



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH

CO₂-Tonnagen und Wärmespeichereffekte über den Lebenszyklus von Gebäuden

Kurzstudie

- Revision C -



Kurzstudie

Projekt	CO2-Tonnagen und Wärmespeichereffekte über den Lebenszyklus von Gebäuden
beauftragt durch	Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. Dr.sc.techn. Ronald Rast Kochstraße 6-7 10969 Berlin
ausführende Stelle	LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH Dr.-Ing. Sebastian Pohl Berliner Allee 58 64295 Darmstadt

Darmstadt, 3. Mai 2018

Dr.-Ing. Sebastian Pohl



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH



Inhaltsverzeichnis

- 1 **LCEE-Studienreihe Nachhaltigkeit im Wohnungsbau**
- 2 **Simulative Quantifizierung von Wärmespeichereffekten**
- 3 **Ökobilanzielle Abbildung von Wärmespeichereffekten**
- 4 **Bestimmung der CO₂-Tonnagen über den Lebenszyklus**
- 5 **Zusammenfassung**

Literaturverzeichnis

Die vorliegende Kurzstudie wurde in ihrer Fassung und Version „Revision B“ vom 06.02.2018 einer unabhängigen externen Verifizierung in Anlehnung an die kritische Prüfung einer Ökobilanz gemäß ISO TR 14071/DIN CEN ISO/TS 14071 sowie gemäß Verifizierungscheckliste für Ökobilanzen im EPD-Programm des Instituts Bauen und Umwelt (IBU) unterzogen.

Im Rahmen dieser Verifizierung wurde seitens des hiermit beauftragten unabhängigen externen Sachverständigen insbesondere die Übereinstimmung der ökobilanziellen Berechnungen der Kurzstudie mit den relevanten Normen EN 15978 und EN 15804+A2 sowie ISO 14040 und ISO 14044 bestätigt.

Empfehlungen des Sachverständigen hinsichtlich einer Reflexion und Interpretation der zentralen Studienergebnisse mit Blick auf die obligatorische ökobilanzielle Basisdatenbank Ökobau.dat wurden in der hier vorliegenden Fassung und Version „Revision C“ vom 03.05.2018 umgesetzt.

1 LCEE-Studienreihe Nachhaltigkeit im Wohnungsbau

Studienkontext

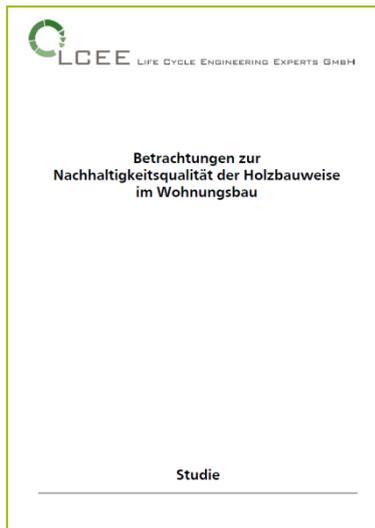


Abb. 1: Band IV der LCEE-Studienreihe [4]

In den Jahren seit 2012 wurde durch die LCEE eine umfassende Studienreihe zur Nachhaltigkeitsqualität marktgängiger Bauweisen im deutschen Wohnungsbau erarbeitet ([1]-[4]; siehe exemplarisch Abb. 1).

Methodische Basis dabei war die systematische Anwendung von Kriterien des *Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen (DGNB)* auf repräsentative Typengebäude aus dem Ein- (EFH) und Mehrfamilienaus-Segment als sogenannte Muster-EFH | Muster-MFH (siehe Abb. 2 f.).

Entsprechend war eine normkonforme ökobilanzielle Analyse und Bewertung von Muster-EFH und Muster-MFH über einen Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren bzw. deren funktionell äquivalenten Ausführungsvarianten in Mauerwerk (Ziegel, Kalksandstein sowie Poren- und Leichtbeton), Stahlbeton- (nur für Muster-MFH) und Holzbauweise elementarer Bestandteil der Studienreihe – inkl. einer Verifizierung der Ökobilanzierungen durch einen unabhängigen externen Sachverständigen, mit der insbesondere die Normkonformität bestätigt werden konnte.¹

Eine Analysevariation bestand in der Analyse und Bewertung eines 80-Jahre-Lebenszyklus.



Abb. 2²: Musterhaus Typengebäude EFH [5] [6]



Abb. 3³: Musterhaus Typengebäude MFH aus [3][4] (vgl. auch [6])

¹ Gegenüber dem originären Stand der Studie aus [1] liegt in [5] nunmehr eine Ökobilanzierung für das Typengebäude EFH der ARGE//eV gemäß [6] vor.

² Bildnachweis: ARGE//eV

³ Bildnachweis: ARGE//eV



Typengebäude und deren Konstruktionen

Wie soeben zum Studienkontext erläutert erfolgte die ökobilanzielle Analyse und Bewertung anhand von Typengebäuden, um repräsentative und auf den gesamtdeutschen Wohnungsbau übertragbare Ergebnisse generieren zu können.

Denn auch bei einer Analyse und Bewertung einer Vielzahl einzelner (realer) Beispielgebäuden wären die jeweils gebäudespezifischen Besonderheiten von derart großer Bedeutung, dass Ergebnisse nur in sehr weiten Spektren dargestellt bzw. lediglich tendenziell gewertet werden könnten.

Da die hier verwendeten Typengebäude der Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE//eV) [6] jeweils einen auf Grundlage von aktuellen Statistiken, Marktbeobachtungen und einer differenzierten Bautätigkeitserfassung bestimmten „Durchschnitt“ für den deutschen Wohnungsbau in der derzeitigen Baupraxis darstellen, erfüllen sie die nötigen Anforderungen an Repräsentativität und Praxisrelevanz.

Repräsentativität und Praxisrelevanz wurden freilich auch für Konstruktionen und Baustoffe der Typengebäude gewährleistet, indem Konstruktionen und Baustoffe (im Wesentlichen: Wandbaustoffe) herangezogen wurden, die für Gebäude der jeweiligen Bauart derzeit üblich sind und überwiegend zur Anwendung kommen [6].

Als weiterer Grund bzw. Vorteil der Auswahl der Typengebäude gemäß [6] im Rahmen der Studien [1]-[4] und auch dieser aufbauenden Kurzstudie kam hinzu, dass damit eine hervorragende Datenbasis etwa zu Baukosten (für ökonomische Nachhaltigkeitsanalyse), Konstruktionen (Bauteilaufbauten, Flächen, Massen; für ökobilanzielle Nachhaltigkeitsanalysen) und energetischer Qualität (siehe verfügbare Studien zur thermischen/energetischen Simulation gemäß Kapitel 2) erschlossen werden konnte.

Die Definition eines entsprechenden „Durchschnitts“ legt Eckdaten eines Typengebäudes EFH und MFH fest, wie z.B. Einbausituation, Geschossigkeit/Gebäudehöhe, Wohnungsgrößen, Wohnraumanzahl, etc.

Insofern ist das Verfahren zur Auswahl von Objekten für die Nachhaltigkeitsanalyse und -bewertung als systematisch und stringent zu klassifizieren.

Normkonformität der ökobilanziellen Analyse und Bewertung wurde durch eine unabhängige externe Verifizierung bestätigt.

Nutzungsdauern gemäß BBSR bzw. System BNB

Entsorgungsregeln für *End of Life*-Bilanzierung gemäß *DGNB*

Systemgrenzen der Ökobilanz im Studienkontext

Grds. erfolgte die ökobilanzielle Analyse und Bewertung der zuvor genannten Typengebäude gemäß folgender Normen(-reihen):

- ▶ DIN EN ISO 14040 und 14044 (allgemeine Normen(-reihe) für die Ökobilanzierung)
- ▶ DIN EN 15978 (Berechnungsmethode für die Gebäudeökobilanzierung)
- ▶ DIN EN 15804 (Ebene von Bauprodukten bzw. von ökobilanziellen Basisdaten)

Gleichzeitig erfolgte eine Berücksichtigung von Vorgaben des *DGNB* hinsichtlich von Modellierungs- und Berechnungsvorschriften für die einzelnen Lebenszyklusphasen und -module eines zu bilanzierenden Gebäudes.

Abb. 4 zeigt die entsprechend berücksichtigten Systemgrenzen bzw. betrachteten Module des Gebäudelebenszyklus. Demnach wurden in der Gebäudebewertung innerhalb der Systemgrenzen die Module A1 bis A3 (Herstellungsphase), die Module B4 (Austausch und Ersatz von Bauteilen nach Ablauf deren Nutzungsdauern) und B6 (Energieverbrauch im Betrieb; hier: Endenergiebedarf Wärme und Strom) sowie die Module C3 und C4 (Abfallbehandlung und Beseitigung/ Entsorgung) erfasst; das Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenzen i.V.m. den Modulen B4 und C3/C4) wird informativ separat ausgewiesen.

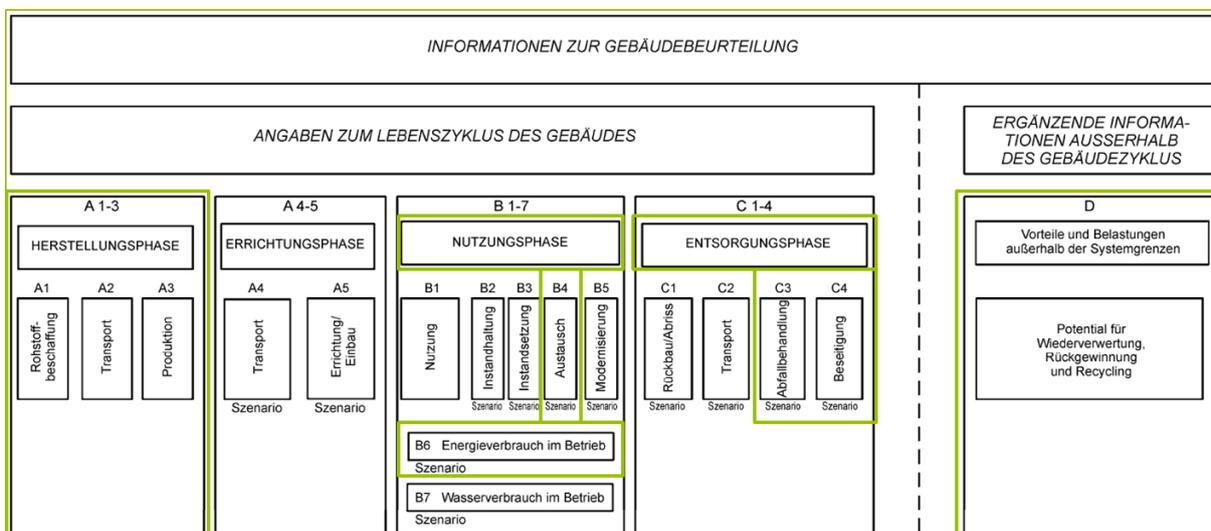


Abb. 4: Gebäudelebenszyklusstadien nach DIN EN 15978 | Ökobilanz-Systemgrenzen aus [1]-[4]



Energetische Äquivalenz im Sinne z.B. des EnEV-Standards bzw. identischer U-Werte.

Aufgrund seiner größeren Masse und vergleichsweise höheren Trägheit bei Temperaturänderungen ist Mauerwerk eher in der Lage, Wärme aufzunehmen und erst zeitverzögert wieder abzugeben, die Wärme also zu puffern.

In den Ökobilanzen aus [1], [5] und [3], [4] wurden die Ergebnisse pro m² Nettogrundfläche (NGF) und Jahr des Gebäudelebenszyklus ausgewiesen.

Zielsetzung der Kurzstudie

Ein zentrales Ergebnis dieser ökobilanziellen Analyse und Bewertung war, dass die Gesamtergebnisse bzw. -umweltwirkungen der Muster-Gebäude über ihren Lebenszyklus ganz maßgeblich von den Energieverbräuchen der Nutzungsphase (Wärme, Strom) bestimmt werden. Dabei wurden die Muster-Gebäude allerdings als auch energetisch vollständig äquivalent modelliert.

Faktisch können sich aber trotz energetischer Äquivalenz Unterschiede im Heizenergiebedarf der betrachteten Ausführungsvarianten ergeben, da dieser auch von der Wärmespeicherfähigkeit der verwendeten konstruktiven Baumaterialien beeinflusst wird.

Denn die Beheizung von Massivhäusern unterscheidet sich von derjenigen von Holzhäusern insofern, als die heizfreien Zeiträume in den Übergangsphasen zwischen Heizperiode und Nicht-Heizperiode respektive Nicht-Heizperiode und Heizperiode im April respektive Oktober länger sind – mit entsprechenden positiven Auswirkungen auf den Heizenergiebedarf [7][8].

Die vorliegende Kurzstudie soll diesen Effekt für das Muster-EFH und Muster-MFH aus [1] bzw. [5] sowie [3] und [4] respektive die modellierten Ausführungsvarianten ökobilanziell quantifizieren und in Form absoluter CO₂-Tonnagen für das jeweils komplette Gebäude und über den gesamten Lebenszyklus ausweisen.

2 Simulative Quantifizierung von Wärmespeichereffekten



Abb. 5: Energie-simulative Studie zum Muster-MFH [8]

Thermischer Komfort

Temperaturverhalten

Energie-simulative Studien zu Muster-EFH und -MFH

Im Rahmen eines Beratungsmandats zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Energieeinsparung wurden das Muster-EFH und Muster-MFH mittels einer energetischen Gebäudesimulation analysiert und bewertet [7][8].

Dabei sollte explizit auch untersucht werden, wie sich massive Bauweisen gegenüber der leichteren Holzbauweise auf das thermische Verhalten auswirken und in diesem Kontext u.a. auch der Heizenergiebedarf durch die Wärmespeicherung in massiven Bauteilen beeinflusst wird.

In diesen Studien wurden in Analogie zur eigenen Studienreihe die je Gebäudeklasse (EFH, MFH) marktrelevanten Bauweisen Mauerwerk (Ziegel, Kalksandstein sowie Poren- und Leichtbeton), Stahlbeton- (nur für Muster-MFH) und Holzbau abgebildet.

Simulationsergebnisse im Überblick

In allen Bauweisen des Muster-EFH und Muster-MFH kann der thermische Komfort sowohl im Winter als auch im Sommer grds. sichergestellt werden.

Gleichwohl ist der thermische Komfort der Massivhäuser faktisch besser zu bewerten, weil im Sommer dort geringere Überhitzungshäufigkeiten und Spitzen-Raumtemperaturen feststellbar sind.

Aufgrund der größeren thermischen Speicherfähigkeit der Bauteile ist das thermische Verhalten der Massivhäuser insgesamt stabiler als beim Holzhaus, im einzelnen weil

- ▶ die Temperaturschwankungen geringer ausfallen,
- ▶ insbesondere eine Überhitzung weniger schnell eintritt
- ▶ und somit eine höhere (thermische) Trägheit des Gebäudes vorliegt



Heizung

Ferner sind in den Massivhäusern auch die Spitzen-Heizleistungen um durchschnittlich 4 % (für Muster-EFH) bzw. um 8 bis 17 % (für Muster-MFH) geringer als im Holzhaus (vgl. Tab. 1 ff.).

Die einleitend skizzierten Unterschiede in der Beheizung von Massiv- und Holzhäusern in den Übergangsphasen von Heizperiode/Nicht-Heizperiode führen freilich auch zu Unterschieden im Heizenergiebedarf. Je nach Mauerwerksbauweise liegen die entsprechenden Reduzierungen des Heizenergiebedarfs bei bis zu 8 % für das Muster-EFH (im Durchschnitt: 6,5 %) bzw. bis zu 15 % für das Muster-MFH (im Durchschnitt: 8,5 %) bezogen auf das Holzhaus als Referenzfall und Bezugspunkt (vgl. Tab. 1 ff.).

Ausführungs- variante	Heizenergiebedarf		Spitzenheizleistungen	
	absolut [MWh]	Abweichung zu Referenz	absolut [kW]	Abweichung zu Referenz
Holz (Referenz)	8,50	± 0 %	4,8	± 0 %
Mauerwerk (Durchschnitt)	7,95	- 6,5 %	4,6	- 4 %

Tab. 1: Durchschnittliche Wärmespeichereffekte des Mauerwerks im Muster-EFH [7]

Ausführungs- variante	Heizenergiebedarf		Spitzenheizleistungen	
	absolut [MWh]	Abweichung zu Referenz	absolut [kW]	Abweichung zu Referenz
Holz (Referenz)	30,3	± 0 %	19,2	± 0 %
Mauerwerk (Durchschnitt)	27,8	- 8,5 %	17,25	- 10 %
Stahlbeton	28,8	- 5 %	18,0	- 6 %

Tab. 2: Durchschnittliche Wärmespeichereffekte des Mauerwerks im Muster-MFH [8]



3 Ökobilanzielle Abbildung von Wärmespeichereffekten

Ökobilanzielle Abbildung der Nutzungsphase

Wie einleitend beschrieben stellen die Umweltwirkungen der Nutzungsphase den ganz wesentlichen Teil der Gesamt-Umweltwirkungen über den Gebäudelebenszyklus dar.

Zu deren Berechnung werden die Endenergiebedarfswerte je Energieträger gemäß EnEV rechenstechnisch gekoppelt mit den entsprechenden ökobilanziellen Basisdaten an Umweltwirkungen je Energieträger (etwa kg CO₂ je kWh Strom, Erdgas, etc.). Dabei erfolgt der Ergebnisausweis gemäß Vorgaben des DGNB normiert auf bzw. pro m² NGF und Jahr.

Im Rahmen der Studienreihe aus [1]-[4] ergaben sich wegen der energetisch funktionellen Äquivalenz der betrachteten Ausführungsvarianten des Muster-EFH wie des Muster-MFH jeweils absolut identische ökobilanzielle Ergebnisse der Nutzungsphase.

Berücksichtigung von Wärmespeichereffekten

Gemäß Darstellung in Kapitel 2 führt das thermische Verhalten, konkret das Wärmespeichervermögen, der massiven Ausführungsvarianten zu einer Reduzierung des Heizenergiebedarfs (vgl. Tab. 1 f.).

Diese prozentualen Reduzierungsfaktoren können in die soeben skizzierte Berechnungsmethodik der Ökobilanz der Nutzungsphase implementiert werden, indem die Endenergiebedarfswerte um den entsprechenden Prozentsatz verringert werden – allerdings nur diejenigen, die unmittelbar mit dem Heizen, d.h. der thermischen Raumkonditionierung, in Verbindung stehen.

Im Übrigen entspricht dieses Vorgehen der Berücksichtigung von Wärmespeichereffekten bzw. die Bezugnahme der ökobilanziellen Abbildung der Nutzungsphase auf Ergebnisse einer thermischen/energetischen Simulation den neuesten Vorgaben des aktuellen DGNB-Systems in der Version 2018, die ein entsprechendes Vorgehen explizit gestatten.

Entsprechend wurde auch die Anlagentechnik und Energieversorgung der Ausführungsvarianten äquivalent (= identisch) modelliert.

Ökobilanzierung der Konstruktion über den Lebenszyklus bleibt gänzlich unverändert.

Demnach nicht: z.B. Endenergiebedarf Trinkwarmwasser

Im neuen DGNB-System der Version 2018 wird die Bezugnahme auf Simulationsergebnisse als Alternative zur Verwendung von Ergebnissen nach EnEV implementiert.



4 Bestimmung der CO₂-Tonnagen über den Lebenszyklus

Umrechnung der DGNB-Ergebnisse in CO₂-Tonnagen

Gemäß Kurzbeschreibung unter Kapitel 3 wurden die Ökobilanz-Ergebnisse der Studienreihe aus [1]-[4] bisher DGNB-konform normiert auf den bzw. pro m² NGF und Jahr bestimmt und ausgewiesen.

Nachfolgend soll der Ergebnisausweis abweichend davon als CO₂-Tonnage für das gesamte Muster-EFH bzw. Muster-MFH über den kompletten Gebäudelebenszyklus – mithin pro 50 und alternativ 80 Jahre (siehe Ausführungen in Kapitel 1) – erfolgen.

Dadurch sollen die Ergebnisse besser einordbar und vergleichbar gemacht werden, z.B. auch mit Blick auf andere „Referenzwerte“ für Umweltwirkungen bzw. CO₂-Fußabdrücke wie etwa den Pro-Kopf-Ausstoß an CO₂ in Deutschland.

Dazu sind die Ökobilanz-Ergebnisse pro m² NGF und Jahr aus Kapitel 3 lediglich mit den Gesamt-m² NGF des Muster-EFH bzw. Muster-MFH aus Abb. 2 f. sowie der Jahresanzahl des Gebäudelebenszyklus (50 und alternativ 80 Jahre) zu multiplizieren und auf die Gewichtseinheit Tonne (t) umzurechnen.

CO₂-Reduzierung durch Speichereffekte im Massivbau

Die entsprechenden Ergebnisse aus Tab. 3 f. | Abb. 6 f. verdeutlichen zunächst, dass zwischen den Ausführungsvarianten eines durchschnittlichen Mauerwerks und der Holzbauweise in der Herstellungsphase erhebliche Unterschiede in den verursachten CO₂-Äquivalenten bestehen. Dies ist damit zu begründen, dass Holz und Holzwerkstoffe in den ökobilanziellen Basisdaten als CO₂-Senke modelliert sind, was die CO₂-Speicherwirkung der Materialausgangsgestalt eines Baumes widerspiegelt.

Diese Unterschiede aus der Lebenszyklusphase der Herstellung nivellieren sich aber über den gesamten Lebenszyklus betrachtet weitestgehend ein. Denn erstens wird in der Lebenszyklusphase des End of Life die CO₂-Speicherwirkung des Holzes/der Holzwerkstoffe umge-

Jede Person „verursacht“ in Deutschland pro Jahr ca. **10 Tonnen** CO₂-Emissionen.

Die Stahlbetonbauweise als weitere Ausführungsvariante für MFH weist generell die höchsten CO₂-Äquivalente für Herstellung, Nutzung (Erneuerung) und Summe Lebenszyklus auf.

Für das Muster-EFH wurden als Untervarianten der Holzbauweise Stahlbeton- und Holzbalkendecken abgebildet.



Zum Vergleich: die jährlichen Pro-Kopf-Emissionen an CO₂ betragen in Deutschland ca. 10 Tonnen.

Vgl. etwa CO₂-Rechner unter www.dekra-online.de

Dies entspricht ca. 1-4 % der durchschnittlichen Jahresfahrleistung je Pkw in Deutschland.

Fazit⁴

kehrt, weil bei der thermischen Verwertung (Verbrennung) von Holz/Holzwerkstoffen das gespeicherte CO₂ wieder frei wird. Und zweitens verursacht die Ausführungsvariante der Holzbauweise in der Betriebsphase wegen der gegenüber massiven Ausführungsvarianten geringeren Wärmespeichereffekte deutlich mehr CO₂.

Insgesamt beträgt die prozentuale/absolute „Einsparung“ an CO₂ über 50 Jahre für das Muster-EFH in Holz in der Untervariante mit Holzbalkendecken ggü. dem Mauerwerk -1,6 %/ -5,00 t; für die Untervariante mit Stahlbetondecken des Muster-EFH in Holz sind sogar um 0,3 %/ 0,89 t höhere CO₂-Tonnagen über den Lebenszyklus festzustellen. Für das Muster-MFH beträgt die „CO₂-Einsparung“ über 50 Jahre -1,9 %/ -15,8 t.

Verglichen mit den *CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs* und *umgerechnet auf den Zeitraum eines Jahres* entsprechen diese Unterschiede der CO₂-Tonnagen der Fahrleistung eines durchschnittlichen Diesel-Mittelklassewagens von 145 (pro Wohnung des Muster-MFH) bis 555 km (für Muster-EFH mit Holzbalkendecken).

Für eine Betrachtung von 80 Jahren kehren sich die Ergebnisse weiter um: mit dem Durchschnitts-Mauerwerk lassen sich prozentual/absolut gegenüber der Holzbauweise für das Muster-EFH in der Untervariante mit Holzbalkendecken -1,9 %/ -8,81 t (Untervariante mit Stahlbetondecken: -2,1 %/ -9,55 t gegenüber Durchschnittsmauerwerk) bzw. für das Muster-MFH -4,0 %/ -45,9 t CO₂-Äquivalente „einsparen“.

Letztlich bestätigt sich damit nochmals die Kernaussage der Studien aus [1]-[4], wonach hierfür primär *nicht* die Bauweise entscheidend ist, sondern die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Bauteile. Wobei nach Sach- und Ergebnislage dieser Kurzstudie zu ergänzen ist, dass eben diese energetische Qualität – im Sinne von ökobilanziell wirksamen Wärmespeichereffekten – in massiven Wohngebäuden aus Mauerwerk höher ist als diejenige von Wohngebäuden in Holzbauweise.

⁴ Naturgemäß werden die ökobilanziellen Ergebnisse und die darauf basierten Aussagen auch von der Datenqualität der verwendeten ökobilanziellen Basisdaten (hier: Ökobau.dat) beeinflusst. Je nach angenommener Fehlerbreite können sich die o.g. Ergebnisdifferenzen grds. auch größer oder kleiner darstellen. An der Kernaussage des Fazits ändert eine übliche Fehlerbreite ökobilanzieller Basisdaten aber nichts.



CO ₂ -Äquivalente absolut ¹⁾ in Tonnen (t)						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	71,79	28,52	22,23	193,62	316,15	-16,53
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	58,86	29,03	28,32	200,83	317,04	-19,04
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	40,93	29,03	40,36	200,83	311,15	-23,64
Ø Holzständer	49,89	29,03	34,34	200,83	314,10	-21,34

%Abweichungen CO ₂ -Äquivalente bezogen auf ØMauerwerk als Referenzwert ¹⁾						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	-18,0%	1,8%	27,4%	3,7%	0,3%	15,2%
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	-43,0%	1,8%	81,6%	3,7%	-1,6%	43,0%
Ø Holzständer	-30,5%	1,8%	54,5%	3,7%	-0,7%	29,1%

Absolute Abweichungen CO ₂ -Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf ØMauerwerk als Referenzwert ¹⁾						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	-12,93	0,52	6,09	7,21	0,89	2,51
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	-30,86	0,52	18,14	7,21	-5,00	7,11
Ø Holzständer	-21,89	0,52	12,11	7,21	-2,06	4,81

Tab. 3: CO₂-Äquivalente Muster-EFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus

CO ₂ -Äquivalente absolut ¹⁾ in Tonnen (t)						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	71,79	50,81	22,23	309,79	454,62	-20,65
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	58,86	55,66	28,32	321,33	464,16	-25,69
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	40,93	60,80	40,37	321,33	463,42	-34,89
Ø Holzständer	49,89	58,23	34,34	321,33	463,79	-30,29

%Abweichungen CO ₂ -Äquivalente bezogen auf ØMauerwerk als Referenzwert ¹⁾						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	-18,0%	9,6%	27,4%	3,7%	2,1%	24,4%
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	-43,0%	19,7%	81,6%	3,7%	1,9%	69,0%
Ø Holzständer	-30,5%	14,6%	54,5%	3,7%	2,0%	46,7%

Absolute Abweichungen CO ₂ -Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf ØMauerwerk als Referenzwert ¹⁾						
1) für gesamtes Muster-EFH ([5]) und dessen NGF (274 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-EFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer mit MiWo-dämmung + Stb.decken	-12,93	4,85	6,09	11,54	9,55	5,04
Holzständer mit MiWo-dämmung + Holzbalkendecken	-30,86	9,99	18,14	11,54	8,81	14,25
Ø Holzständer	-21,89	7,42	12,11	11,54	9,18	9,64

Tab. 4: CO₂-Äquivalente Muster-EFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus

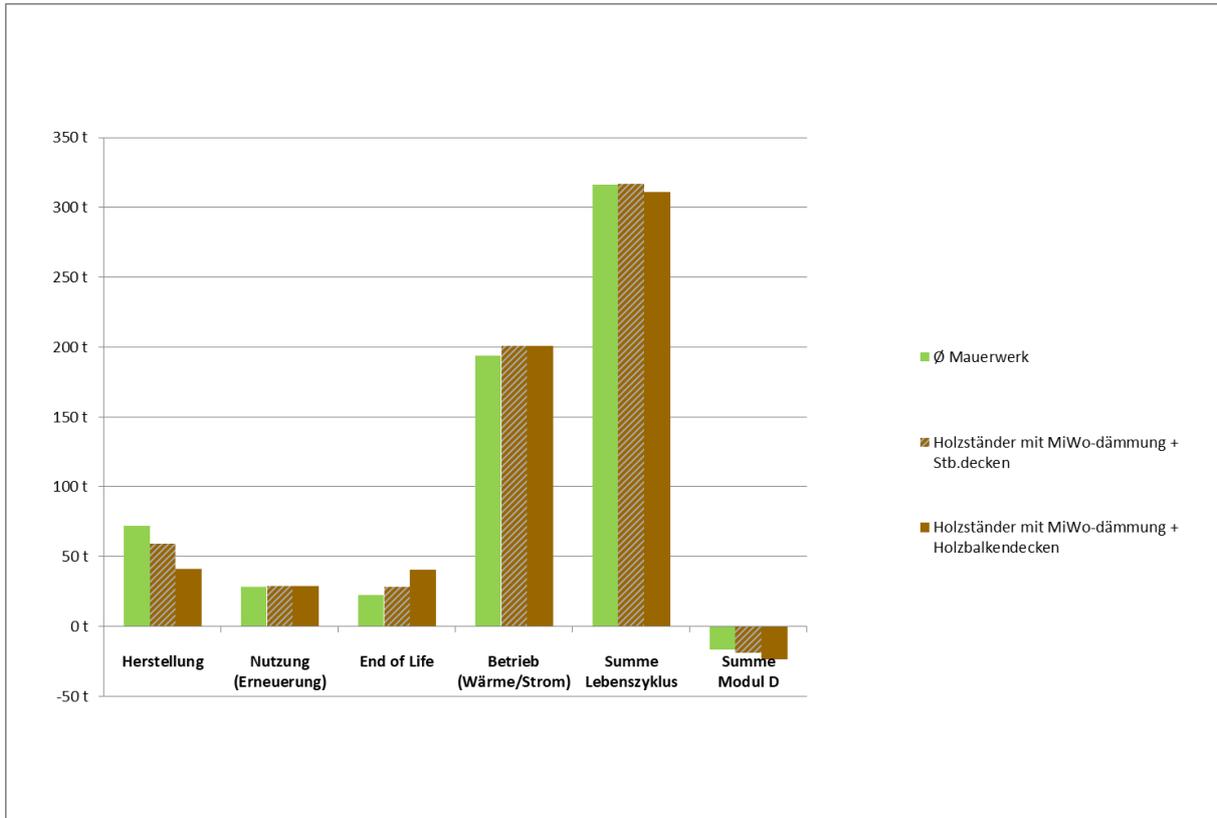


Abb. 6: Absolute CO2-Äquivalente in t für Muster-EFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus

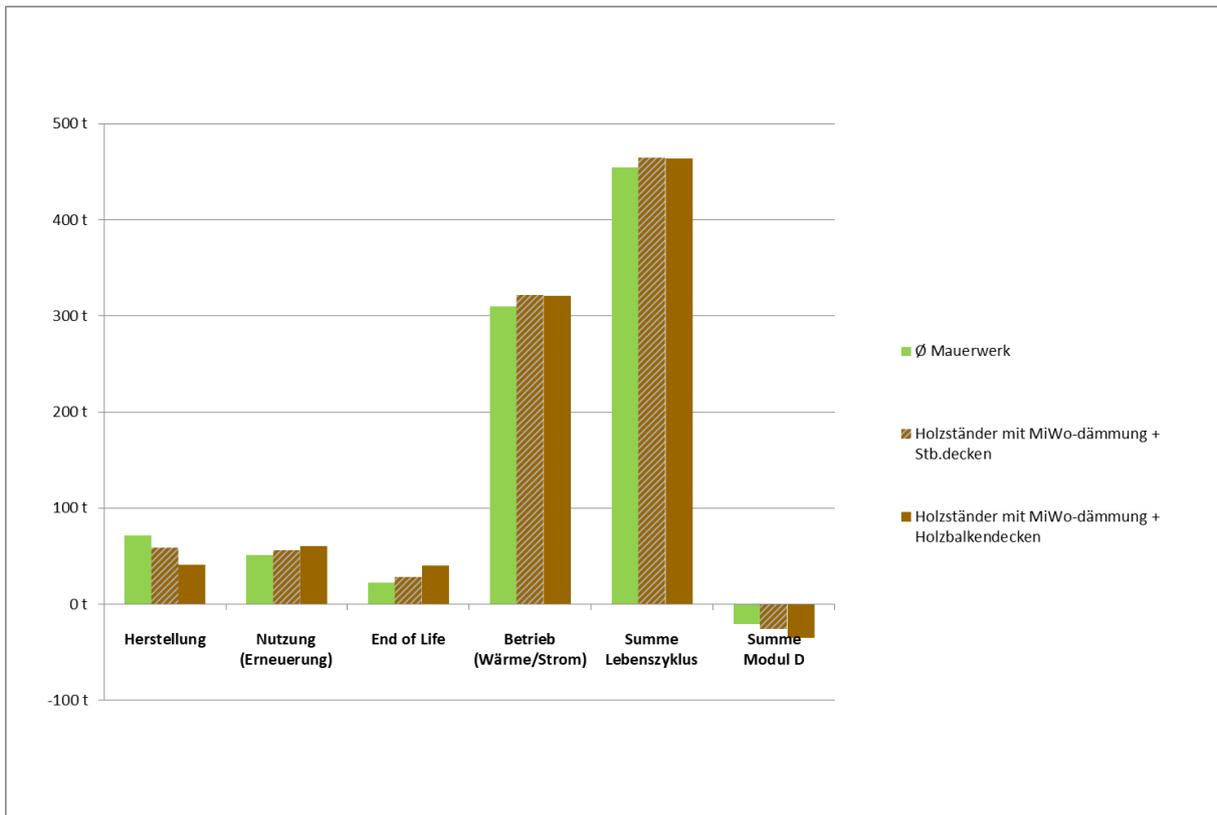


Abb. 7: Absolute CO2-Äquivalente in t für Muster-EFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus



CO₂-Äquivalente absolut^{*)} in Tonnen (t)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	268,13	88,59	63,30	418,68	838,70	-51,49
Holzständer MiWo-Dämmung	200,13	86,79	92,96	443,00	822,88	-61,58
Stahlbeton WDVS/EPS	303,04	103,41	71,50	428,65	906,60	-59,44
%-Abweichungen CO₂-Äquivalente bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer MiWo-Dämmung	-25,4%	-2,0%	46,9%	5,8%	-1,9%	19,6%
Stahlbeton WDVS/EPS	13,0%	16,7%	13,0%	2,4%	8,1%	15,4%
Absolute Abweichungen CO₂-Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer MiWo-Dämmung	-68,00	-1,80	29,66	24,32	-15,82	10,10
Stahlbeton WDVS/EPS	34,91	14,82	8,21	9,97	67,90	7,95

Tab. 5: CO₂-Äquivalente Muster-MFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus

CO₂-Äquivalente absolut^{*)} in Tonnen (t)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	268,13	159,11	63,30	669,90	1160,43	-71,36
Holzständer MiWo-Dämmung	200,13	204,44	92,96	708,80	1206,33	-94,20
Stahlbeton WDVS/EPS	303,04	175,83	71,50	685,85	1236,21	-79,31
%-Abweichungen CO₂-Äquivalente bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Holzständer MiWo-Dämmung	-25,4%	28,5%	46,9%	5,8%	4,0%	32,0%
Stahlbeton WDVS/EPS	13,0%	10,5%	13,0%	2,4%	6,5%	11,1%
Absolute Abweichungen CO₂-Äquivalente in Tonnen (t) bezogen auf Ø Mauerwerk als Referenzwert*)						
^{*)} für gesamtes Muster-MFH ([3][4]) und dessen NGF (1.091 m ²) sowie über gesamten Lebenszyklus von 80 Jahren						
Lebenszyklusphasen	Herstellung	Nutzung (Erneuerung)	End of Life	Betrieb (Wärme/Strom)	Summe Lebenszyklus	Summe Modul D
Muster-MFH-Variante						
Ø Mauerwerk	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Holzständer MiWo-Dämmung	-68,00	45,33	29,67	38,91	45,90	22,85
Stahlbeton WDVS/EPS	34,91	16,72	8,21	15,95	75,78	7,95

Tab. 6: CO₂-Äquivalente Muster-MFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus

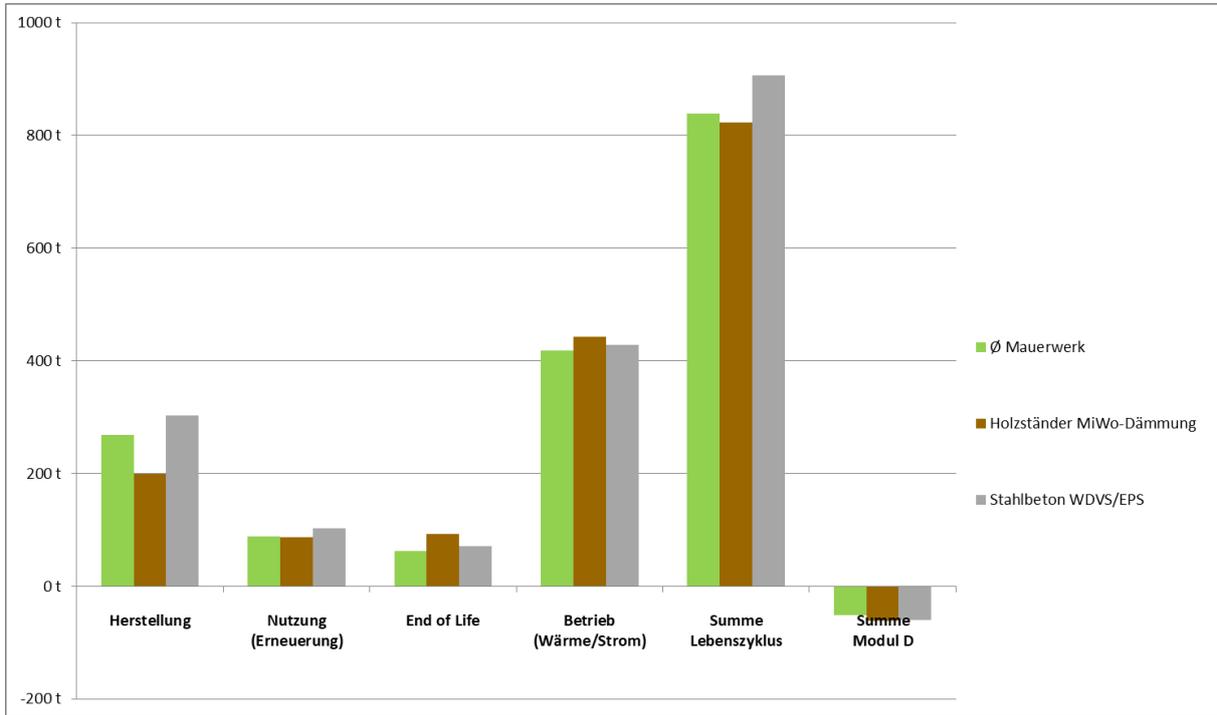


Abb. 8: Absolute CO2-Äquivalente in t für Muster-MFH für 50-Jahre-Gebäudelebenszyklus

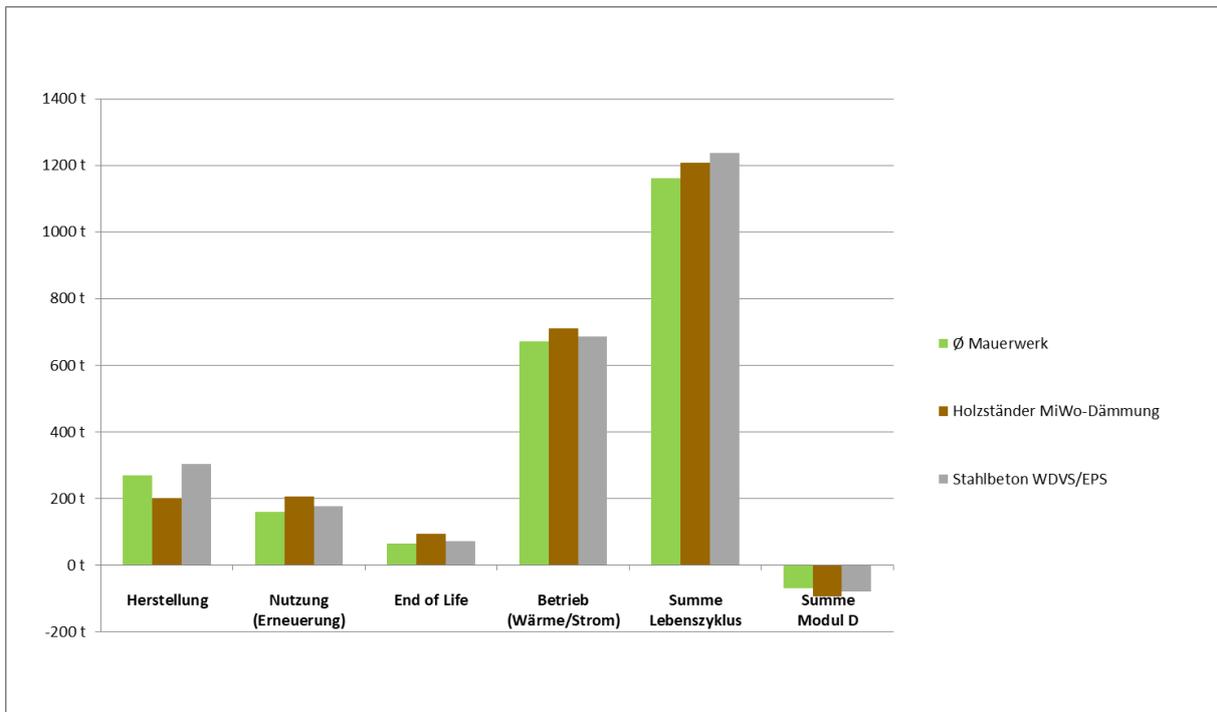


Abb. 9: Absolute CO2-Äquivalente in t für Muster-MFH für 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus



5 Zusammenfassung

Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Kurzstudie war die Quantifizierung derjenigen Effekte, die die Wärmespeicherfähigkeiten von Konstruktionsmaterialien auf die ökobilanziellen Ergebnisse der marktrelevanten Bauweisen Mauerwerk, Stahlbeton- und Holzbauweise haben.

Ausgangsbasis

Normkonformität der Ökobilanzierungen durch externe Prüfung bestätigt.

Ausgangsbasis der Kurzstudie waren dabei die durch die TU Darmstadt unabhängig geprüften Ökobilanzen für das Muster-EFH/-MFH aus Abb. 2 f., die bisher keine Wärmespeichereffekte der funktionell – d.h. insbesondere auch energetisch – äquivalenten Ausführungsvarianten des Muster-EFH/-MFH umfassten.

Die Ergebnisse der energetischen Gebäudesimulationen aus [7][8] zum thermischen Verhalten des Muster-EFH/-MFH in unterschiedlichen Bauweisen zeigen aber, dass zwischen den massiven Ausführungsvarianten in Mauerwerk und der in Holzbauweise aufgrund unterschiedlicher Wärmespeicherfähigkeiten nennenswerte Unterschiede in den Heizwärmebedarfen bestehen, die sich auch ökobilanziell signifikant niederschlagen (müssen). Denn die ökobilanziellen Gesamtergebnisse über den Gebäudelebenszyklus werden entscheidend von den Energiebedarfen der Nutzungsphase bestimmt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Tab. 3 f. sowie der Abb. 6 f. machen deutlich, dass die ökobilanziellen Nachteile des Mauerwerks in der reinen Herstellungsphase gegenüber Holz als kurzfristigem biogenen CO₂-Speicher über einen Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren weitestgehend kompensiert werden. Über einen realitätsnäheren Gebäudelebenszyklus von 80 Jahren kann das Mauerwerk die höheren Umweltwirkungen der Herstellungsphase überkompensieren und „spart“ CO₂-Äquivalente ein.

Über 80 Jahre:

- ▶ Muster-EFH Holz verursacht ggü. Mauerwerk bis zu 2,1 % / 9,55 t mehr CO₂.
- ▶ Muster-MFH Holz verursacht ggü. Mauerwerk 4,0 % / 45,9 t mehr CO₂.

Insofern können die zentralen Ergebnisse der Studien aus [1]-[4] bestätigt werden, wonach die ökologische Nachhaltigkeitsqualität primär *nicht* durch die Bauweise bestimmt wird, sondern die energetische Qualität eines Gebäudes und seiner Konstruktionen/Bauteile.

Literaturverzeichnis

- [1] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2013
- [2] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Nachhaltigkeit von mehrgeschossigen Wohngebäuden aus Mauerwerk. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2014
- [3] Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau. LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH, Darmstadt 2016
- [4] Pohl, S.: Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau. LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH, Darmstadt 2017
- [5] Pohl, S.: Ökobilanzierung Typengebäude EFH ARGE//eV nach [6]
- [6] ARGE//eV: Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden - Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht, Bauforschungsbericht Nr. 68, Kiel 2015
- [7] Lahme, A., Buchholz, S.: Einfamilien-Typenhaus nach EnEV-2016-Standard in verschiedenen Bauweisen – Beratung zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Energieeinsparung. alware GmbH, Braunschweig 2015
- [8] Lahme, A.: Mehrfamilien-Typenhaus nach EnEV-2016-Standard in verschiedenen Bauweisen – Beratung zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Energieeinsparung. alware GmbH, Braunschweig 2015



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH