



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH

Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau

Studie



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH

Studie

Projekt	Nachhaltigkeit von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau
beauftragt durch	Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. Dr.-Ing. 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, im Juli 2016

Dr.-Ing. Sebastian Pohl



Inhaltsverzeichnis

- 1 Motivation - Kontextualisierung - Vorgehensweise**
- 2 Nachhaltigkeit als strategischer Ansatz**
- 3 Das Bauwesen im Zentrum einer nachhaltigen Entwicklung**
- 4 Die Rohstoffe - Wiege des Lebenszyklus**
- 5 Die Produktion - Von den Rohstoffen zum fertigen Mauerstein**
- 6 Die Bauwerkserstellung - Aus Steinen werden Bauteile**
- 7 Die Nutzungsphase - Bedeutung des Faktors *Mensch***
- 8 Durch Cradle-to-Cradle zum geschlossenen Kreislauf**
- 9 Resümee - Nachhaltigkeitsbilanz von Mehrfamilienhäusern**

Literaturverzeichnis

Anhang

1 Motivation - Kontextualisierung - Vorgehensweise

Eine Einführung zur Nachhaltigkeit ist Teil des Kapitels 2 wie auch zweier Vorgängerstudien zur Nachhaltigkeitsqualität von Wohngebäuden aus Mauerwerk [1][2].

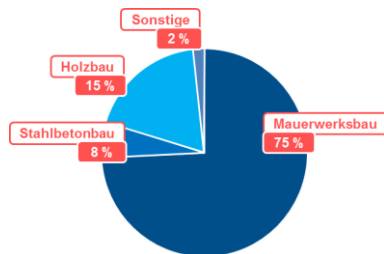


Abb. 1: Marktanteile im Wohnungsbau (2011/12) [3]

Basis: Untersuchungen der Vorgängerstudien zu EFH/ZFH sowie MFH



Ziel: Kombinierte Betrachtung aller aktuell marktrelevanten Konstruktions-/Bauweisen im Geschosswohnungsbau

Als in der Baupraxis anerkannte Bewertungs- und Zertifizierungssysteme kommen für diese bewertungstechnische Einordnung wiederum die Systeme *DGNB* (Nutzungsprofil *Neubau Wohngebäude, Version 2012*; kurz: *NWO12*) sowie *NaWoh* in Betracht.

Bedeutung des Mauerwerksbaus für Nachhaltigkeit

Eine nachhaltige Entwicklung gilt als zentrale Antwort auf globale Zukunftsfragen wie Ressourcenknappheit und Klimawandel. Eine Schlüsselrolle kommt dabei allgemein der Bau- und Immobilienwirtschaft als material- und energieintensiver Branche und im Speziellen Wohnbauten als wichtiger Gebäudetypologie zu.

Innerhalb dieses Gebäudesegments weist die Bauweise Mauerwerk traditionell den mit Abstand größten Marktanteil auf (Abb. 1). Insoweit kann und muss die Mauerwerksindustrie einen eigenen signifikanten Beitrag für eine nachhaltige Gesellschaft leisten. In diesem Kontext nimmt die vorliegende Studie eine fundierte Untersuchung und Beurteilung der Nachhaltigkeitsqualität von Wohngebäuden aus Mauerwerk vor.

Kontextualisierung und Vorgehensweise der Studie

Die nachfolgenden Untersuchungen basieren auf zwei Vorgängerstudien zur Nachhaltigkeitsqualität von Ein- (EFH) und Zwei- (ZFH) [1] sowie Mehrfamilienhäusern (MFH) [2] aus Mauerwerk. Die aktuellen Untersuchungen weiten diese aus in Richtung analoger Analysen zur Nachhaltigkeit von MFH hinsichtlich einer Vergleichsbetrachtung aktueller Entwicklungen in der Konstruktions- und Bauweise von Geschosswohnungsbauten.

Auch der dritte Band der Studienreihe nimmt eine ganzheitliche, den Gebäudelebenszyklus umfassende Perspektive ein und wählt als Betrachtungsrahmen sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte der *drei fundamentalen Nachhaltigkeitszieldimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziokultur/Funktionalität* sowie der *bauspezifischen Querschnittsqualitäten Technik und Prozesse*. Darüber hinaus werden identifizierte Nachhaltigkeitsaspekte von MFH, die gleichsam im Bewertungsregime einschlägiger Zertifizierungssysteme adressiert werden, weiterhin jeweils auch bewertungstechnisch eingeordnet, um einen Vergleich zwischen den marktrelevanten Konstruktions-/Bauweisen Mauerwerk sowie Stahlbeton und Holz ableiten zu können.

2 Nachhaltigkeit als strategischer Ansatz

Grenzen des Wachstums und nachhaltige Entwicklung

Die überblickshafte Retrospektive zur historischen Entwicklung des Nachhaltigkeitsansatzes in den o.g. Vorgängerstudien hat gezeigt, dass dieser zum originären Weltkulturerbe gehört und mitnichten eine neuartige und kurzlebige Modeerscheinung ist [1][2]. Zutreffend ist vielmehr, dass die strategische Vision der *Nachhaltigkeit* für eine resiliente Zukunft nach einer langen Zeit des Nischendaseins Ende des 20. Jahrhunderts auf die Weltbühne zurückgekehrt ist und den globalen wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Diskurs seit Beginn des neuen Jahrtausends entscheidend mitprägt [4].

Kern der Studie war die Simulation verschiedener Szenarien. Das hierzu konzipierte Weltmodell untersuchte dabei die global wirkenden Wechselbeziehungen zwischen fünf wichtigen „Trends“ [5]: Industrialisierung, Bevölkerungswachstum, Unterernährung, Ausbeutung von Rohstoffreserven und Zerstörung des Lebensraums.

Oft zitierte Meilensteine der *wissenschaftlichen* Auseinandersetzung mit Anforderungen einer zukunftsfähigen Entwicklung markieren die Studie *Die Grenzen des Wachstums* des Club of Rome sowie der *Brundtland-Bericht* der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED). Durch die Untersuchungen der von einer Forschergruppe um den Ökonom Dennis L. Meadows erstellten Studie aus dem Jahr 1972 wurde die zerstörerische Problematik einer allgemeinen Wachstumsdoktrin angesichts der natürlichen Grenzen des verfügbaren Umweltraums unserer Erde thematisiert und erstmals mit einer wissenschaftlichen und computergestützten Methodik analysiert [5]. Die Problemstellung der Überforderung und devastativen Ausbeutung der Erde wurde auch vom Brundtland-Bericht 1987 aufgegriffen und ins Zentrum der Bestrebungen für eine nachhaltige Entwicklung gestellt. Der Bericht wird deshalb als so bedeutend für den Nachhaltigkeitsdiskurs angesehen, weil mit ihm erstmalig eine ganzheitliche Strategie einer zukunftsfähigen globalen Entwicklung skizziert wurde. Er gilt mithin als moderne Definition des Nachhaltigkeitsbegriffs [6].

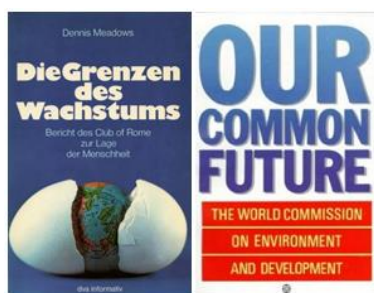


Abb. 2: Literaturempfehlung
Meilensteine des wissenschaftlichen Diskurses [5][6].

Dazu, welche Wertigkeit den Zieldimensionen zuzuordnen sind, gibt es im Wesentlichen vier abgrenzbare Positionen, die sich in *Nachhaltigkeitsgrade* übersetzen lassen [7].

Eine umfassende Darstellung dieses politischen Prozesses der supranationalen und nationalen Operationalisierung findet sich etwa in [8].

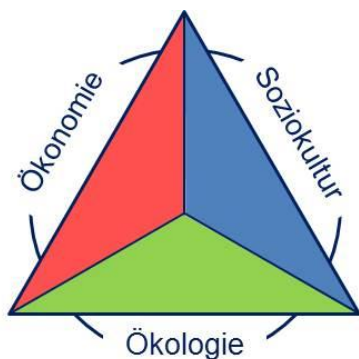


Abb. 3: Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit

Die Zieltrias Ökologie - Ökonomie - Soziokultur

Wichtig für die Verankerung des Nachhaltigkeitsansatzes in der globalen *politischen* Debatte waren insbesondere die Umwelt- und Klimakonferenzen der Vereinten Nationen. So verpflichtete etwa die auf der UN-Konferenz in Rio de Janeiro 1992 beschlossene *Agenda 21* alle Unterzeichnerstaaten zur Erarbeitung nationaler Strategien für eine nachhaltige Entwicklung und prägte ganz entscheidend das Leitbild der Nachhaltigkeit als Drei-Säulen-Modell bestehend aus ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Zielsetzungen. Gleichwohl ist dieses Leitbild Gegenstand stetiger Diskussion und Fortentwicklung. Eine wichtige Kontroverse besteht beispielsweise ob der korrekten hierarchischen Ordnung der Zieldimensionen [7].

Die *Agenda 21* gilt jedenfalls als wesentliche Basis aller zeitlich nachfolgenden supranationalen, nationalen und lokalen Ansätze zur Konkretisierung und Umsetzung des bis dahin abstrakten Nachhaltigkeitsgedankens. Für den europäischen bzw. bundesdeutschen Hoheitsbereich erfolgte diese Operationalisierung durch die Lissabon-Strategie der EU bzw. die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, die Arbeit und Ergebnisse eines langjährigen Entwicklungs- und Konsultationsprozesses bündelt und die Konzeption des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit ausdrücklich festschreibt [8]. Damit hat sich auch Deutschland zu einem strategischen Umdenken unter Berücksichtigung des Lebenszyklusgedankens verpflichtet [9].

Die Umsetzung, Fortschreibung und Kontrolle der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie obliegt in Deutschland insbesondere dem Staatssekretärausschuss, der als *Green Cabinet* vor allem auch die Bau- und Immobilienwirtschaft in den Fokus seines Nachhaltigkeitsmanagements gerückt hat. Aufgrund der beschriebenen Entwicklungen hat sich das Drei-Säulen-Modell als Dreiklang aus Ökologie, Ökonomie und Soziokultur (Abb. 3) zwischenzeitlich weltweit zumindest als Grundfigur und erste Konkretisierungsstufe des abstrakten Nachhaltigkeitsansatzes des Brundtland-Berichts etabliert.

3 Das Bauwesen im Zentrum einer nachhaltigen Entwicklung

Weitere Nachhaltigkeitsaspekte und -kennzahlen werden z.B. in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamts veröffentlicht [10].

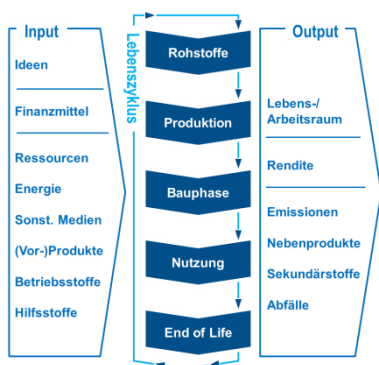


Abb. 4: Lebenszyklusphasen von Bauwerken

Beyond Green - Nachhaltiger Wohnraum

In der soeben als Teil des Operationalisierungsprozesses genannten nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung kommt dem Bauwesen eine Schlüsselrolle zu. Die bereits zitierten Vorgängerstudien haben hierzu ausgeführt, dass dieser bau- und immobilienwirtschaftlichen Schwerpunktsetzung die Tatsache und Erkenntnis der enormen Umweltwirkungen der Bau- und Immobilienwirtschaft zugrunde liegt [1][2][4].

In analoger Weise lässt sich die Bedeutung des Bauwesens u.a. auch mit der sozioökonomischen Relevanz und Wichtigkeit von Bauwerken wie beispielsweise Wohngebäuden fundieren, etwa was den zunehmenden Bedarf an nachhaltigem - im Sinne von: umweltverträglichem, bezahlbarem und unter Komfortaspekten hochwertigem - Wohnraum in städtischen Ballungszentren (vor allem im Geschosswohnungsbau) angeht.

Auch dieses ergänzende Beispiel für die Nachhaltigkeitsbedeutung des Bauwesens verdeutlicht, dass Gebäude nicht nur bei Konzeption, Planung und Erstellung, sondern über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg zu betrachten sind, wenn es um ihre Nachhaltigkeitsqualität geht. Abb. 4 zeigt einen sozioökonomisch erweiterten Überblick über die einzelnen Lebenszyklusphasen und deren Nachhaltigkeitswirkungen getrennt nach In- und Output-Seite. Der für die Umsetzung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie verantwortliche Staatssekretärausschuss sieht eine forcierte lebenszyklusorientierte Betrachtung von Gebäuden unter Einbeziehung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte denn auch als wichtigen Baustein einer nachhaltigen Entwicklung.

Für eine Systematisierung der Nachhaltigkeitsbetrachtung von Gebäuden über den Lebenszyklus ist es jedoch erforderlich, Nachhaltigkeit als abstrakte Begrifflichkeit transparent und messbar zu machen. Das heißt, das Drei-Säulen-Modell muss weiter konkretisiert und auf Gebäudeebene objektiviert werden [11].

Meilenstein Deutsche Zertifizierungssysteme

Speziell für die deutsche Bau- und Immobilienwirtschaft wurde mit der Entwicklung des *Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen* im Rahmen der Aktivitäten des Gremiums *Runder Tisch Nachhaltiges Bauen* und unter maßgeblicher Beteiligung des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt die grundlegende Voraussetzung dazu geschaffen [12]. Das Deutsche Gütesiegel stellt eine ganzheitliche - lebenszyklusbasierte und mehrdimensionale - Weiterentwicklung internationaler Systeme dar und bewertet Gebäude auf Basis einer wissenschaftlich fundierten und planungsbasierten Methodik aus ökologischen, ökonomischen und soziokulturell-funktionalen Kriterien unter bauspezifischer Einbeziehung technischer und prozessqualitativer sowie standortbezogener Aspekte (Abb. 5).

Umfangreiche Informationen zu den deutschen Nachhaltigkeitszertifizierungssystemen *DGNB* und *BNB* sind über den jeweiligen Internetauftritt der Systemträger unter www.dgnb.de und www.nachhaltigesbauen.de verfügbar.



Abb. 5: Bewertungsmethodik des DGNB-Systems [13]

Gemeinsam mit dem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) getragenen *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen des Bundes (BNB)* bildet das privatwirtschaftliche System der *Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB-System)* die deutsche Systemlandschaft zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden. Beide Systeme wurden 2009 als *gemeinsames Basissystem* Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen entwickelt. Bereits seit den 1990er Jahren gibt es die internationalen Bewertungssysteme BREEAM und LEED. Allerdings sind beide durch eine ökologische Schwerpunktsetzung gekennzeichnet und entsprechen nicht dem anerkannten Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit. Sie gelten daher als reine Green-Building-Systeme [11][14].



Die Systeme *BNB* und *DGNB* repräsentieren einen Meilenstein der Verankerung von Grundsätzen nachhaltigen Bauens in der Bau- und Immobilienwirtschaft und haben sich seit ihrer Praxiseinführung zunehmend bei der Realisierung von Bauvorhaben etabliert [14]. Mittlerweile geht ihr Portfolio an *Systemvarianten* bzw. *Nutzungsprofilen* weit über die ursprünglich abbildbare Typologie Büro-/Verwaltung hinaus. Heute können alle wichtigen Gebäudetypologien bewertet werden, wobei speziell für Wohngebäude auch das System *NaWoh* anwendbar ist. (Tab. 1).

Zusätzlich umfasst das *DGNB*- bzw. *BNB*-Systemportfolio auch Systemvarianten bzw. Nutzungsprofile zur Bewertung und Zertifizierung von Bestandsgebäuden und ganzen Quartieren.

Gebäudetypologien für Neubauten	BNB	DGNB	NaWoh
Büro- und Verwaltungsgebäude	✓	✓	-
Bildungsbauten	✓	✓	-
Handelsbauten	-	✓	-
Hotelgebäude	-	✓	-
Industriebauten	-	✓	-
Gesundheitsbauten	-	✓	-
Laborgebäude	✓	✓	-
Wohngebäude (größer 6 WE)	-	✓	✓
Kleine Wohngebäude (bis 6 WE)	-	✓	-
Versammlungsstätten	-	✓	-
Außenanlagen	✓	-	-

Tab. 1: DGNB-/BNB-Systemportfolio

Nachhaltigkeit im Wohnungsbau - Das System *NaWoh*

Einleitend wurde beschrieben, dass auch diese Fortsetzungsstudie die Nachhaltigkeitsqualität von Wohngebäuden - hier jedoch: MFH - aus Mauerwerk *lebenszyklusorientiert* analysieren und betrachtete Nachhaltigkeitsaspekte dabei situativ ins Bewertungsregime eines Zertifizierungssystems einordnen soll. Hierfür sind gemäß Tab. 1 - und in Analogie zur jüngsten Vorgängerstudie [2] - das *DGNB*-Nutzungsprofil *Neubau Wohngebäude (NWO)* sowie das System *NaWoh* einschlägig und passgenau, weil sie speziell für Wohngebäude mit mehr als sechs Wohneinheiten bzw. für MFH konzipiert worden sind.

Konkret sollen die nachfolgenden ausgeweiteten Untersuchungen zur Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau auf Basis des Systems *NaWoh* erfolgen. Dieses gehört de jure zwar nicht zur oben skizzierten *BNB*-Familie, ist de facto aber dennoch ein Bestandteil des öffentlichen Systemstrangs des deutschen Bewertungsansatzes.

Um die durch eine Zertifizierung ausgelösten Zusatzkosten zu minimieren und eine Breitenanwendung zu ermöglichen, wurde die *NaWoh*-Bewertungsmethodik bei der Systementwicklung speziell auf die Bedürfnisse der Wohnungswirtschaft angepasst, ohne die Grundstruktur der in Deutschland konzipierten Methode der Nachhaltigkeitsbewertung zu verändern (Abb. 6).

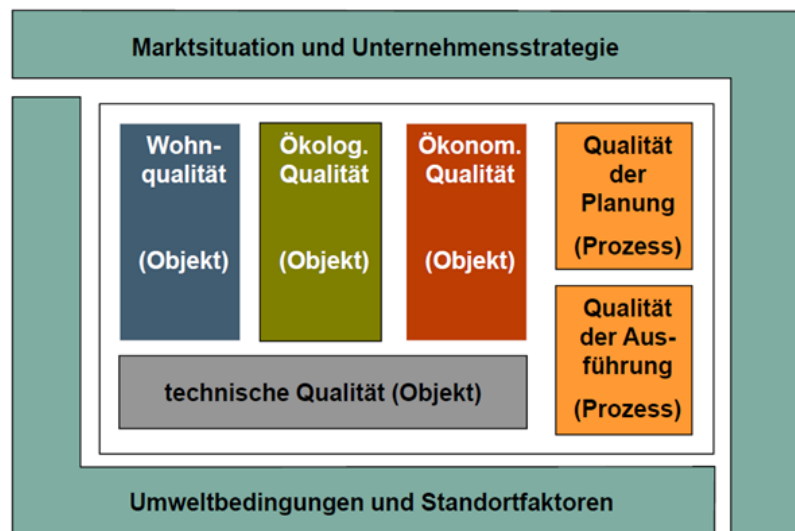


Abb. 6: Bewertungsmethodik des Systems *NaWoh* [15]

Eine weitere Besonderheit des Systems *NaWoh* liegt im Verzicht auf den Ausweis Gesamtbewertung sowie auf die Vergabe von Qualitätsstufen oder Medaillen. Vielmehr wird der Ansatz eines Qualitätssiegels verfolgt, das als Signal für Qualität und Transparenz fungieren soll [15].

Die Besonderheit des Systems *NaWoh* - insbesondere gegenüber dem *DGNB*-Nutzungsprofil *NWO* als gebäudetypologischer Entsprechung - liegt u.a. in der Unterscheidung zwischen bewertenden und lediglich beschreibenden Kriterien. Im Ergebnis vereinfacht und erleichtert diese Vorgehensweise und Struktur der Bewertungsmethodik die Durchführung einer *NaWoh*-Zertifizierung, vor allem im direkten Vergleich mit einer Zertifizierung nach dem vergleichbaren *DGNB*-Nutzungsprofil. Anhang A zeigt den Kriterienkatalog des System *NaWoh* [16].

4 Die Rohstoffe - Wiege des Lebenszyklus

Marktbestimmende Mauersteinarten im Überblick

Da für *beide* Vorgängerstudien und ihre Analysen bereits dieselben marktbestimmenden Mauersteinarten maßgeblich waren, bleibt dies auch für die aktuelle Studie so. Deshalb gilt auch, dass die Vielfalt der eingesetzten Mauersteinarten zu einer Vielfalt an verwendeten Rohstoffen führt. Insofern bleiben *Umweltproduktdeklarationen (EPD)* eine ideale Informationsbasis hinsichtlich der verwendeten Rohstoffe und Vorprodukte bei der Herstellung von Mauersteinen (Tab. 2) [17].



Tab. 2: Exemplarische Umweltproduktdeklarationen (EPD) der marktbestimmenden Mauersteinarten
Marktführer für EPDs zu Baustoffen in Deutschland ist das Institut für Bauen und Umwelt e.V. (IBU). Als Systemträger eines EPD-Programms ist das IBU u.a. verantwortlich für die Verifizierung und Revision von EPDs. Weitere Erläuterungen zum Themenfeld der EPDs gibt auch [17]. Die in Tab. 2 dargestellten EPDs sind über die Homepage des IBU unter www.bau-umwelt.de abrufbar [18][19][20][21].

Ausführliche Erläuterungen zu den verwendeten natürlichen Rohstoffen, deren Gewinnung sowie möglichen Umweltauswirkungen finden sich in den Vorgängerstudien jeweils in den Kapiteln 4 ab Seite 11 [1] bzw. ab Seite 9 [2].

Mithin haben die grundlegenden Ausführungen der ersten Vorgängerstudie [1] zu Nachhaltigkeitsaspekten der Rohstoffgewinnung bzw. der Klassifizierung von Mauersteinen als natürliches Bauprodukt auch bei einer Nachhaltigkeitsbetrachtung von MFH Bestand. Sie sollen aber hier nicht pauschalierend wiederholt, sondern selektiv spezifiziert und mit den Erkenntnissen der jüngsten Vorgängerstudie [2] verschnitten werden hinsichtlich der angestrebten Vergleichsbetrachtung mit anderen, aktuell im Geschosswohnungsbau üblichen Konstruktions- und Bauweisen (Stahlbeton, Holz).



Die erste Vorgängerstudie [1] zeigt in ihrer Abb. 8 für die Mauersteinarten Ziegel, Kalksandstein, Poren- sowie Leichtbeton eine geographische Auswahl zu Förderstätten von Steine- und Erden-Rohstoffen und der Ansiedlung von Produktionsstandorten für Mauerwerk in direkter Umgebung.

Rohstoffversorgung und Naturraumbeanspruchung

Ein zentraler Aspekt für die ökologische Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk in der frühen Lebenszyklusphase liegt in der langfristig sicheren und ortsnahen Versorgung mit den erforderlichen Steine- und Erden-Rohstoffen. Die genannte Ortsnähe - bezogen auf die Standorte von Produktionsbetrieben in unmittelbarer Nähe zu den Abbaugebieten der Steine- und Erden-Rohstoffe - führt insbesondere dazu, dass energie- und emissionsintensive Transporte in Verbindung mit den enormen Masseströmen im Zuge des Tagebaus minimiert werden können.

Hinzu kommt, dass Abbaugebiete für Steine- und Erden-Rohstoffe nicht auf Dauer in Anspruch genommen werden, sondern mit Ende des Rohstoffabbaus durch gesetzlich vorgeschriebene Rekultivierungs- oder Renaturierungsmaßnahmen an Gesellschaft und Natur zurückgegeben werden müssen. Die Rohstoffgewinnung für die Mauerwerksindustrie ist mithin grundsätzlich nicht mit einer direkten Zerstörung von Umwelt und Natur verbunden. Dieser wichtige Aspekt der Folgenutzung von Rohstoffgewinnungsflächen bleibt bei der Nachhaltigkeitsuntersuchung von Bau- und Konstruktionsmaterialien häufig unberücksichtigt, insbesondere bei der Diskussion um nachwachsende Rohstoffe wie etwa Holz. Solche Rohstoffe können die Vorteile ihrer Regenerierbarkeit nur dann tatsächlich und dauerhaft realisieren, wenn die Bewirtschaftung der Gewinnungsflächen bzw. Nutzung der Ressource nachhaltig erfolgt. Wenn also über einen bestimmten Zeitraum nur so viel der Ressource verbraucht wird, wie im selben Zeitraum auch nachwachsen kann. Aus eben diesem Grund fragt beispielsweise das *DGNB*-System im Rahmen seiner Kriterien explizit nach der Herkunft verwendeter Holzwerkstoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft.



Nachhaltigkeit notwendiger industrieller Vorprodukte

Über die natürlichen Rohstoffe hinaus bestehen Mauersteine je nach Steinart aus verschiedenen industriellen Vorprodukten. Eine wichtige Gruppe dieser Vorprodukte stellen *Bindemittel* dar, die die Bildung des *Kunststeins Mauerwerk* erst ermöglichen und für die Festigkeit mitverantwortlich sind (Tab. 3). In Mauersteinen werden - mit Ausnahme der Mauersteinart Ziegel - als hydraulische Bindemittel Branntkalk und/oder Zement eingesetzt.

In der Bauindustrie wird grundsätzlich zwischen hydraulischen und nicht-hydraulischen Bindemitteln unterschieden.



Bindemittel im Ziegel

Der Rohstoff Ton wirkt durch das Brennen der geformten Steine gleichsam als Bindemittel



Bindemittel im Kalksandstein

Im Kalksandstein sorgt Branntkalk als Bindemittel für die erhärtende chemische Reaktion der Steinrohmasse.



Bindemittel im Porenbeton

In Porenbetonsteinen werden Zement und Branntkalk als Bindemittel eingesetzt.



Bindemittel im Leichtbeton

Neben Zement werden zunehmend auch Substitute wie Trass als Bindemittel verwendet.

Tab. 3: Mauersteinarten und verwendete Bindemittel

Hydraulische Bindemittel härten dabei sowohl an der Luft als auch unter Wasser aus und sind nach Erhärten wasserbeständig.

Beide werden durch das Vermahlen und Brennen von natürlichem Kalkstein bzw. natürlichem Kalkstein und Ton hergestellt. Aufgrund dieses mechanisch-thermisch dominierten, mithin energieintensiven Herstellprozesses sind Branntkalk und Zement Vorprodukte mit im Vergleich zu den oben beschriebenen Rohstoffen nicht unerheblichen Umweltwirkungen.

Die Kalksandsteinindustrie verzichtet bewusst auf eine Verwendung von Substituten für die von ihrem *Reinheitsgebot* umfassten Primärrohstoffe Kalk, Sand und Wasser.

Die Hersteller optimieren ihre Mauersteine deshalb kontinuierlich hinsichtlich des Gehalts an industriellen Bindemitteln bzw. des Energieeinsatzes. Eine wichtige Strategie ist dabei z.B. bei der Herstellung von Leichtbetonsteinen die Substitution des Zements durch industrielle Koppelprodukte sowie durch natürliche Rohstoffe (z.B. Trass), die wie Zement eine hydraulische Bindewirkung und Festigkeitsbildung erzeugen. Dadurch können die aus den Bindemitteln resultierenden Umweltwirkungen erheblich reduziert werden.



Diese Unterschiede hinsichtlich der Bindemittelgehalte werden auch im Rahmen ökobilanzieller Auswertungen in den Kapiteln 5 und 6 erneut thematisiert.

Ohnehin zeichnen sich die betrachteten Mauersteinarten im Vergleich mit anderen mineralischen Baustoffen (wie etwa (Stahl-)Beton) durch einen relativ geringen Bindemittelgehalt aus. Die nachfolgende Tab. 4 zeigt eine Auswertung von Umweltproduktdeklarationen des IBU-EPD-Programms hinsichtlich des *absoluten* Gehalts an Bindemitteln in kg für die Mauersteinarten Kalksandstein, Poren- und Leichtbeton sowie für Beton C25/30 und C30/37 je m³ des jeweiligen Baustoffs.

Baustoff	Spezifikation	Rohdichte [kg/m ³]	Eingesetzte(s) Bindemittel	Bindemittelgehalt		Quelle
				in [M-%]	in [kg je m ³]	
Kalksandstein	Durchschnittliches KS-Mauerwerk, max. Bindemittelgehalt	1800	Branntkalk	7,0%	126,0	EPD-BKS-2009111-D
	Durchschnittliches KS-Mauerwerk, min. Bindemittelgehalt	1800	Branntkalk	5,0%	90,0	EPD-BKS-2009111-D
	Durchschnittliches Xella-KS-Mauerwerk, max. Bindemittelgehalt	1800	Branntkalk	13,0%	234,0	EPD-XEL-2008311-D
	Durchschnittliches Xella-KS-Mauerwerk, min. Bindemittelgehalt	1800	Branntkalk	4,0%	72,0	EPD-XEL-2008311-D
Porenbeton	Durchschnittliches Xella-PB-Mauerwerk, max. Bindemittelgehalt	445	Zement, Branntkalk	50,0%	222,5	EPD-XEL-2012113-D
	Durchschnittliches Xella-PB-Mauerwerk, min. Bindemittelgehalt	445	Zement, Branntkalk	25,0%	111,3	EPD-XEL-2012113-D
	Durchschnittliches H+H Celcon-PB-Mauerwerk, max. Bindemittelgehalt	460	Zement, Branntkalk	50,0%	230,0	EPD-HHC-2010112-D
	Durchschnittliches H+H Celcon-PB-Mauerwerk, min. Bindemittelgehalt	460	Zement, Branntkalk	25,0%	115,0	EPD-HHC-2010112-D
Leichtbeton	natürliche Zuschläge, Vollblock Vbl. leicht	450	Zement	23,0%	103,5	EPD-BVL-2013111-D
	natürliche Zuschläge, Vollstein Vbl. schwer	1800	Zement	8,0%	144,0	EPD-BVL-2013111-D
	natürliche Zuschläge, Hohlblock Hbl.	800	Zement	11,0%	88,0	EPD-BVL-2013111-D
	natürliche Zuschläge mit Trass, Vollblock Vbl. leicht	450	Zement, Trass	18,0%	81,0	EPD-BVL-2013121-D
	natürliche Zuschläge mit Trass, Vollstein Vbl. schwer	1800	Zement, Trass	7,0%	126,0	EPD-BVL-2013121-D
	natürliche Zuschläge mit Trass, Hohlblock Hbl.	800	Zement, Trass	8,0%	64,0	EPD-BVL-2013121-D
Beton	C25/30	2400	Zement, Flugasche	15,0%	360,0	EPD-IZB-2013421-D
	C30/37	2400	Zement, Flugasche	17,1%	410,4	EPD-IZB-2013431-D
	Betonlichtschächte	2717	Zement, Kalksteinmehl	18,1%	491,8	EPD-BBS-2012111-D

Tab. 4: Art und Gehalte von Bindemitteln in mineralischen Baustoffen

Basis der Auswertungen in Tab. 4 sind diverse Umweltproduktdeklarationen des IBU-EPD-Programms für die Baustoffkategorien Mauerwerk (<http://bau-umwelt.de/hp547/Mauerwerk.htm>) und Beton (<http://bau-umwelt.de/hp4379/Beton.htm>) [22][23]. Es wird deutlich, dass bezogen auf die Kubatur der Baustoffe Beton deutlich höhere Bindemittelgehalte aufweist.

Am Institut für Angewandte Bauforschung in Weimar werden derzeit z.B. Verfahren entwickelt, um aus Mauerwerkbruch geblähte Leichtzuschläge für Mauersteine im industriellen Maßstab herzustellen (siehe dazu auch in Kapitel 8).

Auch für andere Vorprodukte wie Blähton als industriellem Zuschlagstoff werden künftig zunehmend Substitute mit reduzierten Umweltwirkungen verfügbar sein, die z.B. aus dem Recycling von Mauerbruch stammen. Im Übrigen haben andere industrielle Vorprodukte wie Aluminium als Porosierungsstoff nur vernachlässigbar kleine Massenanteile und stammen oftmals ebenfalls bereits aus Recyclingprozessen.



Mauerwerk als *Verbundwerkstoff*

Stahlbeton ist in diesem Sinne ein Verbundwerkstoff aus Beton als mineralischer Materialkomponente und Bewehrungsstahl.

Weiterer (industrieller) Vorprodukte bedarf es rohstoffseitig für die Herstellung von Mauersteinen grundsätzlich nicht (siehe dazu auch Kapitel 5). Jedoch wird Mauerwerk in der Anwendung für Wandbauteile von Gebäuden üblicherweise als *Verbundwerkstoff* aus Mauersteinen und Mörtelfugen ausgeführt. Ein Bauteil aus Mauerwerk benötigt demnach bei der Bauwerkserstellung eine zweite Materialkomponente (siehe dazu auch Kapitel 6). Allerdings ist die Klassifizierung als Verbundwerkstoff kein Alleinstellungsmerkmal der Mauerwerksbauweise, sondern gilt auch bei anderen massiven Bauweisen wie z.B. Bauteilen aus Stahlbeton.

Bewertungstechnische Abbildung der Rohstoffe

Im Kontext einer Nachhaltigkeitszertifizierung von MFH aus Mauerwerk und mit Blick auf den Kriterienkatalog des relevanten Systems *NaWoh* spielen die ökobilanziellen Umweltwirkungen von Bauprodukten eine wichtige Rolle. Für die Lebenszyklusphase der Rohstoffe bedeutet dies eine Ökobilanzierung der sogenannten *Vorketten*, das heißt der Input- und Output-Flüsse im Rahmen des Abbaus oder der Gewinnung bzw. Herstellung der oben dargestellten Rohstoffe und Vorprodukte.

In den genannten Vorgängerstudien [1][2] wurde diesbezüglich aber bereits dargelegt, dass das relevante Bewertungssystem keine eigenständigen Anforderungswerte für die Umweltwirkungen der Rohstoffe und Vorprodukte vorhält, sondern die ökobilanzielle Nachhaltigkeitsqualität im Gesamtzusammenhang eines Wohngebäudes über dessen Lebenszyklus hinweg beurteilt. Insofern muss die ökobilanzielle bewertungstechnische Abbildung wiederum gesamthaft am Ende der Studie erfolgen.



5 Die Produktion - Von den Rohstoffen zum fertigen Mauerstein

EPDs - Transparente Darstellung des Herstellprozesses

In Kapitel 4 zu den Rohstoffen als Startpunkt des Lebenszyklus von Mauersteinen wurden Umweltproduktdeklarationen (EPD) bereits als gängige Informationsbasis für die verwendeten Rohstoffe von Bauprodukten allgemein bzw. von Mauersteinen im Speziellen vorgestellt. Darüber hinaus ist ferner eine exakte Abbildung und Beschreibung der Herstellprozesse von den Rohstoffen zum fertigen Bauprodukt zentraler Bestandteil von EPDs. Abb. 7 zeigt eine Übersicht dieses und weiterer grundlegender Inhalte von EPDs sowie die Basisschritte im Prozess der EPD-Erstellung.

Welche Inhalte eine EPD je nach Bauproduktgruppe umfassen muss, legt die Produktgruppenregel (engl.: *Product Category Rule*; kurz: *PCR*) fest. Sie ist als Basisdokument Grundvoraussetzung und erster Schritt einer EPD-Erstellung. Weitere Details zur Thematik beschreibt [24].



- **Produktdefinition:** Anwendung, Normen, Bauphysik, ...
- **Grundstoffe:** Rezeptur, Hilfsstoffe, Rohstoffgewinnung, ...
- **Produktherstellung:** Prozesse, Gesundheit/Arbeitsschutz, ...
- **Produktverarbeitung:** Restmaterial, Verfahren, ...
- **Nutzungszustand:** Beständigkeit, Umwelt/Gesundheit, ...
- **Außergewöhnliche Einwirkungen:** Brand, Hochwasser
- **Ökobilanz:** *verifizierte* Bilanzierung der Umweltwirkungen, u.a. nach Primärenergie, Treibhauspotential, etc.
- **Nachweise:** z.B. Radioaktivität, Auslaugung



Abb. 7: Grundlegende Inhalte und Basisschritte der Erstellung einer EPD

Die Mauerwerksindustrie hat den Trend zur transparenten Darstellung ihrer Produkte früh aufgegriffen und veröffentlicht seit 2008 über das Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) als Programmhalter EPDs für die marktbestimmenden Mauersteinarten. Zwischenzeitlich wurde das Portfolio an verfügbaren Umweltproduktdeklarationen für Mauersteine gegenüber dem in den Vorgängerstudien dargestellten Stand nochmals erweitert und aktualisiert.¹ Die Aktualisierung von EPDs betraf dabei auch die Normenumstellung auf die bzw. EU-Harmonisierung gemäß der EN 15804 bei der Erarbeitung von Umweltproduktdeklarationen und zentraler Inhalte wie ökobilanzieller Berechnungen zu den Umweltwirkungen eines deklarierten Produkts.

Herstellprozess: Mischen - Formgebung - Aushärtung

In Kapitel 4 wurde ebenfalls bereits darauf hingewiesen, dass die für EFH/ZFH [1] und MFH [2] marktbestimmenden Mauersteinarten dieselben sind. Insofern haben die Ausführungen der besagten Vorgängerstudien zum Herstellprozess von Mauersteinen hier analog Geltung (siehe auch Abb. 8). Ein besonderer Hinweis soll an dieser Stelle jedoch bezüglich der Umweltwirkungen des Herstellprozesses von Mauersteinen gegeben werden. Denn diese werden - mit Ausnahme der Steinart Leichtbeton, die lediglich luftgetrocknet wird - maßgeblich mitbestimmt von den Energieverbräuchen für die Trocknung respektive Härtung der Steinrohlinge und die Sicherstellung der Materialfestigkeit. Dazu werden etwa Ziegel in Tunnelöfen gebrannt, während Kalksand- oder Porenbetonsteine in Autoklaven unter erhöhtem Druck ihre Festigkeit erhalten [18][19][20].²

Aus diesem Grund gelten auch die Feststellungen zum Bereich Umwelt- und Gesundheitsschutz sowie zum dichten Herstellernetz i.V.m. der Regionalität der Rohstoffvorkommen weiter fort [1][2].

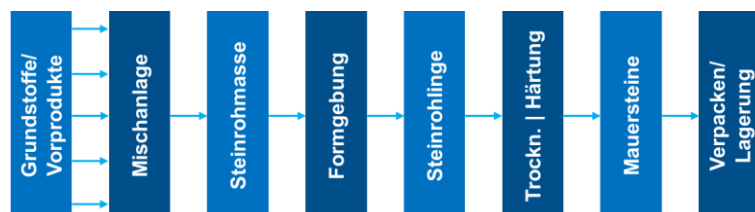


Abb. 8: Schematische Darstellung des Herstellprozesses

¹ Eine aktuelle Liste aller derzeit verfügbaren Umweltproduktdeklarationen für Mauersteine findet sich frei zugänglich unter folgendem Link: <http://bau-umwelt.de/hp547/Mauerwerk.htm>

² Zur Lufttrocknung von Leichtbetonsteine in Regallagern siehe [21].

Bei der Herstellung von Stahlbeton-Fertigteilen für Wandkonstruktionen kommt mit Blick auf die Umweltwirkungen hinzu, dass hier bereits die Materialkomponente des Bewehrungsstahls in das (Halb-)Fertigprodukt integriert wird.

Diesbezüglich bestehen für die genannten Steinarten (bis auf Leichtbeton) keine wesentlichen Unterschiede gegenüber anderen Halbfertigprodukten mineralischer Basis wie beispielsweise Stahlbeton-Fertigteilen. Auch diese sind - als alternative praxisübliche Konstruktionsvariante von MFH oder zumindest Teilen derselben - im Rahmen der Fertigung einer thermischen Behandlung zu unterziehen. Dies gilt im Übrigen auch für die Herstellung von holzbasierten Bauteilen (Holztrocknung).

Bewertungstechnische Abbildung der Produktion

Mit Blick auf die Herstellung von Mauersteinen spielen für die bewertungstechnische Abbildung im relevanten Zertifizierungssystem *NaWoh* wiederum die ökobilanziellen Umweltwirkungen die zentrale Rolle. In der Lebenszyklusphase der Produktion sind dabei prinzipiell insbesondere die Verbräuche an Energie und sonstigen Medien von Bedeutung (siehe oben unter Abschnitt Herstellprozess: Mischen - Formgebung - Aushärtung).

Jedoch gilt auch hier, dass das System *NaWoh* keine eigenständigen Anforderungswerte für die Umweltwirkungen der Produktionsphase vorhält. Die ökobilanziellen *Benchmarks* aus Abb. 9, denen die Berechnungsergebnisse eines Gebäudes gegenübergestellt werden, um die Stufe der (deutlichen Über-)Erfüllung zu bestimmen, betreffen den gesamten Lebenszyklus der Gesamtkonstruktion eines Gebäudes. Entsprechend kann eine Einschätzung der ökobilanziellen Nachhaltigkeitsqualität nur im Kontext dieses Gesamtgebäudelebenszyklus erfolgen, in den die Umweltwirkungen der Herstellung von Bauprodukten dann als eine von diversen Bilanzpositionen integriert werden.

deutlich übererfüllt	$\leq 12 \text{ kg CO}_2\text{-Äqu.} / (\text{m}^2_{\text{NofA}} \cdot \text{a})$ zusätzlich Angabe pro m ² Wohnfläche (nachrichtlich, nicht bewertend)
übererfüllt	$\leq 17 \text{ kg CO}_2\text{-Äqu.} / (\text{m}^2_{\text{NofA}} \cdot \text{a})$ zusätzlich Angabe pro m ² Wohnfläche (nachrichtlich, nicht bewertend)
erfüllt	$\leq 24 \text{ kg CO}_2\text{-Äqu.} / (\text{m}^2_{\text{NofA}} \cdot \text{a})$ zusätzlich Angabe pro m ² Wohnfläche (nachrichtlich, nicht bewertend)

Abb. 9: Gesamtgebäude- und lebenszyklusbezogene ökobilanzielle Benchmarks des Systems NaWoh [16]

6 Die Bauwerkserstellung - Aus Steinen werden Bauteile

Mauerwerk: Verbundwerkstoff aus Steinen + Mörtel

Mauerwerk aus natürlichen oder künstlichen Steinen gehört zu den ältesten Bauweisen überhaupt und weist eine mehrtausendjährige Entwicklung auf [25]. Dabei wurden die Steine von jeher unter Nutzung diverser Fugenmaterialien im Verbund verlegt (Abb. 10).

Heute wird die Bauweise weit überwiegend zur Herstellung vertikaler Bauteile wie Wandscheiben/Pfeilern aus künstlichen Steinen verwendet, während horizontale Tragglieder (z.B. Decken) vorwiegend aus (Stahl-)Beton, Stahl oder Holz hergestellt werden [26].

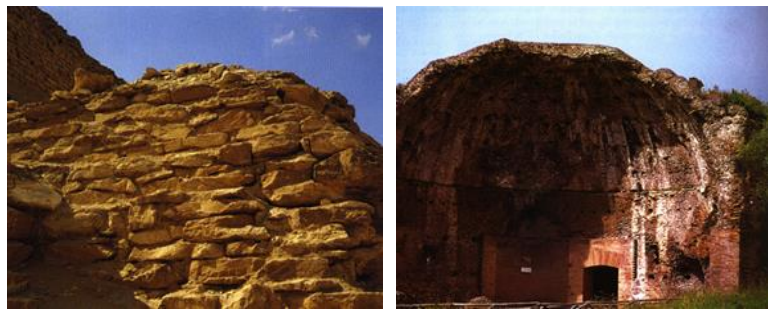


Abb. 10: Beispiele historischer Bauten aus Mauerwerk

Links: Stufenpyramide mit auf Kalk- und Gipsbasis vermörtelten Fugen | Rechts: Historischer Kuppelbau aus Mauerwerk

Die zitierten Vorgängerstudien konnten zeigen, dass aufgrund verfeinerter Herstellverfahren in den vergangenen Jahren u.a. in der Verarbeitung von Mauersteinen entscheidende nachhaltigkeitsrelevante Optimierungen möglich waren, die vornehmlich zu einer Materialeinsparung an Mörtel geführt haben. Einerseits hat hierzu beigetragen, dass moderne Mauersteine heute im Stoßfugenbereich mit einer Verzahnung versehen werden. Dies macht eine Vermörtelung der Stoßfuge überflüssig und die Mauersteine können *knirsch* in *Stumpfstoßtechnik* verlegt werden. Andererseits ermöglichen Plansteine ein Verlegen mit Dünnbettmörtel. Die Fugendicke beträgt dabei nur noch 1-3 mm und erlaubt eine rationelle Reihenverlegung. Heute können alle marktbestimmenden Mauersteinarten mit dieser ressourcensparenden Verarbeitungstechnik ausgeführt werden (siehe Abb. 11). Weiterhin haben auch die Entwicklung größerer Steinformate i.V.m. einer maschinellen Versetstechnik und die Entwicklung ergonomisch geformter Griffhilfen zu einer deutlichen Rationalisierung des Verarbeitungsprozesses beigetragen.

Die zweite wesentliche mineralisch basierte Massivbauweise des Stahlbetons unterscheidet sich deutlich in ihrer Verarbeitungstechnik. Einerseits wird Baustahl als ergänzende Materialkomponente des Verbundwerkstoffs benötigt, andererseits sind zur Bauwerks- bzw. Bauteilerstellung - wie auch für die Holzbauweise - weitere Betriebsmittel erforderlich (Hebezeuge, etc.; speziell für die Stahlbetonbauweise Schalung für Ortbetonbauteile).



Abb. 11: Materialeinsparung und Ressourcenschonung durch weiterentwickelte Mauertechniken

Normal- und Dünnbettmörtel weisen grundsätzlich eine sehr ähnliche stoffliche Zusammensetzung auf. Beim Dünnbettmörtel (DM) ist die Korngröße der Zuschläge allerdings auf 1 mm begrenzt (für DM mit Stützkorn für großformatige Steine sind auch Zuschläge mit Durchmessern > 1mm zulässig). In puncto Nachhaltigkeit bzw. Ökologie wirkt sich zudem positiv aus, dass fugenwirksame Wärmebrücken erheblich reduziert werden.

Nachhaltigkeitswirkungen der Bauwerkserstellung

Ökologie

Daraus resultiert, dass eine Mauerwerkswand - obwohl als Bauteil aus Verbundwerkstoff klassifiziert - nahezu vollständig aus Mauerstein besteht und pro m² Wandfläche nur ca. 4 kg Mörtel benötigt [27]. Dies schlägt sich auch ökobilanziell nieder, etwa beim Vergleich einer (tragenden) Außenwand hergestellt aus verschiedenen mineralisch basierten Massivbaustoffen. Abb. 12 zeigt entsprechende ausgewählte Ökobilanz-Ergebnisse massiver Außenwandvarianten (Mauerwerk, Stahlbeton) sowie einer Variante in Holzständer-Bauweise.

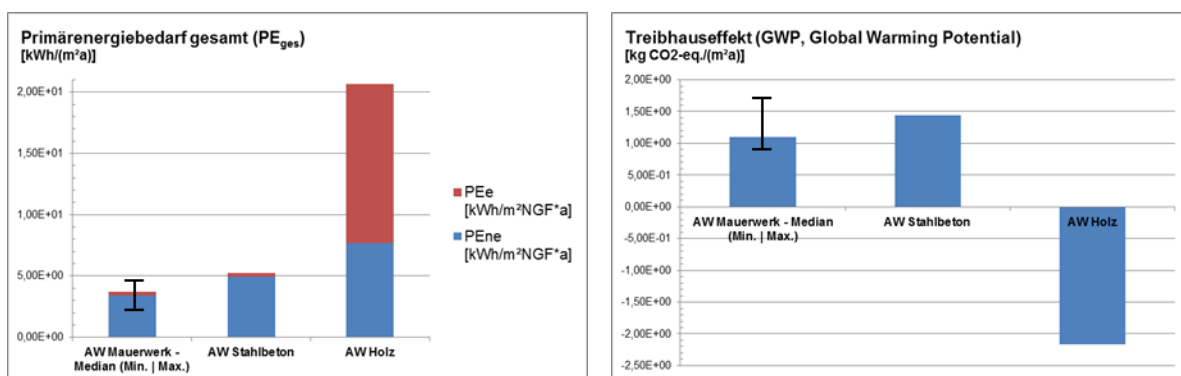


Abb. 12: Ausgewählte Ökobilanz-Ergebnisse von Ausführungsvarianten einer massiven Außenwand
Systemgrenzen und Berechnungsparameter: Bilanzierung einer Außenwand für Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (gemäß System NaWoh), Lebenszyklusphase Herstellung und Wirkungskategorien *Primärenergie gesamt/nicht erneuerbar/erneuerbar (PE_{ges}/PE_{ne}/PE_e)* und *Treibhauspotential (GWP)*. Die Ausführungsvarianten der Außenwand weisen vergleichbare Eigenschaften hinsichtlich Tragfähigkeit und insbesondere Wärmedurchgangskoeffizienten auf. Die Betrachtung erfolgt demnach auf Basis eines funktionalen Äquivalents. Eine gesamthafte Darstellung aller Ökobilanz-Ergebnisse zeigt Anhang C dieser Studie. Weiterführende Erläuterungen und Analysen zu den Ökobilanz-Ergebnissen der Ausführungsvarianten finden sich unter Kapitel 9.



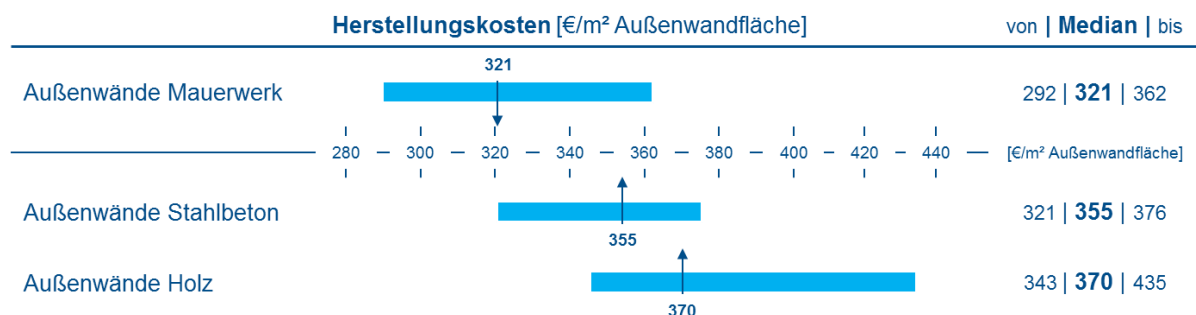
Dabei resultieren die niedrigen GWP-Werte aus der Senkenwirkung des Werkstoffs Holz im Zuge des Baumwachstums.

Ökonomische Wirkungen der Bauwerkserstellung

Die gesamthafte Darstellung der Ökobilanz-Ergebnisse aller anerkannten Wirkungskategorien in Anhang C zeigt, dass die Außenwand-Variante in Holzständerbauweise in allen Wirkungskategorien außer der des Treibhauspotentials GWP mit Abstand die höchsten Umweltwirkungen aufweist.

Auch bei den ökonomischen Wirkungen der Erstellungsphase, d.h. den Herstellungskosten, unterscheiden sich die für MFH marktgängigen Konstruktionsweisen teilweise deutlich. Dies liegt in erster Linie daran, dass Wände aus Mauerwerk verarbeitungstechnisch leichter herzustellen sind als etwa Wandbauteile aus Stahlbeton. Dort bestehen im Kontext mit der erforderlichen Bewehrung aus Baustahl z.B. gesteigerte Anforderungen zur Sicherstellung einer dauerhaften Funktionsfähigkeit und Standsicherheit (korrekte Bewehrungslage, ausreichende Betondeckung, Vorgang der Betonage, etc.). Außerdem erfordert diese wie auch die Holzbauweise bzw. der entsprechende Bauablauf gemäß obiger Kurz-Schilderung weitere Betriebsmittel, insbesondere Hebezeuge. Speziell bei Ortbetonbauteilen kommt hinzu, dass eine Schalung zur Aufnahme und Formgebung der Frischbetonmasse hergestellt werden muss. Ferner kann das Einbringen des Frischbetons die Vorhaltung weiterer Hebezeuge (z.B. Betonpumpen) erfordern.

Im Ergebnis schlägt sich dies auch quantitativ in statistischen Kostenkennwerten der verschiedenen Bau- und Konstruktionsweisen nieder. Tab. 5 zeigt hierzu die entsprechende Auswertung einer Untersuchung der ARGE//eV [28]. Es wird deutlich, dass sich Außenwände aus Mauerwerk gegenüber den anderen marktüblichen Bau- und Konstruktionsweisen mit geringeren Herstellungskosten realisieren lassen.



Tab. 5: Herstellungskosten von Außenwänden gemäß ARGE//eV [28]



Sonstige Nachhaltigkeitswirkungen

Bei Ausführung entstehende *Staub- und Lärmemissionen* können durch eine entsprechende Ausgestaltung der Bauprozesse auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Insofern kann die Ableitung einer ökobilanziellen Bewertung für MFH aus Mauerwerk erst im Kontext des gesamten Lebenszyklus am Ende der Studie erfolgen.

Ein Schwerpunkt der Bewertung ist daher u.a. der Anteil *flüchtiger organischer Verbindungen* in einem Bauprodukt (engl.: *Volatile organic compound*; kurz: *VOC*).

Bei der Erstellung von Bauteilen aus Mauerwerk fällt in gewissem Umfang Rest- bzw. Bruchmaterial der Mauersteine an, das als Abfallfraktion *Bauschutt* zu entsorgen ist. Allerdings kann dieses Material grundsätzlich vollständig recycelt werden, indem es verschiedenen Wertungspfaden zurückgeführt wird. Generelle Untersuchungen zu Recyclingpotentialen von Mauersteinen finden sich unter Kapitel 8.

Bewertungstechnische Abbildung der Erstellungsphase

Im Rahmen der vorstehenden Kapitel zu den Rohstoffen und der Produktion von Mauersteinen wurde bereits ausgeführt, dass die ökobilanzielle Analyse einen zentralen Bewertungsbestandteil der Nachhaltigkeitszertifizierung von MFH darstellt. Für die Lebenszyklusphase der Bauwerkserstellung sind dazu - neben ausgewählten Elementen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) - alle konstruktiven Bauteile über ihren gesamten Schichtaufbau ökobilanziell zu erfassen. Für die Schicht Mauerwerk als Teil des konstruktiven Bauteils einer Wand sind hier die Umweltwirkungen der Rohstoffgewinnung und der Produktionsphase abzubilden und gemeinsam mit analogen Berechnungsergebnissen zu den übrigen Bauteilschichten zu aggregieren. Das relevante Zertifizierungssystem enthält wie zuvor bereits geschildert zwar ökobilanzielle Benchmarks eines Wohngebäudes, allerdings werden darin der gesamte Lebenszyklus, das heißt auch die Umweltwirkungen der Instandhaltung und des End of Life sowie des Wärme-/Strombedarfs der Nutzungsphase, gebündelt. Daher sind im Übrigen auch die Ergebnisse der beispielhaften Ökobilanz von Wandbauteilen (siehe Abb. 12) hier noch nicht bewertungstechnisch verwendbar.

Bewertungsaspekt *Vermeidung von Schadstoffen*

In der Nachhaltigkeitsbeurteilung von MFH spielen zudem Risiken für die lokale Umwelt eine wesentliche Rolle. Vom entsprechenden Kriterium des Systems *NaWoh* [16] wird mit Blick auf die Phase der Verarbeitung von Materialien bewertet, ob die verwendeten Bauprodukte bestimmte Material-/Stoffgruppen enthalten, die eine Gefahr für Boden/Luft/Grund-/Oberflächenwasser sowie die Gesundheit von Mensch/Flora/Fauna darstellen.



Die gesamte Kriterienmatrix wird in Anhang B der Studie dargestellt.

Dabei werden insbesondere (teil-)halogenierte Treib- und Kältemittel, Schwermetalle sowie organische Lösungsmittel und Weichmacher betrachtet. Alle für die Bewertung bzw. die Einhaltung der Qualitätsanforderungen des Kriteriums relevanten Bauteile und Materialien werden mittels einer Anforderungsmatrix dargestellt (Abb. 13).

zu beschreibende Merkmale	<p>Typ III Umweltproduktdeklarationen (EPD) die erforderliche Nachweise enthalten oder ein entsprechendes RAL UZ gelten automatisch als Erfüllungsnachweise. Ansonsten sind äquivalente Herstellernachweise oder Erklärungen vorzulegen. Zu betrachten sind mindestens 80% der Oberflächen.</p> <p>Zur Minimierung von Schadstoffen wurden folgende Qualitätskriterien für die eingesetzten Materialien und Produkte eingehalten:</p> <p>Belegung von Oberflächen von Wänden, Fußböden, Decken oder Dächern</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Verwendung von Produkten zur Belegung von Oberflächen in großflächiger Anwendung der Oberflächen, die einen VOC-Gehalt von 25 % nicht überschreiten, <input type="checkbox"/> VOC-Gehalt von max. 15%.<input type="checkbox"/> Verwendung von Beschichtungen, Imprägnierungen, Klebern oder Schutzmitteln, die PU, Epoxidharz oder Bitumen enthalten, zur Belegung von Oberflächen, in großflächiger Anwendung (> 20 %), die keiner der folgenden GISCODEs und Produkt-Codes zuzurechnen sind:<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> DD 1/2 (Polyurethansiegel für Fußbodenbeläge, stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> PU 30/50/60 (Polyurethansysteme, lösemittelhaltig, gesundheitsschädlich)<input type="checkbox"/> RE 2,5/4/5/6/7/8/9 4 – 9 (Epoxidharzsysteme, lösemittelhaltig bzw. sensibilisierend bis giftig und Krebs erzeugend)<input type="checkbox"/> BBP 30-70 (Bitumenmassen, lösemittelhaltig, gesundheitsschädlich)<input type="checkbox"/> D 6/7; RU 4; S 1 – S 6 (Verlegewerkstoffe, lösemittelhaltig bzw. stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> Ö 60/70 Öle/ Wachse (stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> Verwendung von Pigmenten und Sikkativen in Lacken ohne Blei, Cadmium, Chrom VI und deren Verbindungen (eingefärbt bzw. sikkativiert)<input type="checkbox"/> Epoxidharzprodukte der Gruppen GISCODE RE 0 (Epoxidharzdispersionen).<input type="checkbox"/> Reaktive 1 oder 2-K Polyurethan-Systeme der Gruppen GISCODE PU 10.<input type="checkbox"/> Bitumenemulsionen der Gruppen GISCODE BBP 10.<input type="checkbox"/> Epoxidharzprodukte der Gruppen GISCODE RE 1 (lösemittelfrei). <p><input type="checkbox"/> Produkte zur Belegung / Beschichtung der mineralischen Oberflächen, mit ei-</p>
----------------------------------	---

Abb. 13: Anforderungsmatrix des Kriteriums 3.2.4 Vermeidung von Schadstoffen (Auszug) [16]

Das Kriterium *3.2.4 Vermeidung von Schadstoffen* prüft anhand der in Abb. 13 dargestellten Matrix die Einhaltung spezifischer Anforderungen an unterschiedlichste Baumaterialien und -produkte. Allerdings gibt es anders als bei der Kriterienentsprechung im DGNB-Nutzungsprofil NWO nicht mehrere Qualitätsstufen, sondern es handelt sich vielmehr um ein beschreibendes Kriterium, das die Einhaltung von Mindeststandards kontrollieren und sicherstellen soll. Auch hier ist die Einhaltung der Anforderungen über Produkt-, technische oder Sicherheitsdatenblätter oder Umweltproduktdeklarationen nachzuweisen. Zudem werden vom Kriterium 3.2.4 anders als im DGNB-System allein Risiken der verwendeten Produkte und Materialien im Zuge der Verarbeitung adressiert und nicht etwaige Wirkungen in der Nutzungsphase [16].



Massive Bauteile aus Mauerwerk haben gegenüber Stahl- oder Holzkonstruktionen den Vorteil, dass sie keine spezifischen materialtechnischen Maßnahmen (Beschichtung, Imprägnierung) zum Schutz vor Korrosion, Feuchte oder Brand erfordern.

Die finale Gesamtbewertung hängt von einer analogen Bewertung weiterer verwendeter Baumaterialien ab.

Zur Erfüllung des zugehörigen Indikators *Konzentration an VOC/Schadstoffen* muss grundsätzlich spätestens vier Wochen nach Fertigstellung eine Bestimmung der VOC-Konzentration der Raumluft inklusive zugehöriger chemischer Analyse auch hinsichtlich des Formaldehyd-Gehalts durchgeführt und die Ergebnisse dokumentiert werden (Abb. 14).

Die Vielfalt und (ökologische) Qualität verfügbarer Baumaterialien ermöglicht ohne weiteres die Auswahl entsprechender emissionsarmer Produkte.

Das Baumaterial Mauerwerk stellt über den gesamten Lebenszyklus und insbesondere die Erstellungsphase kein Risiko für Umweltmedien oder die Gesundheit von Mensch, Flora und Fauna dar. Auch etwaige Beschichtungsstoffe im Kontext eines gesamthaften Schichtaufbaus (Anstriche, etc.) können mittlerweile so beschafft werden, dass die Anforderungen des Kriteriums erfüllt werden.

Insgesamt stellt die Bauweise Mauerwerk damit eine wichtige Voraussetzung für eine Erfüllung des Kriteriums im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung von MFH bzw. Mauerwerk im Geschosswohnungsbau sicher.

Bewertung der *Raumluftqualität*

Der soeben beschriebene Aspekt der Emittierung von VOC wird zusätzlich auch im Rahmen eines Kriteriums zur Bewertung der *Raumluftqualität* analysiert [16].

Circa 4 Wochen nach Fertigstellung des Gebäudes (bautechnische Abnahme) sind die Innenräume auf die vorhandenen Immissionskonzentrationen an flüchtigen organischen Stoffen zu überprüfen.

Es wurde nachgewiesen, dass für oberflächenbildende Stoffe ausschließlich als emissionsarm ausgewiesene Bauprodukte (z. B. geprüft nach AgBB oder „Blauer Engel“) zum Einbau gekommen sind. Einzubeziehen sind alle oberflächenbildenden Baustoffe inklusive Hilfsstoffe, d.h. Farben, Lacke, Beläge aller Art, Kleber.

Bezeichnungen der Nachweisdokumente:.....

ODER

Es wurden stichprobenhafte Messungen durchgeführt und folgende Nachweise erbracht:

Raumluftkonzentration TVOC der untersuchten Räume:

≤ 800 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 ≤ 500 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 ≤ 300 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Raumluftkonzentration Formaldehyd der untersuchten Räume:

≤ 60 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 ≤ 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Bezeichnungen der Nachweisdokumente:.....

Abb. 14: Anforderungsmatrix des Kriteriums Raumluftqualität [16]
Aufgrund seiner Klassifizierung als mineralischer Baustoff bietet Mauerwerk ideale Voraussetzungen für eine optimale Bewertung des Kriteriums. Diese werden grundsätzlich nicht von den je nach energetischen/innenraumgestalterischen Anforderungen benötigten Ergänzungsmaterialien beeinträchtigt.

7 Die Nutzungsphase - Bedeutung des Faktors *Mensch*

Daseinszweck: Komfort | Sicherheit | Funktionalität

In der zitierten ersten Vorgängerstudie wurde gezeigt, welche Bedeutung der Nutzungsphase von Gebäuden allgemein und von Wohnbauten jedweder Größe im Speziellen angesichts der menschlichen Aufenthaltszeiten in geschlossenen Räumen, vor allem den eigenen vier Wänden [14], soziokulturell beizumessen ist [1]. Jenseits einer monetären Perspektive muss der Daseinszweck von Gebäuden primär darin liegen, für ihre Nutzer Komfort, Sicherheit und Funktionalität zu stiften.

Wie bereits unter Kapitel 4 realisiert soll auch für die Nachhaltigkeitsbetrachtung der Nutzungsphase in dieser Fortsetzungsstudie keine pauschalierende Wiederholung der Inhalte der Vorgängerstudien erfolgen, sondern deren selektive Spezifizierung und Verschneidung im Sinne der angestrebten Vergleichsbetrachtung von MFH aus Mauerwerk mit anderen derzeit marktüblichen Bau-/Konstruktionsweisen (Stahlbeton, Holz).

Komfortbildende soziokulturelle Gebäudemerkmale

Hierfür sind zunächst wiederum die *komfortbildenden* soziokulturellen Gebäudemerkmale maßgebend.

Das Komfortniveau einer Umgebungssituation wird durch die Parameter des *thermischen, visuellen* und *akustischen Komforts* sowie der *Innenraumlufqualität* konkretisiert [1][2].³ Das Empfinden des thermischen Komforts eines Raums durch die Nutzer hängt - neben individuellen Faktoren wie Bekleidung, körperlicher Aktivität oder Gesundheitszustand - im Wesentlichen von den Faktoren operative Temperatur, Zugluft, Strahlungstemperaturasymmetrie und Luftfeuchte ab. Auch in den deutschen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen für Gebäude haben sich diese Indikatoren als Bewertungsgrundlage etabliert (Abb. 15).⁴

³ Der visuelle Komfort wird determiniert von Grundrissgestaltung und Dimensionierung der Fensteröffnungen sowie technischen Anlagen wie Blend- und Sonnenschutzsystemen. Er ist unspezifisch hinsichtlich des Konstruktionsmaterials und wird nachfolgend nicht betrachtet.

⁴ Von der Konstruktionsweise der gebäudeumhüllenden Bauteile werden die Kriterien *Operative Temperatur* und *Strahlungstemperaturasymmetrie* beeinflusst. Die beiden übrigen Indikatoren weisen primär Abhängigkeiten von und zu der Anlagentechnik, insbesondere raumluftechnischer Anlagen, auf und sollen hier daher nicht weiter verfolgt werden [29][30].



METHODE

Der thermische Komfort in der Heiz- und Kühlperiode wird über mehrere Einzelindikatoren bewertet. Grundlage der Beurteilung sind die Vorgaben von DIN EN 15251, DIN EN ISO 7730, VDI 2078, VDI 3804, DIN EN 12831, DIN 33403, ASR und VBG.

Im Rahmen der Bewertung werden die folgenden Indikatoren beurteilt:

- (1) Operative Temperatur/ Raumlufttemperatur / Heizperiode (quantitativ)
- (2) Zugluft / Heizperiode (qualitativ)
- (3) Strahlungstemperaturasymmetrie und Fußbodentemperatur / Heizperiode (qualitativ)
- (4) Relative Luftfeuchte / Heizperiode (quantitativ)
- (5) Operative Temperatur/ Raumlufttemperatur / Kühlperiode (quantitativ)
- (6) Zugluft / Kühlperiode (qualitativ)
- (7) Strahlungstemperaturasymmetrie und Fußbodentemperatur / Kühlperiode (qualitativ)
- (8) Relative Luftfeuchte / Kühlperiode (quantitativ)

Als *operative Temperatur* wird die vom Menschen empfundene Raumtemperatur bezeichnet. Sie ist ein Mittelwert aus der Lufttemperatur eines Raums und der mittleren Strahlungstemperatur der Raumbegrenzungen.

Die *Strahlungstemperaturasymmetrie* dient der Beurteilung asymmetrischer Strahlungsverhältnisse, z.B. aufgrund kalter Flächen (z.B. Wände, Fenster).

Abb. 15: Bewertungsmethodik zum thermischen Komfort im DGNB-System [29]

Der *Wärmedurchgangskoeffizient* - nach seinem Formelzeichen als *U-Wert* bezeichnet - ist ein spezifischer Kennwert für die Wärmedämmeigenschaft eines Bauteils. Er ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)] und der Dicke d [m] der verwendeten Materialien.

Thermischer Komfort im Winter

Eine entsprechende energetische Qualität der Gebäudehülle lässt sich auch mit Wandbauteilen aus Stahlbeton realisieren. Allerdings ist dabei prinzipiell ein höherer Materialeinsatz an Dämmstoff erforderlich, weil Stahlbeton *im direkten Vergleich mit allen hier betrachteten Mauerwerksarten* schlechtere U-Werte aufweist.

Gemäß Definition der operativen Temperatur genügt eine angemessene Lufttemperatur allein nicht, um behagliche thermische Bedingungen sicherzustellen. Für eine als behaglich empfundene Raumtemperatur müssen z.B. auch die Außenwände ausreichende Oberflächentemperaturen aufweisen. Diese wiederum werden von den Wärmedämmeigenschaften des Wandaufbaus bestimmt, zusammengefasst in der Kennzahl des U-Werts.

Mit massiven Wandkonstruktionen aus Mauerwerk können mit üblichen Wandstärken - je nach Mauersteinart ohne oder im Verbund mit anderen Dämmmaterialien - U-Werte bis zum Passivhaus-Standard erreicht werden. Außenwandkonstruktionen aus Porenbeton können monolithisch, Kalksandstein-Außenwände z.B. mit einem Wärmedämmverbundsystem ausgeführt werden; die Steinarten Ziegel oder Leichtbeton sind alternativ als Mauersteine verfügbar, deren Hohlkammern mit Dämmstoffen ausgefüllt sind. Im Zusammenspiel mit hochwärmedämmten Fenstern/Türen und einer hohen energetischen Qualität anderer raumbegrenzender Bauteile (Bodenplatte, oberste Geschossdecken oder Dachflächen) lassen sich mit Außenwänden aus Mauerwerk auch Temperaturasymmetrien vermeiden.

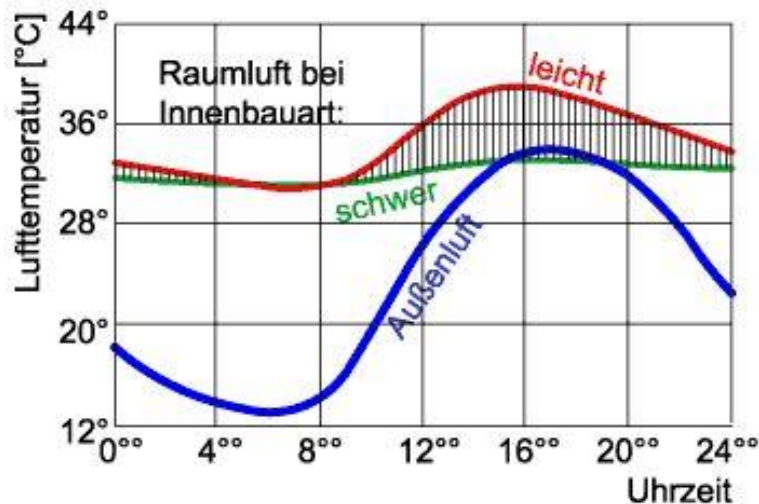


Vom System *NaWoh* wird der thermische Komfort im Winter nicht durch ein eigenes Kriterium abgebildet, sondern in die Bewertung der energetischen Qualität eines MFH integriert. Allerdings beinhaltet das System ein gesondertes Kriterium zum thermischen Komfort im Sommer.

Thermischer Komfort im Sommer

Diese energetische Qualität der Gebäudehülle lässt sich heute prinzipiell auch in Holzbauweise erreichen. Jedoch hat die massive Konstruktionsweise in Mauerwerk bei hohen Außentemperaturen im Sommer einen zentralen Vorzug. Denn für einen guten sommerlichen Wärmeschutz ist - über aktive anlagentechnische Maßnahmen wie die Ausführung von Sonnenschutzsystemen hinaus - auch die Wärmespeicherfähigkeit von Außenbauteilen entscheidend.

Aufgrund ihrer großen Masse und vergleichsweise hohen Trägheit bei Temperaturänderungen (Abb. 16) sind massive Bauteile wie Außenwände aus Mauerwerk in der Lage, Wärme aufzunehmen und erst stark zeitverzögert wieder abzugeben, die Wärme also zu *puffern*. Im bauordnungsrechtlichen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes [31] wird die Wärmespeicherfähigkeit der Baukonstruktion explizit erfasst.



Eine mittlere und schwere Bauart wird beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 und der entsprechenden Berechnung des *zulässigen Sonneneintragskennwerts* positiv berücksichtigt. Dadurch wird die Speichermasse und Pufferwirkung massiver Wandkonstruktionen abgebildet. Mithin wirkt sich Mauerwerk im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz positiv aus.

Abb. 16: Temperaturverläufe Sommer ohne Verschattung für leichte und schwere Bauweise [32]

Nach DIN 4108-2 kann vereinfachend von einer mittleren bzw. schweren Bauweise ausgegangen werden, wenn massive Innen- und Außenwände mit flächenanteilig gemittelten Rohdichten von größer 600 kg/m^3 bzw. 1.600 kg/m^3 in Verbindung mit Stahlbetondecken ausgeführt werden. Außerdem dürfen keine innenliegende Wärmedämmung an Außenbauteilen, (thermisch) abgehängten Decken und Raumhöhen größer 4,50 m vorliegen.



Der zweite Anforderungsbereich des akustischen Komforts ist aufgrund seiner zentralen Kennzahl der *Nachhallzeit* - und deren Abhängigkeit von konstruktionsunspezifischen Parametern - kein maßgeblicher Aspekt der Analyse des Konstruktionsmaterials Mauerwerk.

Schallschutztechnische Anforderungskategorien für MFH

Diese Kenngröße beschreibt gemäß ihrer Namensgebung die Fähigkeit eines Bauteils, den Schall zu dämpfen und steht in einem funktionalen Zusammenhang mit der flächenbezogenen Masse m' des Bauteils. Dabei gilt grundsätzlich, dass das bewertete Schalldämm-Maß mit der flächenbezogenen Masse zunimmt.

Aus rein konstruktiver Sicht bestehen bezüglich des *akustischen Nutzerkomforts* Anforderungen an Gebäude allgemein bzw. Wohnungsbauten im Speziellen primär darin, den respektive die Nutzer vor übermäßigen Schallbelästigungen von außen oder aus anderen - fremden wie eigenen - Wohnbereichen zu schützen (*Schallschutz*), um somit eine bestimmungsgemäße Nutzung von Gebäuden gewährleisten zu können.

Im Kontext einer Beurteilung von MFH aus Mauerwerk sind diesbezüglich Anforderungen an den *Luftschallschutz von Trennwänden* (gegenüber fremden Wohneinheiten bzw. Wohnbereichen) und *Außenwänden* (gegenüber Außenlärm) sowie von *Innenwänden gegenüber anderen eigenen Wohnbereichen* einschlägig.⁵ Entsprechende Anforderungswerte an die schallschutztechnische Qualität von Wandkonstruktionen werden einerseits in der DIN 4109 [33] und dem zugehörigen Beiblatt 2 [34] sowie andererseits ergänzend z.B. in der der DEGA-Empfehlung 103 [35] festgelegt. Als Kenngröße zur Einschätzung der schallschutztechnischen Qualität wird insbesondere das *bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_{w}* herangezogen (siehe Tab. 6).

Anforderung	DIN 4109	DIN 4109, Beiblatt 2	DEGA-Empfehlung 103
Luftschallschutz Trennwände (ggü. fremden Wohnbereichen)	erf. $R'_{w} = 53$ dB	erf. $R'_{w} \geq 55$ dB	von erf. $R'_{w} \geq 50$ dB (Schallschutzklasse E) bis erf. $R'_{w} \geq 72$ dB (Schallschutzklasse A*)
Luftschallschutz Außenwände (ggü. Außenlärm)	erf. $R'_{w} = 40$ dB (z.B. für Lärmpegelbereich IV)	siehe DIN 4109	wie DIN 4109 (Schallschutzklassen D bis A) bzw. wie DIN 4109 + 5 dB (Schallschutzklasse A*)
Luftschallschutz Innenwände (ggü. eigenen Wohnbereichen)	keine	erf. $R'_{w} = 40$ dB (normaler Schallschutz) erf. $R'_{w} \geq 47$ dB (erhöhter Schallschutz)	erf. $R'_{w} \geq 42$ dB (Klasse EW1: keine Vertraulichkeit) erf. $R'_{w} \geq 47$ dB (Klasse EW2: Vertraulichkeit gegeben)

Tab. 6: Schallschutz-Anforderungen mit Relevanz für Wandkonstruktionen

Die DIN 4109 legt lediglich Mindestanforderungen an den Schallschutz zwischen fremden Wohnbereichen und gegenüber Außenlärm fest. Das Beiblatt 2 enthält hierzu Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz und Empfehlungen für den normalen und erhöhten Schallschutz im eigenen Wohnbereich. Die DEGA-Empfehlung 103 bündelt die Anforderungen der DIN 4109 und des Beiblatts 2 und ergänzt den Gesamtumfang an Schallschutzanforderungen um weitere Geräuscharten. Ziel ist die Erstellung eines Schallschutzausweises

⁵ Anforderungen hinsichtlich Trittschallschutz und Geräuschen aus Wasserinstallationen/haustechnischen Anlagen als weitere schallschutztechnisch relevante Aspekte werden wesentlich auch von anderen Faktoren außer der Wandkonstruktion beeinflusst und können hier unberücksichtigt bleiben.



Massive Konstruktionen haben hier aufgrund ihrer höheren (flächenbezogenen) Masse klare Vorteile gegenüber vergleichsweise leichten Konstruktionen wie etwa der Holzbauweise.

Informationen zu möglichen Schadstoffen und dem Emissionsverhalten von Baumaterialien liefern z.B. Produkt- und Sicherheitsdatenblätter der Hersteller oder insbesondere auch die bereits beschriebenen EPDs. Die emissionsökologische Qualität von Bauprodukten wird z.B. auch durch Produktsiegel wie dem *Blauen Engel* dokumentiert.

Das subjektive Sicherheitsempfinden wird dabei u.a. beeinflusst von technischen Sicherheitseinrichtungen. Derartige Aspekte werden nicht vom Konstruktionsmaterial determiniert und daher nachfolgend nicht betrachtet.

Gleichwohl Mauerwerkskonstruktionen je nach Mauersteinart im direkten Vergleich zu Wänden aus Stahlbeton über eine geringere flächenbezogene Masse verfügen, reicht diese in aller Regel aus, um die Anforderungen hinsichtlich des Schallschutzes gegenüber Außenlärm sowie fremden Wohneinheiten und eigenen Wohnbereichen einzuhalten. Mit der Anwendung von Mauerwerkssteinen hoher Rohdichten oder Verfüllsteinen können auch höhere Schallschutzempfehlungen wie z.B. nach DIN 4109, Beiblatt 2 realisiert werden.

Für das Wohlbefinden und im Besonderen die Gesundheit der Nutzer ist außerdem die *Raumluftqualität* in Gebäuden von entscheidender Bedeutung. Vor allem ältere Menschen und Kinder gelten als besonders empfindlich hinsichtlich einer Belastung der Innenraumluft mit Schadstoffen biologischer (Schimmelpilze, Milben, etc.) oder chemisch-physikalischer Herkunft (Faserstäube, Lösungsmittel, Halogene, etc.).

Ein erheblicher Teil an potentiellen Schadstoffquellen in Gebäuden kann bereits in der Planungsphase vermieden werden, indem bei der Auswahl von Baumaterialien emissionsarme Produkte den Vorzug bekommen. Mineralische Baumaterialien wie Mauerwerk stellen keine Schadstoffquellen dar und legen damit hervorragende Voraussetzungen für eine hohe Innenraumluftqualität. Insbesondere auch deshalb, weil für die im Kontext einer Mauerwerkskonstruktion ggf. erforderlichen Ergänzungsmaterialien (Grundierungen, Spachtelmassen, Anstriche, etc.) heute vielfältige emissionsarme Produkte verfügbar sind.⁶

Sicherheitsniveau massiver Gebäudekonstruktionen

Auch das Sicherheitsniveau eines Gebäudes gehört thematisch in den Kontext soziokultureller Gebäudequalitäten. Diesbezüglich wird in den deutschen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen wie *DGNB* und *BNB* üblicherweise zwischen der subjektiv von den Nutzern *empfundene Sicherheit* und der *objektiven Sicherheit des Gebäudes* differenziert.⁷

⁶ Siehe dazu bereits Erläuterungen zu Bewertungsaspekt Vermeidung von Schadstoffen sowie Bewertung der Raumluftqualität in Kapitel 6.

⁷ Anders als im *DGNB*-Nutzungsprofil *NWO* fließt im System *NaWoh* das Sicherheitsniveau eines Gebäudes nicht in die Nachhaltigkeitsbewertung ein. Auch im thematisch zugehörigen Kriterium Brandschutz findet der Aspekt keine Berücksichtigung.



Beim komplementären *abwehrenden Brandschutz* handelt es sich um die Brandbekämpfung.

Vorhandene Tragreserven von Bauteilen erhöhen deren Feuerwiderstand. Diese Tragreserven bestehen z.B. in Außenwänden aus Mauerwerk, weil die Wandstärken eher an wärme- und/oder schallschutztechnischen Randbedingungen orientiert werden.

Statistisch resultieren 95 % der Todesfälle bei Bränden aus einer Rauchgasvergiftung.

Objektive Sicherheit ist dann gegeben, wenn reale Gefahrensituationen bestmöglich vermieden werden bzw. im Fall des Schadenseintritts eine weitestgehende Sicherheit gewährleistet und das Schadensausmaß weitest möglich begrenzt wird [29][30].

Im Vergleich zu anderen Extremereignissen wie Sturm, Erdbeben oder Überflutungen ist der Brandfall in Deutschland ein Schadensszenario mit relativ hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten [1][2]. Entsprechend groß ist hier der Stellenwert des vorbeugenden Brandschutzes respektive der zugehörigen bauordnungsrechtlichen Normen, die sich insbesondere mit Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und an den Feuerwiderstand daraus erstellter Bauteile befassen.

Insofern kann hier wiederholend auf die spezifischen Vorzüge von Wandkonstruktionen aus Mauerwerk referenziert werden. Einerseits tragen Mauersteine als *nicht brennbare* mineralische Baustoffe (beste *Brandklasse A1*) nicht selbst zu einem Brand bei und verfügen aufgrund regelmäßig bestehender Tragreserven über einen hohen Feuerwiderstand, durch den die bauordnungsrechtlich/normativ geforderten Feuerwiderstandsklassen automatisch bereits übererfüllt werden. Diese Vorzüge gelten grundsätzlich auch für die hier maßgeblichen MFH aus Mauerwerk oder andere mineralisch basierte Konstruktionsmaterialien wie Stahlbeton, wobei dieser je nach Bauteil und Ausführung noch höhere Feuerwiderstandsdauern aufweisen kann.

In den genannten Vorgängerstudien wurde ebenfalls hervorgehoben, dass beim *Eintritt des Brandschadensfalls* Sicherheit und Unversehrtheit der Nutzer in vielen Fällen vom Ausmaß der Entwicklung von Rauchgasen abhängen. Wichtig ist hier, dass das Rauchgaspotential über die besondere Gefährdung durch die Innenausstattung hinaus nicht durch konstruktive Materialien unnötig erhöht wird. Nicht umsonst fragt das entsprechende Kriterium des *BNB*-Basissystems für Büro- und Verwaltungsgebäude explizit das Risiko der Entwicklung ätzender oder zersetzender Rauchgase durch die verwendeten Baustoffe ab [30].



Dieser positive Beitrag der massiven Bauweise auf das materielle Schadensausmaß lässt sich auch für andere Schadensszenarien anführen, etwa beim Eintritt eines Hochwasserereignisses. Hierbei ist die Wiederherstellung eines beschädigten Wandaufbaus einer Konstruktion in Holzbauweise (Kompletterneuerung durchfeuchteter Verkleidungs- und Dämmmaterialien) mit erheblich mehr Aufwendungen verbunden als die bei massiven Konstruktionen erforderliche Trocknung betroffener Wandflächen.

Nutzungsflexibilität

Insofern wirken sich auch hier die mineralischen Materialeigenschaften des Baustoffs Mauerwerk positiv auf das Sicherheitsniveau von Gebäuden aus.

Gemäß [1] wird bei brandschutztechnischen Vergleichen verschiedener Bau- und Konstruktionsweisen mitunter die These vertreten, die Konstruktion spiele nur eine untergeordnete Rolle, da die maßgebliche Gefahr im Brandfall von der Innenausstattung ausgehe. Selbst wenn man diese Auffassung angesichts der nachweislichen Brandlasten durch die Innenausstattung zunächst teilt, so hat die Bau- und Konstruktionsweise dennoch einen erheblichen Einfluss auf das materielle Schadensausmaß beim Eintritt des Brandschadensfalls. Denn über die gesundheitlichen Folgen für die Gebäudenutzer hinaus stellt sich bei oder nach einem Brand die Frage, ob das Gebäude in seiner (tragenden) Struktur insoweit intakt bleibt oder geblieben ist, dass es nach entsprechenden Renovierungsmaßnahmen weiter genutzt werden kann oder ob Abriss und Neubau die einzig verbleibende Option ist. Da massive Bauteile wie Mauerwerkswände einerseits stofflich nicht selbst zu einem Brand beitragen können und andererseits in Verbindung mit ihrem Feuerwiderstand über nennenswerte Tragreserven verfügen, gewähren massive Gebäude in vielen Fällen - je nach absolutem Ausmaß eines Brandfalls - höhere Wahrscheinlichkeiten für die Möglichkeit einer Weiternutzung der Trag- und Gebäudestruktur.

Funktionale und ökonomische Gebäudequalitäten

Die funktionale und ökonomische Qualität eines (Wohn-)Gebäudes wird maßgeblich von dessen Nutzungsflexibilität geprägt. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist z.B. die Reaktionsfähigkeit eines Gebäudes bezüglich künftiger Anforderungen an altersgerechte oder barrierefreie Gebäude und Grundrissgestaltungen. Hier ermöglichen Wandkonstruktionen aus Mauerwerk einen zweckmäßigen Ausgleich zwischen zwei übergeordneten nachhaltigkeitsrelevanten Eigenschaften.



Denn speziell bei der Ständerbauweise werden vertikale Lasten nicht linienförmig, sondern punktuell abgetragen.

Werterhaltung und -stabilität

Einerseits wird die Umnutzungsfähigkeit bzw. Nutzungsflexibilität begünstigt durch die bereits skizzierten statischen Reserven tragender Mauerwerkskonstruktionen in Verbindung mit den üblicherweise in Stahlbeton ausgeführten Geschossdecken. Andererseits sind gleichzeitig bauliche Grundrissänderungen (Mauerdurchbrüche, etc.) bei Mauerwerkswänden aus statischer bzw. baupraktischer Sicht leichter umsetzbar als bei Ständerbauweisen bzw. bei anderen massiven Konstruktionsweisen wie Stahlbeton.

Zwar wird dieser Aspekt in den entsprechenden Kriterien der deutschen Nachhaltigkeitsbewertungssysteme im Wesentlichen anhand der Grundrissgestaltung (Flexibilität der Grundrisse durch nicht tragende Wände, Raumhöhe, Möblierbarkeit, etc.) beurteilt [29][30], die grundsätzlich unabhängig von der Konstruktionsweise ist. Faktisch ist es unter funktionalen Gesichtspunkten aber auch von Relevanz, dass z.B. im Rahmen einer Nutzungsänderung (einzelner Raumbereiche) auftretenden modifizierten Grundrissanforderungen in (Wohn-)Gebäuden aus Mauerwerk relativ gut Rechnung getragen werden kann.

Der Wert eines Gebäudes stellt - unabhängig von der Gebäudetypologie - eine sehr volatile Größe dar. Er wird beeinflusst von einer Vielzahl von Faktoren, die insbesondere nicht konstruktiver oder bau- und materialtechnischer Natur sind. Vor allem der Standort bzw. die Lage eines Gebäudes, das heißt die individuelle Marktsituation, ist für den Immobilienwert von herausragender Bedeutung. Dennoch lassen sich eine Reihe konstruktiv-bautechnischer Charakteristika anführen, die prinzipiell zumindest mittelbar zu einer gewissen Wertstabilität beitragen können.

Für MFH zählt hierzu erstens eine hohe Nutzungsflexibilität hinsichtlich sich im Laufe des Lebenszyklus wandelnden Anforderungen an die Nutzung von Wohngebäuden. Diesbezüglich wurde bereits die entsprechende Qualität von vertikalen Bauteilen aus Mauerwerk dargestellt.



Im Kontext des Werterhalts lässt sich die Betrachtung ferner ausweiten auf die Widerstandsfähigkeit von Mauerwerk hinsichtlich eines Befalls durch Schädlinge [1].

In den gängigen Bewertungssystemen ist ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren implementiert. In der Realität verfügen massive Bauteile aber über deutliche längere Lebensdauern von über 80 Jahren. Insofern sind diese Systeme bewertungstechnisch nur bedingt in der Lage, die beschriebene Qualität von Bauteilen aus Mauerwerk realitätsgetreu abzubilden.

Ökobilanzielle Bewertung der Nutzungsphase

Bewertung des thermischen Komforts und der energetischen Qualität

Zudem trägt zweitens auch ein hohes Sicherheitsniveau von Gebäuden zur Werterhaltung eines Wohngebäudes bei. Die entsprechenden Qualitäten von Wänden aus Mauerwerk wurden bereits im Unterkapitel zum Sicherheitsniveau massiver Gebäudekonstruktionen herausgearbeitet (siehe ebenfalls oben).

Generell gilt des Weiteren, dass die massiven Bauteile von Wohngebäuden aus Mauerwerk über extrem hohe Lebensdauern verfügen. Aus diesem Grund bedürfen sie grundsätzlich keiner Instandhaltung, also keiner Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen. Dies wirkt sich einerseits positiv auf die Wertstabilität aus, weil der Zustand der Tragstruktur unabhängig von einer - für andere Konstruktionsweisen regelmäßig erforderlichen - Instandhaltungsstrategie per se erhalten bleibt. Andererseits trägt diese Instandhaltungsfreiheit auch zu niedrigen Lebenszykluskosten der Baukonstruktion bei. Im Übrigen sind die Lebenszykluskosten von Mauerwerkskonstruktionen tendenziell auch niedriger als die von Stahlbetonkonstruktionen, weil - bei gleichen Kosten in der Nutzungsphase aufgrund der festgestellten Instandhaltungsfreiheit - die Kosten für Herstellung (vgl. Tab. 5) und der Aufwand für Rückbau und Recycling (siehe Kapitel 8) niedriger sind.

Bewertungstechnische Abbildung

Eigenständige ökobilanzielle Benchmarks für die Nutzungsphase und die Ableitung einer entsprechenden Bewertung liegen im System *NaWoh* nicht vor. Die Ableitung einer ökobilanziellen Bewertung für MFH der markt gängigen Bauweisen (Mauerwerk, Stahlbeton, Holz) erfolgt daher im Kontext des gesamten Lebenszyklus am Ende der Studie in Kapitel 9.

Die Beurteilung des thermischen Komforts von MFH (Kriterium 1.1.6) ist ein wesentlicher Bestandteil der (soziokulturell-funktionalen) Wohnqualität und wirkt sich durch die Wechselwirkung zum Wärmeschutz (Kriterium 2.1.2 *Energetische Qualität*) gleichsam positiv auf die technische Qualität aus. Durch ihre Wärmedämmeigenschaften und v.a. die Wärmespeicherfähigkeit bieten Wandkonstruktionen aus Mauerwerk hier sehr gute Voraussetzungen für eine hohe Bewertung.



Bewertung der Raumluftqualität

Die *Voraussetzungen* für eine zu erwartende gute Raumluftqualität in Mehrfamilienhäusern werden vom einschlägigen Zertifizierungssystem bzw. dem entsprechenden Kriterium *Raumluftqualität* im Kontext der Baufertigstellung bewertet. In Kapitel 6 wurde hierzu dargelegt, dass Mauerwerk aufgrund seiner mineralischen Stoffzusammensetzung ideale Voraussetzungen für eine optimale Bewertung dieses Kriteriums schafft.

Bewertung der Wertstabilität und Nutzungsflexibilität

Im Rahmen dieses Kapitels wurde u.a. auch der positive Beitrag von Konstruktionen aus Mauerwerk für die Wertstabilität von MFH adressiert. Das entsprechende Kriterium des Systems *NaWoh* (4.2.1 *Langfristige Wertstabilität*) zieht allerdings für dessen Bewertung auch baustoff- bzw. materialunspezifische Indikatoren wie die Nutzungsneutralität oder die Flexibilität der Haustechnik heran. Die beschriebene hohe Qualität von MFH aus Mauerwerk hinsichtlich des Erhalts ökonomischer Werte kann demnach vom Bewertungssystem *NaWoh* nur bedingt abgebildet werden.

Bewertung der schallschutz- technischen Qualität

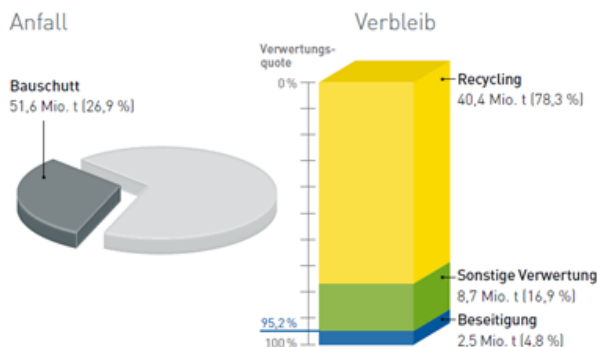
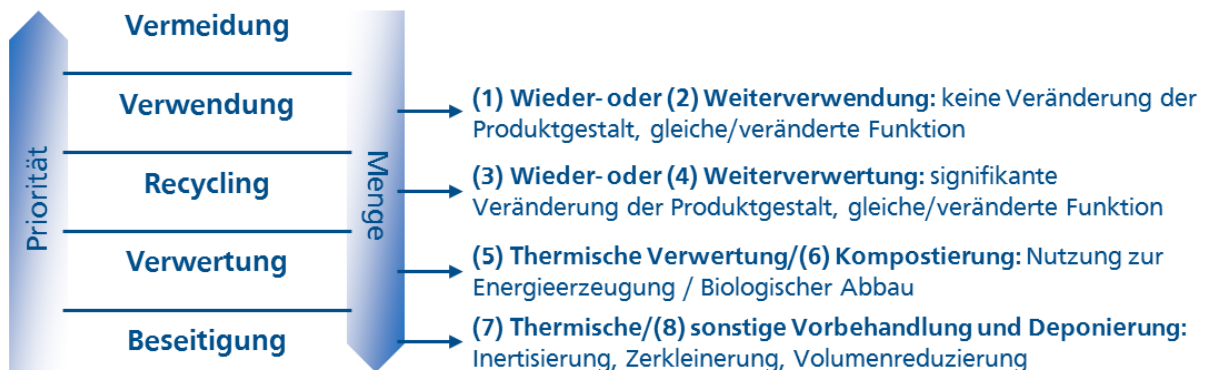
Demgegenüber ist die schallschutztechnische Qualität von MFH aus Mauerwerk zur Gänze im Bewertungssystem *NaWoh* abbildbar (Kriterium 2.1.1 *Schallschutz*). Dabei basiert die schallschutztechnische Bewertung auf den Ergebnissen eines Schallschutznachweises nach DIN 4109. Zwar hängt das letztendliche Bewertungsergebnis eines MFH insbesondere auch von anderen Faktoren ab (z.B. schallschutztechnische Qualität von Geschossdecken). Für die Bewertungsaspekte Luftschallschutz Außenwände (*Luftschall Außenbauteile*), Trennwände (*fremde Wohnbereiche*) und Innenwände (*eigener Wohnbereich*) können prinzipiell aber abschließende Bewertungsergebnisse abgeleitet werden. In der Praxis übliche Wandstärken und -aufbauten von Mauerwerkskonstruktionen im MFH-Bereich können die Anforderungen des Kriteriums ohne weiteres einhalten und diese im Zuge einer Optimierung von Wandaufbauten ggf. auch deutlich übererfüllen.

8 Durch Cradle-to-Cradle zum geschlossenen Kreislauf⁸

End of Life als Startpunkt eines neuen Lebenszyklus

Unabhängig von der Gebäudegröße sind für Wohnungsbauten dieselben Mauersteinarten marktbestimmend. Daher haben die Ausführungen beider Vorgängerstudien zu den anfallenden Abfallfraktionen und -mengen am Ende des Lebenszyklus (engl.: *End of Life*, kurz: *EoL*) von Wohngebäuden aus Mauerwerk auch im Rahmen dieser Fortsetzungsstudie für MFH weiterhin Gültigkeit.

Mit rund 52 Mio. Tonnen p.a. repräsentiert die für Mauersteine maßgebliche Abfallfraktion des Bauschutts ca. 13 % des gesamtdeutschen jährlichen Abfallaufkommens von ca. 390 Mio. Tonnen [36]. Allerdings wird diese Abfallfraktion nahezu vollständig (ca. 95 %) einer Verwertung zugeführt; über 78 % davon sogar der relativ hochwertigen Abfallhierarchiestufe des Recycling.



In Deutschland wird durch das *Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)* eine fünfstufige *Abfallhierarchie* vorgegeben, die eine Stufenfolge des Umgangs mit Abfällen festlegt. Diese Hierarchie lässt sich aufteilen in insgesamt 8 *Entsorgungspfade*, die das Stufenmodell präzisieren. Für mineralische Bau- und Abbruchabfälle sind die Entsorgungspfade der Wieder-/ Weiterverwertung von größter Relevanz. Dies zeigt sich auch an deren Recyclingquoten (links).

Abb. 17: Abfallhierarchie und ihre Entsorgungspfade sowie Recyclingquote der Abfallfraktion Bauschutt in Deutschland 2012 [37]

⁸ Cradle-to-Cradle = von der Wiege bis zur Wiege; Form der zyklischen Ressourcennutzung, bei der die Abfälle eines Produkts an seinem Lebenszyklusende gleichzeitig die Rohstoffe eines (entsprechenden) neues Produkts am Lebenszyklusanfang darstellen.



Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten sind Abfallströme in möglichst hohem Maße den oberen Stufen zuzuordnen, um die Umwelt insgesamt möglichst wenig zu beeinträchtigen. Dies gilt in doppelter Hinsicht, denn einerseits führen hohe Wieder-/Weiterverwendungs- und Recyclingquoten zu einer verringerten Umweltbelastung durch die andernfalls nötige Beseitigung (Deponierung) von Abfällen und andererseits zu einer Umweltentlastung durch die Substitution von (Primär-) Rohstoffen mittels der gewonnenen Recyclingstoffe. Dadurch werden Stoffkreisläufe geschlossen und das Ende eines Lebenszyklus ist gleichsam der Startpunkt eines neuen Lebenszyklus.

Down-/Upcycling

Stoffliche Ab-/ Aufwertung eines Abfallstoffs durch die Verwendung bei der Herstellung eines minder-/ höherwertigen Produkts verglichen mit dem Ausgangsprodukt.

Ohnehin wird ja mit dem skizzierten Downcycling von mineralischen Bauabfällen im Straßen- und Erdbau gegenüber der thermischen Verwertung (z.B. von Holzwerkstoffen) oder der Deponierung grundsätzlich bereits eine hochwertige Abfallhierarchiestufe eingehalten.

Künftige Recyclingpotentiale für Mauerbruch

Eine weitere wesentliche Feststellung aus [1][2] in diesem Kontext war, dass die recycelten Baustoffe überwiegend im Straßen- und Erdbau *weiterverwendet* werden, wobei es sich in vielen Fällen um ein sogenanntes *Downcycling* von (höherwertigen) Ausgangsabfallstoffen handelt. Gleichwohl gibt es in der Branche vielversprechende Forschungsinitiativen, um die Potentiale für ein Upcycling oder zumindest für eine Produktion von Recycling-Baustoffen gleicher Funktionsstufe schrittweise zu erschließen. Dabei geht es vor allem um die Problematik einer schwankenden stofflichen Zusammensetzung der Abfallfraktion Mauerbruch bei der Herstellung von thermisch gebundenen leichten Gesteinskörnungen. Künftig sollen hierdurch Primärrohstoffe bei der Mauersteinproduktion zumindest partiell substituiert werden [38], sofern dies technisch möglich und wirtschaftlich ist.

Auch im gemeinschaftlichen Forschungsprojekt „Stoffkreislauf im Mauerwerksbau - SiM“ befasst sich die Mauersteinindustrie mit weiteren technischen Lösungsmöglichkeiten des Mauerwerksrecyclings, das angesichts des Spannungsfelds zwischen einschlägigen europäischen Normen des Baustoffrecyclings einerseits und zunehmend strengerer Umweltauflagen andererseits eine außerordentliche Herausforderung darstellt [39][40].



Unabhängig davon sind Konstruktionen und Bauteile aus Mauerwerk im Vergleich etwa mit einer massiven Bauweise aus Stahlbeton deutlich einfacher zurückzubauen.

Dies unterscheidet einen Wandaufbau aus Mauerwerk wiederum von einer massiven Bauweise aus Stahlbeton. Im Zuge des Rückbaus bzw. der Trennung unterschiedlicher Materialschichten bedarf es dort des HerauslöSENS und Abscheidens des Bewehrungsstahls.

Bewertung des Recyclingpotentials von MFH

Dennoch konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens zielführende zukünftige Verwertungspfade für Mauerwerk identifiziert und konkrete Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des Stoffkreislaufs abgeleitet werden.

Weitere Forschungsschwerpunkte

Aufgrund der massiven Bauweise von Wohngebäuden aus Mauerwerk ist deren Rückbau und Demontage mit einem entsprechenden Aufwand sowie dem Einsatz von Maschinen verbunden. Die Mauerwerksindustrie nimmt sich jedoch auch dieser Problematik an und forscht an Methoden und Verfahren zur Verbesserung der Rückbaufähigkeit von Mauerwerkskonstruktionen. Beispielhaft sei hier auf die Entwicklung vollrezyklierbarer, modularer Systeme hingewiesen [41].

Andere Forschungsansätze z.B. am Institut für Massivbau der TU Darmstadt befassen sich mit der Thematik der Trennbarkeit von Konstruktionen aus Mauerwerk hinsichtlich des in der Praxis relevanten gesamthaften Bauteilschichtaufbaus. Grundsätzlich kann ein Wandaufbau aus Mauerwerk und Putz-/Farbschichten als „homogenisiert“ betrachtet werden, der beim Rückbau nicht zu trennen ist [29]. Mauerwerk wird aber zunehmend in Kombination mit Dämmmaterialien - als Wärmedämmverbundsystem (WDVS) oder integrierte Kerndämmung - ausgeführt. Hier werden hinsichtlich der Auswirkungen auf die Trennbarkeit von Bauteilen und ihren Schichten aktuell die wissenschaftlichen Grundlagen erschlossen [42].

Bewertungstechnische Abbildung

Das als Bewertungsbasis ausgewählte System *NaWoh* beurteilt das Recyclingpotential von MFH - im Gegensatz zur quantitativen Methodik des *DGNB*-Pendants - rein qualitativ mittels des Kriteriums *2.2.7 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit [...]*. Hier werden verschiedene nachhaltigkeitsrelevante Merkmale eines Rückbaukonzepts abgefragt (siehe Abb. 18), wobei keine wertende Unterscheidung zwischen leichter/schwerer Rückbau- und Trennbarkeit erfolgt.



Im Zuge einer ökobilanziellen Erfassung und Bewertung des End of Life von Mauerwerkskonstruktionen (siehe auch Kapitel 9) besteht allgemein noch die Problematik einer nur rudimentären Grundlage an ökobilanziellen Basisdaten in der zu verwendenden offiziellen Datenbank *Ökobau.dat*. Mittels hersteller- und produktspezifischer Datensätze für die Aufbereitung mineralischen Bauschutts ließen sich hier deutliche Genauigkeitssteigerungen in der ökobilanziellen Erfassung und Bewertung herbeiführen.

Konkret wurde in der ersten Vorgängerstudie - im Vergleich mit anderen gängigen Wandkonstruktionen und unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten aus abgeschlossenen Zertifizierungsprojekten - der Aufwand zur Demontage als *mittel* (24 von max. 38 Punkten) und der Aufwand zur Trennung von Mauerwerkswänden zumindest als *vertretbar* (24 von max. 38 Punkten) kategorisiert.

<input type="checkbox"/> Es liegt ein Rückbaukonzept für die Primär- und Sekundärstruktur sowie der Technischen Anlagen vor.
<input type="checkbox"/> Das Konzept enthält eine Kurzübersicht über Grundstruktur und die wichtigsten baulichen Komponenten.
<input type="checkbox"/> Das Konzept enthält ein Rückbau und Recyclingkonzept pro Bauteil für: <input type="checkbox"/> Wände <input type="checkbox"/> Dach <input type="checkbox"/> Fußboden <input type="checkbox"/> weitere Bauelemente, nämlich:.....
<input type="checkbox"/> Die verwendeten Verbundstoffe sind aufgelistet.
<input type="checkbox"/> Die Stoffe sind nach leicht bzw. schwer recyclebaren Stoffen kategorisiert.
<input type="checkbox"/> Das Konzept erklärt, wie sich Einzelbestandteile voneinander trennen lassen, bzw. welche nicht getrennt werden können (inbes. Schichtentrennung).
<input type="checkbox"/> Das Konzept enthält Anweisungen und Vorschläge zum Umgang mit den getrennten Stoffen, z.B. Art der möglichen Weiterverwendung, Recycling/Downcycling, Art der Entsorgung.
<input type="checkbox"/> Das Konzept enthält Hinweise auf Kontaminationen und Problemstoffe.
<input type="checkbox"/> Das Konzept erfasst den Rückbau der Technischen Anlagen, z.B. auch PV-Anlagen (einschließlich Rückbau bei Ersatzmaßnahmen während der Lebensdauer, z.B. Ersatz der Haustechnik nach 25 Jahren).

Abb. 18: Bewertungsmethodik des *NaWoh*-Kriteriums 2.2.7

Die bestehenden Vorteile von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber anderen massiven Bauweisen hinsichtlich Rückbau- und Trennbarkeit können vom System *NaWoh* bzw. dem maßgeblichen Kriterium also nicht herausgearbeitet werden. Vielmehr wäre dazu eine Bezugnahme auf das zweite für MFH einschlägige *DGNB*-Nutzungsprofil *Neubau Wohngebäude (NWO)* nötig. Die Bewertung erfolgte dann analog zu der des Recyclingpotentials im Rahmen der ersten Vorgängerstudie bzw. gemäß Kriteriensteckbrief des dort maßgeblichen *DGNB*-Nutzungsprofils *Neubau Kleine Wohngebäude (NKW)* [1]. Hier konnten Wandkonstruktionen aus Mauerwerk in Relation zu den maximal erreichbaren Punktzahlen und verglichen mit anderen massiven Konstruktionsweisen wie etwa Stahlbeton verhältnismäßig hohe Bewertungen erreichen.

9 Resümee - Nachhaltigkeitsbilanz von Mehrfamilienhäusern

Ganzheitliche Lebenszyklus-orientierte Perspektive

Bisherige Untersuchungen der Studie

In Analogie zu den zitierten Vorgängerstudien [1][2] wurden in den Untersuchungen der vorstehenden Kapitel 4 bis 8 auf Basis des Drei-Säulen-Modells die Nachhaltigkeitsqualitäten von MFH aus Mauerwerk entlang des gesamten Lebenszyklus - von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum End of Life - untersucht und sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte berücksichtigt. Für in dieser Weise betrachtete Aspekte, die auch vom als relevant identifizierten Nachhaltigkeitsbewertungssystem *NaWoh* adressiert werden, erfolgte parallel eine entsprechende (vorläufige) bewertungstechnische Einordnung.

In diesem Kapitel 9 werden nun - ebenfalls analog zu [1][2] - die einzelnen Bewertungsaspekte aufgegriffen und in den Kontext einer Nachhaltigkeitsbewertung von MFH aus Mauerwerk integriert. Eine zentrale Rolle werden dabei wiederum die ökobilanziellen Ergebnisse eines exemplarischen Muster-MFH der marktrelevanten Bauweisen (marktbestimmenden Mauerwerksarten, Stahlbeton, Holz) spielen (siehe nachfolgend).

Nachhaltigkeitsbilanz von MFH aus Mauerwerk

Aufgrund seiner gesamtgebäudebezogenen Methodik umfasst das System *NaWoh* einige Kriterien, bei denen sich für einzelne Bauteile wie z.B. Wandkonstruktionen isoliert betrachtet keine trennscharfen Nachhaltigkeitsbewertungsergebnisse - weder quantitativer Natur noch als qualitative Tendenzaussage - ableiten lassen. Ein Beispiel hierfür ist die ökobilanzielle Bewertung: Für Wandkonstruktionen lassen sich zwar ökobilanzielle Ergebnisse berechnen. *NaWoh* hält aber keine eigenständigen Vergleichswerte zur Ableitung eines Bewertungsergebnisses vor. Vielmehr gibt es diese *Benchmarks* nur für die aggregierten Umweltwirkungen aus Herstellung, Instandhaltung und Rückbau sowie Versorgung des Bauwerks mit Wärme- und Strom (Energieversorgung).



Bewertung eines Muster-MFH
als Vergleichsobjekt der Studie.

Weitere Informationen zum
Vergleichsobjekt können An-
hang D entnommen werden.

Zur Erstellung einer Nachhaltigkeitsbilanz für MFH im Rahmen einer Anwendung des Bewertungssystems *NaWoh* ist es demnach erforderlich, dies anhand eines exemplarischen Vergleichsgebäudes zu tun. Im vorliegenden Fall der Fortsetzungsstudie wurde hierfür das MFH aus Abb. 19 verwendet.

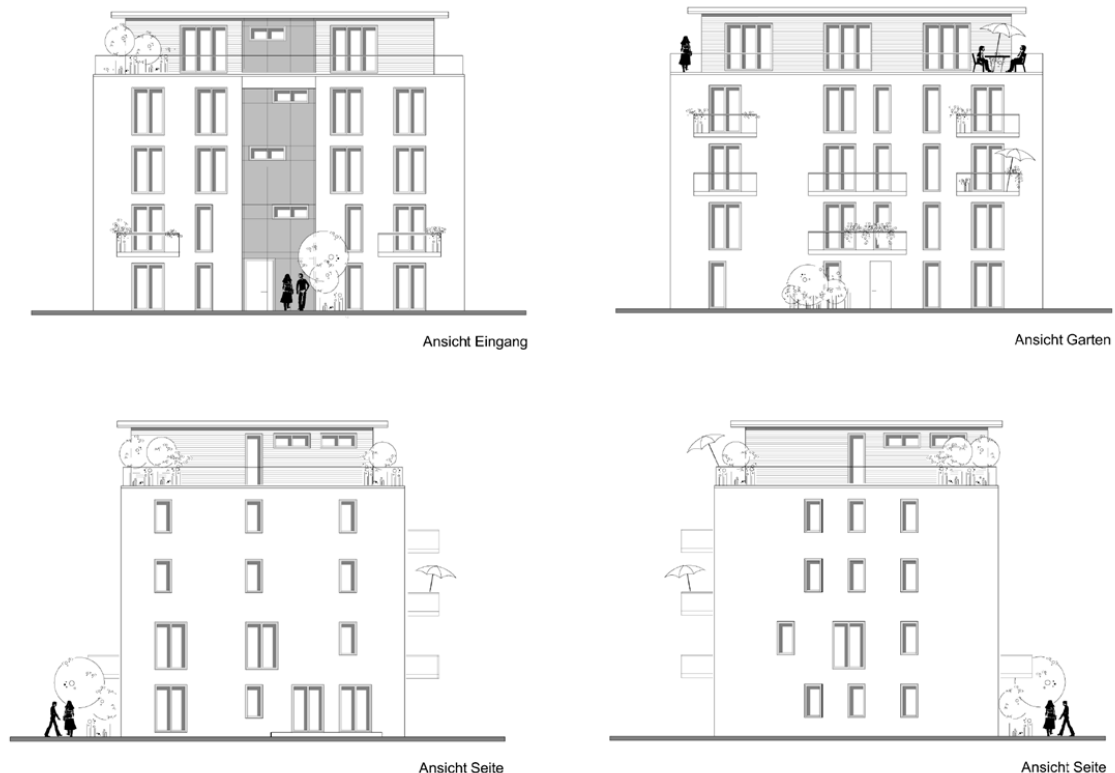


Abb. 19: Ansichten des Vergleichsgebäudes [28]

Ökobilanzielle Bewertung

Die Variantenuntersuchung erfolgte unter jeweils identischen Randbedingungen hinsichtlich energetischer Qualität, Gestaltung und Konstruktion.⁹

Hierfür wurde eine vollständige Ökobilanzierung gemäß den Anforderungen der entsprechenden Kriterien des Systems *NaWoh* durchgeführt. Dabei wurden vier Varianten für die marktbestimmenden Mauerwerksarten Ziegel, Kalksandstein, Poren- sowie Leichtbeton bilanziert. Des Weiteren wurden als zusätzliche Vergleichsvarianten eine Stahlbeton- und Holzständerbauweise modelliert und bilanziert. Für die Holzständerbauweise wurde zudem zwischen zwei Varianten – einer mit einheimischem und einer mit importiertem Holz – unterschieden.

⁹ Somit sind alle Varianten z.B. grundsätzlich identisch hinsichtlich Gründung, Dach sowie Boden-, Wand- und Deckengestaltung. Die entsprechenden Wandaufbauten können Anhang D entnommen werden.

Mit der Variantenbetrachtung von importiertem Holz bzw. Holzwerkstoffen soll der ökobilanzielle Einfluss der Import-Transporte identifiziert werden. Hierfür wird einerseits ein Importmix von Holz/ Holzwerkstoffen aus den vier größten Bezugsländern Frankreich, Estland, Polen und Tschechien i.V.m. einer mittleren (gemäß Importvolumen gewichteten) Transportentfernung angesetzt. Andererseits werden für diese Variante explizit keine ausländischen ökobilanziellen Basisdaten verwendet, um *keine* Ergebniseffekte aus Unterschieden in den ökobilanziellen Basisdaten zwischen Deutschland und den Bezugsländern zu erzeugen; fiktiv wird daher für die Import-Variante mit einheimischen ökobilanziellen Basisdaten gerechnet.

Abb. 20 zeigt die ökobilanziellen Auswirkungen durchschnittlicher Transportentfernungen für den Import pro m³ Holz im direkten Vergleich zu den ökobilanziellen Wirkungen des Transport, die in den Basisdatensätzen für einheimische Hölzer inkludiert sind.

Allerdings repräsentieren auch die gesteigerten ökobilanziellen Wirkungen des Transports nur einen geringen Anteil der ökobilanziellen Gesamtergebnisse – mit entsprechend geringem Effekt auf Gesamtergebnisebene der Ökobilanzen.

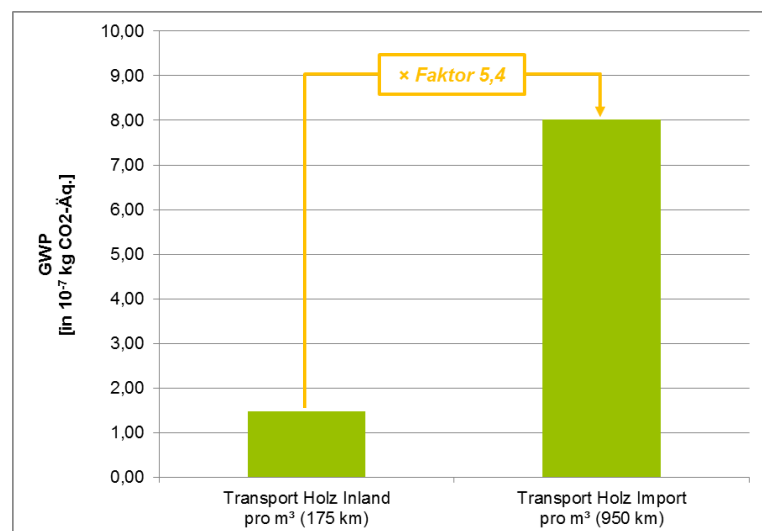


Abb. 20: Ökobilanzielle Auswirkungen des Holzimports auf Bilanzposition Transporte (Modul A2)

Für Ergebnisdarstellung bzw. -auswertung sowie Gegenüberstellung zwischen den Vergleichsobjekten aus Mauerwerk (Mediandarstellung mit Min-Max-Werten) und den Vergleichsvarianten in Stahlbeton-/Holzbaweise werden hier die Wirkungsindikatoren Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP) und Primärenergiebedarf gesamt (PE_{ges}) herangezogen. Die absoluten Ergebnisse der Varianten wurden normiert, wobei Stahlbeton den auf 1 normierten Bezugspunkt darstellt. Final wurde die Ableitung einer Bewertung im System *NaWoh* durchgeführt.



Ökobilanzielle Gesamtergebnisse

Bei einer entsprechenden Betrachtung der ökobilanziellen Gesamtergebnisse - d.h. einer Bilanzierung aller Bauteile des Muster-MFH über den gesamten Lebenszyklus *sowie* seines Wärme- und Stromverbrauchs während der Nutzungsphase - zeigt sich einerseits, dass die Ergebnisse aller Muster-MFH-Varianten auf einem ähnlichen Niveau liegen (siehe Abb. 21). Maßgeblicher Hintergrund dessen ist, dass die ökobilanziellen Gesamtergebnisse sehr stark von den entsprechenden Umweltwirkungen geprägt werden, die aus dem Wärme- und Stromverbrauch der Nutzungsphase resultieren (siehe Abb. 22).

Andererseits kann die Vergleichsvariante aus Stahlbeton zum einen generell durch höhere Umweltwirkungen gegenüber den Mauerwerksvarianten charakterisiert werden (vgl. Abb. 22). Zum anderen weisen auch die Holz-Varianten für den Wirkungsindikator AP höhere Ergebnisse als die Mauerwerksvarianten auf, während sie allein im Bereich des Treibhauspotentials die geringfügig niedrigsten Werte aller Vergleichsvarianten für sich beanspruchen können.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass den Muster-MFH-Varianten aus Mauerwerk eine - je nach Wirkungskategorie - mit den Varianten aus Stahlbeton und Holz absolut vergleichbare bzw. teilweise bessere ökobilanzielle Qualität attestiert werden kann.

NaWoh-Bewertung

Dies schlägt sich folgerichtig auch in der Bewertung der zugrundeliegenden *NaWoh*-Kriterien *3.1.1 Ökobilanz - Teil 1* (Treibhauspotential) und *3.1.2 Primärenergiebedarf* nieder.

Anders als das Pendant *NWO12* der *DGNB*-Systemfamilie vergibt *NaWoh* keine Bewertungspunkte, sondern kontrolliert die Einhaltung bzw. *Erfüllung* von Mindestanforderungen - z.B. an die Emissionsreduzierung von Treibhausgasen - und honoriert darüber hinaus eine Überfüllung (siehe Tab. 7).

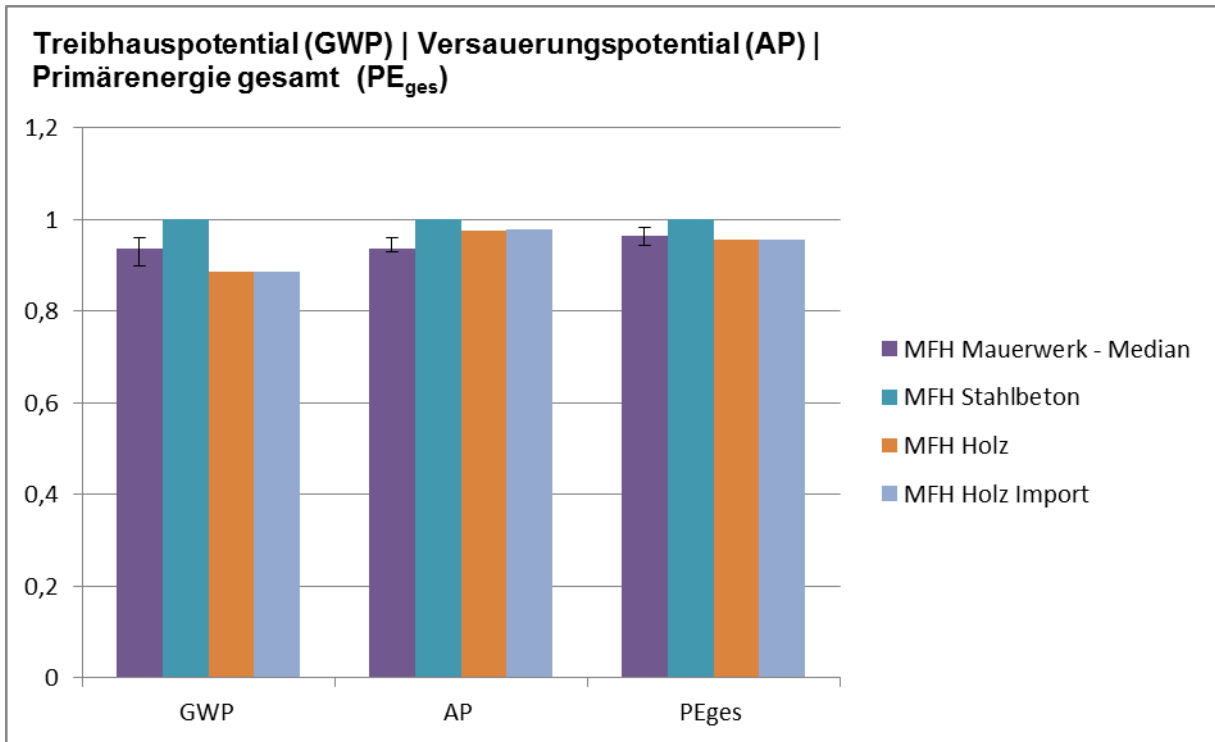


Abb. 21: Ökobilanzielle Gesamtergebnisse des Muster-MFH normiert auf die Stahlbeton-Variante

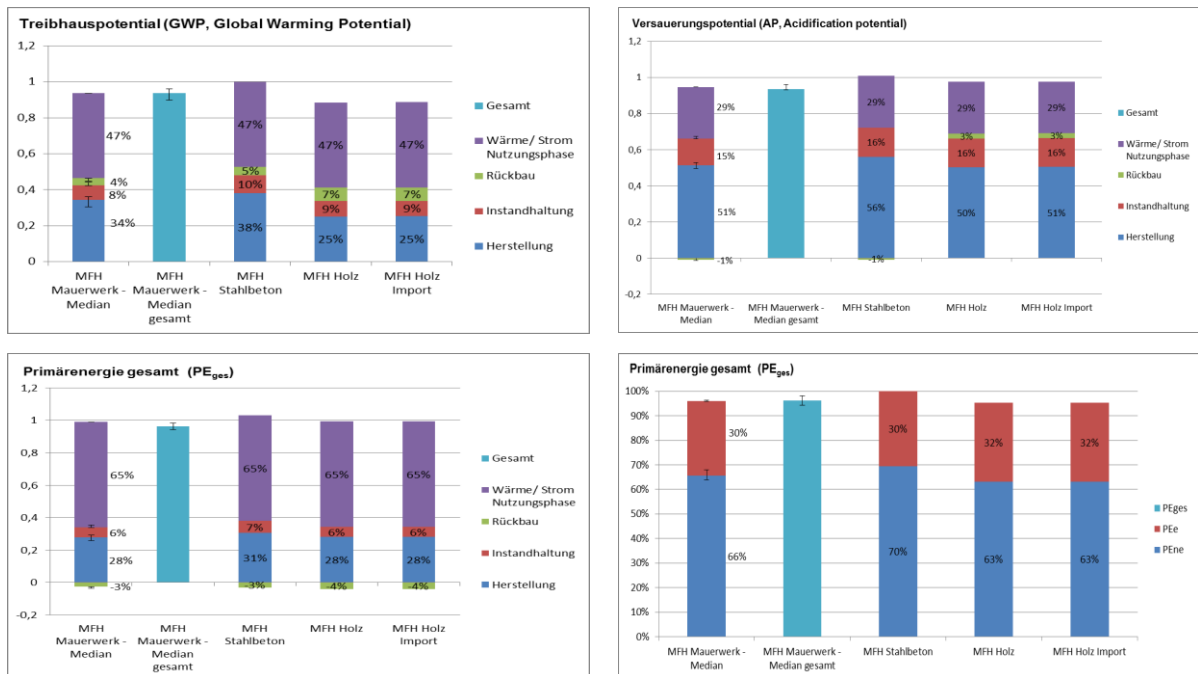


Abb. 22: Ökobilanzielle Teil-Gesamtergebnisse des Muster-MFH normiert auf die Stahlbeton-Variante
 Systemgrenzen und Berechnungsparameter: Bilanzierung aller Bauteile sowie des Wärme- und Stromverbrauchs der Nutzungsphase für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und über den gesamten Lebenszyklus hinweg (Herstellung | Nutzung | Rückbau).



Implizit lässt sich gleichwohl eine Art Ergebnisinterpretation vornehmen, da das Kriterium typische Werte für eine Plausibilitätsprüfung anführt [16].

Über die bewertenden Kriterien hinaus weist das beschreibende Kriterium *3.2.1 Ökobilanz - Teil 2* zusätzliche Ökobilanz-Ergebnisse u.a. für den Wirkungsindikator *Versauerungspotenzial* nachrichtlich aus, ohne konkret eine Bewertung vorzunehmen. Tab. 7 zeigt eine Gesamtübersicht zu den Bewertungsergebnissen der Muster-MFH-Varianten im System *NaWoh*.

Dabei zeigt sich, dass alle Muster-MFH-Varianten in allen zu bewertenden ökobilanziellen Kriterien die exakt gleiche *NaWoh*-Bewertung erhalten würden.

Wirkungskategorie	GWP	PE _{ne}	PE _e	AP
MFH Ziegel	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH KS	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH Porenbeton	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH Leichtbeton	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH Stahlbeton	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH Holz	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut
MFH Holz Import	übererfüllt	deutlich übererfüllt	deutlich übererfüllt	sehr gut

Tab. 7: Bewertungsergebnisse der Muster-MFH-Varianten im System *NaWoh*

Angesichts dieser maximalen Einheitlichkeit der *NaWoh*-Bewertungsergebnisse stellt sich natürlich die Frage nach der Sinnhaftigkeit der Kalibrierung der Vergleichswerte (*Benchmarks*) des *NaWoh*-Systems. Hierzu lässt sich zum einen anmerken, dass die Einheitlichkeit der *NaWoh*-Bewertungsergebnisse primär nicht auf einem (zu) weitmaschigen Raster an Vergleichswerten basiert, sondern auf der Enge des Ergebniskorridors der Muster-MFH-Varianten. Und zum zweiten trägt zu den (einheitlichen) sehr guten respektive optimalen *NaWoh*-Bewertungsergebnissen auch bei, dass das Muster-MFH einen hohen (über alle Varianten zwingend identischen – Stichwort funktionales Äquivalent!) energetischen Standard aufweist, was wegen des hohen Ergebnisanteils des Wärme-/Strombedarfs der Nutzungsphase zu einer Einhaltung bzw. Übererfüllung der *NaWoh*-Vergleichswerte führt.



Exkurs: Ausweitung des Betrachtungszeitraums auf 80 Jahre

Bei einem Betrachtungszeitraum von 80 Jahren können die langen Nutzungsdauern massiver Konstruktionen bzw. Bauteile realitätsgetreuer abgebildet werden.

Bei der Entwicklung der deutschen Nachhaltigkeitsbewertungs- und -zertifizierungssysteme (vgl. Kapitel 3) wurde der Betrachtungszeitraum der Bewertung allgemein bzw. auch der ökobilanziellen Bewertung im Speziellen - und damit der zu bewertende Lebenszyklus eines Gebäudes - auf 50 Jahre fixiert. Auf diesen Betrachtungszeitraum bezogen sich auch die bisher dargestellten ökobilanziellen Berechnungen.

In der Realität können Gebäude allerdings erheblich längere Lebenszyklen und Nutzungsdauern aufweisen, insbesondere gilt dies für Wohngebäude. Aus diesem Grund wurden die ökobilanziellen Berechnungen nochmals in modifizierter Vorgehensweise, d.h. für einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser modifizierten Berechnungen sind in Abb. 23 und Abb. 24 dargestellt.

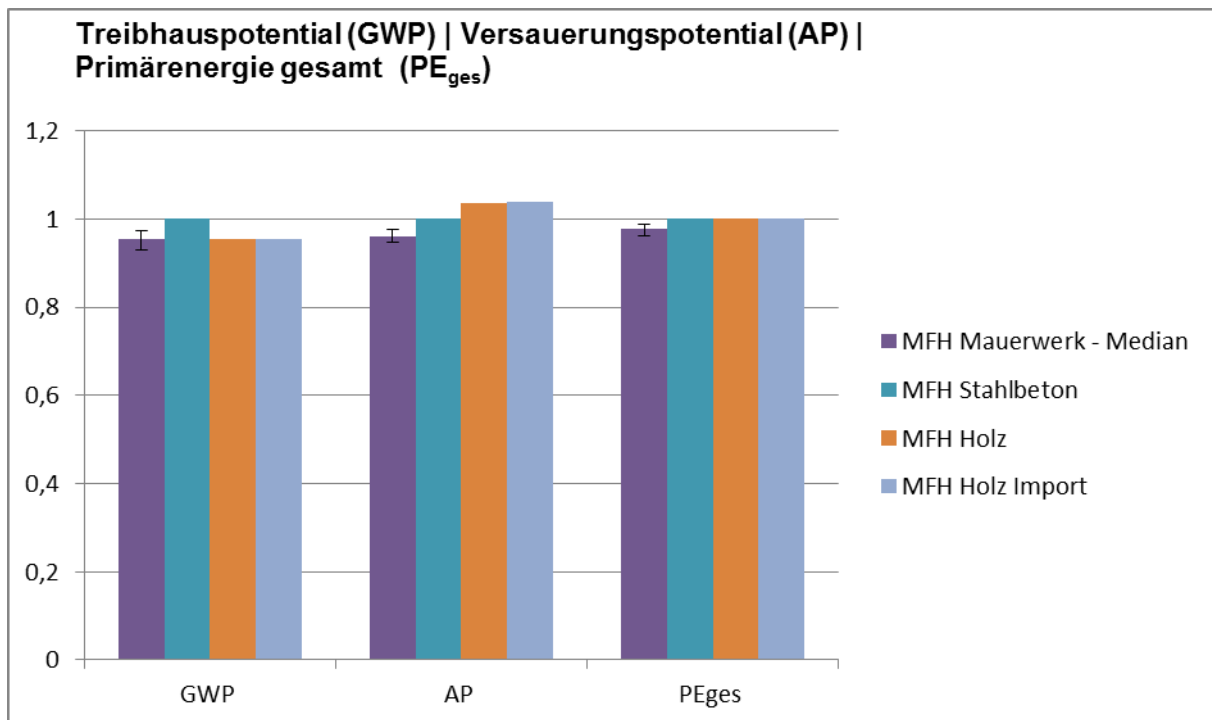


Abb. 23: Ökobilanzielle Gesamtergebnisse des Muster-MFH normiert auf die Stahlbeton-Variante



Wesentliche Auswirkungen der Ausweitung des Betrachtungszeitraums

Als Fazit der Auswertung der modifizierten ökobilanziellen Berechnung der Muster-MFH-Varianten lassen sich zwei zentrale Punkte herausstellen:

> Leicht reduzierte absolute Gesamtergebnisse für alle Indikatoren¹⁰ i.V.m. einer Abnahme des Ergebniseinflusses der Herstellungsphase

Hintergrund ist erstens, dass die Umweltwirkungen der Konstruktion/der Bauteile aus der Lebenszyklusphase der Herstellung auf einen deutlichen längeren Zeitraum verteilt werden. Jedoch führt der ausgedehnte Betrachtungszeitraum zweitens zu Instandhaltungsaufwendungen für Bauteilschichten mit geringen Nutzungsdauern, z.B. Ausbaumaterialien wie Anstriche oder textile Bodenbeläge und damit zu Umweltwirkungen. Allerdings werden diese erhöhten Umweltwirkungen im Ergebnis gleichsam zumindest teilweise durch die Umlage auf einen längeren Betrachtungszeitraum kompensiert. Ohnehin überschreiten die Nutzungsdauern der konstruktiven Bauteilschichten der mineralisch basierten Muster-MFH-Varianten den Betrachtungszeitraum von 80 Jahren, wodurch der Einfluss der Herstellungsphase für diese Muster-MFH-Varianten abnimmt – graphisch sichtbar in Abb. 22 und Abb. 24 im Vergleich der jeweiligen blauen Balkenbestandteile der Herstellung (z.B. GWP: Abnahme von ca. 30 – 38 %-igen auf ca. 23 – 28 %-igen Anteil).

> Verschiebung der ökobilanziellen Gesamtergebnisse zwischen Muster-MFH-Varianten

Grundsätzlich gilt die obige Feststellung der Annahme des Ergebniseinflusses der Herstellungsphase wegen des auf 80 Jahre ausgeweiteten Betrachtungszeitraums auch für die Muster-MFH-Varianten in Holzbauweise. Als weiterer zweiter – hier entscheidender – Effekt tritt hinzu, dass die Nutzungsdauern der Konstruktionsbauteile der Holz-Varianten kürzer sind als der Betrachtungszeitraum und deshalb diese Konstruktionsbauteile im Verlauf der 80 Jahre (ökobilanziell) einmal zu ersetzen sind, mit entsprechenden Auswirkungen auf die ökobilanziellen Gesamtergebnisse.

¹⁰ Diese Reduzierung der absoluten Ergebnisse wird naturgemäß in der normierten Darstellung nicht ersichtlich; die Feststellung basiert auf einer Auswertung der Hintergrundberechnungen.

Diese Auswirkungen sind, dass

- sich die Ergebnisse der Wirkungskategorie des GWP zwischen den Mauerwerks- und den Holz-Varianten faktisch gänzlich annähern *und*
- sich demgegenüber die Ergebnisabstände in den Wirkungskategorien des AP und PE_{ges} insofern vergrößern, als die Ergebnisse der Holz-Varianten nunmehr etwas deutlicher oberhalb der Ergebnisse der Mauerwerksvarianten liegen.

Eine Bewertung analog zu Tab. 7 lässt sich für den modifizierten Betrachtungszeitraum nicht ableiten, weil das System *NaWoh* für die Ökobilanz-Kriterien nur Benchmarks vorhält, die für den originären Betrachtungszeitraum von 50 Jahren kalibriert sind.

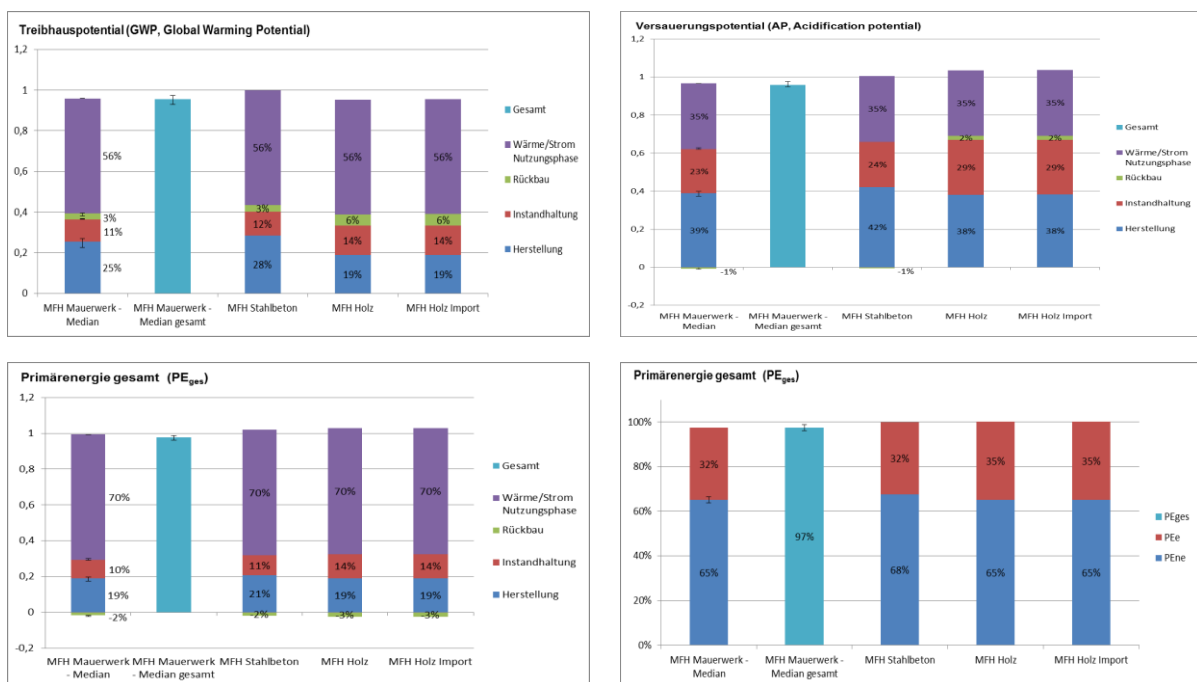


Abb. 24: Ökobilanzielle Teil-Gesamtergebnisse des Muster-MFH normiert auf die Stahlbeton-Variante
Systemgrenzen und Berechnungsparameter: Bilanzierung aller Bauteile sowie des Wärme- und Stromverbrauchs der Nutzungsphase für einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren und über den gesamten Lebenszyklus hinweg (Herstellung | Nutzung | Rückbau).



Vermeidung von Schadstoffen

Das beschreibende Kriterium *3.2.4 Vermeidung von Schadstoffen* gehört zur Hauptkriteriengruppe der *Ökologie* und ermittelt im Rahmen einer qualitativen Abfrage, ob die eingesetzten Bauprodukte bestimmte Material- und Stoffgruppen mit Risikopotential für Boden, Luft, Grund- und Oberflächenwasser sowie die Gesundheit von Mensch, Flora und Fauna enthalten [16]. Besondere Berücksichtigung dabei finden (teil-) halogenierte Treib- und Kältemittel, Schwermetalle sowie organische Lösemittel/Weichmacher (Flüchtige organische Verbindungen; kurz: *VOC*). Entsprechende Qualitätsanforderungen werden in einer Kriterienmatrix fixiert (siehe Abb. 13 sowie Anhang B).

Das Baumaterial Mauerwerk ist bezüglich dieser Anforderungen als unkritisch zu klassifizieren. Diese Feststellung besteht auch mit Blick auf etwaige Beschichtungsstoffe zur Realisierung eines kompletten Wandaufbaus fort: Für Grundierungen, Spachtelmassen, Anstriche und ähnliche Baumaterialien sind am Markt verschiedenste Produkte verfügbar, die ebenfalls die Anforderungen des Kriteriums erfüllen. Da es sich allerdings hier um ein beschreibendes Kriterium handelt, lassen sich dieser ökologischen Qualität des Materials Mauerwerk keine Bewertungsstufen zuordnen.

Wertstabilität und Nutzungsflexibilität

Der Fokus des Bewertungssystems liegt auf einer Beurteilung der Nachhaltigkeitsqualität eines Gebäudes und nicht auf der einer einzelnen Konstruktionsweise.

Im Zuge der Untersuchung der Nachhaltigkeitsqualität von MFH aus Mauerwerk in der Nutzungsphase wurde der positive Beitrag massiver Konstruktionen für Wertstabilität und Nutzungsflexibilität dargelegt (Kapitel 7). In diesem Zusammenhang wurde u.a. auf die hohen Lebensdauern in Verbindung mit einer Instandhaltungsfreiheit von Mauerwerkswänden sowie die aus statisch-baupraktischer Sicht einfache Realisierbarkeit von Mauerdurchbrüchen bzw. generell Grundrissänderungen hingewiesen.



Bewertungsmethodik Kriterien

Bewertung der Wertstabilität und Nutzungsflexibilität von MFH anhand *konstruktions- und baustoff-/materialunabhängiger* Indikatoren (Architektonischer Grundrissgestaltung, lichter Raumhöhe, Nutzungsneutralität, Haustechnik, etc.).

Qualitätsmerkmale von Konstruktionen aus Mauerwerk (Tragreserven & Widerstandsfähigkeit, Lebensdauern & Wartungsfreiheit, einfache Realisierbarkeit von Grundrissänderungen) können mit diesen Indikatoren *nicht adäquat* abgebildet werden.

Faktische Nachhaltigkeitsqualität von MFH aus Mauerwerk

- > Statische Tragreserven im Falle von veränderten Nutzungsanforderungen
- > Widerstandsfähigkeit beim Eintritt von Schadensereignissen i.V.m. Begrenzung des Schadensausmaßes
- > Hohe Lebensdauern i.V.m. Instandhaltungsfreiheit der Wandkonstruktionen
- > Baupraktisch einfache Realisierbarkeit von Grundrissänderungen (z.B. Mauerdurchbrüche, etc.)
- > Anpassbarkeit hinsichtlich Anforderungen einer barrierefreien/altersgerechten Grundrissgestaltung

Abb. 25: Einschätzung zur faktischen Nachhaltigkeitsqualität hinsichtlich der Aspekte Wertstabilität und Nutzungsflexibilität

Thermischer Komfort Sommer

Der thermische Komfort im Winter wird implizit vom technischen Kriterium 2.1.2 *Energetische Qualität* abgebildet (siehe dazu unten).

Der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 erfolgt auf Basis der Gegenüberstellung des real vorhandenen Sonneneintragskennwerts S und einem höchsten zulässigen Sonneneintragskennwert [31].

Allerdings bewerten die entsprechenden Kriterien des relevanten Bewertungssystems *NaWoh* beide Aspekte anhand anderer Indikatoren, die weitestgehend unabhängig von der Konstruktionsweise und der Baustoff-/Materialwahl sind (siehe Abb. 25). Insofern kann die beschriebene hohe Nachhaltigkeitsqualität von MFH aus Mauerwerk vom anzuwendenden Bewertungssystem - bedingt durch dessen Systematik und Methodik - nicht vollumfänglich abgebildet werden.

Das Kriterium 1.1.6 *Thermischer Komfort* ist ein wichtiges Element der Hauptkriteriengruppe Wohnqualität. Dieser wird im System *NaWoh* wie bereits oben beschrieben auf Basis des Nachweises des sommerlichen Wärmeschutzes bzw. des Indikators des Sonneneintragskennwerts S bewertet.

Der vorhandene Sonneneintragskennwert S wird bestimmt von den Fensterflächen, dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung und der Nettogrundfläche des jeweiligen Raums [31]. Insoweit besteht kein Einfluss durch Wandkonstruktionen. Allerdings wird der zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} neben weiteren Faktoren beeinflusst von der Bauart: für eine mittlere und schwere Bauart (vgl. Abb. 16), z.B. in Mauerwerk, legt die DIN 4108-2 höhere zulässige Sonneneintragskennwerte fest.



Hier können die Anforderungen einfacher eingehalten und leichter übererfüllt werden; MFH aus Mauerwerk legen wesentliche Voraussetzungen für eine optimale Bewertung (Abb. 26).

MFH aus Mauerwerk	Kriterium 1.1.6 <i>Thermischer Komfort</i>
Anforderungen des Kriteriums	
Mindestanforderung	Einhaltung DIN 4108-2
Übererfüllung	Sonneneintragskennwert $S: S_{\text{vorh}} \leq 0,95 \cdot S_{\text{zul}}$
Deutliche Übererfüllung	Sonneneintragskennwert $S: S_{\text{vorh}} \leq 0,90 \cdot S_{\text{zul}}$
<p>Der vorhandene Sonneneintragskennwert S eines Gebäudes wird nach DIN 4108-2 determiniert von Fensterflächen, Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung sowie Nettogrundfläche des betrachteten Raums. Daher ist grundsätzlich keine Aussage zur Bewertungseinstufung für MFH aus Mauerwerk möglich.</p> <p>Allerdings wird der höchstens zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} beeinflusst von der Bauart. Konkret schreibt die DIN 4108-2 für mittlere und schwere Bauarten (z.B. Mauerwerk) höhere zulässige Sonneneintragskennwerte S_{zul} fest.</p> <p>Dadurch kann die strengere Anforderung des Zielwerts von MFH aus Mauerwerk bei sonst gleichen Randbedingungen (Fensterflächen, Verglasung, Grundrissflächen) einfacher erreicht werden. MFH aus Mauerwerk legen daher hervorragende Voraussetzungen für eine optimale Bewertung des Kriteriums.</p>	

Abb. 26: Einschätzung zur Bewertung des *NaWoh*-Kriteriums 1.1.6 Thermischer Komfort

Raumluftqualität

Einen weiteren Bestandteil der Hauptkriteriengruppe Wohnqualität stellt das beschreibende Kriterium 1.2.2 *Raumluftqualität* dar. Hier sind die Innenräume vier Wochen nach Gebäudefertigstellung auf die vorhandenen Konzentrationen an VOC/Formaldehyd zu überprüfen, wozu eine Raumluftmessung erforderlich ist. Vom Kriterium wird aber lediglich abgefragt, ob Konzentrationen an VOC/Formaldehyd bestimmt und dokumentiert werden und nicht, wie hoch die Konzentrationen liegen. Gleichwohl werden emissionsarme Bauprodukte und -materialien einen wichtigen Beitrag für entsprechende niedrige Konzentrationen leisten. Dies wird vom Kriterium auch ausdrücklich anerkannt.

Dieses Qualitätskriterium der Emissionsarmut trifft insbesondere auf mineralische Baumaterialien wie Mauerwerk zu. Wandkonstruktionen aus Mauerwerk bieten daher ideale Voraussetzungen für eine hohe Raumluftqualität. Diese Einschätzung gilt auch im Kontext mit je nach energetischen/innenraumgestalterischen Anforderungen notwendigen Ergänzungsmaterialien (z.B. integrierte Kerndämmung, Innenwandfarben).



Die Vielfalt und (ökologische) Qualität lieferbarer Baumaterialien gewährleistet hier ohne weiteres die Verfügbarkeit entsprechend emissionsarmer Produkte.

Brandschutz

Im *DGNB*-Nutzungsprofil *NWO* wird im Rahmen des Kriteriums *SOC1.7 Sicherheit und Störfallrisiken* zumindest die Vermeidung von Rauchgasrisiken adressiert.

Im Zuge der Analyse der Nutzungsphase von MFH wurde ausführlich das hohe Sicherheitsniveau massiver Gebäudekonstruktionen herausgearbeitet (Kapitel 7). Leider wird dieser Nachhaltigkeitsaspekt im relevanten Bewertungssystem *NaWoh* weder im Rahmen eines eigenständigen Kriteriums noch innerhalb des thematisch zugehörigen Kriteriums *2.2.1 Brandschutz* adressiert. Nichtsdestotrotz soll das hohe Sicherheitsniveau massiver Konstruktionen gemäß Analyse aus Kapitel 7 in einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbilanz von MFH aus Mauerwerk Eingang finden (siehe Abb. 27).

MFH aus Mauerwerk	Kriterium 2.2.1	Brandschutz
Bewertungsmethodik Kriterium		
Bewertung der Einhaltung bauordnungsrechtlicher Mindestanforderungen an den Brandschutz (gem. Landesbauordnungen) auf Basis eines Brandschutzgutachtens oder Nachweis alternativer Teilaspekte (Brandabschnitte, Fluchtwegplanung, Brandschutztechnik, etc.)		
Qualitätsmerkmale von Konstruktionen aus Mauerwerk (Brandverhalten, Widerstandsfähigkeit beim Eintritt von Brandereignissen, etc.) können hiermit <i>nicht</i> abgebildet werden.		
Faktische Nachhaltigkeitsqualität von MFH aus Mauerwerk		
<ul style="list-style-type: none">> In der Regel automatische (Über-)Erfüllung bauordnungsrechtlicher baustoffspezifischer Anforderungen an den Brandschutz (Brandverhalten, Feuerwiderstand) ohne weitere Maßnahmen> Kein Beitrag zur Entwicklung von Rauchgasen im Brandfall> Begrenzung des materiellen Schadensausmaßes beim Eintritt eines Brandfalls		

Abb. 27: Einschätzung zur faktischen Nachhaltigkeitsqualität hinsichtlich des Brandschutzes

Schallschutz

Das Kriterium *2.1.1 Schallschutz* gehört wie der Aspekt Brandschutz zur technischen Qualität von MFH. Die Bewertung der schallschutztechnischen Qualität erfolgt auf Basis eines Schallschutznachweises nach DIN 4109 (siehe bereits in Kapitel 7). Im Kontext der hier avisierten exemplarischen Nachhaltigkeitsbeurteilung von MFH sind dabei gemäß Abb. 28 der Schallschutz gegen Außenlärm und der horizontale Luftschallschutz (Wände) relevant. Für diese Aspekte liegen in *2.1.1* Anforderungswerte für das bewertete Schalldämmmaß R'_w von Außenbauteilen (Mindestanforderung $R'_w \geq 40$ dB für Lärmpegelbereich IV) und Trennwänden (Mindestanforderung $R'_w \geq 55$ dB) vor (Abb. 28).

In der Praxis für MFH übliche Wandstärken und -aufbauten von Mauerwerkskonstruktionen in Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton oder Leichtbeton können diese schallschutztechnischen Anforderungen in der Regel einhalten bzw. (deutlich) übererfüllen. Das letztendliche schallschutztechnische Bewertungsergebnis eines Gebäudes hängt darüber hinaus aber auch ab von anderen Faktoren, z.B. der schallschutztechnischen Qualität der Geschossdecken (Luft- und Trittschall) oder der Dach- und Fensterflächen (Luftschall gegenüber Außenlärm).

MFH aus Mauerwerk **Kriterium 2.1.1** **Schallschutz**

Bewertungsmethodik Kriterium

Abfrage zur Erfüllung, Übererfüllung oder deutlichen Übererfüllung von normativen Schallschutzanforderungen

Anforderungen an Schallschutz gegen Außenlärm

deutlich übererfüllt ✓*)	Auf Basis des aktuellen maßgeblichen Außenlärmpegels werden die Anforderungen des nächsthöheren Lärmpegelbereiches noch überschritten. <i>siehe Anlage 1</i>	Tabelle Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen:			
übererfüllt ✓*)	Auf Basis des aktuellen maßgeblichen Außenlärmpegels werden die Anforderungen des nächsthöheren Lärmpegelbereiches erfüllt. <i>siehe Anlage 1</i>	Lärmpegelbereich	Maßgeblicher Außenlärmpegel L_{MAP}	Klassifizierung	DIN 4109
erfüllt ✓*)	Auf Basis des aktuellen maßgeblichen Außenlärmpegels werden die Anforderungen des zutreffenden Lärmpegelbereiches erfüllt. <i>siehe Anlage 1</i>	I	≤ 55 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	30 dB
		II	56 - 60 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	30 dB
		III	61 - 65 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	35 dB
		IV	66 - 70 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	40 dB
		V	71 - 75 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	45 dB
		VI	76 - 80 dB(A)	erf. $R'_{w,res}$ (Außenbauteil)	50 dB

Anforderungen können von gängigen Wandkonstruktionen in Mauerwerk in Abhängigkeit vom maßgeblichen Lärmpegelbereich (deutlich) übererfüllt werden.

*) keine Betrachtung eines kombinierten Bauteils Wand – Fenster

Anforderungen an Luftschallschutz

deutlich übererfüllt ✓	Übererfüllung der Anforderungen entsprechend Niveau B der Anlage 1	Tabelle Luft- und Trittschallschutz:			
übererfüllt ✓	Einhaltung der Anforderungen entsprechend Niveau B der Anlage 1	Luft- und Trittschallschutz	Klassifizierung	Niveau A ¹⁾	Niveau B ²⁾
erfüllt ✓	Einhaltung der Anforderungen entsprechend Niveau A der Anlage 1	horizontaler Luftschallschutz (Decken) zwischen Aufenthaltsräumen und fremden Räumen	R'_w in dB	≥ 55	56
		vertikaler Luftschallschutz (Wände) zwischen Aufenthaltsräumen und fremden Räumen	R'_w in dB	≥ 55	57
		Luftschallschutz zwischen Aufenthaltsräumen und fremden Treppenhäusern bzw. Fluren	R'_w in dB	≥ 55	56

Anforderungen können von Wandkonstruktionen in Mauerwerk durch Verwendung hochdichter oder gefüllter Steine (deutlich) übererfüllt werden.

Abb. 28: Einschätzung zur Bewertung des Kriteriums 2.1.1 Schallschutz

Wärmeschutz

Bei der Analyse der Lebenszyklusphase der Nutzung von MFH wurde u.a. der thermische Komfort der Nutzer intensiv betrachtet. In diesem Zusammenhang wurden insbesondere Anforderungen an die energetische Qualität der Gebäudehülle herausgestellt. Diese Qualität wird vom Bewertungssystem *NaWoh* im Wesentlichen vom Kriterium *2.1.2 Energetische Qualität* adressiert. Allerdings fragt das Kriterium konstruktionsunspezifisch lediglich ab, welches Energieeffizienz-niveau ein Wohngebäude aufweist (siehe Abb. 29).

Mit üblichen Wandstärken für Außenwände lassen sich jedenfalls - je nach Wahl einer der marktbestimmenden Mauersteinarten ohne oder im Verbund mit ergänzenden Dämmmaterialien (WDVS-Schale oder integrierte Kerndämmung) - entsprechende energetische Qualitätsniveaus eines MFH erreichen, die die Anforderungen des Kriteriums einhalten und übererfüllen.

MFH aus Mauerwerk		Kriterium 2.1.2 Energetische Qualität																																																		
Bewertungsmethodik Kriterium																																																				
Abfrage zur Erfüllung, Übererfüllung oder deutlichen Übererfüllung von Energieeffizienz-niveaus																																																				
Bewertungsstufen																																																				
deutlich übererfüllt ✓	Das Gebäude entspricht dem Energie-Plus-Standard nach Definition des BMVBS (siehe Broschüre „Wege zum Effizienzhaus Plus“). Das Gebäude entspricht dem Niveau des KfW-Effizienzhaus 40 und benötigt maximal 40% des Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009. siehe Anlage 1	Anforderungen zur Erreichung der KfW-Effizienzhausniveaus nach dem jeweils aktuellen Merkblatt ¹ .																																																		
übererfüllt ✓	Das Gebäude entspricht dem Niveau des KfW-Effizienzhaus 55 und benötigt maximal 55% des Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009. Das Gebäude entspricht dem Niveau des KfW-Effizienzhaus 70 und benötigt maximal 70% des Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009. siehe Anlage 1	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>KfW-Effizienzhaus 70</th> <th>KfW-Effizienzhaus 55</th> <th>KfW-Effizienzhaus 40</th> <th>Effizienzhaus Plus</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ENTWEDER</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009</td> <td>max. 70 %</td> <td>max. 55 %</td> <td>max. 40 %</td> <td>$Q_p < 0$</td> </tr> <tr> <td>spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverluste H_{tr} im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009</td> <td>max. 85 %</td> <td>max. 70 %</td> <td>max. 55 %</td> <td>*)</td> </tr> <tr> <td>Einhaltung der Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes aus EnEV 2009</td> <td>Ja</td> <td>Ja</td> <td>Ja</td> <td>Ja</td> </tr> <tr> <td>ODER</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Jahres-Primärenergiebedarf Q_p pro m² Gebäudenutzfläche $A_{n,PHPP}$ nach PHPP</td> <td>-</td> <td>40 kWh/m²</td> <td>30 kWh/m²</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Jahres-Heizwärmebedarf $Q_{h,PHPP}$ pro m² Wohnfläche nach PHPP</td> <td>-</td> <td>15 kWh/m²</td> <td>15 kWh/m²</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>UND</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>verbindlicher Nachweis zur Planung und Baubegleitung durch einen Sachverständigen ist zu erbringen.</td> <td>Nein – aber: Bestätigung des Niveaus durch einen Sachverständigen</td> <td>Ja</td> <td>Ja</td> <td>Ja</td> </tr> </tbody> </table>		KfW-Effizienzhaus 70	KfW-Effizienzhaus 55	KfW-Effizienzhaus 40	Effizienzhaus Plus	ENTWEDER					Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009	max. 70 %	max. 55 %	max. 40 %	$Q_p < 0$	spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverluste H_{tr} im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009	max. 85 %	max. 70 %	max. 55 %	*)	Einhaltung der Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes aus EnEV 2009	Ja	Ja	Ja	Ja	ODER					Jahres-Primärenergiebedarf Q_p pro m ² Gebäudenutzfläche $A_{n,PHPP}$ nach PHPP	-	40 kWh/m ²	30 kWh/m ²	-	Jahres-Heizwärmebedarf $Q_{h,PHPP}$ pro m ² Wohnfläche nach PHPP	-	15 kWh/m ²	15 kWh/m ²	-	UND					verbindlicher Nachweis zur Planung und Baubegleitung durch einen Sachverständigen ist zu erbringen.	Nein – aber: Bestätigung des Niveaus durch einen Sachverständigen	Ja	Ja	Ja
	KfW-Effizienzhaus 70	KfW-Effizienzhaus 55	KfW-Effizienzhaus 40	Effizienzhaus Plus																																																
ENTWEDER																																																				
Jahres-Primärenergiebedarf Q_p im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009	max. 70 %	max. 55 %	max. 40 %	$Q_p < 0$																																																
spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverluste H_{tr} im Vergleich zum Referenzgebäude nach EnEV 2009	max. 85 %	max. 70 %	max. 55 %	*)																																																
Einhaltung der Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes aus EnEV 2009	Ja	Ja	Ja	Ja																																																
ODER																																																				
Jahres-Primärenergiebedarf Q_p pro m ² Gebäudenutzfläche $A_{n,PHPP}$ nach PHPP	-	40 kWh/m ²	30 kWh/m ²	-																																																
Jahres-Heizwärmebedarf $Q_{h,PHPP}$ pro m ² Wohnfläche nach PHPP	-	15 kWh/m ²	15 kWh/m ²	-																																																
UND																																																				
verbindlicher Nachweis zur Planung und Baubegleitung durch einen Sachverständigen ist zu erbringen.	Nein – aber: Bestätigung des Niveaus durch einen Sachverständigen	Ja	Ja	Ja																																																
erfüllt ✓	Die aktuelle Energieeinsparverordnung (EnEV 2009) wird eingehalten.																																																			

Anforderungen können von Wandkonstruktionen in Mauerwerk - je nach Wahl einer der marktbestimmenden Mauersteinarten im Verbund mit ergänzenden Dämmmaterialien (WDVS-Schale oder integrierte Kerndämmung) - (deutlich) übererfüllt werden.

Abb. 29: Einschätzung zur Bewertung des Kriteriums 2.1.2 Energetische Qualität



Rückbau- und Demontagefreundlichkeit

Abschluss der technischen Hauptkriteriengruppe des einschlägigen Bewertungssystems *NaWoh* bildet das Kriterium *2.2.7 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit der Baukonstruktion*. Hier erfolgt eine rein qualitative Abfrage zum Vorliegen eines Rückbaukonzepts sowie einzelner zentraler Inhalte (vgl. Abb. 18).

Leider werden dadurch der verhältnismäßig geringe Aufwand zur Demontage sowie die vertretbaren Möglichkeiten zur Trennung von Bauteilen und Bauteilschichten aus Mauerwerk von diesem Kriterium - jedenfalls quantitativ - nicht adressiert. Trotzdem sollen diese nachweislichen Qualitäten von Wänden aus Mauerwerk in dieser ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbilanz von MFH Eingang finden.

MFH aus Mauerwerk	Kriterium NWO12-42	Rückbau- und Demontagefreundlichkeit
--------------------------	---------------------------	---

Gewichtung Kriterium

4,1 % Anteil an der Gesamtnote

Relevante Indikatoren des Kriteriums und maximal erreichbare Checklistenpunkte

- 1. Aufwand zur Demontage des Bauteils maximal 38 von insgesamt 100 Checklistenpunkten erreichbar
- 2. Möglichkeit zur Trennung von Bauteilschichten maximal 38 von insgesamt 100 Checklistenpunkten erreichbar

Anforderungen der relevanten Indikatoren

Aufwand zur Demontage des Bauteils

Sehr hoch	Ausschließlich mit sehr hohem Aufwand zu demontieren	Übertrag aus Liste mit Einstufung der Bauteile	Max. 38	
Hoch	Mit hohem Aufwand zu demontieren z. B. Abschlagen von gut anhaftenden Beschichtungen	Dabei entsprechen die Kategorien folgender Bewertung		
Mittel	Mit mittlerem Aufwand zu demontieren z. B. Herauslösen von Fußböden, Entfernen von eingegossenen Foilenelementen	Sehr hoch	0	erreicht ✓
Gering	Mit geringem Aufwand zu demontieren z. B. Absaugung von geschütteten Materialien, Demontieren von abschraubbaren Verschaltungen	Hoch	8	erreicht ✓
Sehr gering	Sehr leicht zu demontieren z. B. Lösen geklemmter Verbindungen oder einfacher Klick- bzw. Schraubverbindungen, Entfernen loser Auflagen	Mittel	24	erreicht ✓
		Gering	32	nicht erreicht x
		Sehr gering	38	nicht erreicht x

Möglichkeit zur Trennung von Bauteilschichten

Nicht vertretbar	Beseitigung von Restanhaftungen auf Materialien wie Bodenbelägen oder Fensterrahmen, z. B. Estrich- oder Fugenmassenreste Trennverfahren, die nicht auf der Baustelle durchgeführt werden können	Übertrag aus Liste mit Einstufung der Bauteilschichten	Max. 38	
Vertretbar	Erfordert neben dem personellen Aufwand einen entsprechenden, baustellengeeigneten Maschineneinsatz: Abstemmen, Abfräsen, Abschleifen usw.	Dabei entsprechen die Kategorien folgender Bewertung		
Leicht	Kann von Personen manuell oder mit einfachen Werkzeugen vorgenommen werden: Abziehen (z. B. Boden und Wandbeläge auf Trennlage), Abreißen, Abheben usw.	Nicht vertretbar	0	erreicht ✓
		Vertretbar	24	erreicht ✓
		Leicht	38	bedingt erreicht ✓

Abb. 30: Exkurs - Einschätzung zur Bewertung der Rückbau- und Demontagefreundlichkeit von Mauerwerkskonstruktionen im *DGNB*-System Neubau Wohngebäude Version 2013 (*NWO13*)



Die finale Bewertung ist ferner von einer analogen Bewertung weiterer Bauteile abhängig.

Aus dieser Perspektive schafft die dargelegte Einschätzung zur Rückbau- und Demontagefreundlichkeit von Wandkonstruktionen aus Mauerwerk zumindest sehr gute Voraussetzungen für eine hohe Bewertung des Recyclingpotentials.

Insbesondere deshalb, weil bei einer Anwendung des - typologisch verwandten - *DGNB*-Nutzungsprofils *NWO* und dessen Kriteriums *NWO12-TEC1.6 Rückbau- und Demontagefreundlichkeit* für die relevanten Indikatoren *Aufwand zur Demontage* und *Aufwand zur Trennung* hohe bis optimale Bewertungsergebnisse erzielt werden können (siehe Abb. 30).

Unter Kapitel 8 wurde entsprechend gezeigt, dass - verglichen mit weiteren in der Baupraxis von MFH gängigen Wandkonstruktionen und Wandaufbauten einerseits und insbesondere unter Einbeziehung eigener Erfahrungswerten aus realen Zertifizierungsprojekten andererseits - der Aufwand zur Demontage von Wandkonstruktionen aus Mauerwerk als *mittel* (24 von max. 38 Punkten) klassifiziert werden kann. Weiterhin kann der Aufwand zur Trennung von Bauteilschichten zumindest als *vertretbar* (24 von max. 38 Punkten) eingestuft werden.



Fazit

In Kapitel 9 wurden alle im Rahmen dieser Studie untersuchten Nachhaltigkeitsaspekte von MFH aus Mauerwerk in den Kontext einer Nachhaltigkeitsbewertung im einschlägigen System *NaWoh* eingeordnet und für die relevanten Bewertungskriterien dieses Systems eine Einschätzung zur Bewertung des jeweiligen Kriteriums für ein exemplarisches MFH abgeleitet. Da die relevanten Kriterien aber nur einen Teil des gesamten Kriterienkatalogs des Systems repräsentieren, ist keine abschließende Gesamtbewertung möglich. Die Gesamtbewertung wird vielmehr von einer Vielzahl weiterer Gebäudecharakteristika und -parameter determiniert. Nichtsdestotrotz lassen sich aufgrund der vorstehenden Einschätzungen dieses Kapitels zu Bewertungsergebnissen einzelner Kriterien (vgl. Abb. 25 bis Abb. 30) qualitative Aussagen zum Einfluss der beschriebenen Nachhaltigkeitsqualität von Wandkonstruktionen aus Mauerwerk auf das spätere Gesamtergebnis machen.

Ausblick

Im Rahmen einer Weiterentwicklung der einschlägigen deutschen Zertifizierungssysteme könnten prinzipiell weitere spezifische Nachhaltigkeitsqualitäten von Mauerwerk adressiert werden, z.B. bezüglich einer verbreiterten Datenbasis für die ökobilanzielle Abbildung des End of Life.

Insgesamt zeigt die vorliegende Studie, dass Wandkonstruktionen aus Mauerwerk in von der Konstruktionsweise und/oder dem Baumaterial tangierten Kriterien des Systems *NaWoh* entweder unmittelbar zu hohen Bewertungsergebnissen beitragen oder zumindest mittelbar die dazu nötigen Voraussetzungen schaffen, damit letztlich die hohe Nachhaltigkeitsqualität von MFH aus Mauerwerk im Vergleich mit anderen markt gängigen Bau- und Konstruktionsweisen wie Stahlbeton oder Holz objektiv und transparent dokumentiert werden kann.

Insbesondere bei der ökobilanziellen Analyse zum Treibhauseffekt (CO₂) über einen maßgeblichen Betrachtungszeitraum/Gebäudelebenszyklus von 50 bis 80 Jahren ist festzustellen, dass zwischen den ökobilanziellen Ergebnissen von MFH aus Mauerwerk und der Vergleichsvariante in Holzbauweise faktisch keine Unterschiede bestehen.



Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau [Hrsg.]: Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Online unter www.dgfm.de/aktuelles/studien.html
- [2] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau [Hrsg.]: Nachhaltigkeit von mehrgeschossigen Wohngebäuden aus Mauerwerk. Online unter www.dgfm.de/aktuelles/studien.html
- [3] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. [Hrsg.]: Jahresbericht 2011/12, Berlin 2013
- [4] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Mauerwerksbauten. In: Mauerwerksbau aktuell 2015. Berlin: Bauwerk Verlag 2015
- [5] Meadows, D.L.: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 1972
- [6] United Nations [Hrsg.]: Report of the World Commission for Environment and Development: Our common future, Genf 1987
- [7] Rogall, H.: Ökologische Ökonomie. Eine Einführung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2008
- [8] Busco Ferber, E.: Nachhaltigkeit und Gebäudezertifizierung bei Bestandsbauten. In: Der Facility Manager, Ausgabe März 2011
- [9] Die Bundesregierung: Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. 2002
- [10] Statistisches Bundesamt: Test des OECD-Indikatorensets Green Growth in Deutschland 2012, Wiesbaden 2012
- [11] Peters, H.R.: Bauprodukte für nachhaltiges Bauen. In: Mauerwerksbau aktuell 2009. Berlin: Bauwerk Verlag 2009
- [12] Graubner, C.-A. et al.: Ausarbeitung des nationalen Nachhaltigkeitszertifizierungssystems. Erstellung von Kriteriensteckbriefen für ausgewählte Kriterien. Erarbeitung von Grundlagen für die Wichtung der Einzelkriterien. Endbericht des BBR Forschungsvorhabens. Berlin, 2008
- [13] Homepage der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen e.V.: www.dgnb.de
- [14] Graubner, C.-A. et al.: Beyond Platin - Nachhaltigkeitstrends in der Bau- und Immobilienwirtschaft. In: Mauerwerk 16 (2012), Heft 5. Berlin: Ernst & Sohn 2012
- [15] Lützkendorf, T.: BNW - Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau. Ausgewählte Ergebnisse der Arbeitsgruppe Wohnen. Vortrag zum Symposium „Nachhaltig Bauen - Zukunft gestalten“. Berlin: 2013



- [16] Systembeschreibung und Kriterienkatalog des Systems NaWoh unter www.nawoh.de
- [17] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte - Ein Kommunikationskanal für ökologische Nachhaltigkeitsqualität. In: BetonWerk international, No. 3, 2012, S. 116-120
- [18] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration Perlitgefüllte Ziegel (EPD-POR-2011-211-D), Königswinter 2011
- [19] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration Kalksandstein (EPD-BKS-2009-111-D), Königswinter 2009
- [20] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration H+H Porenbeton (EPD-HHC-2010-112-D), Königswinter 2010
- [21] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration Leichtbetonmauersteine aus natürlichem Zuschlag und Zumischungen von industriell hergestelltem Zuschlag (EPD-BVL-2008-111-D), Königswinter 2008
- [22] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration Informationszentrum Beton - Beton C25/30 (EPD-IZB-2013421-D), Königswinter 2010
- [23] Institut Bauen und Umwelt e.V.: Umweltproduktdeklaration Informationszentrum Beton - Beton C30/37 (EPD-IZB-2013431-D), Königswinter 2010
- [24] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Sustainability performance of lightweight aggregate concrete masonry. In: Tagungsband zur Nachhaltigkeitskonferenz SB 13 München. München: 2013
- [25] Weickenmeier, N.: Grundlagen der Gestaltung; Stein auf Stein. In: Mauerwerksbau aktuell 2008. Berlin: Bauwerk Verlag 2008
- [26] Graubner, C.-A., Schneider, C.: Nachhaltigkeit von Mauerwerksbauten. In: Mauerwerksbau aktuell 2010. Berlin: Bauwerk Verlag 2010
- [27] BMVBS [Hrsg.]: Deutsche Baustoffdatenbank Ökobau.dat 2013 (www.nachhaltigesbauen.de)
- [28] ARGE//eV: Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden - Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht, Bauforschungsbericht Nr. 68, Kiel 2015
- [29] Kriterienkataloge des DGNB-Systems (www.dgnb.de)
- [30] Kriterienkataloge des BNB-Systems (www.nachhaltigesbauen.de)
- [31] DIN e.V.: DIN 4108-2 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- [32] Graubner, C.-A., Schneider, C.: Nachhaltigkeit von Mauerwerksbauten. In: Mauerwerksbau aktuell 2010. Berlin: Bauwerk Verlag 2010
- [33] DIN e.V.: DIN 4109 - Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin



- [34] DIN e.V.: DIN 4109 Beiblatt 2- Schallschutz im Hochbau - Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- und Arbeitsbereich, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin
- [35] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.: DEGA-Empfehlung 103 - Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis, Berlin 2009
- [36] Statistisches Bundesamt: Umwelt - Abfallbilanz 2013, Wiesbaden 2015
- [37] Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden [Hrsg.]: Mineralische Bauabfälle, Monitoring 2012, Berlin 2015
- [38] Müller, A. et al.: Aufbaurückstände - Eine neue thermisch gebundene leichte Gesteinskörnung mit hoher Ressourceneffizienz. In: BFT International 02/2013. Gütersloh: Bauverlag 2013
- [39] Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.: Verwertungsoptionen für rezyklierte Gesteinskörnungen aus Mauerwerk in der Steine- und Erden-Industrie, AiF-Forschungsbericht Nr. 115, Hannover 2013
- [40] Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.: Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk, AiF-Forschungsbericht Nr. 116, Hannover 2014
- [41] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) [Hrsg.]: Zukunft bauen - Das Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau 2013, Berlin 2012
- [42] Graubner, C.-A., Clanget-Hulin, M.: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen. Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Abschlussbericht eines Projekts der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2837, Fraunhofer IRB Verlag

Anhang

Anhang A - Kriterienkatalog System *NaWoh*

Anhang B - Anforderungsmatrix Kriterium *3.2.4 Vermeidung von Schadstoffen*

Anhang C - Ökobilanz-Ergebnisse von Varianten einer massiven Außenwand

Anhang D - Beschreibung und Planungsunterlagen des Vergleichsgebäudes



Anhang A – Kriterienkatalog System *NaWoh*

1. WOHNQUALITÄT

Nummer	Steckbrief mit Teilindikatoren	Seite
3-stufig		
1.1.1	Funktionale Qualität der Wohnungen	1
1.1.1-1	Funktionalität der Wohnbereiche	
1.1.1-2	Funktionalität Koch- & Essbereiche	
1.1.1-3	Funktionalität Sanitärbereiche	
1.1.1-4	Vorhandensein von Stau- und Trockenraum	
1.1.2	Freisitze / Außenraum	13
	Vorhandensein von Balkon, Terrasse, Mietergärten	
1.1.3	Barrierefreiheit - Zugang und Wohnungen	15
1.1.3-1	Barrierefreiheit des Zugangs zum Gebäude	
1.1.3-2	Barrierefreiheit des Zugangs zu Wohnungen	
1.1.3-3	Grad der Barrierefreiheit von Wohnungen	
1.1.4	Stellplätze	26
1.1.4-1	Stellplätze für Fahrräder	
1.1.4-2	Stellplätze für Kinderwagen / Rollatoren	
1.1.4-3	Stellplätze für PKW / Mobilitätskonzept	
1.1.5	Freiflächen	35
1.1.5-1	Freiflächen für die Allgemeinheit	
1.1.5-2	Freiflächen für Kinder	
1.1.5-3	Freiflächen für Jugendliche	
1.1.6	Thermischer Komfort	44
	Thermische Behaglichkeit im Sommer	

beschreibend		
1.2.1	Visueller Komfort / Tageslichtversorgung	51
1.2.2	Raumluftqualität	55
1.2.3	Sicherheit	57
1.2.4	Flächenverhältnisse	61
1.2.5	Einrichtungen zum Müllsammeln und -trennen	63
1.2.6	Gestalterische und städtebauliche Qualität	65

2. TECHNISCHE QUALITÄT

Nummer	Steckbrief mit Teilindikatoren	Seite
3-stufig		
2.1.1	Schallschutz	1
2.1.1-1	Schallschutz gegen Außenlärm	
2.1.1-2	Luft- und Trittschallschutz	
2.1.1-3	Schallschutz gegen Körperschall / Installationen	
2.1.2	Energetische Qualität	11
	Effizienzniveau	
2.1.3	Effizienz der Haustechnik	15
	Effizienz der Haustechnik	
2.1.4	Lüftung	21
	Lüftung	

beschreibend		
2.2.1	Brandschutz	27
2.2.2	Feuchteschutz	31
2.2.3	Luftdichtheit der Gebäudehülle	37
2.2.4	Reaktion auf standortbezogene Gegebenheiten	40
2.2.4-1	Reaktion auf erhöhtes Radon-Vorkommen	
2.2.4-2	Reaktion auf erhöhtes Hochwasser-Risiko	
2.2.4-3	Reaktion auf erhöhtes Sturm-Risiko	
2.2.5	Dauerhaftigkeit	52
2.2.6	Wartungsfreundlichkeit / Nachrüstbarkeit TGA	54
2.2.7	Rückbau-/ Recyclingfreundlichkeit der Baukons.	56



3. ÖKOLOGISCHE QUALITÄT

Nummer	Steckbrief mit Teilindikatoren	Seite
3-stufig		
3.1.1	Ökobilanz – Teil 1 Treibhauspotenzial	1
3.1.2	Primärenergiebedarf	18
3.1.2-1	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar	
3.1.2-2	Primärenergiebedarf erneuerbar	
3.1.3	Flächeninanspruchnahme und Flächenversiegelung	23
3.1.3-1	Flächeninanspruchnahme	
3.1.3-2	Flächenversiegelung	

beschreibend		
3.2.1	Ökobilanz – Teil 2	31
3.2.2	Energiegewinnung für Mieter und Dritte	35
3.2.3	Trinkwasserbedarf	37
3.2.4	Vermeidung von Schadstoffen	40
3.2.5	Einsatz von zertifiziertem Holz	43

4. ÖKONOMISCHE QUALITÄT

Nummer	Steckbrief mit Teilindikatoren	Seite
3-stufig		
4.1.1	Lebenszykluskosten Ausgewählte Kosten im Lebenszyklus	1
4.1.2	Werthaltigkeit der Investition Investitionskosten / Marktwert	25

beschreibend		
4.2.1	Langfristige Wertstabilität	30

5. PROZESSQUALITÄT

Nummer	Steckbrief mit Teilindikatoren	Seite
3-stufig		
5.1.1	Qualität der Bauausführung / Messungen Qualität der Bauausführung / Messungen	1

beschreibend		
5.2.1	Qualität der Projektvorbereitung	3
5.2.1-1	Integraler Prozess	
5.2.1-2	Bedarfsplanung	
5.2.2	Dokumentation	10
5.2.2-1	Objektdokumentation	
5.2.2-2	Produktdokumentation	
5.2.3	Übergabe / Einweisung	15
5.2.3-1	Einweisung Personal	
5.2.3-2	Bereitstellung von Informationen für Nutzer	
5.2.4	Inbetriebnahme / Einregulierung	20
5.2.5	Voraussetzung für Bewirtschaftung	22
5.2.6	Reinigungs- / Wartungs- / Instandhaltungsplan	25

A1 - Standortsituation
A2 - Hinweise und Prognosen
B1 - Umweltmerkmale
B2 - Trends und Prognosen
C1 - Objektidentifikation
C2 - Ausgewählte Kennwerte und Merkmale
D1 - Konzept / Strategie zu wohnungswirtschaftlichen Zielen
D2 - Sonstige Spezifika



Anhang B – Anforderungsmatrix Kriterium

3.2.4 Vermeidung von Schadstoffen, System NaWoh [16]

zu beschreibende Merkmale	<p>Typ III Umweltproduktdeklarationen (EPD) die erforderliche Nachweise enthalten oder ein entsprechendes RAL UZ gelten automatisch als Erfüllungsnachweise. Ansonsten sind äquivalente Herstellernachweise oder Erklärungen vorzulegen. Zu betrachten sind mindestens 80% der Oberflächen.</p> <p>Zur Minimierung von Schadstoffen wurden folgende Qualitätskriterien für die eingesetzten Materialien und Produkte eingehalten:</p> <p>Kunstschäumdämmstoffe</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Verwendung von Kunstschäumdämmstoffen ohne halogenierte Treibmittel. Hierbei sind alle Dämmstoffe, die schon über die EnEV - Berechnungen erfasst sind, Wärmedämmung und die Hauptdämmmaterialien für die Haustechnik zu bewerten. <p>Belegung von Oberflächen von Wänden, Fußböden, Decken oder Dächern</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Verwendung von Produkten zur Belegung von Oberflächen in großflächiger Anwendung der Oberflächen, die einen VOC-Gehalt von 25 % nicht überschreiten, <input type="checkbox"/> VOC-Gehalt von max. 15%.<input type="checkbox"/> Verwendung von Beschichtungen, Imprägnierungen, Klebern oder Schutzmitteln, die PU, Epoxidharz oder Bitumen enthalten, zur Belegung von Oberflächen, in großflächiger Anwendung (> 20 %), die keiner der folgenden GISCODEs und Produkt-Codes zuzurechnen sind:<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> DD 1/2 (Polyurethansiegel für Fußbodenbeläge, stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> PU 30/50/60 (Polyurethansysteme, lösemittelhaltig, gesundheitsschädlich)<input type="checkbox"/> RE 2,5/4/5/6/7/8/9 4 – 9 (Epoxidharzsysteme, lösemittelhaltig bzw. sensibilisierend bis giftig und Krebs erzeugend)<input type="checkbox"/> BBP 30-70 (Bitumenmassen, lösemittelhaltig, gesundheitsschädlich)<input type="checkbox"/> D 6/7; RU 4; S 1 – S 6 (Verlegewerkstoffe, lösemittelhaltig bzw. stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> Ö 60/70 Öle/ Wachse (stark lösemittelhaltig)<input type="checkbox"/> Verwendung von Pigmenten und Sikkativen in Lacken ohne Blei, Cadmium, Chrom VI und deren Verbindungen (eingefärbt bzw. sikkativiert)<input type="checkbox"/> Epoxidharzprodukte der Gruppen GISCODE RE 0 (Epoxidharzdispersionen).<input type="checkbox"/> Reaktive 1 oder 2-K Polyurethan-Systeme der Gruppen GISCODE PU 10.<input type="checkbox"/> Bitumenemulsionen der Gruppen GISCODE BBP 10.<input type="checkbox"/> Epoxidharzprodukte der Gruppen GISCODE RE 1 (lösemittelfrei).<input type="checkbox"/> Beschichtungen / Belegung der nicht mineralischen Oberflächen, deren VOC-Gehalt 3 % <input type="checkbox"/> 10 % <input type="checkbox"/> des eingebauten Produkts nach 2004/42/EG (Richtlinie über die Begrenzung der VOC-Emissionen) nicht überschreitet, z.B. in Deutschland:<ul style="list-style-type: none">- GISCODE M DF 01 (lösemittelfreie Dispersionsfarben)- M GF 01 (wasserverdünnbare, farblose Grundanstrichstoffe)- Ö 10 (lösemittelfreie Öle/ Wachse)- PU 10 (lösemittelfreie PU-Systeme)<input type="checkbox"/> Produkte zur Belegung / Beschichtung der mineralischen Oberflächen, mit ei-
--------------------------------------	--



	<p>nem VOC-Gehalt von max. 3 %</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Emissions- und lösemittelfrei ausgewiesene Beschichtungen zur Belegung der mineralischen Oberflächen von Wänden, Fußböden, Decken oder Dächern<input type="checkbox"/> Chromoxidfreie Oberflächenveredelungen und Beschichtungen bei Aluminium- und Edelstahlbauteilen. Zu betrachten sind Aluminium- und Edelstahlbauteile der Gebäudehülle <p>Korrosionsschutz-, Dichtungs-, Kleber- oder Versiegelungshilfsmittel</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Korrosionsschutz-, Dichtungs-, Kleber- oder Versiegelungshilfsmittel, die zur Bearbeitung der Oberflächen von Wänden, Fußböden, Decken oder Dächern sowie Stahlkonstruktionen im wettergeschützten Bereich verwendet werden, dürfen einem VOC-Gehalt von <input type="checkbox"/> 10 % <input type="checkbox"/> 3% nicht überschreiten.<input type="checkbox"/> Verwendung von Bodenbelagsklebstoffen der Gruppen EmiCode EC 1 (sehr emissionsarm) oder RAL UZ 113 (emissionsarm). Zu betrachten sind mindestens 80 % Bodenbelagsflächen<input type="checkbox"/> Korrosionsschutzbeschichtungen der Gruppen GISCODE BS 10 (wasserverdünnt, Lösemittelgehalt < 5 %). <p>Regenabwässerung</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Die Verwendung von bauartgeprüften Vorreinigungsanlagen für die unterirdische Regenabwässerung (Sickerschächte, Sickerrohre, Rigolen), wenn Metalldachflächen aus Kupfer oder Zink mehr als 50 qm betragen. Alternativ wird der Nachweis des witterungsbedingten Abtrages geneigter und senkrechter Bauteile entsprechend Leitfaden für das Bauwesen (Umweltbundesamt 17/05) gefordert. <p>Kältemittel</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> keine halogenierten oder teilhalogenierten Kältemittel <p>Kunststoffe</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> keine Kunststoffe mit Blei- Cadmium- und Zinnstabilisatoren Dabei werden Fenster, Fußbodenbeläge und Wandbekleidungen betrachtet. <p>Holzschutz</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> keine Verwendung von mit Holzschutzmitteln behandelter Holzprodukte, entsprechend dem GISCCODE HSM-W 60-90 (Chrom- Kupferverbindungen) Zu betrachten sind mindestens 80 % der Bauelemente, Tragwerke, Fußböden und Wandverkleidungen<input type="checkbox"/> In den Gefährdungsklassen (zukünftig: Gebrauchsklassen) 1 und 2 nach DIN 68800, erfolgt der vorbeugende Holzschutz ausschließlich konstruktiv oder durch artentypischen Resistenzen
--	---



Anhang C – Ökobilanz-Ergebnisse von Varianten einer massiven Außenwand

Systemgrenzen und Berechnungsparameter

Räumliche Systemgrenze

Zeitliche Systemgrenze

Funktionelle Systemgrenze

Funktionelle Einheit

Wirkungsindikatoren

Bilanzierung einer **Außenwand**

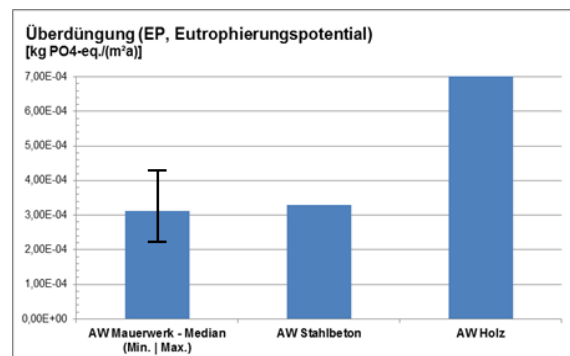
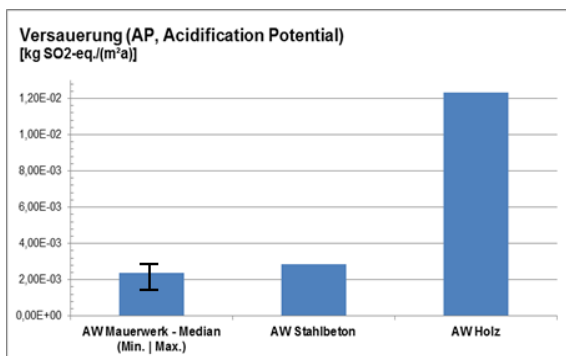
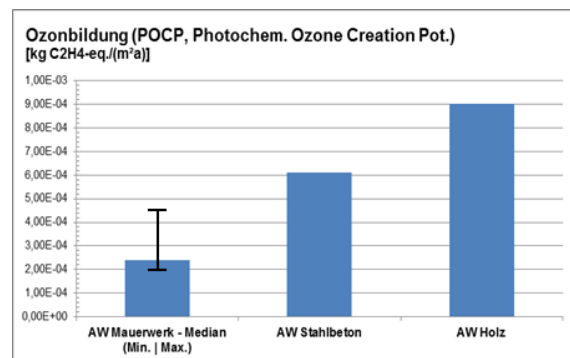
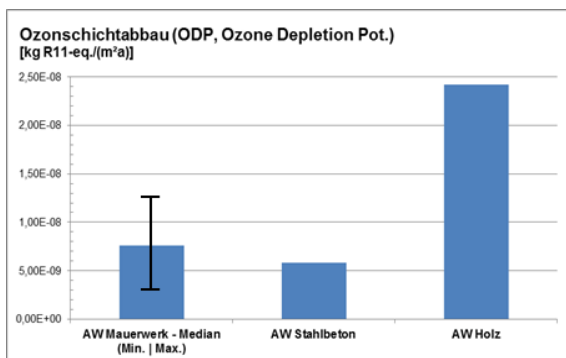
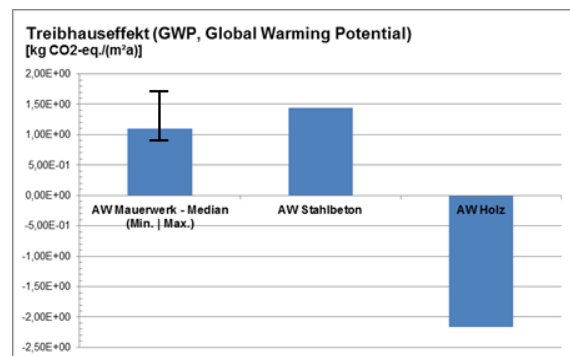
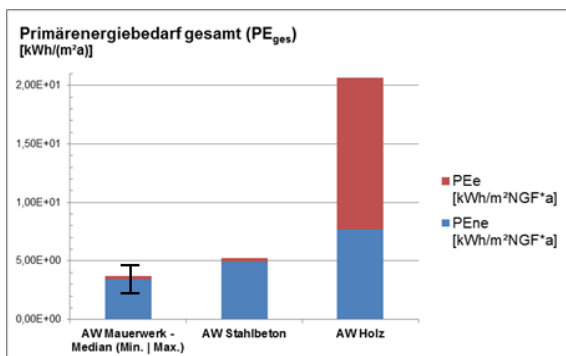
Betrachtungszeitraum gemäß *NaWoh*: **50 Jahre**

Bilanzierung der **Herstellung**

1 m² Außenwand vergleichbarer Eigenschaft (Tragfähigkeit, Energetische Qualität, etc.)

_ Ökobilanzielle Indikatoren gemäß System *NaWoh* (siehe nachfolgende Säulendiagramme)

_ Ergebnisse pro 1 m² Nettogrundfläche und Jahr





Anhang D – Beschreibung und Planungsunterlagen des Vergleichsgebäudes

Gebäudepass

Gebäudetypologie	Mehrfamilienhaus (MFH) mit 12 Wohneinheiten (WE)
Energiestandard	EnEV 2014 (inkl. Verschärfung 1. Januar 2016)
Wohnfläche	Ca. 880 m ²
Geschosse	6 (KG bis 4. OG)
Baukonstruktion	<p>Außenwände (EG bis 4. OG)</p> <ul style="list-style-type: none">_ Variante 1: Hochlochziegel mit Mineralwoll-Füllung, d = 36,5 cm mit Putzoberfläche außen und innen_ Variante 2: Kalksandstein Planstein d = 15 cm mit WDVS (18 cm) und Putzoberfläche außen und innen_ Variante 3: Porenbetonstein d = 42,5 cm mit Putzoberfläche außen und innen_ Variante 4: Leichtbeton-Hohlblock mit Mineralwoll-Füllung, d = 36,5 cm mit Putzoberfläche außen und innen_ Variante 5: Stahlbeton d = 20 cm mit WDVS (18 cm) und Putzoberfläche außen und innen_ Variante 6: Holzständer d = 20 cm mit Mineralwolldämmstoff außen und zwischen Stielen, Putzoberfläche außen und innen <p>Außenwände (KG)</p> <ul style="list-style-type: none">_ alle Varianten: Stahlbeton, d = 20 cm, Perimeterabdichtung <p>Innenwände (EG bis DG)</p> <ul style="list-style-type: none">_ Variante 1: Hochlochziegel d = 24 cm (tragend) bzw. d = 11,5 cm (trennend) mit Putzoberflächen_ Variante 2: Kalksandstein Planstein d = 20 cm (tragend) bzw. d = 11,5 cm (trennend) mit Putzoberflächen_ Variante 3: Porenbetonstein d = bis 24 cm (tragend) bzw. d = 11,5 cm (trennend) mit Putzoberflächen_ Variante 4: Leichtbeton-Hohlblock d = 24 cm (tragend) bzw. - Vollblock d = 11,5 cm (trennend) mit Putzoberflächen_ Variante 5: Stahlbeton d = 20 cm (tragend) bzw. d = 11,5 cm (trennend in KS) mit Putzoberflächen_ Variante 6: Holzständer d = 15,5 cm mit Mineralwolldämmstoff, Putzoberfläche außen und innen



Innenwände (KG)

- _ alle Varianten: Kalksandstein Planstein d = 20 cm (tragend) bzw. d = 11,5 cm (trennend) mit Putzoberflächen

Decken

- _ für alle Varianten: Stahlbetondecke, d = 20 cm

Dach

- _ Sparrenflachdach mit Zwischensparrendämmung, bekiest

Fenster

- _ Holz-Alu-Fenster ($U = 1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Ansichten



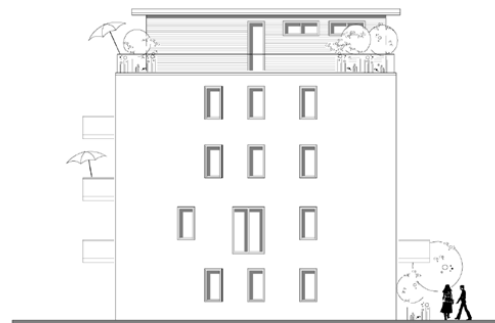
Ansicht Eingang



Ansicht Garten

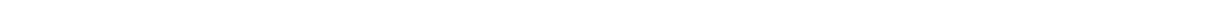


Ansicht Seite



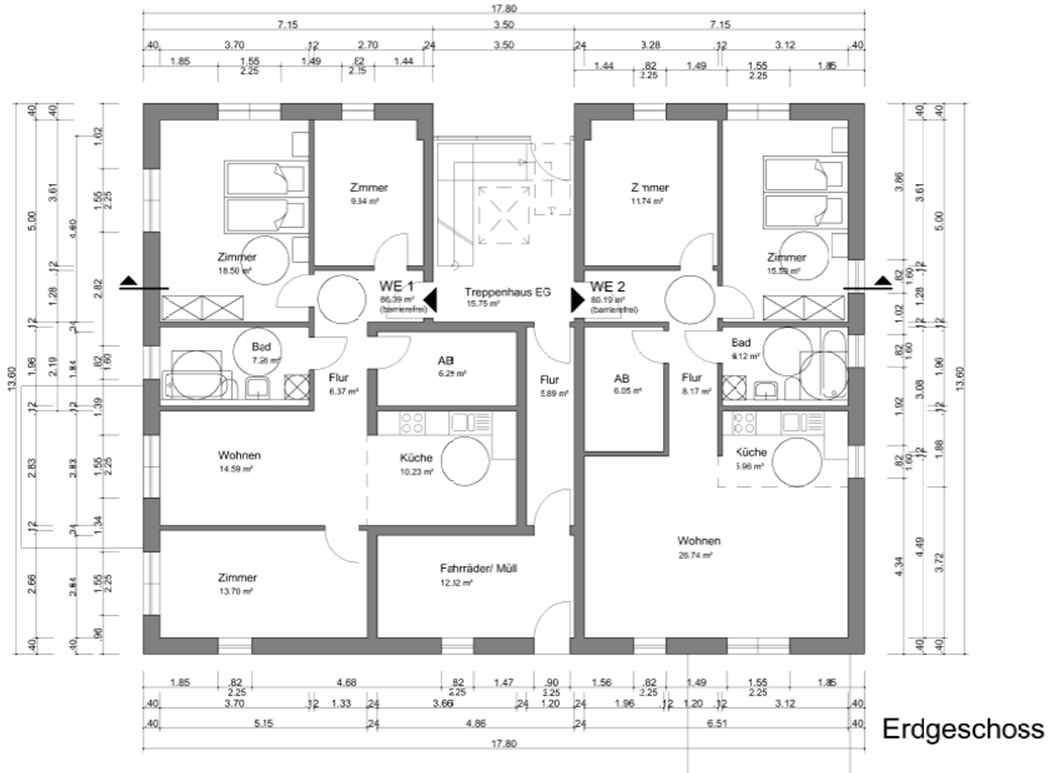
Ansicht Seite

Schnitt





Grundriss EG



Erdgeschoss

Grundriss 1. OG



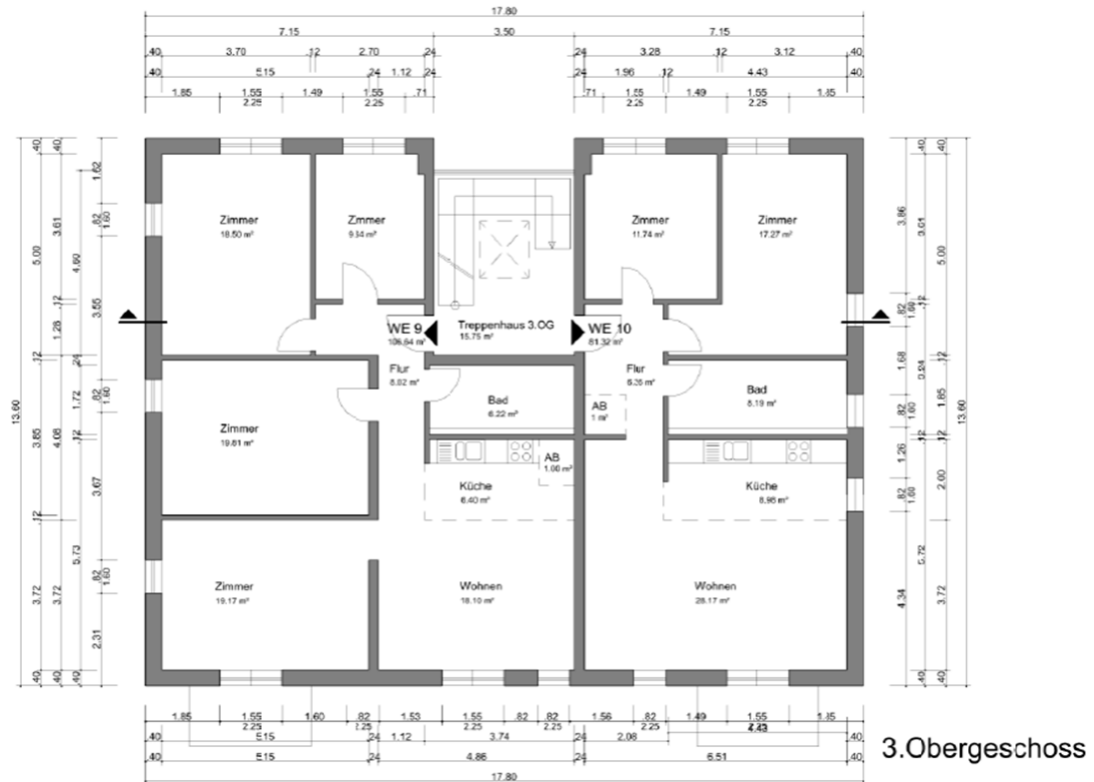
1.Obergeschoss



Grundriss 2. OG

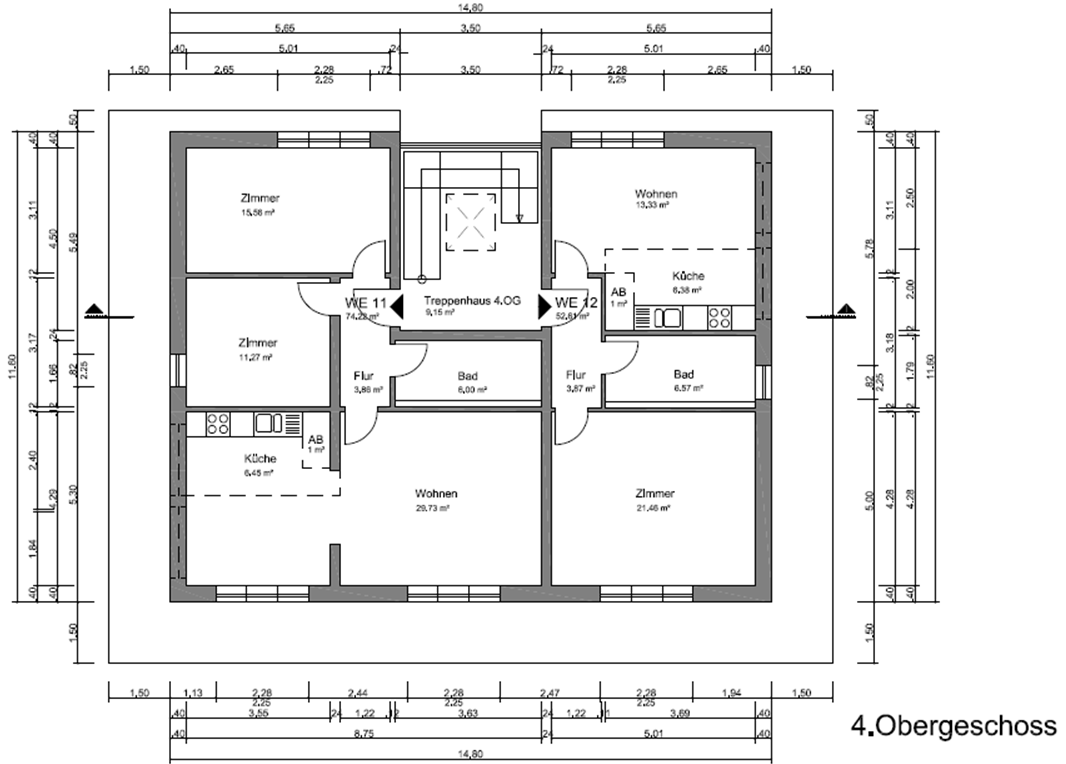


Grundriss 3. OG





Grundriss DG





LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH



LCEE LIFE CYCLE ENGINEERING EXPERTS GMBH