Reizaufnahme kann sehr unterschiedlich sein [38]. Während der Eine durch die Nutzung von Ohrstöpseln die Stille sucht, um die außerhalb seiner Behaglichkeitsvorstellungen

Tafel 7 Kategorien des Umgebungsklimas nach DIN EN 7730

	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C
Vertikaler Lufttemperaturunterschied 1,1 und 0,1 m über dem Fußboden [°C]	< 2	< 3	< 4
Oberflächentemperaturbereich des Fußbodens [°C]	19 bis 29	19 bis 29	19 bis 31
Asymmetrie der Strahlungstemperatur [K]			
■ Warme Decke	< 5	< 5	< 7
■ Kühle Wand	< 10	< 10	< 13
■ Kühle Decke	< 14	< 14	< 18
■ Warme Wand	< 23	< 23	< 35

auftretenden störenden Geräusche aus der eigenen Wahrnehmung zu verbannen, schaltet der Andere ganz gezielt diese ruhigen Umgebungsgeräusche aus seinem Bewusstsein aus und ersetzt sie durch Kopfhörer, um sich bei Schalldruckpegeln am Ohr von über 100 dB behaglich zu fühlen.

Wie in [40] beschrieben, hat der Schallschutz in Gebäuden eine große Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen. Besonders wichtig ist er im Wohnungsbau, da die Wohnung dem Menschen einerseits zur Entspannung und zum Ausruhen dient, andererseits aber auch den privaten Bereich gegenüber den Nachbarn und der Umwelt abschirmen soll. Genauso wichtig ist Schallschutz in den Industrie- und Verwaltungsbereichen, in denen laute und leise Tätigkeiten gleichzeitig ausgeübt werden.

Durch die hohe Rohdichte und die damit erzielbare hohe flächenbezogene Masse von Kalksandsteinwänden lassen sich die Anforderungen nach DIN 4109 einschließlich der Anforderungen an einen erhöhten Schallschutz problemlos erfüllen.

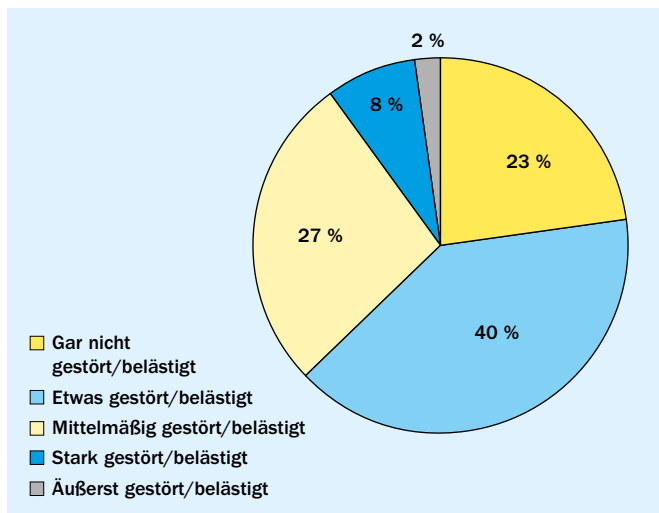


Bild 19 Wahrgenommene Lärmbelästigung in Deutschland 2014 [39]

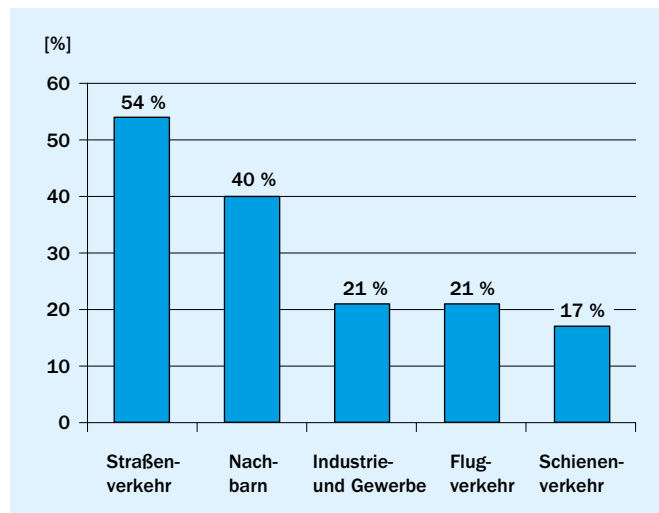


Bild 20 Wahrgenommene Lärmbelästigung in Deutschland 2014 nach Lärmquellen [39]

4.3 Gesundheit

Im Hinblick auf den Gesundheitsschutz sind drei Bereiche zu nennen:

- Brandschutz
- Vermeidung von Schimmelpilzbildung
- Sicherstellung der Raumluftqualität

4.3.1 Brandschutz

Zielsetzung des Brandschutzes ist es u.a., im Brandfall Leib und Leben zu retten. Der Brandschutz stellt somit die höchste Stufe des Gesundheitsschutzes dar. In brandschutztechnischer Hinsicht lassen sich mit Kalksandsteinwänden alle Anforderungen nach DIN 4102 sowie der Landesbauordnung erfüllen. Mehr dazu in [41].

Schneider und Oswald stellen in [42] fest, dass der Brandschutz wesentlich von der Bauart – Holz- oder Massivbau – bestimmt wird (Tafel 8).

Tafel 8 Statistische Daten über Brandhäufigkeiten, Brandtote und Gebäudeschäden im Wohnbau nach [42]

Risikodaten	Schweiz	Bauart	Prozentueller Vergleich [%]
Eintrittshäufigkeit [Brände/(10 ⁵ a m ²)]	2,780 4,465	Massivbau Holzbau	100 160
Schadensausmaß¹⁾ [€/(m ² a)]	0,114 0,281	Massivbau Holzbau	100 247
Brandopfer [1/(10 ⁶ m ² a)]	0,028 0,079	Massivbau Holzbau	100 282

¹⁾ Schäden, die infolge Brand am Gebäude auftreten

4.3.2 Vermeidung von Schimmelpilzbildung

Untersuchungen zeigen, dass eine Gefährdung der Schimmelpilzbildung gegeben ist, wenn in den bauteiloberflächennahen Bereichen eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 80 % relativer Feuchte über mehrere Stunden am Tag an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen gegeben ist.

Die DIN 4108-2 definiert hierzu einen einzuhaltenden Temperaturfaktor f_{Rsi} :

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \geq 0,7 \quad (4.8)$$

mit

- f_{Rsi} = Temperaturfaktor an der Bauteilinnenoberfläche
- θ_{si} = Maßgebende minimale Temperatur an der Bauteilinnenoberfläche [°C], z.B. im Bereich von Wärmebrücken
- θ_i = Lufttemperatur [°C] ($\theta_i = 20$ °C nach DIN 4108-2)
- θ_e = Außenlufttemperatur [°C] ($\theta_e = -5$ °C nach DIN 4108-2)

Sofern der Nutzer ordnungsgemäß lüftet und heizt, also eine relative Feuchte von $w_i < 50$ % nicht überschritten wird und die Lufttemperatur $\theta_i \geq 20$ °C beträgt, ergibt sich hieraus, dass die Oberflächentemperatur θ_{si} mindestens 12,6 °C beträgt. Damit stellt sich an der Oberfläche eine maximale relative Feuchte von $w_{si} \leq 80$ % ein; das schließt die Gefahr einer Schimmelpilzbildung aus.

Maßnahmen des winterlichen Wärmeschutzes führen zu einer Erhöhung der Bauteilinnenoberflächentemperatur. Kalksandstein-Außenwände, die dem derzeitigen Anforderungsniveau an den winterlichen Wärmeschutz (= Anforderungen nach EnEV) entsprechen, führen zu Wandinnenoberflächentemperaturen, die weit über die Anforderungen des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108-2 hinausgehen. Damit ist auch bei nicht vollständig zu vermeidenden konstruktiven bzw. geometrischen Wärmebrücken eine ausreichende Sicherheit gegeben. Hierbei



ist auf die wärmetechnisch optimierten Ausführungsdetails der Kalksandsteinindustrie und auf Beiblatt 2 der DIN 4108 hinzuweisen, die zu einer deutlichen Reduzierung des Wärmebrückeneinflusses führen [43, 44].

4.3.3 Sicherstellung der Raumlufthqualität

Im Hinblick auf die Sicherstellung der Raumlufthqualität ist insbesondere auf die Anforderungen bezüglich

- Kohlendioxyd (CO₂),
- Formaldehyd und
- flüchtiger organischer Verbindungen (TVOC)

hinzuweisen.

Kohlendioxyd CO₂

Die Innenraumlufth sollte einen Wert von 1.000 ppm CO₂ nicht überschreiten. Dieser Wert ist identisch mit der traditionellen Pettenkofer-Zahl von 0,10 %. Dieser allgemein empfohlene hygienische Innenraumlufthrichtwert gilt in Räumen mit raumlufthtechnischen Anlagen bei sitzender oder leichter Tätigkeit [45].

Formaldehyd

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte des Umweltbundesamtes hat 2016 für Innenräume den Wert von 0,1 mg pro m³ als Grenzwert festgesetzt [46].

TVCO-Konzentrationen

Neben klassischen Gefahrstoffen stellen die flüchtigen organischen Verbindungen eine große Gruppe der Emissionen dar, die durch Bauprodukte in den Innenraum getragen werden. Aufgrund der Vielzahl von chemischen Verbindungen, die bis jetzt nur zu einem Bruchteil toxikologisch untersucht werden konnten, wurden verschiedenste Konzepte entwickelt, die Bewertungen auf Basis von Summenkonzentrationen (TVOC) in Verbindung mit Einzelstoffbetrachtungen vornehmen.

Hierzu werden verschiedene Ziel- und Richtwerte für VOC in Innenräumen angegeben. Beispielhaft sind in Tafel 9 die Ziel- und Richtwerte nach [47] dargestellt.

Es wird somit eine Begrenzung des Summenwerts für leichtflüchtige organische Verbindungen von 200 µg/m³ vorgeschlagen.

Kalksandsteine bestehen aus rein natürlichen Stoffen, so dass eine Beeinträchtigung der Innenraumlufthqualität ausgeschlossen werden kann. Insbesondere bei den anderen Materialien des Innenausbaus sollte jedoch auf die Wahl emissionsfreier Produkte geachtet werden. Für die Bewertung von VOC-Emissionen aus Bauprodukten wurden seitens des Umweltbundesamtes UBA und des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt Verfahren zur Klassifizierung entwickelt.

Tafel 9 Ziel- und Richtwerte verschiedener Substanzgruppen nach [47]

Substanzgruppe	Zielwerte [µg/m ³]	Richtwerte [µg/m ³]
Alkane und Alkene	50	200
Aromaten	50	200
Terpene/Sesquiterpene	20	200
Chlorierte Kohlenwasserstoffe	10	50
Ester und Ketone	10	100
Aldehyde C ₅ – C ₁₀	20	50
Alkohole	20	50
Ethylenglykole/-ether	20	50
Propylenglykole/-ether	10	50
Sonstige	20	50
Summe: VOC/SVOC	< 200 µg/m ³	

INFO

Laut Eurofins Product Testing (DK) und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (D) sind Kalksandsteine gemäß Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten für Innenräume geeignet und halten die WHO-Kriterien ein.

4.4 Minimierung weiterer Aufwendungen in der Nutzungsphase

Als weitere Aufwendungen in der Nutzungsphase sind zu nennen:

- Reinigungsaufwand
- Instandhaltungsaufwand

Reinigung

Untersuchungen der Oberfinanzdirektion Hannover zeigen, dass der Reinigungsaufwand bei Verwaltungsgebäuden bis zu 30 % der Baufolgekosten im Gebäudebetrieb betragen kann.

Kalksandsteinwände lassen sich auch als Sichtmauerwerk problemlos reinigen. Bei bewittertem KS-Sichtmauerwerk sind die Empfehlungen der Kalksandsteinindustrie für Beschichtungen und Imprägnierungen zu beachten, um natürliche Verunreinigungen oder Veralgungen zu reduzieren.

Instandhaltung

Eine turnusmäßige Instandhaltung erhöht die technische Lebensdauer von Konstruktionen erheblich. Aufgrund der Robustheit sind Kalksandsteinwände instandhaltungsfrei. Beschichtungen oder Imprägnierungen sowie Dämmmaßnahmen als Wärmedämm-Verbundsystem oder vorgehängte hinterlüftete Bekleidung erfordern eine turnusmäßige Inspektion und Wartung.

5. Lebenszyklusende

Am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes steht der Abbruch. Eine der Zielsetzungen des nachhaltigen Bauens ist es, Bauwerke soweit wie möglich im Kreislauf zu führen, so dass die Materialien oder Produkte nach einem Aufbereitungsprozess wieder in den Stoffstrom zurückgeführt werden können. Dabei gilt die folgende Abfallhierarchie:

- Vermeidung
- Vorbereitung zur Wiederverwendung
- Recycling
- Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung
- Beseitigung

5.1 Regelung

Die gesetzliche Regelung zur Verwertung und Beseitigung von Bau- und Abbruchabfällen erfolgt durch mehrere miteinander in Verbindung stehende Gesetze, Verwaltungsvorschriften, Regeln und Richtlinien. Relevant für Deutschland sind u.a.:

- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)
- Vollzugshinweise der deutschen Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA-Empfehlungen)
- Abfallverzeichnis-Verordnung, hier werden unter der Katalognummer 17 als „Bau- und Abbruchabfälle“ enthaltene Abfallarten nach Tafel 10 genannt
- Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV, vom 18. April 2017) als gesetzliche Grundlage der Getrennthaltung zur ordnungsgemäßen und schadlosen sowie möglichst hochwertigen Verwertung (auch bei Bauabfällen)
- Entsprechende Gerichtsurteile auf deutscher und europäischer Ebene

Tafel 10 Bau- und Abbruchabfälle nach deutscher Abfallartenverzeichnis-Verordnung

Abfallart	EU-Abfallartenverzeichnis Nr.
Beton, Kalksandstein	17 01 01
Ziegel	17 01 02
Fliesen & Keramik	17 01 03
Holz	17 02 01
Glas	17 02 02
Kunststoff	17 02 03
Bitumengemische, Kohlenteeer und teehaltige Produkte	17 03
Metalle	17 04
Boden, Steine & Baggergut	17 05
Dämmmaterial und asbesthaltige Baustoffe	17 06
Baustoffe auf Gipsbasis	17 08
Sonstige Bau- & Abbruchabfälle	17 09

INFO

Kalksandsteinreste aus Rückbau und Abbruch erfüllen die Kriterien der /LAGA/ Z O. Das bedeutet, dass das Material für den uneingeschränkten Einbau geeignet ist, z.B. als Verfüllungen im Erd-, Straßen- und Wegebau, als Vegetationssubstrat und auch auf Deponien.

5.2 Verfahren

Die Möglichkeit des Recyclings soll beispielhaft für drei verschiedene Baumaterialien dargestellt werden.

Beispiel 1: Kalksandstein

Auf dem Gebiet des Recyclings von Kalksandstein-Materialien wurden in den vergangenen Jahren folgende wesentliche Forschungsarbeiten durchgeführt:

- Verwendung von sortenreinem KS-Material (Produktionsabfälle) für die erneute Kalksandsteinproduktion,
- Wiederverwendung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess (Forschungsbericht Nr. 80 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.),
- Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie (Forschungsbericht Nr. 97 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.),
- Einfluss von anhaftenden anderen Baustoffen an KS-Recycling-Splitt auf die Qualität von KS-Recyclingsteinen,
- Verwendung von ursprünglichem KS-Material für den Beton- und Stahlbetonbau, den Straßenbau und die erneute KS-Produktion,
- Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel (Forschungsbericht Nr. 111 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.),
- Ressourceneffizienz in der Kalksandsteinindustrie (Forschungsbericht Nr. 122 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.).

Ergebnisse dieser Forschungsvorhaben sind u.a., dass

- aus KS-Mauerwerk-Recycling-Bruchmaterial erneut KS-Mauersteine herstellbar sind,
- sich die optische Qualität von Kalksandsteinen mit Recyclingzuschlag von der ursprünglich gewohnten weißen Farbe des Kalksandsteins in eine grau-braune Färbung ändert und
- die Druckfestigkeit der Steine um ca. 10 % reduziert wird, was jedoch bei der hohen Druckfestigkeit von Kalksandsteinen keine Einschränkung bedeutet.

Beispiel 2: Expandierter Polystyrol-Hartschaum

Das technische Recycling von expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) ist vollständig entwickelt und wird derzeit umgesetzt. Das rückgeführte EPS, das hauptsächlich aus Verpackungsmaterial oder sortenreinem, unverschmutztem Verschnitt von Baustellen besteht, wird zu kleinen Fraktionen zerkleinert und unter Wasserdampf in neue EPS-Produkte geformt. Dieser Prozess verläuft ohne chemische Prozesse, so dass er mehrmals hintereinander stattfinden kann.

Dagegen wird aus Bauwerken rückgebautes EPS derzeit nur in geringen Mengen in den Wiederverwendungsprozess überführt. Gründe dafür sind die Materialverschmutzungen, z.B. mit mineralischem Kleber oder Bitumen. Die anfallenden EPS-Bauabfälle werden in der Regel in speziellen Verbrennungsanlagen thermisch verwertet. Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist das Einbringen von EPS-Kügelchen in den Boden zur Bodenauflockerung.

Für die in Zukunft sortenrein zu trennenden Fraktionen an EPS-Bauabfällen kann als Entsorgungsweg die energetische Verwertung, das Downcycling (z.B. Einsatz in Betonen, Ziegelporosierung, Bodenauflockerung), aber auch die Rückführung für die Wiederverwendung genannt werden.

Darüber hinaus sind erste labortechnische Anlagen zu nennen, die expandierten Polystyrol-Hartschaum in Styrol zurückwandeln können. Diese Anlagen arbeiten derzeit jedoch noch nicht in industriellem Maßstab.

Für genutztes EPS in Verbundkonstruktionen, wie z.B. bei WDVS, wurden in [48] Trennmethode für den technischen Rückbau entwickelt, die eine ausreichende Qualität für die Wiederverwendung gewährleisten.

Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass es bereits mehrere allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Wärmedämm-Verbundsysteme gibt, in denen das Aufdoppeln der Systeme mit Neusystemen geregelt wird. Somit kann auf ein vorhandenes intaktes Wärmedämm-Verbundsystem ein weiteres herstellergleiches System aufgebracht werden, um z.B. den baulichen Wärmeschutz deutlich zu verbessern.

Beispiel 3: Künstliche Mineralfaser (KMF)

Bislang existierte für beim Rückbau von Gebäuden angefallene KMF als Entsorgungsweg nur die Beseitigung auf Deponien. Die Rückführung von KMF in den Herstellungsprozess ist derzeit laut Literaturangaben (wecobis, EPDs) theoretisch möglich und soll zukunftsnahe auch in der Praxis zur Anwendung kommen. Um KMF in den Produktionskreislauf zurückzuführen, muss das Material bei Gebäudeabbruch selektiv zurückgebaut werden. Die größte Herausforderung besteht gegenwärtig noch in der Entfernung von Stör- und Schadstoffen des Abbruchmaterials sowie in der Bestimmung und Trennung der verschiedenen Mineralfaserarten. Für die Rückführung der KMF in den Herstellungsprozess werden an der TU Berlin derzeit technisch machbare, effiziente und vor allem wirtschaftliche Aufbereitungstechnologien entwickelt und erprobt [49].



Bild 21 Abbaustätten werden rekultiviert, neue Biotope entstehen.

Literatur

- [1] Abschlussbericht der Enquete-Kommission, „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestags, „Konzept Nachhaltigkeit, vom Leitbild zur Umsetzung“, Deutscher Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn 1998
- [2] Bericht der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, „Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016“, Berlin 2016, <http://www.ag-energiebilanzen.de/20-0-Berichte.html>., Stand Februar 2017
- [3] Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. „Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung“, Stuttgart 2016, https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21_Langversion.pdf. Stand 07.03.2016
- [4] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). „Energiestudie 2016“. Hannover Dez. 2016, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2016.html?nn=1542226
- [5] Mineralölwirtschaftsverband e.V. und Institut für Wärme und Öltechnik, „Themenspezial Erdöl“, Berlin 2012, <https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2016/07/Themenspecial-Erdoel-IWO-MWV-2012.pdf>, abgerufen am 13.09.2017
- [6] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Fokus Volkswirtschaft, <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-Nr.-96-Juli-2015.pdf>, abgerufen am 13.09.2017
- [7] Boustead, I.; et al.: Eco-Indices: What Can They Tell Us?, ICME doc. #16752 & 16754, 2000
- [8] AG Energiebilanzen e.V.. <http://www.ag-energiebilanzen.de/9-0-Energieflussbilder.html>, abgerufen am 25.08.2017
- [9] Klimadiplomatie von A bis Z, Paris-Abkommen, <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimagipfel/kleineslexikon-der-klimadiplomatie/#c77221>, abgerufen am 06.09.2017
- [10] BMUB: Klimaschutzplan 2050, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, Stand: Nov. 2016
- [11] Umweltbundesamt: „Umweltdaten“, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energieerzeugern-sektoren>, Stand Juli 2016, abgerufen am 24.08.2017
- [12] http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/enev_2009_10a_ausserbetriebnahme_von_elektrischen_speicherheizsystemen_ab_13.07.2013.htm, abgerufen am 25.08.2017
- [13] GEG 2018 Referentenentwurf, http://www.enev-online.eu/geg/referentenentwurf/text/index.htm#2_Anforderungen_Neubauten, abgerufen am 06.09.2017
- [14] Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden von 2016, http://www.enev-online.de/epbd/2017/161130_eu_kommission_vorschlag_novelle_richtlinie_2010.pdf, abgerufen am 13.09.2017
- [15] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energiedaten“, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-09.html>, Stand 17.10.2016, abgerufen am 25.08.2017
- [16] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi – Gesamtausgabe Energiedaten; <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energie-und-Umwelt/energiedaten-energie-umwelt-17.html>, Stand: 30.06.2016, abgerufen am 25.08.2017
- [17] Statistisches Bundesamt – Bevölkerungsstand; https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen_/lrbev03.html, abgerufen am 30.08.2017
- [18] Statistisches Bundesamt – Bestand an Wohnungen: Fachserie 5 Reihe 3 – 2016; <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Bauen/Bauen.html>, abgerufen am 30.08.2018
- [19] Kraftfahr-Bundesamt – Bestand in den Jahren 1960 bis 2017 nach Fahrzeugklassen; https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html, abgerufen am 30.08.2017
- [20] Leitfaden Nachhaltiges Bauen 2015, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Stand: Feb. 2016
- [21] BMUB: BNB, <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-buerogebaeude/bnb-bn-2015/kriterien-bnb-buero-und-verwaltungsgebaeude-neubau.html> – Stand: 13.09.2017
- [22] Vogdt, F. U.: Nachhaltigkeit des Bauens – Lebenszyklusbeachtung baulicher Anlagen, BDB Jahrbuch, Hrsg.: Bund Deutscher Baumeister, Architekten und Ingenieure e.V., Berlin 2003
- [23] Technische Universität Berlin, Studie „Ökologischer Restwert“ – Abschlussbericht, Berlin 07.03.2013
- [24] Amt für Bundesbauten: Standardisierte Nutzungszeiten von Gebäuden und Bauteilen. Bern 1997
- [25] Künzel, H. M.; Künzel, H.; Sedlbauer, K.: Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen, Bauphysik, Heft 3/2006, Seite 153–163
- [26] Arlt, J.; Pfeiffer, M.: Lebensdauer der Bauteile und Baustoffe zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau, Institut für Bauforschung e.V., Forschungsbericht F 2464, Fraunhofer IRB Verlag, 2005
- [27] DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement, Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen
- [28] Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen, https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2015/LCA-Bilanzierungsregeln_BNB_BN_2015.pdf, Stand: 04.04.2016, abgerufen am 13.09.2017
- [29] Eden, W. et al: Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein und Kalksandstein-Wandkonstruktionen. Forschungsbericht 82 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 1995
- [30] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. – Umwelt-Produktdeklaration für Kalksandsteine nach ISO 14025 und EN 15804, Deklarationsnummer EPD-BKS-20160002-IAE1-DE, Institut Bauen und Umwelt e.V., 03.März 2016
- [31] Keller, G.; Muth, H.: Strahleneinwirkungen durch Radon in Wohnhäusern. – In: Bauphysik Jahrgang 15 (1993), H. 5, S. 141–145
- [32] Bundesamt für Strahlenschutz: Radonkarte Deutschland <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/bo-den/radon-karte.html>. Stand: 02.05.2017

- [33] Brameshuber, W.: Untersuchungen zum Auslaugverhalten bereegneter Bauteile, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin – Bautechnik 86, Heft 7, 2009
- [34] Richter, W.: Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Heizperiode, Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden 2003
- [35] Thermal Comfort Booklet, Hrsg.: Luma Sense Technologies. http://www.lumasense.dk/fileadmin/Files/Sales_litterature/Thermal_Comfort_Booklet_Spanish.pdf, Stand: 29.10.2008
- [36] DIN EN ISO 7730: 05-2006: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung durch Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
- [37] Leusden, F.; Freymark, H.: Darstellung der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch. In: Gesundheitsingenieur 72 (1951) H. 16, S. 271–273
- [38] Vogdt, F. U. et al.: Nachhaltiges Bauen unter besonderer Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte. In: Bauphysik-Kalender. Hrsg.: Cziesielski, E., Berlin 2005
- [39] BMUB: „Umweltbewusstsein in Deutschland 2014“; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/umweltbewusstsein_in_deutschland_2014.pdf, Stand 2014, abgerufen am 21.09.2017
- [40] Fischer, H.-M.: Schallschutz. In: KALKSANDSTEIN – Planungshandbuch. Planung, Konstruktion, Ausführung, 7. Auflage. Hrsg. Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., Hannover 2018
- [41] Hahn, C.: Brandschutz. In: KALKSANDSTEIN – Planungshandbuch. Planung, Konstruktion, Ausführung, 7. Auflage. Hrsg. Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., Hannover 2018
- [42] Schneider, O.; Oswald, M.: Brandschutz-Studie. Brandschutztechnische Analyse von Massiv- und Holzbauweisen. Wien 2002
- [43] Kalksandstein – Detailsammlung zum Wärmebrücken-katalog, Hrsg.: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., https://www.ks-original.de/sites/default/files/downloads/2017/ks-detailsammlung_0.pdf, abgerufen am 21.09.2017
- [44] Kalksandstein – Wärmebrücken-katalog, Hrsg.: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., <https://www.ks-original.de/sites/default/files/downloads/2017/ks-waermebrueckenkatalog.pdf>, 2. Überarbeitete Auflage, Hannover 2014
- [45] Gesundheitsblatt, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf, abgerufen am 21.09.2017
- [46] Umweltbundesamt, Ausschuss für Innenraumrichtwerte, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/bilder/dateien/0_ausschuss_fuer-innen-raumrichtwerte_empfehlungen_und_richtwerte_20161202.pdf, abgerufen am 21.09.2017
- [47] Scholz, H.: Vorkommen ausgewählter VOC in Innenräumen und deren Bedeutung. In: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF): Gebäudestandard 2000: Energie und Raumluftqualität – Ergebnisse des 4. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) Nürnberg 1998, S. 205–214
- [48] Graubner, C.-A.; Clanget-Hulin, M.: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen – Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Projekt im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Bericht F2837, Fraunhofer IRB Verlag, 2013
- [49] Forschungsvorhaben (TU-Berlin): Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen (KMF), SWD-10.08.18.7-14.24 (in Bearbeitung)

Bildnachweise

Bild 9: Deutscher Bundestag; **Bild S. 407:** Heidelberger Kalksandstein GmbH;
Bild S. 414: Erich Spahn; **Bild S. 420:** Andreas Friese

Bild S. 402, Bild 21: Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.