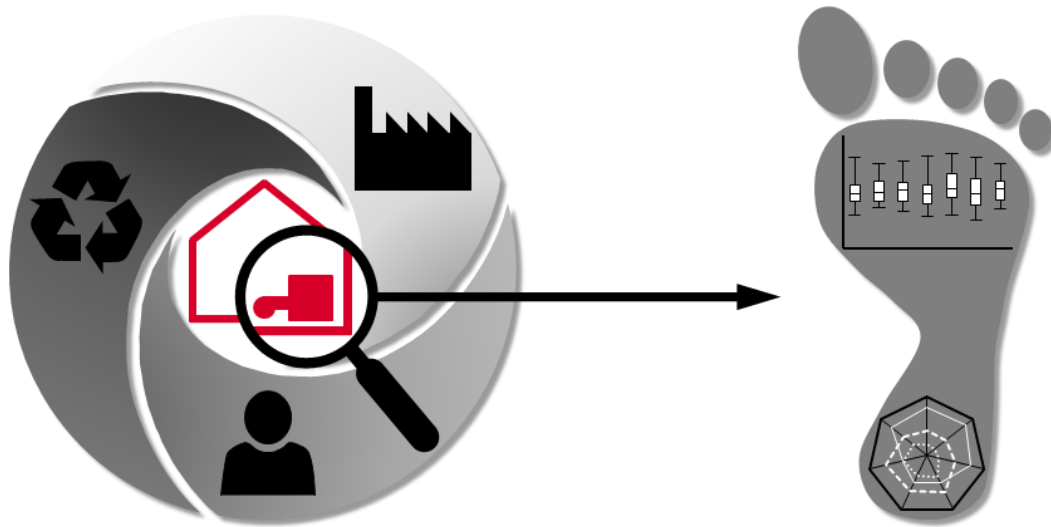


Technische Universität München
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang



Dissertation

Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik

Markus Weißenberger

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Fakultät für Architektur

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften
von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer
Berücksichtigung der Gebäudetechnik

Markus Norbert Weißenberger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch
Hochschule München

Die Dissertation wurde am 11.10.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Architektur am 23.11.2016 angenommen.



Diese Dissertation wird unter einer Creative Commons-Lizenz veröffentlicht:

„Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen: CC BY-SA 4.0“

www.creativecommons.org (Licenses: CC BY-SA 4.0)

Zitationsvorschlag:

Weißberger Markus, *Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik*, Diss., Technische Universität München / Hochschule München, München: 2016, DOI: [10.14459/2016md1325463](https://doi.org/10.14459/2016md1325463)

Vorwort und Danksagung

Das Ziel jeder Generation sollte der verantwortungsvolle Umgang mit dem Planet Erde sein; gewissermaßen die maximal mögliche Ressourcenschonung und somit der minimale Eingriff in die Natur – besser noch: einen positiven ökologischen Fußabdruck zu hinterlassen. Durch dieses gestiegene Bewusstsein gewinnt – nicht nur in der Baubranche – der Nachhaltigkeitsgedanke immer mehr an Bedeutung, d.h. neben den klassischen Planungsparametern nehmen die ganzheitlichen und ökologischen Betrachtungen von Gebäuden immer mehr an Bedeutung zu. Deshalb ist die persönliche Motivation, mit dieser Arbeit einen Beitrag zu leisten: für ressourcenschonende, nachhaltige und vor allem ökologische Gebäude.

Diese Doktorarbeit zur Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden mit Fokussierung der Gebäudehülle und speziell der Gebäudetechnik entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am kooperativen Graduiertenkolleg (KGk.). Das KGk. – eine Kooperation der Hochschule München und der Technischen Universität München – wurde finanziell gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst; hiermit danke ich allen Verantwortlichen, die dies ermöglicht haben.

Keine Dissertation entsteht im Alleingang. Ich bin vielen Menschen, die mich begleitet haben, zu Dank verpflichtet. Mein Dank gilt besonders all denjenigen, die mich bei der Anfertigung dieser Dissertation tatkräftig unterstützt haben – egal ob fachlich, sprachlich oder moralisch.

Zuerst möchte ich mich namentlich gleichermaßen bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Lang und Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch sehr herzlich für die Betreuung meiner Arbeit und für die eingeräumten Freiheiten sowie die stets angenehme Zusammenarbeit besonders bedanken.

Ein spezieller Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Holger König für die tiefgründigen fachlichen Diskussionen und die Hilfe mit der Software LEGEP. Des Weiteren der Firma Taglieber (Oettingen), hier besonders an Christine Taglieber M.Sc., und der Firma Bau-Fritz (Erkheim) die mir beide Pläne und sehr detailliertes Datenmaterial zur Verfügung gestellt haben.

Ebenso möchte ich mich bei allen am KGk. „Gebäudetechnik & Energieeffizienz“ und am Lehrstuhl „Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen“ bedanken, die durch ihre Unterstützung und durch hilfreiche Gespräche zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Schließlich habe ich viel Unterstützung und vor allem Ermutigung von meinen Kindern und der Familie sowie Freunden erfahren, denen ich ebenfalls ein fränkisches „Dangä“ sage. Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Kathi, ohne deine Hilfe hätte ich nicht den langen Weg vom Heizungsbauer bis hierher geschafft – DANKE!

Anmerkung:

Die vorliegende Doktorarbeit wurde aus ökologischen und ökonomischen Gründen für den **doppelseitigen Ausdruck** konzipiert; deshalb befinden sich Leerseiten in diesem Dokument.

Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation werden die ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäude und vor allem deren Gebäudetechnik über den kompletten Lebenszyklus analysiert sowie hieraus eine Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten Berechnung der umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik entwickelt. Gebäude haben eine große Ressourcenbeanspruchung und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Natur sind zu hoch; folglich haben diese ein Verbesserungspotenzial. Trotz steigender Bedeutung wird gewöhnlich die Herstellungs- und Entsorgungsphase bei Gebäuden vernachlässigt. Sofern eine lebenszyklusbasierte Beurteilung der umweltbezogenen Auswirkungen stattfindet, wird die Gebäudetechnik meist unzureichend betrachtet.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel, die umweltbezogene Qualität von Wohngebäuden, und hier vor allem der Gebäudetechnik, detailliert zu analysieren sowie einfacher bewertbar zu machen. Aufbauend auf den Grundlagen sowie einer Metaanalyse und der Berechnungsbasis des *life cycle assessments* (LCA = Ökobilanz) quantifiziert das LCA die Ressourcenbeanspruchung und die potenziellen Umweltauswirkungen des repräsentativen Ein- und Mehrfamilienhauses mit deren Baukonstruktions- und Gebäudetechnikvarianten. Auf diesen Ergebnissen beruhend wird erstmalig eine Vorgehensweise zur vereinfachten Ermittlung der umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik vorgestellt.

Die fünf Hauptergebnisse sind: (1) Die derzeit komplexe und daher meist vernachlässigte Betrachtung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnikkomponenten kann wesentlichen Einfluss auf die umweltbezogenen Auswirkungen des Bauwerks haben; im Extremfall beim Einfamilienhaus bis zur Hälfte des Bauwerks. (2) Wenngleich Aktivtechnik eine höhere Ressourcenbeanspruchung und mehr potenzielle Umweltauswirkungen bei Herstellung und Instandhaltung sowie Entsorgung verursacht, kann diese im Lebenszyklus ökologisch sinnvoll sein; in allen betrachteten Fällen ist dies bei der Lüftungs- und vor allem der Photovoltaikanlage gegeben. (3) Der Haushaltsstrom sowie das Bauwerk (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) üben einen bedeutsamen Einfluss – je nach Variante zwischen 40 % und 90 % – auf das LCA des Gebäudes aus und beinhalten folglich Optimierungspotenzial. (4) Der Lebenszyklus des Gebäudes sollte künftig als Bilanzierungsgrundlage dienen. (5) Durch das entwickelte Verfahren ist es mittels der LCA-Schätzung und der vereinfachten LCA-Berechnung möglich, mit wesentlich geringerem Aufwand als beim detaillierten Berechnungsverfahren, jedoch bei angemessener Genauigkeit, die ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik zu bestimmen.

Die Ergebnisse zeigen die Wichtigkeit der umweltbezogenen Lebenszyklusbetrachtung von (Niedrigstenergiewohn-)Gebäuden auf; insbesondere die Berücksichtigung der Gebäudetechnik. Gebäude mit geringer Ressourcenbeanspruchung und niedrigen potenziellen Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu schaffen müssen das übergeordnete Ziel werden.

Abstract

In the present dissertation the environmental performance of nearly zero-energy residential buildings is analyzed over the whole life cycle with focus on their building services engineering; based on this an approach is developed to simplify the detailed evaluation of the ecological quality of the building services engineering. Buildings have a high demand of resources, which impacts the environment. Therefore there is a high need for improvement. Despite their growing importance, the construction and disposal phase of a building is usually neglected. Even when a life cycle based analysis of the environmental performance is conducted, the building services engineering is rarely considered sufficiently.

Against this background, the goal is to analyze the ecological quality of residential buildings and particularly their building services engineering in detail. This will serve as a base for a simplified evaluation of the role of building services engineering. The dissertation first details the basics, the meta-analysis and the calculation fundamentals of life cycle assessment (LCA), which quantifies the demand on resources and the potential environmental impacts. Then an LCA of a representative single- and a multi-family house in different variants of the building construction and the building services engineering is conducted. Based on these results, a simplified approach for assessing the potential environmental impacts of the building services engineering is introduced for the first time.

The five main results are: (1) While complicated and therefore often disregarded, the current approach for assessing the ecological quality of building services engineering components can have a substantial impact on the environmental performance of the building structure; in an extreme case, up to a half of the building structure. (2) Despite the fact, that active technology consume more resources and emit more emissions for construction, maintenance and disposal, their employment is meaningful, once it is assessed by taking the life cycle into account. This is true for all considered ventilation systems and in particular for all photovoltaic systems. (3) The energy demand of household appliances and the embodied energy and emissions of the building can contribute between 40 % and 90 % to the life cycle of a building and therefore should be optimized. (4) In the future the life cycle of a building should be an assessor's guiding principle. (5) The LCA estimation and simplified LCA approach developed here makes it possible to assess the ecological quality of the building service engineering with fundamentally less effort than required by a detailed LCA, but with enough accuracy.

The results show the importance of considering the environmental life cycle, particularly in relation to building services engineering when analyzing (nearly zero-energy residential) buildings. Making buildings with less demand on resources and low potential environmental impacts over its whole life cycle should be the ultimate goal.

Anmerkung:

In dieser Arbeit werden Niedrigstenergiewohngebäude und insbesondere die ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik über den Lebenszyklus analysiert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit des Textes steht das Adjektiv „ökologisch“ für die Beschreibung der umweltbezogenen Qualität eines Gebäudes und dessen Baukomponenten über den gesamten Lebenszyklus.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Motivation und Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung und Aufbau	5
1.4 Kurzzusammenfassung	6
2 Überblick über die ökologische Analyse mit Fokus auf die Baubranche	7
2.1 Geschichtliche Entwicklung	7
2.2 Life cycle assessment-Grundlagen	9
2.2.1 Methode	9
2.2.2 Energetische und umweltbezogene Bewertungsparameter	10
2.2.3 Schwachstellen und Grenzen	20
2.3 Life cycle assessment-Anwendung	22
2.3.1 Allgemeine Anwendung	22
2.3.2 Anwendung in der Baubranche	23
2.4 Abgrenzung zu anderen Publikationen	26
2.5 Kurzzusammenfassung	28
3 Metaanalyse von Niedrigstenergiewohngebäuden	29
3.1 Grundlagen zur Metaanalyse	29
3.1.1 Einführung	29
3.1.2 Korrelationskoeffizient nach Pearson	29
3.1.3 Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE})	30
3.2 Analyse der Fallstudien	32
3.2.1 Rahmenbedingungen	32
3.2.2 Gebäudetechnik	34
3.2.3 Eingebundene Energie	35
3.2.4 Treibhauspotenzial	37
3.3 Kurzzusammenfassung	38

4 Berechnungsgrundlagen für die ökologische Analyse	39
4.1 Rahmenbedingungen	39
4.1.1 Life cycle assessment	39
4.1.2 Untersuchungsrahmen	40
4.1.3 Berechnungsmethode	46
4.1.4 Datengrundlage	50
4.1.5 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen	54
4.2 Untersuchungsobjekte	55
4.2.1 Einfamilienhaus	55
4.2.2 Mehrfamilienhaus	57
4.3 Standardgebäude	59
4.3.1 Baukonstruktion	59
4.3.2 Gebäudetechnik	60
4.3.3 Übersicht über die Eigenschaften	62
4.4 Varianten	64
4.4.1 Energetischer Gebäudestandard	64
4.4.2 Baukonstruktion	64
4.4.3 Gebäudetechnik	68
4.5 Kurzzusammenfassung	71
5 Ökologische Analyse von Niedrigstenergiewohngebäuden	73
5.1 Grundlagen zur ökologischen Analyse	73
5.1.1 Erklärung Box-Plot-Darstellung	73
5.1.2 Aufbau und Überblick über die ökologische Analyse	74
5.2 Baukonstruktion	74
5.2.1 Baukomponenten	74
5.2.2 Baukomponentenanteile an der Baukonstruktion	85
5.3 Gebäudetechnik	88
5.3.1 Übersicht über die komplette Gebäudetechnik	88
5.3.2 Sanitärtechnik	92
5.3.3 Heizungstechnik	95
5.3.4 Lüftungstechnik	101
5.3.5 Elektrotechnik	103
5.3.6 Restliche Gebäudetechnik	104
5.4 Bauwerk: Baukonstruktion und Gebäudetechnik	105
5.5 Niedrigstenergiewohngebäude: Bauwerk und Betrieb	111
5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	120
5.7 Kurzzusammenfassung	121
6 Vereinfachte ökologische Ermittlung der Gebäudetechnik	123
6.1 Ökologische Betrachtung von Gebäuden	123
6.2 Gebäudetechnik	124
6.3 Sanitärtechnik	126
6.3.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	126
6.3.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	130
6.3.3 Gewichtsbestimmung der Sanitär-Hauptkomponenten	131

6.4 Heizungstechnik	132
6.4.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	132
6.4.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	133
6.4.3 Gewichtsbestimmung der Heizungs-Hauptkomponenten	133
6.5 Lüftungstechnik	135
6.5.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	135
6.5.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)	136
6.5.3 Gewichtsbestimmung der Lüftungs-Hauptkomponenten	136
6.6 Kurzzusammenfassung	137
7 Resümee	139
7.1 Bedeutung für die Baubranche – derzeit und zukünftig	139
7.2 Diskussion	141
7.3 Kurzzusammenfassung	142
8 Zusammenfassung und Ausblick	143
8.1 Zusammenfassung	143
8.2 Ausblick	147
8.3 Kernaussage Doktorarbeit	148
Abkürzungsverzeichnis	149
Literaturverzeichnis	153
Abbildungsverzeichnis	169
Tabellenverzeichnis	175
Anhang	177
A Weitere Ergebnisse und Datengrundlage der Metaanalyse	177
B Sachbilanzdaten	179
C Weitere Ergebnisse der ökologischen Analyse von Niedrigstenergiewohngebäuden	199
D Weitere Ergebnisabweichungen und Faktoren der vereinfachten ökologischen Ermittlung der Gebäudetechnik	203
Glossar	207
Index	211

Anmerkung:

Nach jedem Hauptkapitel in dieser Dissertation erfolgt eine Zusammenfassung des jeweiligen Kapitels in Kurzform.

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Einführung

„Die Kohlenlager [...] werden endlich einmal abgebaut sein und ersetzen sich nicht wieder [...] jede geförderte Tonne Kohlen bringt uns demselben einen Schritt näher.“ [1:6]. Dieses Zitat von 1841 zeigt, dass seit Langem Ressourcen als endliches Gut angesehen werden. Jedoch nimmt die Menschheit seit geraumer Zeit übermäßig Ressourcen (u.a. Kohle) in Anspruch und belastet hierdurch das Ökosystem Erde enorm. Wie in *Abbildung 1.1* ersichtlich, liegt in Deutschland der ökologische Fußabdruck (Vergleich: Menschlicher Verbrauch mit regenerativer Kapazität der Erde [2:36]) mit 4,6 gha¹ [2:144] deutlich über dem maximal verträglichen von 1,8 gha [2:141], d.h. hätte jeder Mensch auf der Welt den identischen Ressourcenbedarf, wären rund 2,5 Planeten notwendig.



Abbildung 1.1: Ökologischer Fußabdruck (Bedürfnisse) und Biokapazität (Angebot)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [2:140+141+144])

¹ 1 gha („globaler Hektar“) entspricht einem biologisch produktiven Hektar Land mit weltweit mittlerer Produktivität [2:38].

Mehr denn je gehören der sorgsame Ressourcenumgang und die Bewältigung des steigenden Ressourcenverbrauchs sowie die damit einhergehenden Emissionserhöhungen zu den zukünftigen Herausforderungen. Besonders beachtenswert erscheint hierbei, dass derzeit 23 Länder – u.a. auch Deutschland – 71 % der weltweiten CO₂-Emissionen emittieren [3:298]. Zudem werden zurzeit, mit steigender Tendenz, weltweit ca. 50 % mehr Ressourcen verbraucht als durch die Erde zur Verfügung stehen [2:38]. Der „Ressourcenhunger“ ist momentan nur durch Ausbeutung der Natur zu decken.

Dies ist auf politischer Ebene (teilweise) erkannt und zeigt sich an verschiedenen politischen Zielen. Zum Beispiel am Pariser-Abkommen (COP21) [4], mit dem Ziel den weltweiten Temperaturanstieg auf maximal 2 °C zu begrenzen [4:2]. Des Weiteren an den Zielen der Europäischen Union (EU) und der deutschen Bundesregierung: Die Absicht der EU ist eine 20 %-ige Reduktion des Primärenergieverbrauchs bis 2020 zum Basisjahr 2007 [5:Abs.(2)]. Langfristig möchte Deutschland diesen Verbrauch, basierend auf 2008, bis 2050 um 50 % senken [6:5]. Ein wichtiger Baustein sind hierzu Gebäude; diese werden als entscheidend für die Verwirklichung der Senkung der Treibhausgasemissionen – um 80 % bis 95 % gegenüber 1990 – bis 2050 angesehen [5:Abs.(17)]. Denn alleine der Gebäudesektor wäre in 2050, bei Fortführen der derzeitigen Tendenz, verantwortlich für alle maximal zulässigen Emissionen, die eine Erderwärmung auf 2 °C begrenzt [7:16]. Unter anderem soll deshalb im Jahre 2050 in Deutschland der Gebäudebestand nahezu klimaneutral sein [6:27].

Hierbei kommt der umweltbezogenen bzw. ökologischen Nachhaltigkeitsbetrachtung von Gebäuden, neben den ökonomischen und sozialen Aspekten [8:6], eine immer größere Bedeutung zu. Dies ist v.a. auf die Tatsache zurückzuführen, dass der Bau- und Gebäudesektor während Herstellung, Betrieb und Entsorgung eines Gebäudes enorme Ressourcen bindet sowie eine große Menge an Emissionen verursacht; beispielsweise:

- ca. 1/2 aller weltweit verarbeiteten Rohstoffe [9:26]
- ca. 1/3 der deutschen CO₂-Emissionen [6:27]
- ca. 2/5 der Gesamtenergie in der EU [10:Abs.(3)]
- ca. 1/2 des deutschen Abfallaufkommens [11:451]

Als Hauptfaktoren für das größer werdende ökologische Defizit werden einerseits die wachsende Weltbevölkerung und andererseits der Fortschritt des Lebensstandards gesehen [2:41]. Dem steigenden Ressourcenverbrauch, basierend auf dem zunehmenden Lebensstandard, wird durch die Effizienzsteigerung nur eingeschränkt entgegengewirkt [2:41].

Neben der Effizienz sind die Suffizienz und Konsistenz weitere Umsetzungsstrategien zu einer nachhaltigen Entwicklung [12:187]. Die Effizienz zielt auf eine Steigerung der Ressourcenproduktivität ab [12:187], d.h. diese Öko-Effizienz bezweckt bei minimalem Einsatz von Ressourcen (Input) den maximalen Output und hierdurch geringe Umweltbeeinträchtigungen, z.B. Gebäude mit weniger Energieverbrauch und geringeren CO₂-Emissionen. Während die Effizienzstrategie beim Aufwand ansetzt, um einen gegebenen Nutzen zu erreichen, setzt die Suffizienz am zu erzielenden Nutzen an [13:36+37]. Die Suffizienzstrategie strebt folglich eine (freiwillige) Änderung des Lebensstils und der Wertevorstellungen an [13:38], z.B. Reduzierung der Wohnfläche pro Kopf. Beide, Effizienz und

Suffizienz, beziehen sich auf die derzeitigen Technologien bzw. Prozesse, die Konsistenz – von einigen auch als *eco-effectiveness* bezeichnet [14:287] – zielt auf eine „*qualitative Restrukturierung der Ressourcen-, Energie- und Senkennutzung*“ [14:287] ab; dies bedeutet, hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit naturangepassten Stoffkreisläufen, z.B. erneuerbare Energie aus Plusenergiegebäuden².

1.2 Motivation und Problemstellung

Seit knapp 100 Jahren existiert Wissen über den Ressourcenverbrauch von Gebäuden; jedoch haben in der alltäglichen Anwendung diese Erkenntnisse nur teilweise Berücksichtigung gefunden. Bereits 1919 wurde die Vorteilhaftigkeit von geringerem Materialbedarf und Rohstoffeinsparung im Herstellungsprozess von Ziegel erläutert [15:32]. Des Weiteren ist seit 1922 im Bauwesen der Kohleaufwand für die Herstellung von Mauerwerk sowie für die Beheizung von Räumen bekannt [16:136]. Dennoch ist derzeit eine ressourcenbezogene und folglich umweltbezogene Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen in der Baupraxis nicht gegeben, d.h. ein *life cycle assessment (LCA)*³ findet nur vereinzelt statt. Die vier gegenwärtigen Hauptprobleme sind:

(1) Seit mehreren Jahrzehnten liegt in Deutschland der Fokus im Hinblick auf die Reduktion des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase von Gebäuden. Hierdurch konnte der Energieverbrauch des Gebäudesektors schrittweise erheblich gesenkt werden. Die Einsparungen beruhen auf einer energieeffizienteren Technik in Verbindung mit einer Dämmung. Diese verursacht allerdings einen erhöhten Primärenergieanteil mit den hiermit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt (*Abbildung 1.2 auf der nächsten Seite*). Aufgrund der Tatsache, dass mittlerweile immer energieeffizientere Gebäude gebaut werden und somit die bisher vernachlässigte Herstellung und Entsorgung stetig an Bedeutung gewinnt, ist die energetische und ressourcenbezogene Verbesserung von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus zwingend notwendig. Angesichts der EU-Vorgaben (2010/31/EU [10]) ab 2021 [10:Art.9 Abs.1] nur noch Niedrigstenergiegebäude mit einem sehr geringen Energiebedarf zu bauen [10:Art.2 Nr.2], verstärkt sich die Dringlichkeit der ganzheitlichen Betrachtung.

(2) Angesichts der aktuellen Gesetzeslage zeigt sich, dass die Lebenszyklusbetrachtung derzeit nicht im Mittelpunkt steht. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) [20] ist nutzungsphasenorientiert [20:§3+4]. Die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [21] fokussiert die anrechenbaren Kosten in der Herstellung [21:§4]. Zudem ist das LCA eine Sonderleistung nach HOAI [21:Anl.10+15]. Hierdurch wird derzeit der Rohstoffverbrauch für Herstellung und Entsorgung bei (fast) allen Gebäuden vernachlässigt. Die Notwendigkeit der lebenszyklusorientierten Betrachtung

²Die Dissertation beschränkt sich auf Wohngebäude und deren ökologische Analyse der Nachhaltigkeit hinsichtlich der Strategien Effizienz und vereinzelt Konsistenz.

³Weitere Begrifflichkeiten / Synonyme: Ökobilanz, Lebenszyklusanalyse (LZA), *life cycle analysis*, *ecological balance*, *ecobalance*, *Resource and Environmental Profile Analysis*; international hat sich *life cycle assessment (LCA)* etabliert [17:552], in der deutschen Normung wird der Begriff der Ökobilanz verwendet (z.B. DIN EN ISO 14040 [18], DIN EN ISO 14044 [19]). Nach Meinung des Autors beschreibt der Begriff *life cycle assessment (LCA)* am besten die ökologische Analyse bzw. ganzheitliche Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen über den kompletten Lebenszyklus. Deshalb wird im Rahmen dieser Dissertation die Abkürzung **LCA** für *life cycle assessment* verwendet.

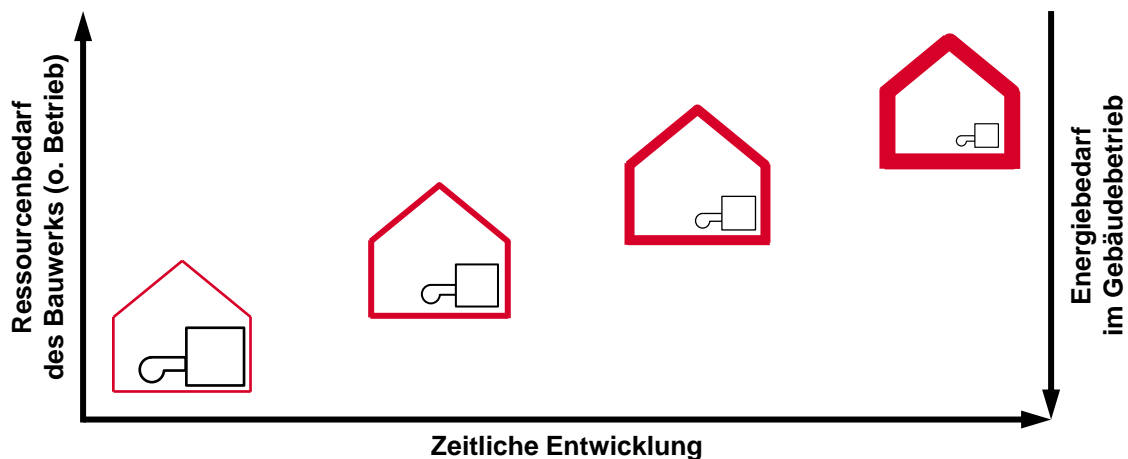


Abbildung 1.2: Ressourcen- und Energiebedarf bei unterschiedlichen Gebäudestandards

zeigt sich beispielsweise bei der Gebäudezertifizierung nach DGNB [22] / BNB [23] / NaWoh [24] / BNK [25]; hier ist die Bilanzierung des Gebäudes mittels dem LCA verpflichtend.

(3) Sofern Gebäude ökologisch untersucht werden, wird hierbei die Gebäudetechnik unzureichend analysiert⁴. Im vereinfachten Verfahren der deutschen Zertifizierungssysteme ist es beispielsweise für das LCA der Technik ausreichend, den Wärmeerzeuger zu bilanzieren (z.B. [26], [27]), d.h. Wärmeverteilung und -übergabe werden vernachlässigt; ebenso bleiben andere Gewerke (z.B. Lüftungstechnik) unberücksichtigt. Als Ausgleich ist das Endergebnis (Baukonstruktion und Wärmeerzeugungsanlage) mit einem 10%-igen Zuschlag bzw. Malus zu belegen (z.B. [26], [27]). Diese Rechenregel wird bei der ökologischen Gebäudebetrachtung häufig angewandt; wie z.B. beim Forschungsprojekt Aktiv-Stadthaus [28:172]. Prinzipiell ist das LCA von Gebäuden einschließlich der Gebäudetechnik möglich, jedoch komplex und zeitaufwendig⁵. Braune [29] fasst in ihrer Dissertation die Sachlage passend zusammen: „[...] Schwäche der heute durchgeführten Gebäude-Ökobilanzen ist das quasi vollständige Vernachlässigen der eingebauten Haustechnik.“ [29:157].

(4) Derzeit sind der Ressourcen- und Energieverbrauch sowie die damit einhergehenden potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik in Verbindung mit der Gebäudehülle über den gesamten Lebenszyklus größtenteils unbekannt⁶. Angesichts der Bandbreite vorhandener Energiesparmaßnahmen zwischen Gebäudehülle und -technik sind die Umsetzungsmöglichkeiten mannigfaltig und erschweren folglich die konkrete Bestimmung bzw. Eingrenzung.

Aus den obengenannten Gründen,

- (1) Herstellung und Entsorgung werden durch die Energieeinsparung in der Nutzung wichtiger,
- (2) momentan (fast) keine Lebenszyklusbetrachtung,

⁴Siehe hierzu auch Kapitel 3.2.2 auf Seite 34.

⁵Siehe hierzu auch Kapitel 2.3 auf Seite 22.

⁶Siehe hierzu auch Kapitel 2.4 auf Seite 26.

- (3) die Gebäudetechnik wird ökologisch unzulänglich betrachtet,
- (4) wenig Kenntnisse über die umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnikwahl,

ist es unabdingbar, das LCA für alle Baubeteiligten praxisnah zu vereinfachen, um auf wissenschaftlich fundierter Basis eine breite Anwendung der ökologischen Betrachtung von Niedrigstenergiewohngebäuden zu ermöglichen. Diese Arbeit greift die erwähnten Mängel auf und entwickelt, basierend auf detaillierten LCA-Analysen, eine Vorgehensweise für die vereinfachte ökologische Bestimmung.

1.3 Zielsetzung und Aufbau

Das Hauptziel der Dissertation ist es, die ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik zu analysieren und die energetische, ressourcen- und umweltbezogene Beurteilung von Niedrigstenergiewohngebäuden und v.a. deren Gebäudetechnik zu vereinfachen. Es soll eine Grundlage geschaffen werden, um die Gebäudetechnik, auf einer fundierten und nachvollziehbaren Vorgehensweise basierend, in die Betrachtung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden einbringen zu können.

Hierbei müssen folgende offene Fragen beantwortet werden:

- *Welche Baukonstruktionsbauteile verursachen den größten Energieverbrauch bzw. die meisten Emissionen im Wohngebäudelebenszyklus bei verschiedenen Niedrigstenergiestandards?*
- *Welche Baukomponenten der Gebäudetechnik sind bei der Betrachtung der ökologischen Eigenschaften die Leitpositionen bzw. Hauptverursacher des Ressourcenverbrauchs und der damit einhergehenden potenziellen Umweltauswirkungen?*
- *Wie hoch ist der Einfluss der Gebäudetechnik auf die ökologischen Eigenschaften des Bauwerks in Niedrigstenergiebauweise?*
- *Wie stellt sich die Verteilung zwischen dem Bauwerk eines Wohngebäudes und dem Gebäudebetrieb bei unterschiedlichen energetischen Bauniveaus dar?*

Die Hypothese ist hierbei:

Eine vermeintlich zeitaufwendige und inhaltlich komplexe Betrachtung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik kann weitgehend durch die Parametrisierung weniger Leitpositionen vereinfacht werden, um zu einem hinreichend genauen LCA zu gelangen.

Um diese Hypothese zu bestätigen, werden die ökologischen Eigenschaften von unterschiedlichen Wohngebäudetypen (Einfamilien- und Mehrfamilienhaus) mit verschiedenen Energiestandards und Varianten über den Lebenszyklus analysiert. Durch die ökologischen Betrachtungen von Niedrigstenergiewohngebäuden einschließlich deren Baukonstruktion und Gebäudetechnik mittels der LCA-Methode werden die Ressourcenbeanspruchung und die potenziellen Umweltauswirkungen von (Niedrigstenergie-)Wohngebäuden allumfassend berücksichtigt und analysiert. Hierdurch sind die umweltbezogenen Auswirkungen v.a. der Gebäudetechnik beurteilbar. Wohngebäude wurden bewusst

für diese Arbeit ausgewählt, um mit einer homogenen Basis bezüglich verwendetem Baustandard und Nutzeranforderung zu kalkulieren⁷.

Nach der Einführung sowie der Darlegung der Motivation und Problemstellung wird die Zielsetzung erläutert (Kapitel 1). Anschließend erfolgt ein Überblick über die geschichtliche Entwicklung, den LCA-Grundlagen und der LCA-Anwendung sowie der Abgrenzung zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten (Kapitel 2). Darauf aufbauend werden verschiedene Fallstudien durch eine Metaanalyse – unter unterschiedlichen Gesichtspunkten – untersucht (Kapitel 3). Die Rahmenbedingungen, die analysierten Gebäude sowie das Standardgebäude und die energetischen Baustandards einschließlich der Baukonstruktions- und Gebäudetechnikvarianten der ökologischen Analyse werden im Kapitel 4 beschrieben. Basierend auf detaillierten Berechnungen mittels der LCA-Methode werden zuerst Gebäudehülle bzw. Baukonstruktion und Gebäudetechnik einzeln, anschließend vereint als Bauwerk sowie schließlich mit Betrieb analysiert (Kapitel 5). Dies mündet im Kapitel 6 in einem Verfahren zur vereinfachten ökologischen Ermittlung der Sanitär-, Heizungs- und Lüftungstechnik. Aus den vorherigen Kapiteln leitet sich die Bedeutung für die Baubranche und die selbstkritische Reflexion der Arbeit ab (Kapitel 7). Zum Schluss der Dissertation (Kapitel 8) werden die Ergebnisse zusammengefasst und hieraus ein Ausblick über weitere Forschungsansätze geschlussfolgert.

1.4 Kurzzusammenfassung

- **1.1 Einführung:**
 - ⇒ Der Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen Belastungen für die Umwelt sind seit geraumer Zeit zu hoch; v.a. Gebäude haben Einsparpotenzial.
- **1.2 Motivation und Problemstellung:**
 - ⇒ Trotz steigender Bedeutung wird die Herstellung und Entsorgung von Gebäuden vernachlässigt; hauptsächlich wird die Gebäudetechnik ökologisch unzureichend betrachtet.
- **1.3 Zielsetzung und Aufbau:**
 - ⇒ Basierend auf der LCA-Methode erfolgt eine ökologische Analyse von Niedrigstenergiewohngebäuden, zur Entwicklung von ökologischen Leitparametern bzw. Faktoren für die einfachere ökologische Beurteilung der Gebäudetechnik.

► **Die Ressourcenbeanspruchung ist derzeit zu hoch, besonders Gebäude binden viele Ressourcen und verursachen hierdurch erhebliche Umweltbelastungen; folglich ist die einfache ökologische Gesamtbewertung von Gebäuden mitsamt der Gebäudetechnik von enormer Bedeutung.**

⁷Wohn- und Nicht-Wohngebäude lassen sich infolge der unterschiedlichen Bau- und Nutzungsweise kaum vergleichen. Der methodische Ansatz kann jedoch auch als Grundlage – allerdings unter anderen Rahmenbedingungen – für Nicht-Wohnungsbauten herangezogen werden.

KAPITEL 2

Überblick über die ökologische Analyse mit Fokus auf die Baubranche

2.1 Geschichtliche Entwicklung

Seit dem Wechsel vom Nomadentum zur Sesshaftigkeit⁸ prägen Gebäude die Gesellschaft [31:9]. Vor Beginn der Neuzeit nutzten die Menschen vornehmlich erneuerbare Ressourcen [32:24]. Hierdurch blieben in der Regel die Umweltprobleme bis zum Industriezeitalter lokal begrenzt [32:24+25]. Ab dem 19-ten Jahrhundert stieg durch den Beginn der Industrialisierung und einer Änderung des Lebensstils vor allem der nicht erneuerbare Ressourcenverbrauch kontinuierlich an [32:25], [33:37], [34:5]; zum Beispiel erhöhte sich der Kohleverbrauch durch die Beheizung von Gebäuden mit Kohle (Abbildung 2.1) oder die Bedeutung und hiermit der Verbrauch von Erdöl stieg durch die Nutzung von Kraftfahrzeugen.

Die natürlichen Kraftquellen der Erde				
Kraftverbrauch: Jahre				
	1909			
Erdöle.	Erdgase.	Wasserkräfte.	Kohle.	
3.500.000 T	2.400.000 T	3.400.000 T	127.600.000 T	
1919				
5.200.000 T	2.400.000 T	5.900.000 T	160.600.000 T	

Abbildung 2.1: Prognose von 1918 über den Zuwachs des Verbrauchs von 1909 bis 1919 (Datenquelle: [35:9])

Das ab dem Industriezeitalter veränderte Konsumverhalten bewirkte hauptsächlich eine Überbelastung der Natur [33:38]. „Man darf nie vergessen [!], dass die Bodenschätze nur einmal da sind und nur einmal gewonnen werden können.“ [36:4]; dieses Zitat von 1942 zeigt beispielhaft, dass die

⁸Ab dem 9. Jahrtausend v.Chr. wurde das Jäger- und Sammlerdasein aufgegeben und feste Gebäude errichtet [30:18].

Endlichkeit von Ressourcen schon relativ lange bekannt ist. Allerdings wächst v.a. seit den 1960er Jahren die Erkenntnis über die Endlichkeit der natürlichen Ressourcen [32:31]. Ausgelöst durch die erste Energiekrise in den 1970er Jahren und im Zusammenhang mit einem wachsenden Umweltbewusstsein wurde Energiesparen bedeutsam [37:203]. Hierdurch wurde in Deutschland 1977 erstmalig eine gesetzliche Vorschrift [38] bezüglich des energetischen Bauniveaus erlassen. Ebenfalls durch die Engpässe bei der Energieversorgung und die Abfallproblematik der Nachkriegsgesellschaft wurde das LCA in den späten 1960er und frühen 1970er Jahren entwickelt [39:8].

Wie *Abbildung 2.2* zeigt, haben sich die ökologische Betrachtung und der energetische Baustandard unabhängig voneinander entwickelt⁹. Seit dem ersten LCA 1969 [40:4] wurde die aus der Verpackungsindustrie stammende heutige Methodik standardisiert [17:552]. Im gleichen Zeitraum wurde in Deutschland der gesetzliche energetische Baustandard fortwährend erhöht [17:553]. Durch die Verknüpfung der Heizanlagen- und Wärmeschutzverordnung zur Energieeinsparverordnung (EnEV) wurde ab 2002 der Primärenergieverbrauch maßgebend sowie die Bauphysik und Anlagentechnik gleichwertig betrachtet [37:15]. Durch all diese Maßnahmen konnte eine durchschnittliche Primärenergiebedarfsreduktion pro Jahr von ca. 6 kWh/(m²a) verwirklicht werden [41:51]. Dies bedeutet beispielhaft eine Minderung des Primärenergiebedarfs innerhalb von 30 Jahren um ca. 180 kWh/(m²a) [41:50]; hatte ein Neubau 1980 einen Bedarf von ca. 250 kWh/(m²a) waren es 2010 ca. 70 kWh/(m²a).

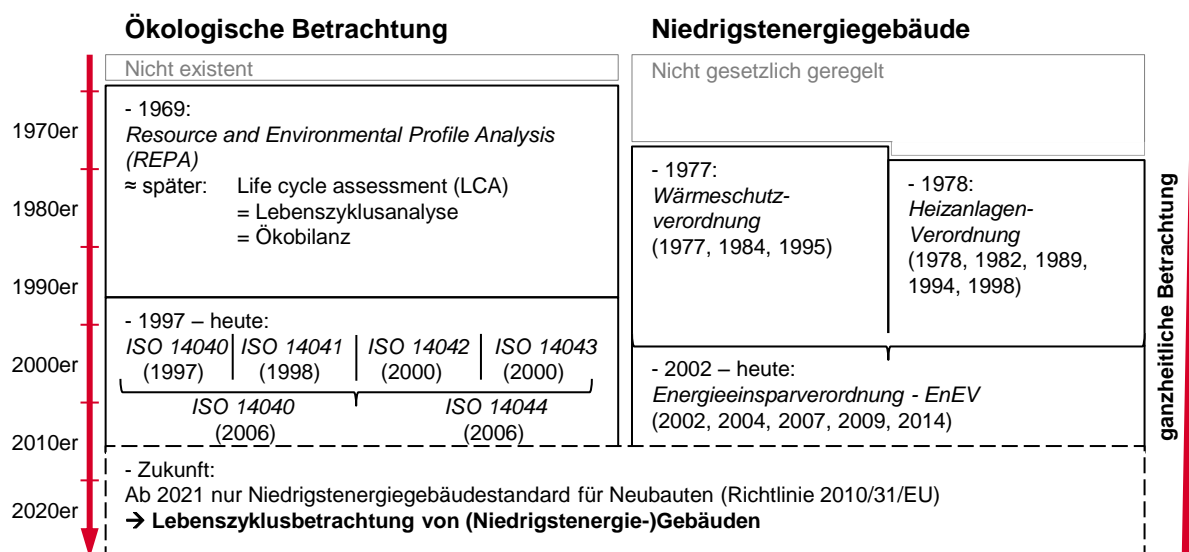


Abbildung 2.2: Überblick über die geschichtliche Entwicklung (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [17:554])

Diese Entwicklung des energiesparenden Bauens setzt sich auf europäischer Ebene fort. Nach der Europäischen Richtlinie 2010/31/EU [10] müssen ab 2018 alle behördlich genutzten Gebäude und ab 2021 alle Gebäude dem Niedrigstenergiestandard entsprechen [10:Art.9 Abs.(1)]. Diese Niedrigstenergiegebäude haben eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz und einen sehr geringen Energiebedarf [10:Art.2 Nr.2].

⁹Einen detaillierten Überblick über diese Thematik findet sich in Weißenberger u.a. [17].

2.2 Life cycle assessment-Grundlagen

2.2.1 Methode

Das LCA umfasst über den gesamten Lebensweg eine Zusammenstellung aller Input- und Outputflüsse sowie eine Beurteilung der hiermit verbundenen möglichen Umweltauswirkungen [18:7]. Hierdurch werden für einzelne Stoffe, ganze Bauteile oder von gesamten Gebäuden die potenziellen Umweltbelastungen – von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung – bestimmt [42:4]. Derzeit ist das LCA die einzige international genormte Methode zur Bestimmung der potenziellen Umweltauswirkungen [39:17]. Wie in *Abbildung 2.3* dargestellt, besteht das LCA aus vier sich gegenseitig beeinflussenden Elementen [18:16]:

- (1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- (2) Sachbilanz
- (3) Wirkungsabschätzung
- (4) Auswertung

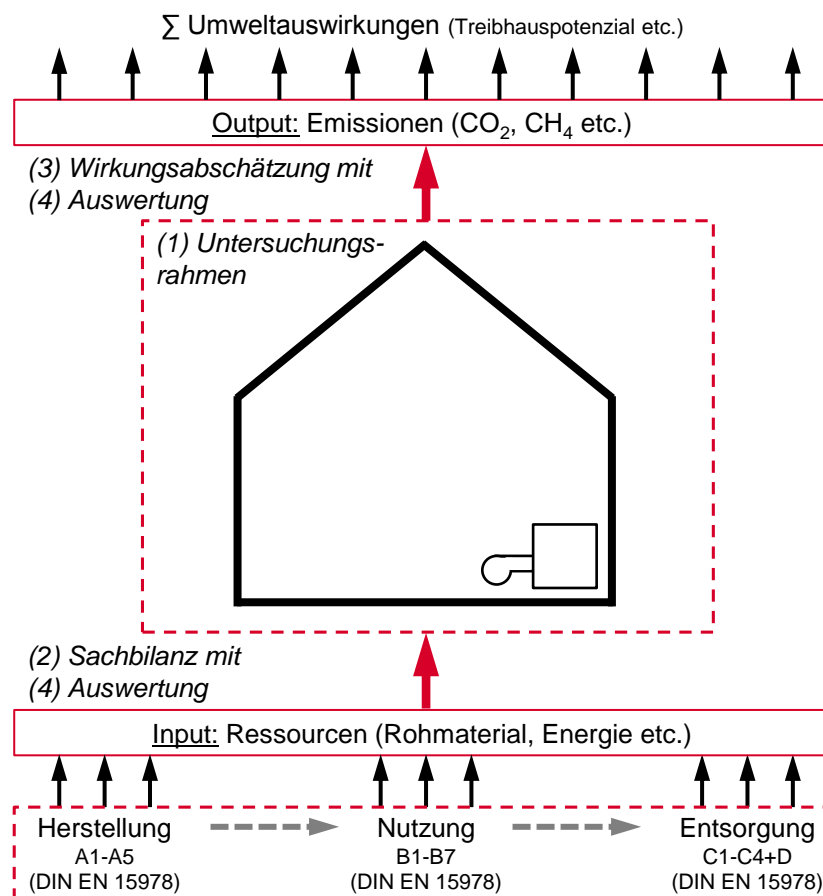


Abbildung 2.3: LCA-Methode angewandt bei Gebäuden
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [17:553])

Zu Beginn einer ökologischen Bilanzierung müssen die Zieldefinition sowie der Untersuchungsrahmen exakt fixiert werden [19:15]. Als nächstes werden in der meist sehr umfassenden Sachbilanz sämtliche Inputs und Outputs von Stoff- und Energieflüssen, die über einen Lebenszyklus auftreten, quantifiziert [18:5+7]. Bei der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz (= Energie- und Stoffstromanalyse) erhobenen Daten hinsichtlich ihrer potenziellen Umweltauswirkungen eingeschätzt¹⁰ [18:5+7]. Zum Schluss werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam beurteilt, um Konsequenzen abzuleiten sowie Empfehlungen zu geben [18:5+7]. Diese Ergebnisse finden beispielsweise Anwendung in der Entwicklung und Verbesserung von Produkten, Unterstützung bei strategischen Planungen sowie bei politischen Entscheidungsprozessen [18:16]. Anwendungsbeispiele im Gebäudesektor sind die ökologische Betrachtung von unterschiedlichen Baukonstruktionen oder von verschiedenen Bauteilen bzw. kompletten Gebäuden [43:1641].

Das LCA kann in drei Haupttypen eingeteilt werden [44:396]. Die gebräuchlichste ist die prozessbasierte Analyse [45:1243], [46:312]. Daneben existieren die Input/Output- sowie die Hybrid-Analyse [44:396]. Die prozessbasierte Analyse beruht auf physikalischen Prozessen, die durch Masse- und Energieströme modelliert werden [47:647]. Hingegen handelt es sich bei der Input/Output-Analyse um eine wirtschaftswissenschaftliche Methode [48:11], bei der die Quantifizierung anhand von ökonomischen Daten erfolgt [47:647]. Die Hybrid-Analyse verbindet beide Methoden [45:1244], [49:54].

In dieser Arbeit wird das prozessbasierte LCA weiter verfolgt. Dies begründet sich darin, dass zum einen das prozessbasierte LCA geeigneter ist, um allgemeingültige Ergebnisse aufzuzeigen [44:396]; zum anderen ist die Input/Output-Analyse recht ungenau und nur für Abschätzungen angemessen [50:15]. Die fehlende Präzision ist ebenfalls für die Hybrid-Analyse gültig, da diese mit den umweltbezogenen ökonomischen Input/Output-Werten verknüpft ist. Des Weiteren sind die Datenbanken bezüglich prozessbasierter Analysen am gebräuchlichsten [46:312].

2.2.2 Energetische und umweltbezogene Bewertungsparameter

Wirkungskategorien

Die Wirkungskategorien repräsentieren wichtige Umweltthemen und können Midpoint- oder Endpoint-Indikatoren sein, wobei die Midpoint-Indikatoren die Vorstufe zu den Endpoint-Indikatoren sind [39:203]. Erstere sind problemorientiert [51:2363], d.h. sie beschreiben die potenzielle Wirkung auf eine Umweltkategorie mittels einer Substanz bzw. Emission (ausgedrückt in Äquivalenten) [52:338+339], z.B. CO₂-Äq., SO₂-Äq.. Die Endpoint-Indikatoren sind schadensorientiert [51:2363]. Diese stehen für die endgültigen Schadensauswirkungen auf den Menschen oder das Ökosystem [51:2363], z.B. Erhöhung des Meeresspiegels oder Zunahme der katastrophalen Wetterereignisse [39:254]. Diese Endpoint-Indikatoren sind mit einem höheren Interpretationsgrad behaftet [53:1421]. Deshalb wird der Midpoint-Denkansatz derzeit bevorzugt, da verlässlichere Einschätzungen vorgenommen werden können [53:1421]; es ist nur eine Kenntnis der Primäreffekte notwendig [39:228].

¹⁰Siehe hierzu auch Kapitel 2.2.2 und Kapitel 4.1.3 auf Seite 46.

Table 2.1 zeigt die üblichen (Midpoint-)Wirkungskategorien und deren Spezifikationen. Die Parameter inklusive ihrer üblichen Kurzform und Einheit sind aufgezeigt; zusätzlich eine Kurzbeschreibung der entsprechenden Wirkungskategorie – eine ausführliche Beschreibung einschließlich Unterscheidung zwischen input- und outputbezogenen¹¹ Wirkungskategorien folgt. Prinzipiell bewertet ein niedriger Wert ebenfalls eine geringere potenzielle Umweltauswirkung, allerdings erfolgt die schlussendliche Bewertung mittels vergleichender Systeme, z.B. Gebäude untereinander. Die verschiedenen Wirkungskategorien wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten wissenschaftlich entdeckt. Mit ca. 10-jähriger Verzögerung gelangten diese in das öffentliche Bewusstsein [39:221].

Table 2.1: Beschreibung der derzeit üblichen Wirkungskategorien bzw. Bewertungsparameter (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [39:222], [54:34+35], [55:28])

Wirkungskategorie bzw. Bewertungsparameter	Abk. Einheit	Kurzbeschreibung Emissionen, die ...	Öffentliche Kenntnisnahme
Primärenergieinhalt gesamt / nicht erneuerbar / erneuerbar	PE _{ges./n.e./e.} kWh (MJ)	Maß für die Energieeffizienz und für den Mangel an Ressourcen	Erste Erdölkrise (Ressourcenverbrauch): 1973
Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)	GWP kg CO ₂ -Äq.	... die globale Erwärmung negativ beeinflussen	UNO-Weltkonferenz: 1992
Ozonabbaupotenzial (Ozone Layer Depletion Potential)	ODP kg CFC11-Äq.	... die stratosphärische Ozonschicht abbauen	Verbot von FCKW in Sprays in den USA: ca. 1978
Versauerungspotenzial (Acidification Potential)	AP kg SO ₂ -Äq.	... die Versauerung von Boden und Wasser verursachen	Waldsterben (Spiegelartikel): ca. 1980
Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential)	EP kg PO ₄ ⁻³ -Äq.	... die Überdüngung von Gewässern und Böden bewirken	Waschmittel ohne Phosphat: ca. 1990
Sommersmogpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)	POCP kg C ₂ H ₄ -Äq.	... die Bildung von troposphärischem Ozon (Sommersmog) fördern	Katalysatorgesetz in den USA: ca. 1975
Abiotischer Ressourcenverbrauch (Stoffe) (Abiotic Depletion Potential)	ADP kg Sb-Äq.	Maß für die Ressourcenverknappung	Erste Erdölkrise (Ressourcenverbrauch): 1973

In dieser Arbeit werden die meisten Bewertungsparameter, die in der DIN EN 15804 [54] enthalten sind, betrachtet. Andere Wirkungskategorien, wie z.B. Humantoxizität, Landnutzung und Biodiversität (Artenvielfalt), bleiben aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Übereinkunft unberücksichtigt. Der Energieverbrauch ist streng genommen keine Wirkungskategorie nach Norm (DIN EN ISO 14040 [18] und DIN EN ISO 14044 [19]), jedoch hervorragend geeignet für die Bewertung von Energiesparmaßnahmen [39:239+240].

¹¹Grundsätzlich wird zwischen input- und outputbezogenen Wirkungskategorien unterschieden. Erstere gewichten den Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Letztere bewerten die Umweltbeeinträchtigung durch Emissionen [39:251].

Primärenergieinhalt

Der inputbezogene Parameter des Primärenergieinhalts, abgekürzt PE (*Primary Energy* – Primärenergie), repräsentiert den Verbrauch an Primärenergie und den damit einhergehenden Ressourceneinsatz (*Abbildung 2.4*) [54:35]. Der Primärenergieinhalt wird in Kilowattstunden bzw. Megajoule (kWh bzw. MJ¹²) angegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt bei der umweltbezogenen Betrachtung von Gebäuden oftmals spezifisch [kWh/(m²a)].

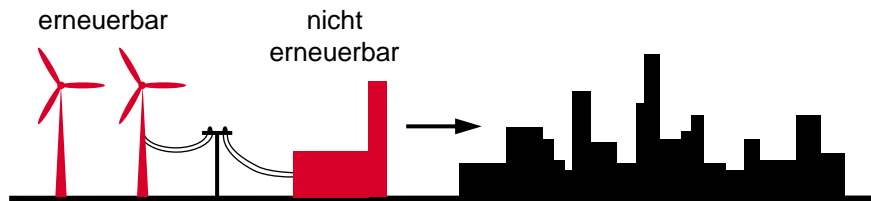


Abbildung 2.4: Primärenergieverbrauch repräsentiert durch den Primärenergieinhalt (PE) – erneuerbar und nicht erneuerbar

Primärenergie ist der Energieinhalt von natürlichen Energieträgern, der noch nicht technisch umgewandelt wurde [50:5]. Beispielsweise sind dies Erdöl oder Erdgas, solange diese noch nicht gefördert wurden [50:5]. Der gesamte Primärenergieinhalt ($PE_{ges.}$) repräsentiert hierbei den nicht erneuerbaren ($PE_{n.e.}$) und erneuerbaren (PE_e)¹³ primärenergetisch bewerteten Energieaufwand. In der DIN EN 15804 [54] erfolgt zusätzlich hierzu noch eine Unterteilung in stoffliche und energetische Nutzung [54:35]. Beispiele für nicht erneuerbare Energie sind Erdgas, Erdöl, Kohle. Biomasse, Solarenergie und Wasserkraft sind hingegen Beispiele für erneuerbare (regenerative) Energieträger. Die energetischen Parameter drücken keine potenziellen Umweltauswirkungen aus, sie sind dennoch zur Analyse des Ressourcenverbrauchs und der Energieeffizienz bei der ökologischen Betrachtung üblich [39:239+240].

Graue Energie / kumulierter Energieaufwand / kumulierter Energieverbrauch: Eingebundene Energie / Eingebundene Emissionen

Die größte Fehlinterpretation bezüglich Begrifflichkeiten beim ökologischen Bauen findet derzeit im deutschen Sprachgebrauch mit der Grauen Energie, dem kumulierten Energieaufwand (KEA) und dem kumulierten Energieverbrauch statt. Der Fachausdruck der Grauen Energie ist in Deutschland nirgends genormt; dieser wurde in der Schweiz geprägt und in der SIA 2032 [57] definiert: „Unter der Grauen Energie versteht man den kumulierten Aufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie zur Herstellung und Entsorgung eines Baustoffs.“ [57:10]. Weiter verweist die SIA 2032 [57] darauf, dass die Graue Energie häufig auch als kumulierter Energieaufwand oder Primärenergieinput bezeichnet

¹²In dieser Arbeit wird – wie für Gebäude üblich – die Primärenergie in kWh angegeben (1kWh = 3,6MJ).

¹³Der Begriff „erneuerbare Energie“ ist physikalisch gesehen falsch. Energie kann im thermodynamischen Sinne nur in eine andere Energieform umgewandelt werden und ist folglich nicht erneuerbar bzw. regenerativ. Allerdings ist die Begrifflichkeit allgemein bekannt (z.B. Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz [56]) und wird deshalb verwendet.

wird¹⁴ [57:10]. Jedoch definiert die deutsche VDI 4600 [50] den KEA als primärenergetisch bewerteten Aufwand für Herstellung, Nutzung und Entsorgung [50:6]. Überdies beschreibt die VDI 4600 [50], dass der KEA „[...] somit auch die Summe aus dem kumulierten nicht regenerativen Aufwand (KNRA) und dem kumulierten regenerativen Aufwand (KRA).“ [50:8] ist. Ein Teil des KEA ist der kumulierte Energieverbrauch (z.B. Beheizung des Gebäudes), der zusammen mit dem kumulierten nicht energetischen Aufwand (z.B. Holz als Werkstoff) den KEA bildet [50:7].

Dies bedeutet, dass sich selbst aktuelle Richtlinien im deutschsprachigen Raum und aus jüngeren Jahren (SIA 2032 von 2010 [57] bzw. VDI 4600 von 2012 [50]) widersprechen. Während die schweizerische Graue Energie die Betriebs- und Unterhaltsenergie ausklammert [57:11], wird dies im deutschen KEA berücksichtigt. Ein weiterer großer Unterschied zwischen KEA und Grauer Energie ist die Tatsache, dass bei letzteren der erneuerbare Energieanteil vernachlässigt wird. Letztendlich bedeutet dies, dass Graue Energie, kumulierter Energieaufwand und kumulierter Energieverbrauch sich beträchtlich unterscheiden und nicht synonym verwendet werden können. Jedoch haben alle Begriffe gemeinsam, dass diese ganzheitlich die Ressourcenbeanspruchung und deren ökologischen Eigenschaften bewerten möchten (Abbildung 2.5).

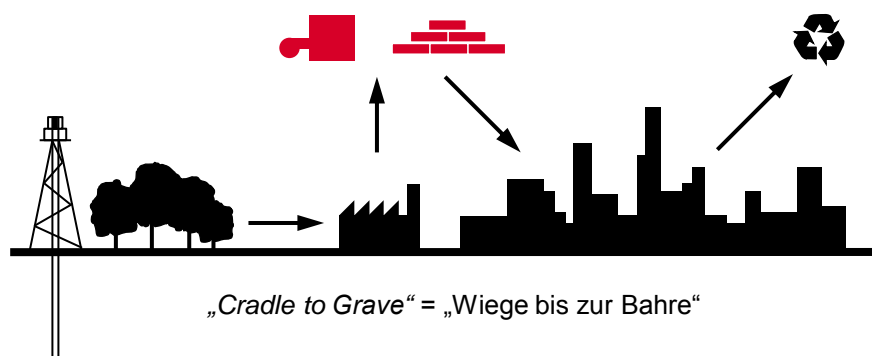


Abbildung 2.5: „Cradle to Grave-Betrachtung“ („Wiege bis zur Bahre-Betrachtung“) repräsentiert durch die Eingebundene Energie bzw. Emissionen

Keiner der Fachausdrücke ist derzeit vollkommen und widerspruchsfrei. Die Definition der Grauen Energie ist im Sinne der konsequenten Energieeinsparung unangemessen, da hier die Energiequelle unberücksichtigt ist [58:152]. Der KEA trägt nicht im vollen Umfang der Baupraxis Rechnung, da die Begrifflichkeit des kumulierten Energieaufwands, der sich aus dem kumulierten Energieverbrauch und dem kumulierten nicht energetischen Aufwand zusammensetzt [50:7], nur für Spezialisten und Experten sofort erschließbar ist. Des Weiteren beschreibt der KEA nicht auf den ersten Blick die Energie, die im Material durch Herstellungs- und Entsorgungsprozesse gebunden ist. Beispielsweise ist der Ressourcenaufwand für die Instandhaltung von Gebäuden im KEA in der Nutzungsphase integriert und ist mittels des nicht energetischen Aufwands nur indirekt ausweisbar. Zudem beziehen sich beide Begrifflichkeiten nur auf die Ressource Energie.

¹⁴Englisch: *embodied energy* oder *cumulative energy demand (CED)* [57:10].

Aufgrund der Tatsache, dass derzeit keine eindeutige Nomenklatur existiert, wird – neben der „Betriebsbedingten Energie bzw. Emission(en) (BE)“ – der Begriff der „Eingebundenen Energie bzw. Emission(en) (EE)“¹⁵ als neue Begrifflichkeit vorgeschlagen. Dieser lehnt sich an der gebräuchlichen englischen Begrifflichkeit der *embodied energy*¹⁶ an. Jedoch existiert bei der *embodied energy (EE)* auch keine eindeutige Definition, wie sich beispielhaft bei Dixit u.a. [45:1239+1240], Ramesh u.a. [67:1593], Sartori u.a. [68:249], Stephan u.a. [69:593-595] und Monahan u.a. [70:188] zeigt. Die Definition der Eingebundenen Energie bzw. Eingebundenen Emissionen orientiert sich an den Lebenszyklusstadien der DIN EN 15978 [71:21], d.h. wie in *Abbildung 2.6* aufgezeigt, teilt sich die gesamte Primärenergie bzw. Emissionen im Lebenszyklus eines Gebäudes in Eingebundene Energie bzw. Emission(en) und Betriebsbedingte Energie bzw. Emission(en) auf.

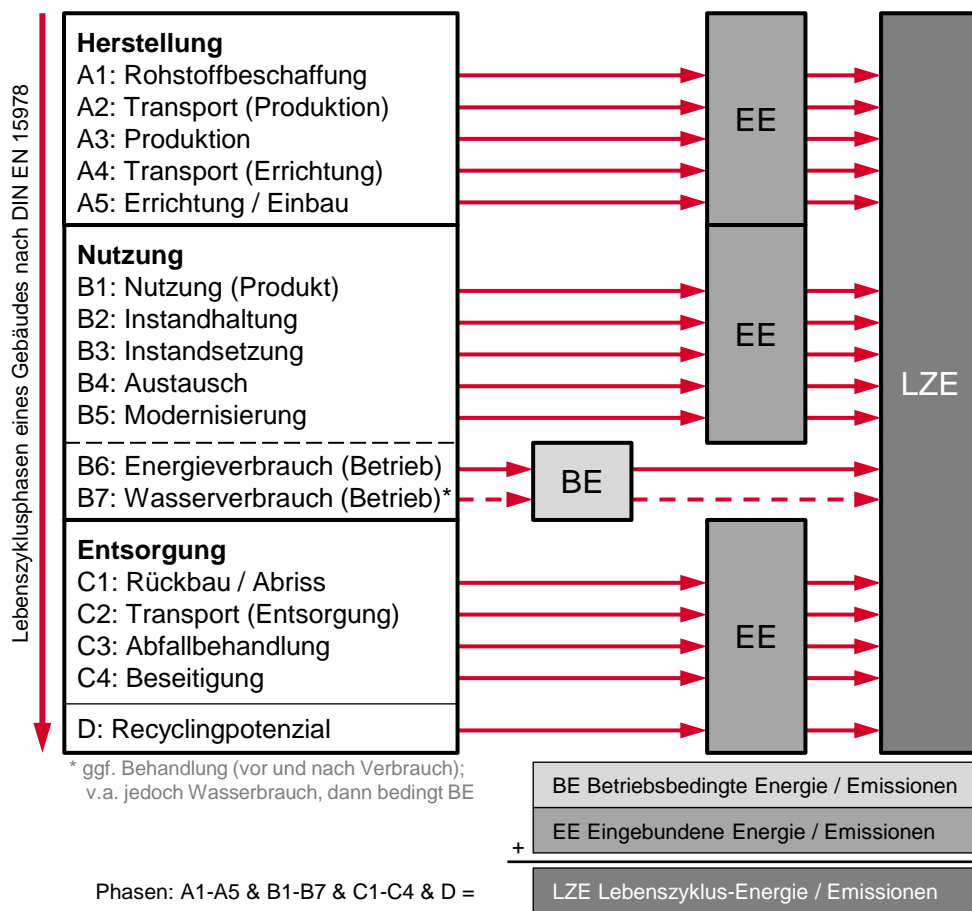


Abbildung 2.6: Definition der Eingebundenen Energie bzw. Emissionen (EE) und Betriebsbedingten Energie bzw. Emissionen (BE)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Module bzw. Phasen DIN EN 15978 [71])

¹⁵Die Begriffe sind als Eigennamen definiert und deshalb großzuschreiben (ähnlich wie z.B. Graue Energie): Betriebsbedingte Energie (BE) bzw. Betriebsbedingte Emission (BE) und Eingebundene Energie (EE) bzw. Eingebundene Emission (EE).

¹⁶*Embodied energy* hat sich international etabliert; dieser Eindruck wird bei der Durchsicht der Konferenzbände bestärkt: IALCCE 2012 [59], PLEA 2013 [60], SB13 [61], [62], CISBAT 2013 [63], WSB 2014 [64], IALCCE 2014 [65], SB16 [66].

Die Betriebsbedingte Energie / Betriebsbedingten Emissionen und die Eingebundene Energie / Eingebundenen Emissionen sind keine eigenständigen output- oder inputbezogenen Parameter, sondern jeweils ein Teil der entsprechenden bereits beschriebenen Bewertungsparameter. Konsequenterweise entspricht die Einheit dem jeweiligen Bewertungsparameter. Im Gebäudelebenszyklus treten immer beide Bestandteile auf. Dementsprechend repräsentiert die Betriebsbedingte Energie / Betriebsbedingten Emissionen, abgekürzt BE, den Betrieb (ein Teil der Nutzungsphase). Die Eingebundene Energie / Eingebundenen Emissionen, abgekürzt EE, steht für die zum Material gehörigen Energie- / Emissionsaufwendungen die im Bauwerk verbaut sind. Folglich grenzt sich die EE ($PE_{ges.}$ für Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung) von den Begrifflichkeiten der Grauen Energie ($PE_{n.e.}$ für Herstellung und Entsorgung) und des kumulierten Energieaufwands ($PE_{ges.}$ für Herstellung, Nutzung, Entsorgung) ab und erweitern die Betrachtung um die im Bauwerk gebundenen Emissionen (Eingebundene Emissionen).

Treibhauspotenzial

Der outputbezogene Parameter Treibhauspotenzial, abgekürzt GWP (*Global Warming Potential*), repräsentiert die globale Erwärmung, ausgelöst durch den Treibhauseffekt (*Abbildung 2.7*) [54:34]. Das Treibhauspotenzial wird in Kohlendioxid-Äquivalenten (CO_2 -Äq.) angegeben¹⁷. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der Baubranche in $kg\ CO_2$ -Äq. [54:34] und bei den ökologischen Betrachtungen von Gebäuden oftmals spezifisch [$kg\ CO_2$ -Äq./(m^2a)].

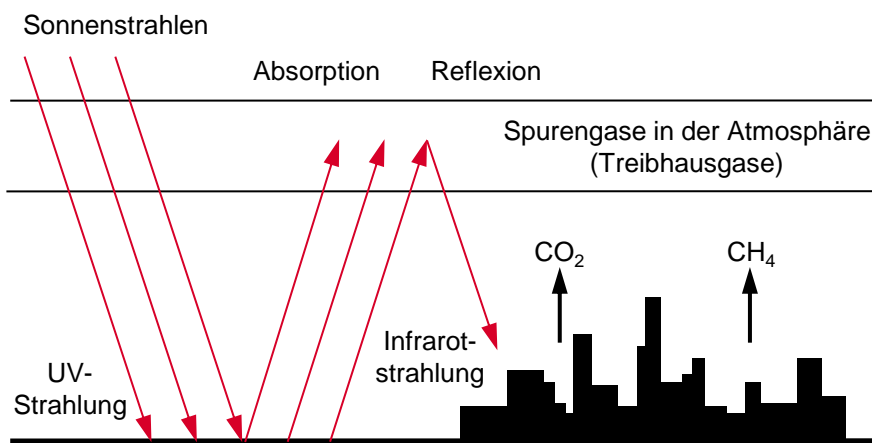


Abbildung 2.7: Treibhauseffekt, repräsentiert durch das Treibhauspotenzial (GWP)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:338])

Der Treibhauseffekt ist das Resultat aus komplexen Strahlungsvorgängen, die eine Erwärmung des Klimas verursachen. Dieser Treibhauseffekt ist beispielsweise bekannt durch das Aufheizen eines Wintergartens oder Gewächshauses. Spurengase in der Atmosphäre – sogenannte Treibhausgase (z.B. Kohlendioxid CO_2 , Methan CH_4) – lassen einfallende Sonnenstrahlung nahezu ungehindert in

¹⁷Aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Treibhausgase verschiedene Lebensdauern haben, muss ein Zeithorizont angegeben werden [39:254]; üblich sind 100 Jahre [39:254], [55:30].

die Erdatmosphäre eindringen, jedoch sind diese für Wärmestrahlung undurchlässig [55:29]. Die kurzwellige ultraviolette (UV) Strahlung trifft auf den Boden auf und wird in langwellige Infrarotstrahlung umgewandelt [55:29]. Hierbei wird ein Teil der Sonnenstrahlung absorbiert und der restliche Teil als Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) in die Atmosphäre abgestrahlt [55:29]. Der absorbierte Anteil führt zu einer Erwärmung der Erdoberfläche [73:11]. Die Treibhausgase verhindern ein Abstrahlen ins Weltall und absorbieren die von der Oberfläche zurückgeworfene Infrarotstrahlung [73:11]; auf diese Weise findet eine zusätzliche Wärmespeicherung in der Atmosphäre statt [55:29]. Dieses Phänomen tritt global auf [39:251].

Es wird zwischen natürlichem und (zusätzlichem) anthropogenem¹⁸ Treibhauseffekt unterschieden [39:252+253]. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt würde die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche bei ca. -18°C liegen [39:253]. Hierdurch wäre kein Lebewesen überlebensfähig [55:29]. Durch den natürlichen Treibhauseffekt liegt derzeit die Durchschnittstemperatur auf der Erde bei ca. 15°C [55:29]. Die durch menschliche Aktivitäten verursachten Emissionsmengen führen zu einer Konzentrationssteigerung der Spurengase in der Atmosphäre [74:81]. Der auf diese Weise erzeugte anthropogene Treibhauseffekt hat seit Ende des 19-ten Jahrhunderts zu einer eindeutig nachweisbaren Erwärmung des Klimas geführt [75:2]. Folglich führt eine Steigerung des Treibhauseffekts zu einer Erhöhung der Erderwärmung und hierdurch zu einer globalen Klimaänderung [74:81].

Ozonabbaupotenzial

Der outputbezogene Parameter Ozonabbaupotenzial, abgekürzt ODP (*Ozone Layer Depletion Potential*), repräsentiert die Zerstörung der stratosphärischen¹⁹ Ozonschicht (*Abbildung 2.8*) [54:34]. Das Ozonabbaupotenzial wird in Trichlorfluormethan-Äquivalenten (CFC11-Äq.) – abgekürzt als CFC11,

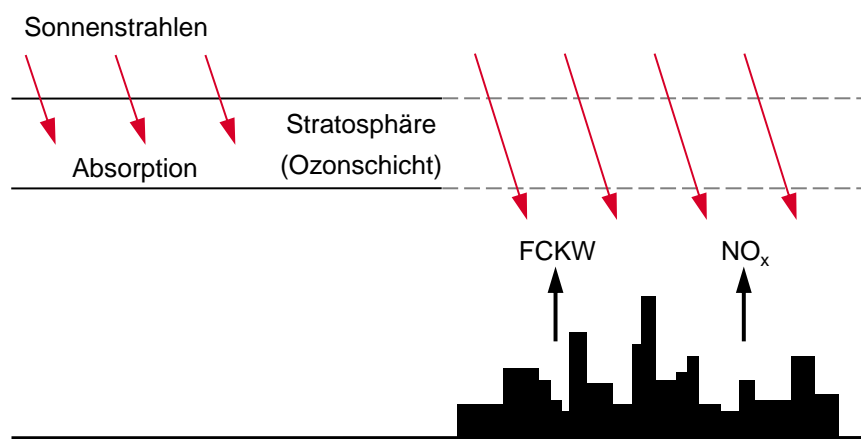


Abbildung 2.8: Ozonabbau, repräsentiert durch das Ozonabbaupotenzial (ODP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:339])

¹⁸Anthropogen: Vom Menschen geschaffen bzw. verursacht.

¹⁹Stratosphäre: Atmosphärensicht in der Höhe von etwa 12 km bis 50 km.

FCKW11 oder R11 – angegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der Baubranche in kg CFC11-Äq. [54:34] und bei ökologischen Betrachtungen von Gebäuden oftmals spezifisch [kg CFC11-Äq./((m²a))].

Der Abbau der Ozonschicht wird durch gasförmige Halogenverbindungen – Stickoxide (NO_x) und v.a. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) – verursacht [72:339]. Dabei zerstören wenige Halogenkohlenwasserstoffe – sogenannte Katalysatormoleküle – viele Ozonmoleküle [55:33]. Der Ozonabbau tritt jedoch mit einer zeitlichen Verzögerung von mehreren Jahren zwischen Emission und beginnender Wirksamkeit ein [39:258]. Der Ozonschichtabbau hat eine globale Wirkungscharakteristik [39:251].

Ozon ist ein Spurengas in der Atmosphäre und kann positiv oder negativ sein [55:37], d.h. Ozon ist in einer sehr geringen Konzentration in der Stratosphäre sowie Troposphäre²⁰ vorhanden [55:31]. Während Ozon in der Troposphäre schädliche Auswirkungen hat (siehe [Sommersmogpotenzial](#)), hat Ozon in der Stratosphäre eine positive Funktion [39:264]. Diese Schutzfunktion des Ozons ist die Absorption der UV-Strahlung – in einem bestimmten Wellenbereich (UV-B) – die schädlich für Mensch, Tier und Ökosystem ist [55:31]. UV-B Strahlung verursacht Schäden bei lebenden Organismen (z.B. Hautkrebs), bei Ökosystemen (z.B. Wuchsveränderungen) und die Abnahme des Planktons [74:82].

Versauerungspotenzial

Der outputbezogene Parameter Versauerungspotenzial, abgekürzt AP (*Acidification Potential*), repräsentiert die Versauerung von Boden und Wasser (*Abbildung 2.9*) [54:34]. Das Versauerungspotenzial wird in Schwefeldioxid-Äquivalenten (SO₂-Äq.) angegeben. Die Darstellung erfolgt in der Baubranche in kg SO₂-Äq. [54:34] und ist bei der Gebäudebetrachtung oftmals spezifisch [kg SO₂-Äq./((m²a))].

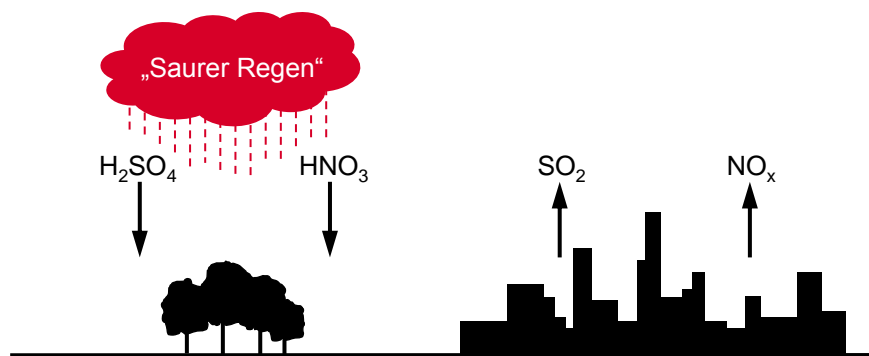


Abbildung 2.9: Versauerung, repräsentiert durch das Versauerungspotenzial (AP)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:340])

Die Versauerung beschreibt den Prozess, bei dem Luftschadstoffe in Säure (Schwefelsäure H₂SO₄, Salpetersäure HNO₃) umgewandelt werden [72:340]. Die Hauptemissionen mit versauernder Wirkung sind Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x) [55:34]. Die Versauerung ist ein globales Problem, die Folgen sind allerdings regional sehr unterschiedlich [55:34].

²⁰Troposphäre: Untere wetterwirksame Atmosphärenschicht in der Höhe von etwa 10 km bis 12 km.

Die Versauerung schädigt Gebäude, Vegetation, Böden, Gewässer und letztendlich den Menschen [55:34]. Hierbei zerstört der „Saure Regen“ nicht nur den Waldbestand, sondern fördert eine Korrosion der Bauwerke [72:340]. Insbesondere wird das Ökosystem der Erde negativ beeinflusst; es kommt zum Versauern von Böden und Gewässern sowie zum Waldsterben [39:273].

Eutrophierungspotenzial

Der outputbezogene Parameter Eutrophierungspotenzial, abgekürzt EP (*Eutrophication Potential*), repräsentiert die Eutrophierung, d.h. Überdüngung (*Abbildung 2.10*) [54:34]. Das Eutrophierungspotenzial wird in Phosphat-Äquivalenten (PO_4^{-3} -Äq.) angegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der Baubranche in kg PO_4^{-3} -Äq. [54:34] und bei der ökologischen Betrachtung von Gebäuden oftmals spezifisch [kg PO_4^{-3} -Äq./ (m^2a)].

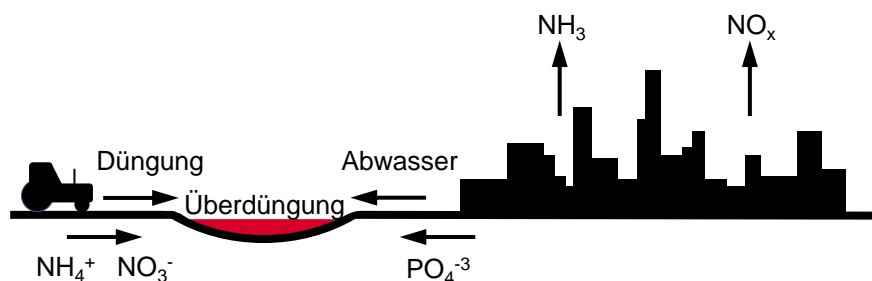


Abbildung 2.10: Überdüngung, repräsentiert durch das Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial (EP)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:341])

„Eutrophierung wird am besten mit Überdüngung oder Überangebot an Nährstoffen übersetzt.“ [39:281], d.h. unter Eutrophierung versteht man eine Nahrungs- und Nährstoffanreicherung [55:35]. Dies verursacht hauptsächlich die Landwirtschaft durch Überdüngung (Phosphate PO_4^{-3} , Nitrate NO_3^- , Ammonium NH_4^+), allerdings tragen auch Luftschadstoffe (Ammoniak NH_3 , Stickoxide NO_x) und Abwasserbestandteile zur Verstärkung bei [72:341]. Hierbei sind die Verursacher keine Schadstoffe im üblichen Sinn, sondern diese bewirken eine Änderung des Nährstoffangebots [39:281]. Die Überdüngung hat eine ähnliche Regionalisierung wie der Sommersmog und die Versauerung [39:251].

Durch übermäßigen Nährstoffeintrag treten bei Gewässern, Böden, Pflanzen und Menschen negative Konsequenzen auf [55:35]. Auswirkungen sind zum Beispiel verstärktes Algenwachstum in Gewässern [74:85]. Dies führt zu einem Sauerstoffmangel, der wiederum in Fischsterben und in ein „Umkippen“ des Gewässers mündet [72:341]. Die durch eine Überdüngung hervorgerufene erhöhte Nitratbelastung des Bodens führt zu Problemen bei der Trinkwassergewinnung und zur Veränderung von Vegetation (z.B. Artenarmut, erhöhte Schädlingsanfälligkeit) [55:36]. Besonders kritisch ist das aus Nitrat entstehende „Nitrit“, das hochtoxisch für den Menschen ist [74:85].

Sommersmogpotenzial

Der outputbezogene Parameter Sommersmogpotenzial, abgekürzt POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*), repräsentiert die photochemische Ozonbildung, d.h. die Bildung von troposphärischem bzw. bodennahem Ozon – auch Sommersmog genannt (*Abbildung 2.11*) [54:34]. Das Ozonabbaupotenzial wird in Ethen-Äquivalenten (C_2H_4 -Äq.) angegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der Baubranche in $kg C_2H_4$ -Äq. [54:34] und bei der ökologischen Betrachtung von Gebäuden oftmals spezifisch [$kg C_2H_4$ -Äq./ (m^2a)].

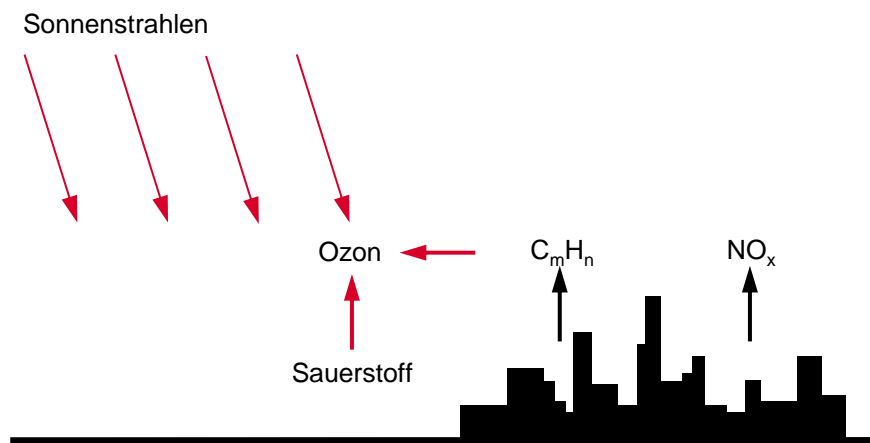


Abbildung 2.11: Bodennahe Ozonbildung, repräsentiert durch das Sommersmogpotenzial (POCP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:342])

Die Voraussetzungen für die Bildung von photochemischem Ozon (Sommersmog) sind eine hohe Intensität der Sonnenstrahlung, reaktive Stickstoffoxide (NO_x) und reaktiv flüchtige Kohlenwasserstoffe (C_mH_n) [39:264]. Unter komplexen photochemischen Reaktionen bildet und entwickelt sich das aggressive Ozon [72:342]. Sommersmog ist, im Gegensatz zur Klimaänderung und dem stratosphärischen Ozonabbau, stark kontinental bzw. regional begrenzt [39:251].

Wie beim [Ozonabbaupotenzial](#) bereits erläutert, ist im Gegensatz zum Ozon in der Stratosphäre, das bodennahe Ozon als schädliches Spurengas einzuordnen [55:37]. Ozon gilt als Zellengift und kann schon in geringer Konzentration beim Menschen zu Gesundheitsschäden führen [73:14]. Sommersmog löst Atembeschwerden aus und hat humantoxische Effekte, auch schädigt es die Vegetation [74:83].

Abiotischer Ressourcenverbrauch (Stoffe)

Der inputbezogene Parameter abiotischer Ressourcenverbrauch (Stoffe), abgekürzt ADP (*Abiotic Depletion Potential*), repräsentiert die Verknappung von abiotischen²¹ Ressourcen (*Abbildung 2.12 auf der nächsten Seite*) [54:34]. Der abiotische Ressourcenverbrauch wird in Antimon-Äquivalenten

²¹ Abiotisch: unbelebt, leblos, von der unbelebten Umwelt ausgehend.

(Sb-Äq.) angegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in der Baubranche in kg Sb-Äq. [54:34] und bei der ökologischen Betrachtungen von Gebäuden oftmals spezifisch [kg Sb-Äq./ (m^2a)].

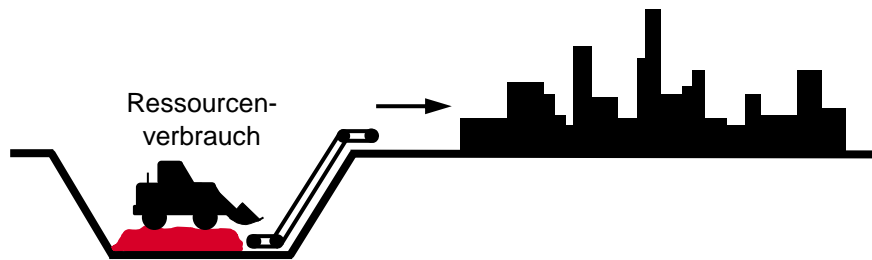


Abbildung 2.12: Ressourcenverbrauch (Bildung nicht durch Lebewesen bewirkt), repräsentiert durch den abiotischen Ressourcenverbrauch (ADP)

Der Charakterisierungsfaktor für jedes Element beim abiotischen Ressourcenverbrauch ist der Ressourcenverknappungsfaktor (Kehrwert der statischen Reichweite) [39:233]. Hierdurch werden praktisch unerschöpfliche Ressourcen (z.B. Sand, Salz) anders quantifiziert als knappe Ressourcen (z.B. Gold, Kupfer). Abiotisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass kein Lebewesen an der Bildung der Ressourcen beteiligt ist. Die Auswirkungen des abiotischen Ressourcenverbrauchs treten durch den Welthandel global in Erscheinung, sind jedoch regional begrenzt. Anzumerken sei hier noch, zum einen, dass neben dem stofflichen ADP noch ein ADP für die Verknappung der abiotischen Ressourcen hinsichtlich fossiler Energieträger existiert [54:34]; zum anderen, dass basierend auf den Werten in der ÖKOBAUDAT 2016 [76] die Ergebnisrobustheit und -vollkommenheit der ADP-Datensätze vom Autor angezweifelt werden.

2.2.3 Schwachstellen und Grenzen

Das LCA hat, wie jede Berechnungsmethode, Schwachstellen und Grenzen. Die Berechnungsmethode ist genormt (DIN EN ISO 14040 [18] und DIN EN ISO 14044 [19]), lässt jedoch Wahlfreiheit bei den Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen. Die DIN EN 15643-2 [8] und DIN EN 15978 [71] konkretisieren die umweltbezogene Betrachtung von Gebäuden, lassen jedoch ebenso Interpretationsspielräume. Hierdurch ergeben sich zwangsläufig verschiedene Ansätze bei der ökologischen Analyse. Daher beziehen sich die folgend genannten Defizite auf die generelle LCA-Methode. Im Kapitel 1.2 auf Seite 3 und Kapitel 2.4 auf Seite 26 werden die Probleme bei der ökologischen Gebäudebetrachtung aufgezeigt. Die allgemeinen LCA-Schwachstellen sind:

- Subjektivität, z.B. bei der Definition der Systemgrenzen oder der Festlegung der Wirkungskategorien [18:27]
- Nur eine Bestimmung der potenziellen Umweltauswirkung ist möglich [18:18], d.h. Schadstoff x (z.B. Schadstoffemission) könnte die Umweltbelastung y (z.B. Treibhauseffekt) haben [77:27]
- Nicht alle Umweltaspekte können vollständig, und wenn nur mittels Referenzeinheiten [18:18], eingeschätzt werden [18:5]

- Derzeit existiert keine weltweit allgemein anerkannte Methode für die genaue Zuordnung von Sachbilanzdaten zu den potenziellen Umweltauswirkungen [18:31]
- Ergebnis besteht aus mehreren Bewertungsparametern, da für das Bündeln zu einem Wert die wissenschaftliche Basis fehlt [18:19]
- Auswirkungen auf die Umwelt basieren auf Modellen, welche nur mit Einschränkungen die Realität abbilden [18:18]
- Fehlender räumlicher und zeitlicher Bezug führt zu Unsicherheiten in den Ergebnissen [18:31]
- Ergebnis hängt von der Aktualität, Verfügbarkeit und Genauigkeit der Datenbanken und der Umweltproduktdeklarationen ab

Reap u.a. [78] stellen im Allgemeinen als besonders verbesserungswürdig die funktionelle Einheit, die Auswahl der Rahmenbedingungen, die Allokation (Verteilung), die räumliche Dimension, die lokale Einzigartigkeit und die Datenverfügbarkeit / -qualität dar [78:384]. Die LCA-Schwachstellen können durch eine bewusst transparente Darstellung minimiert werden.

Allerdings existieren neben den Schwachpunkten auch LCA-Grenzen:

- Beschränkte Anwendbarkeit bei der Nachhaltigkeitsbewertung (*Abbildung 2.13*), d.h. sofern technische, gesellschaftliche und / oder ökonomische Fragen beantwortet werden sollen [31:48]
- Ökologischer Vergleich nur möglich, sofern Annahmen (Methodik, Datenqualität, Systemgrenzen [39:30]) und Zielsetzung einander entsprechen [18:5]
- Suffizienz- und Konsistenzstrategien²² sind nicht direkt ableitbar, da der Ursprungsgedanke die Effizienz ist, d.h. Quantifizierung und folglich Optimierung der potenziellen Umweltauswirkungen

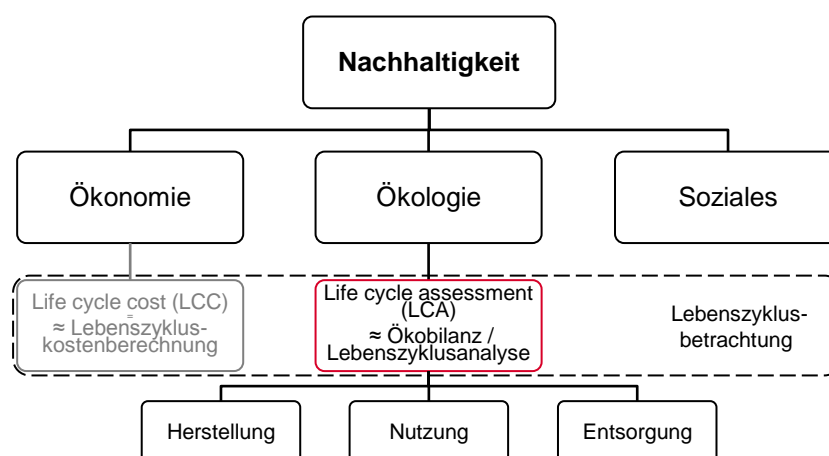


Abbildung 2.13: LCA als Bewertungsmethodik für die Ökologie, als eine Säule der Nachhaltigkeit

Weitere Grundlagen der ökologischen Betrachtung sind im Allgemeinen in Klöpffer u.a. [39] bzw. speziell für das LCA von Gebäuden in König u.a. [31] und Eyerer u.a. [55] beschrieben.

²²Siehe hierzu auch Kapitel 1.1 auf Seite 1.

2.3 Life cycle assessment-Anwendung

2.3.1 Allgemeine Anwendung

Abbildung 2.14 zeigt eine Auswahl der derzeitigen LCA-Anwendungsgebiete. In verschiedenen Industriesektoren wird die Methode für die ökologische Produktbeurteilung eingesetzt und ist folglich etabliert [67:1594], [79:9], [80:1033], [81:1725]. Die meisten international agierenden Unternehmen haben eine eigene Abteilung, die sich mit ökologischen Fragestellungen beschäftigt [82:147]. Zudem zeigen zum Beispiel Dissertationen, dass in diversen Forschungsbereichen umweltrelevante Problemstellungen mit Hilfe der LCA-Berechnungsmethode beantwortet werden. Beispielsweise wird in der Dissertation von Reckmann [83] die Wertschöpfungskette von Schweinefleisch bzw. bei Wötzel [84] die Altfahrzeugverwertung ökobilanziell betrachtet. Des Weiteren nützt Berenz [85] das LCA, um im Energieversorgungssektor den Biomasseeinsatz ökologisch zu bewerten. Eine weitere beispielhafte Doktorarbeit [86] beschäftigt sich in der Abwasserentsorgung mit der ökologischen Vorteilhaftigkeit von verschiedenen Abwassersystemen. Ebenso wird das LCA im Verpackungssektor zum Beispiel in der Dissertation von Prituzhalova [87] benutzt, um vergleichende Untersuchungen zwischen Deutschland und Russland anzustellen. Ferner finden ökologische Bilanzierungen im Baugewerbe statt, das nachfolgend detaillierter beschrieben wird. Aufgeteilt ist die vertiefende Darstellung in Baumaterialien und -produkten, Bauelementen sowie schwerpunktmäßig in Gebäuden; eine Betrachtung von anderen Bauten (z.B. Brücken, Tunnel), bei denen ebenfalls die LCA-Methode angewandt wird, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Dissertation und wird deshalb nicht vertieft.

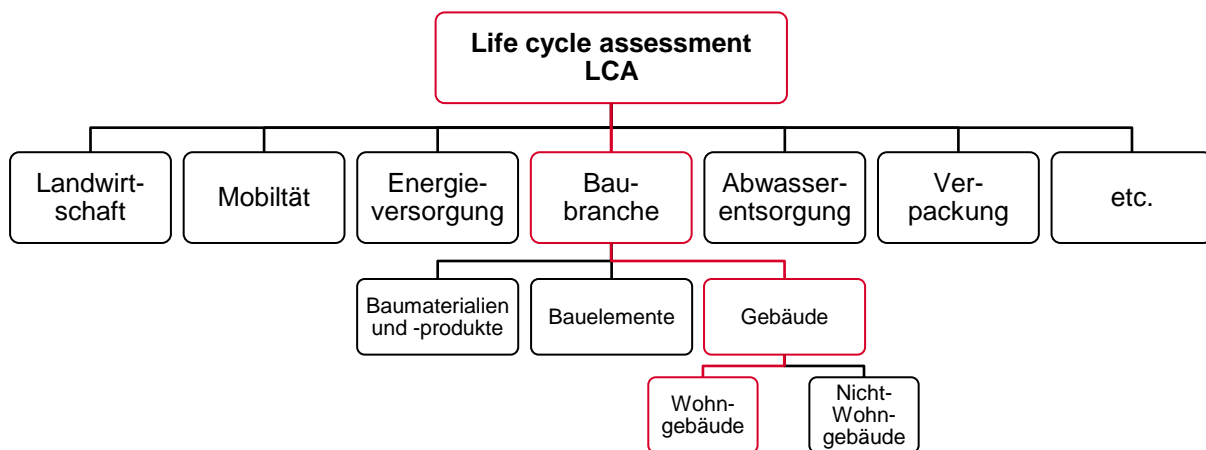


Abbildung 2.14: LCA-Anwendungsgebiete

Verallgemeinernd bleibt festzuhalten, dass das LCA eine breite Anwendung über alle Sektoren hinweg erfährt. Prinzipiell finden ökologische Betrachtungen als Entscheidungshilfe in zwei Ebenen statt: zum einen auf der Produktebene (z.B. Produktoptimierung); zum anderen auf der Metaebene (z.B. Sektorenanalyse).

2.3.2 Anwendung in der Baubranche

Baumaterialien und -produkte

Die ökologische Betrachtung von Baumaterialien und -produkten ist die Grundlage für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen (*Environment Product Declaration (EPD)*). In der DIN EN 15804 [54] werden die Rahmenbedingungen für die EPDs von Bauprodukten geregelt. EPDs liefern keine ökologische Bewertung, sondern stellen verifizierte Ökobilanzdaten und weitere Informationen bereit [88:48]. Hierdurch fördern EPDs den Wettbewerb hinsichtlich ökologischerer Baumaterialien [89:1134]. Zudem erlangen Hersteller durch EPDs Kenntnisse über die produktrelevanten Einflüsse, um folglich diese ökologisch zu optimieren [90:89].

Bauelemente

Ein weiterer Teil der ökologischen Bilanzierung im Gebäudesektor findet bei Bauelementen bzw. -komponenten statt, um ebenfalls EPDs (nach DIN EN 15804 [54]) zu erstellen oder um die Variante mit den geringsten möglichen Umweltauswirkungen zu finden. Beispielsweise werden Holzaußenwände [91], Fassaden [92], [93], Tragwerkssysteme [94], [95], Betondecken [96] und verschiedene Heiz- und Lüftungssysteme [51], [97] (allerdings ohne Berücksichtigung des Einflusses der Gebäudehülle) ökologisch verglichen.

Gebäude

Im Bausektor ist allgemein anerkannt, dass durch zukünftig steigenden Baustandard mehr Ressourcen in Gebäuden gebunden werden, z.B. wird mit höherem gesetzlichen Baustandard mehr Dämmmaterial verbaut. Hierdurch erhöht sich der Anteil an Eingebundener Energie in zukünftig gebauten und sanierten Gebäuden. Des Weiteren haben verschiedene Autoren ([68:256], [98:66], [99:202], [100:388]) festgestellt, dass trotz steigender Eingebundener Energie, Gebäude mit höherem energetischen Standard im kompletten Lebenszyklus effizienter sind; deshalb sollte im Allgemeinen zuerst der Energieaufwand im Betrieb reduziert und anschließend die anderen Phasen (u.a. Herstellung) optimiert werden [68:256], [81:1730], [99:202].

Mittlerweile ist die ökologische Betrachtungsweise von Gebäuden in die Normung eingeflossen und somit Stand der Technik. DIN EN ISO 14040 [18] und DIN EN ISO 14044 [19] sind die Ursprungsnormen für das LCA. Die Grundlagen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden sind in den Normen DIN EN 15643-2 [8] und DIN EN 15978 [71] enthalten. Ferner existiert in der Schweiz die SIA 2032 [57] (Graue Energie von Gebäuden) bzw. in Deutschland die Richtlinie über den kumulierten Energieaufwand (VDI 4600 [50]). Jedoch ist die „[...] heutige Anwendung der Gebäude-Ökobilanz [...] noch als „Randerscheinung“ in Planung, Ausführung und Betrieb von Gebäuden zu bezeichnen.“ [29:75].

LCA-Datenbanken und LCA-Programme zur Unterstützung der ökologischen Berechnung sind mittlerweile Status quo. Mit der ÖKOBAUDAT [76] existiert in Deutschland eine anerkannte Baustoffdatenbank für die Bestimmung ökologischer Wirkungen von Baumaterialien und Baukomponenten bzw. Bauteilen – weitere Datenbanken siehe beispielsweise Takano u.a. [101:23], Wittstock u.a. [102:316–318]. Zudem existieren verschiedene deutsche Programme, die die computergestützte ökologische Betrachtung von Gebäuden ermöglichen (LEGEP [103], SBS-onlinetool [104], eLCA [105], Ökobilanz-Bau [106]) – weitere internationale Programme siehe beispielsweise Wittstock u.a. [102:320+321], Haapio u.a. [107:472], Bribian u.a. [108:2511+2512], Hollberg u.a. [109:948].

Derzeit werden unterschiedlichste Gebäudearten mit verschiedenen Energiestandards bilanziert. Die ökologischen Analysen von Gebäuden finden vornehmlich in Industrieländern statt [110:35], [111:407]. Hier sind Nicht-Wohngebäude Untersuchungsobjekte (z.B. [49], [112], [113]), ebenso werden Wohngebäude mit Standardenergieverbrauch (z.B. [114]–[119]) und hohem Energiestandard (z.B. [120]–[139]) ökologisch untersucht.

Festzustellen ist, dass die ökologische Betrachtung von Gebäuden derzeit möglich, jedoch – wie von vielen Autoren ([29:61], [72:331], [131:870], [140:3734]) angemerkt – komplex und zeitaufwendig ist. Nach Hauser u.a. [141:42] verursacht die ökologische Bilanzierung aufgrund des erheblichen Zeitaufwandes die größten Kosten bei der Gebäudezertifizierung. Dies beruht unter anderem darauf, dass die derzeitigen Standards von und für Experten konzipiert sind [142:353]. Trotzdem ist ein LCA, d.h. eine ganzheitliche Betrachtung von Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gebäudes unabdingbar [17:555], [47:646], [68:256], [89:1134], [143:131]. Dies zeigt sich zum Beispiel zum einen durch die verpflichtende Anwendung bei der Nachhaltigkeitszertifizierung für Gebäude (z.B. nach DGNB [22], BNB [23]); zum anderen, wie in *Abbildung 2.15 auf der nächsten Seite* ersichtlich, am steigenden Interesse, Gebäude mittels LCA zu untersuchen [17:552].

Nach dem derzeitigen Stand werden Gebäude vornehmlich in puncto Primärenergie sowie bei den Umweltindikatoren hinsichtlich des Treibhauspotenzials ökologisch bewertet. Dies zeigt sich beispielsweise bei den Dissertationen von Siraki [48:25], John [145:90], Schulter [146:61] und Ritter [147:25]. Die beiden Indikatoren werden gewählt, da die Primärenergie und das Treibhauspotenzial in der nationalen und internationalen politischen Entscheidungsfindung die griffigsten und gängigsten Begriffe sind [148:92]. Jedoch ist es ebenso bedeutsam, andere Wirkungsindikatoren zu betrachten, da eine Reduzierung des Treibhauspotenzials nicht zwangsläufig eine Minderung anderer Indikatoren zur Folge hat [52:344], [73:116].

Hinsichtlich des Standes der Forschung bei der ökologischen Analyse von Gebäuden, können Aktivitäten hinsichtlich einer noch ganzheitlicheren Denkweise erkannt werden. Ein Beispiel ist die Integration der Infrastruktur in die Gebäudebetrachtung (z.B. [69], [149]). Ein Weiteres wäre die Erweiterung des bisherigen „Cradle to Grave-Ansatzes“ („Wiege bis zur Bahre“) zu „Cradle to Cradle“ („Wiege bis zur Wiege“) (z.B. [150], [151]).

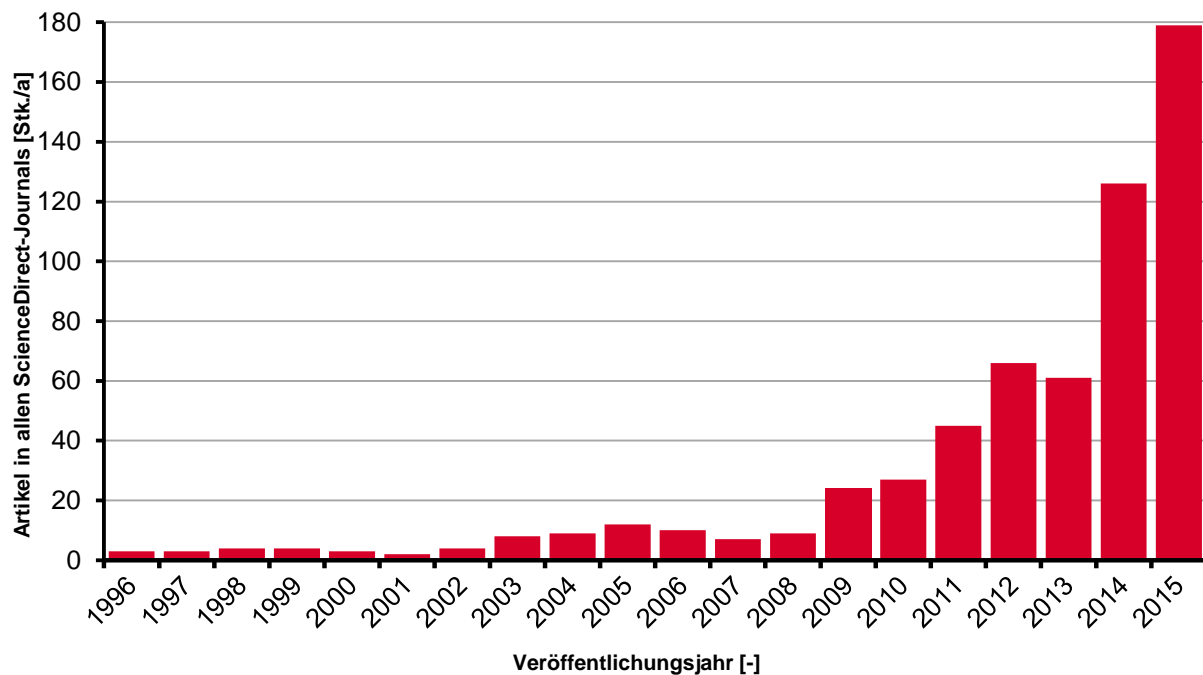


Abbildung 2.15: Entwicklung der Veröffentlichungen bezüglich Gebäude und LCA
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [144] mit Suchbegriffen: „Life cycle assessment“, „LCA“, „Building“ in der Kategorie „Abstract, Title, Keywords“; [17:552] aktualisiert)

Der Stand der Wissenschaft bezüglich einer detaillierteren und genaueren ökologischen Betrachtung von Gebäuden, speziell der Gebäudetechnik, ist auf niedrigem Niveau – quantitativ wie auch qualitativ. Aufgrund der Tatsache, dass das LCA der Anlagentechnik deutlich komplexer ist als die anderen Gebäudeelemente, wird diese häufig nicht berechnet [129:319]. Des Weiteren stellt Passer [74] in seiner Dissertation fest, dass in der Literatur „[...] keine brauchbare Information zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität der Haustechnik gefunden werden [...]“ [74:125] konnte. Ferner zeigt Passer [74] auf, dass die Gebäudetechnik bei der umweltbezogenen Bewertung nicht vernachlässigt werden darf [74:180]. In den seltenen Fällen, in denen die Gebäudetechnik bei Wohngebäuden berücksichtigt wird, werden lediglich nur die Hauptkomponenten betrachtet²³ [152:228]. Allgemein kann konstatiert werden, dass die Gebäudetechnik ökologisch unzureichend genau betrachtet wird; hierdurch existieren keine Verfahren bzw. Methoden, diese vereinfacht zu berücksichtigen.

Derzeit liegen nur wenige Publikationen vor, die den ressourcenbezogenen Einfluss der Gebäudetechnik unter Berücksichtigung der Gebäudehülle von Wohngebäuden ganzheitlich analysieren. Dies liegt u.a. – wie in *Abbildung 2.15* ersichtlich – an der Tatsache, dass das LCA von Gebäuden ein relativ neues Thema ist.

²³Siehe hierzu auch Kapitel 3.2.2 auf Seite 34.

2.4 Abgrenzung zu anderen Publikationen

(1) Die Gebäudetechnik in Verwaltungs- und Bürogebäuden wurde in Veröffentlichungen wie Stoffregen u.a. [153] und Pohl [154] analysiert. In Stoffregen u.a. [153] wurde aufgezeigt, dass die Haustechnik trotz eines sehr geringen Massenanteils von 1 % bis 4 % einen hohen Umwelteinfluss haben kann (7 % bis 23 %) [153:18]. Ebenfalls wurde in Pohl [154] dargestellt, dass die Gebäudetechnik nicht vernachlässigbar ist [154:91]. Aufgrund des ausschließlichen Vergleichs von Nicht-Wohngebäuden mittels des vereinfachten und detaillierten LCA-Verfahrens, wurde auf eine detailliertere ökologische Untersuchung von Wohngebäuden verwiesen [154:95].

(2) Die Dissertation von Renner [155] betrachtete die lebenszyklusorientierte Bewertung der Umweltwirkungen von Wohngebäuden ohne die Gebäudetechnik. Der Passivhausstandard wurde als energetisches und ökologisches Optimum aufgezeigt [155:213]. Allerdings wurde die Anlagentechnik nicht mitbilanziert; es wurde jedoch angeregt, dies zukünftig zu tun [155:217].

(3) Wohngebäude wurden ohne Variation des Niedrigstenergiegebäudestandards in Blengini u.a. [131], König [156], López [157] ökologisch untersucht. Blengini u.a. [131] bilanzierten ein italienisches Niedrigenergiewohngebäude, u.a. mündet die detaillierte Berechnung der Gebäudetechnik in die Aussage, dass diese von geringen Belangen im Lebenszyklus sei [131:876]. Jedoch wurden in der Studie keine Variationen der Technik und des Niedrigstenergiestandards vorgenommen. Die Bestimmung der Orientierungswerte für die ökologische Bewertung von Wohngebäuden gründet, bei vollständiger Erfassung der Gebäudetechnik, in der Studie [156] auf dem Wärmestandard der EnEV 2009 und des Passivhausstandards. Deshalb wird in dieser Studie empfohlen, weitere unterschiedliche energetische Niveaus zu betrachten [156:94]. Ein Einfamilienhaus nach der EnEV 2009 mit sechs solar unterstützten Versorgungssystemen wurde in der Dissertation von López [157] betrachtet: hierbei stellt sich das solar unterstützte Wärmepumpensystem mit Multi-Splitklimagerät als die umweltökonomisch beste Variante heraus [157:123]. Allerdings erfolgte keine Berechnung unterschiedlicher Energiestandards.

(4) Siraki [48] bewertet in seiner Dissertation ein Einfamilienhaus unter Lebenszyklusperspektive mittels dreier Indikatoren. Die Auswertung der Kosten-Umweltbelastungs-Diagramme ergab als beste Variante aller Energieklassen den Passivhausstandard [48:128]. Jedoch ist die Aussage nur für die Indikatoren: Kosten, kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionen gültig; andere potenzielle Umweltauswirkungen wurden nicht betrachtet. Zudem weist Siraki auf die genauere Untersuchung von unterschiedlichen Wohngebäudetypen hin [48:130].

(5) Eine Berücksichtigung der Gebäudetechnik fand bei Thiers u.a. [134], John [145] und Passer [74] statt, jedoch ohne die Gebäudetechnik zu modifizieren bzw. diese detailliert zu untersuchen. Das LCA von zwei französischen Wohngebäuden mit vier Heizsystemvarianten wurde im Rahmen der Dissertation von Thiers (französisch) untersucht und in Thiers u.a. [134] zusammengefasst wiedergegeben. Die Ergebnisse sind auf Deutschland allerdings nur bedingt übertragbar, da der französische Strommix einen 75 %-igen Atomkraftanteil aufweist [134:283] und hieraus unterschiedliche potenzielle Umweltauswirkungen resultieren. Des Weiteren wurde angeregt, verschiedene Heizsysteme

und Niedrigstenergiegebäudestandards zu analysieren [134:283]. 12 Schweizer Mehrfamilienhäuser wurden in der Dissertation von John [145] ökobilanziell untersucht: festgestellt wurde, dass durch die Berücksichtigung von Fußböden, Decken, Außen- und Innenwänden, Dach und Fenstern, Elektro-, Heizungsinstallation und Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) sowie dem Energiebedarf von Heizung, Warmwasser, Lüftung und Haushaltsstrom die wesentlichen Komponenten für die umweltrelevante Gebäudebetrachtung erfasst werden [145:179]; jedoch wurden bei der Analyse der Gebäudetechnik nur die Hauptkomponenten berücksichtigt [145:B22–B166]. In der Dissertation von Passer [74] wurden die Prioritäten für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden in Österreich untersucht: auf der Basis von fünf Wohnhausanlagen konnte die Passivbauweise als ökologisch vorteilhaft sowie die Gebäudetechnik als maßgeblicher Einflussparameter identifiziert werden [74:187]. Nach Passer [74] erscheint eine nähere Betrachtung der Bauprodukte v.a. der Gebäudetechnik als sinnvoll [74:187].

Aus den vorangegangenen Absätzen ((1) bis (5)) leitet sich die Forschungslücke ab. Bisherige Publikationen haben

- (1) keine Wohngebäude betrachtet,
- (2) die Gebäudetechnik unzureichend berücksichtigt,
- (3) den Niedrigstenergiegebäudestandard nicht variiert,
- (4) nicht mehrere Umweltindikatoren und Gebäudetypen analysiert sowie
- (5) keine Variation und detaillierte Analyse einschließlich Vereinfachungsstrategien der Gebäudetechnik vorgenommen (*Abbildung 2.16*).



Abbildung 2.16: Forschungslücken bei bisherigen Veröffentlichungen und Dissertationen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bisher die Gebäudetechnik über verschiedene Niedrigstenergiegebäudestandards in Wohngebäuden mit unterschiedlichen Umweltindikatoren nicht detailliert betrachtet wurde, d.h. eine Arbeit, die mehrere Wohngebäudetypen über unterschiedliche Gebäudestandards mit verschiedener Gebäudetechnik variiert, ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht bekannt; zudem konnten keine Informationen hinsichtlich vereinfachter ökologischer Betrachtung der Gebäudetechnik gefunden werden.

2.5 Kurzzusammenfassung

- 2.1 Geschichtliche Entwicklung:

⇒ Ausgehend von der Verpackungsindustrie ist das *life cycle assessment* (LCA = Ökobilanz) genormt. Das LCA ist geeignet, immer energieeffizienter werdende Gebäude ganzheitlich ökologisch zu beurteilen.

- 2.2 Life cycle assessment-Grundlagen:

⇒ Das LCA ist eine anerkannte Methode, um die potenziellen Umweltauswirkungen zu bestimmen. Für die ökologische Bewertung werden unterschiedliche energetische und umweltbezogene Parameter verwendet, diese unterteilen sich in Betriebsbedingte Energie bzw. Emissionen (BE) und Eingebundene Energie bzw. Emissionen (EE) auf. Die Schwachstellen der Berechnungsmethode sind durch transparente Darstellung minimierbar.

- 2.3 Life cycle assessment-Anwendung:

⇒ Verschiedene Publikationen zeigen, dass die ökologische Analyse ein breites Anwendungsgebiet in grundverschiedenen Sektoren hat. In der Baubranche wird das LCA ebenfalls angewandt, meist jedoch nur von Spezialisten und Wissenschaftlern.

- 2.4 Abgrenzung zu anderen Publikationen:

⇒ Unterschiedliche Wohngebäude mit Variationen des Niedrigstenergiegebäudestandards und v.a. der Gebäudetechnik wurden bisher nicht detailliert betrachtet; ebenso wenig die vereinfachte ökologische Bewertung der Gebäudetechnik.

► **Das LCA ist eine mittlerweile genormte und breit angewandte Berechnungsmethode; allerdings ist die ökologische Betrachtung derzeit für das Bauwesen – speziell für die Gebäudetechnik – zu zeitaufwendig und komplex.**

KAPITEL 3

Metaanalyse von Niedrigstenergiewohngebäuden

3.1 Grundlagen zur Metaanalyse

3.1.1 Einführung

Es folgt eine Metaanalyse über 21 europäische Fallstudien [108], [120]–[139] mit 27 Wohngebäuden²⁴. Die betrachteten Gebäude entsprechen dem Passivhausstandard (12 von 27 Gebäuden) oder sind von einer ähnlichen bzw. besseren energetischen Bauqualität und wurden in „peer-reviewed Papers“ veröffentlicht. Eine Übersicht inklusive Gebäudekriterien und -kennwerte über die 27 Wohngebäude (81 m² bis 4000 m²) befindet sich in *Tabelle A.1 auf Seite 178* im *Anhang*.

Im Rahmen der Metaanalyse werden die Fallstudien nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet. Hierbei werden u.a. der Korrelationskoeffizient nach Pearson und der Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE}) verwendet, die nachfolgend erläutert werden.

3.1.2 Korrelationskoeffizient nach Pearson

Der Korrelationskoeffizient ist eine dimensionslose Maßzahl mittels derer die Stärke des Zusammenhangs (Korrelation) zwischen zwei Variablen angegeben wird [158:426]. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ist eine statistische Methode und kann unter folgenden Voraussetzungen angewandt werden:

- Linearer Zusammenhang muss vorherrschen, da eine andere Korrelation (z.B. U-förmig) durch den Korrelationskoeffizienten nach Pearson nicht erfasst wird [158:426], [159:138]
- Korrelierende Daten müssen intervallskalierte Variablen sein [158:426], aufgrund der prinzipiellen Eignung nur für metrische bzw. quantitative Daten [159:140]
- Beide Größen müssen normalverteilt sein [158:426], d.h. die Daten müssen symmetrisch um den Mittelwert verteilt sein (typische Gaußverteilung)

²⁴14 der 27 Gebäude wurden in Weißenberger u.a. [152:228] analysiert.

Sind die drei Voraussetzungen erfüllt²⁵, kann die Berechnung nach *Gleichung 3.1* erfolgen [159:139]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
\bar{x}	Mittelwert der zu korrelierenden Größen X
\bar{y}	Mittelwert der zu korrelierenden Größen Y
x_i	Wert der korrelierenden Größe X mit i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
y_i	Wert der korrelierenden Größe Y mit i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
n	Anzahl der Wertepaare x_i und y_i

Hierbei liegt der Korrelationskoeffizient r zwischen -1 und + 1 [159:139]:

$ r = 1$	Sehr starker bzw. perfekter linearer Zusammenhang
$r = 0$	Kein linearer Zusammenhang
$r > 0$	Positiver linearer Zusammenhang
$r < 0$	Negativer linearer Zusammenhang

Wobei für r gilt [159:139]:

$0, 0 \leq r < 0, 5$	Kein bis schwacher linearer Zusammenhang
$0, 5 \leq r < 0, 8$	Mittlerer linearer Zusammenhang
$0, 8 \leq r \leq 1, 0$	Starker bis sehr starker bzw. perfekter linearer Zusammenhang

3.1.3 Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE})

Im Rahmen von ökologischen Berechnungen werden Absolut- und Prozentwerte bestimmt. Die Eingebundene Energie wird oftmals als Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch im Lebenszyklus angegeben, z.B. 2 % bis 38 % [68:253] des gesamten Energieverbrauchs bei Standardgebäuden. Allerdings ist eine derartige Darstellung auf Gebäude beschränkt, die keine Energie in der Nutzungsphase erzeugen. Infolge der Energieerzeugung reduziert sich die Lebenszyklus-Energie; hierdurch wird der Nenner klein und auf diese Weise das Endergebnis bei der Verhältnisbildung sehr groß, d.h. Prozentwerte wesentlich größer als 100 % sind der Fall. Ist die Energieerzeugung so groß, dass die Lebenszyklus-Energie vollständig kompensiert wird, ist eine Berechnung mathematisch nicht möglich (Nenner ist 0). Folglich ist für die Analyse der Verhältnisse der Eingebundenen Energie, v.a. bei Plusenergiegebäuden, eine neue Darstellung notwendig. Ebenso soll zukünftig eine Berücksichtigung

²⁵In dieser Arbeit sind alle Voraussetzungen eingehalten; sollten keine quantitativen Variablen und / oder nicht normalverteilte Daten vorliegen, ist der Korrelationskoeffizient nach Spearman (Erklärung der Methode siehe [158:428–429], [159:142–148]) anwendbar.

der potenziellen Umweltauswirkungen erfolgen. Deshalb wird der Lebenszyklus-Energiefaktor bzw. -Emissionsfaktor mit *Gleichung 3.2* als neue Beurteilungsgröße vorgeschlagen²⁶:

$$f_{LZE} = \frac{BE}{EE} \quad (3.2)$$

f_{LZE}	Lebenszyklus-Energiefaktor oder Lebenszyklus-Emissionsfaktor
BE	Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen (Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]: B6 & B7) ²⁷
EE	Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen (Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]: A1-A5 & B1-B5 & C1-C4 & D) ²⁸

Wobei für f_{LZE} gilt:

$f_{LZE} > 1$	Verbrauch bzw. Emissionen im Betrieb des Gebäudes dominieren, um den Faktor f_{LZE}
$f_{LZE} = 1$	BE/EE-Verhältnis ist 1 zu 1 bzw. 50 % zu 50 %, d.h. das Bauwerk des Gebäudes bindet im Lebenszyklus ebenso viel Ressourcen bzw. emittiert Emissionen wie im Betrieb
$f_{LZE} < 1 \wedge > 0$	EE beeinflusst maßgeblich die Bilanz über den kompletten Lebenszyklus, da der Betrieb einen Anteil von $< 50\%$ hat
$f_{LZE} = 0$	Kein bilanzieller Verbrauch bzw. Emissionen im Betrieb des Gebäudes
$f_{LZE} < 0 \wedge > -1$	EE wird durch die Energieproduktion in der Nutzungsphase verringert, d.h. ein Teil der EE wird über den Lebenszyklus zurückgewonnen
$f_{LZE} = -1$	Exakt soviel Energie wird in der Nutzungsphase produziert bzw. Emissionen eingespart, wie Ressourcen im Gebäude gebunden bzw. emittiert wurden, d.h. die komplette EE wird über den Lebenszyklus zurückgewonnen
$f_{LZE} < -1$	EE wird durch die Produktion von Energie bzw. durch die Einsparung von Emissionen vollständig kompensiert und eine negative Lebenszyklusbilanz entsteht

Eine reine Beurteilung mittels f_{LZE} ist allerdings nicht zielführend, da nur das Verhältnis zwischen BE und EE angegeben wird. So stellt beispielsweise ein f_{LZE} von 4 dar, dass zwischen BE und EE ein Verhältnis von 4 zu 1 herrscht oder, anders ausgedrückt, BE machen 80 % bzw. EE 20 % aus. Des Weiteren vermittelt zum Beispiel ein f_{LZE} von 0 nicht, wie viel Energie im gesamten Gebäudelebenszyklus benötigt wird, d.h. bei gleichem f_{LZE} kann die Lebenszyklus-Energie bzw. -Emissionen variieren. Deshalb sollten die Lebenszyklus-Energie bzw. Emissionen die Hauptparameter

²⁶Der Faktor f_{LZE} wurde auszugsweise veröffentlicht in Weißenberger u.a. [160:83].

²⁷Exakte Definition siehe *Gleichung 4.6 auf Seite 49*.

²⁸Exakte Definition siehe *Gleichung 4.5 auf Seite 48*.

für die ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden sein. Der Faktor f_{LZE} zeigt jedoch auf, welche Verhältnisse zwischen Eingebundener Energie bzw. Emissionen und Betriebsbedingter Energie bzw. Emissionen herrschen und stellt folglich eine Erweiterung der bisherigen Betrachtungsweise dar. Zudem ist eine Kategorisierung der Gebäudearten (Null-, Plusenergiegebäude etc.) sowie eine Beurteilung der – derzeit in der Baupraxis vernachlässigten – EE möglich.

3.2 Analyse der Fallstudien

3.2.1 Rahmenbedingungen

Die Herstellungs- und Nutzungsphase wurden bei allen Fallstudien [108], [120]–[139] berechnet (100%), hingegen die Entsorgungsphase nur bei 76%. Die Instandhaltung (B2-B5 nach DIN EN 15978 [71]), ein Teil der Nutzungsphase, wurde bei 16 von 21 Fallstudien (76%) betrachtet – jedoch wurde hierbei teilweise die Instandhaltung in die Herstellungsphase integriert. Der Energieverbrauch im Betrieb (B6 nach DIN EN 15978 [71]) wurde zu 100% in die ökologische Betrachtung mit einbezogen, gleichwohl teilweise unterschiedliche Energieverbräuche berücksichtigt oder explizit außer Acht gelassen wurden (z.B. elektrischer Verbrauch).

Der Betrachtungszeitraum variiert bei den betrachteten Fallstudien zwischen 30 und 100 Jahren. Der Beweggrund für 30 Jahre ist, beispielsweise in Verbeeck u.a. [133], dass nach dem Generationenwechsel – eine Generation bewohnt das Gebäude über 30 Jahre – aufgrund der hohen Unsicherheit an Umbaumaßnahmen, keine weiteren Annahmen gemacht werden können [133:966]. Andere Betrachtungszeiträume sind ebenso nach Ermessen der Autoren angenommen. Ein Zeitraum von über 100 Jahren wurde in keiner der Fallstudien angenommen; gleichermaßen ist dies für andere Gebäudetypen bei weiteren Metaanalysen ([47:646], [68:250], [100:384], [111:408–413], [161:874]) zu beobachten. Wie aus *Abbildung 3.1* deutlich wird, ist der Betrachtungszeitraum von 50 Jahren am häufigsten.

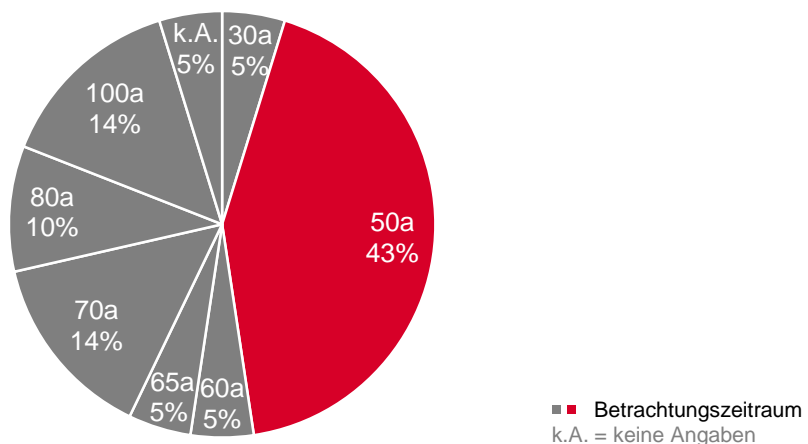


Abbildung 3.1: Zusammenstellung der Betrachtungszeiträume
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – Tabelle A.1 auf Seite 178)

Eine einheitliche und somit übliche funktionelle Einheit²⁹ ist in den untersuchten Fallstudien nicht erkennbar. Hierdurch beziehen sich die Ergebnisse beispielsweise auf unterschiedliche Bezugsflächen. Um dennoch die Studien miteinander vergleichen zu können (Kapitel 3.2.3 auf Seite 35 und Kapitel 3.2.4 auf Seite 37), wurden die Ergebnisse spezifisch in m^2 (meist beheizte Fläche bzw. sofern angegeben Netto-Raumfläche) und Jahr umgerechnet. Hierbei hat sich die Angabe von anderen Flächenangaben (Brutto-, Netto-, Nutzungsfläche, beheizte Fläche) als hilfreich herausgestellt; denn durch einfache Umrechnung konnten die meisten Werte auf eine einheitliche Basis gebracht werden (z.B. $25 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ bei 1000 m^2 Brutto-Geschossfläche ergibt $30 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ bei 833 m^2 Netto-Raumfläche).

Eine Vergleichbarkeit der 21 Fallstudien untereinander ist nur bedingt gegeben, obwohl es sich hierbei um „peer-reviewed Papers“ handelt. Braune [29:71], Berggren u.a. [100:388], Cabeza u.a. [111:407] und Bastos u.a. [162:346] kritisieren die ungenügende Vergleichbarkeit bei ökologischen Bilanzierungen bei Gebäuden ebenfalls; hierdurch ist eine transparente Gegenüberstellung nicht gegeben [163:483]. Ein Eins-zu-eins-Vergleich ist nicht möglich, wengleich die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden (DIN EN 15978 [71]) sowie die Methode des LCA (DIN EN ISO 14040 [18] und DIN EN ISO 14044 [19]) genormt ist [152:228]. Die Dokumentation der Berechnungsgrundlagen, wie Rechenregeln und verwendete Datenbank, variieren und sind teilweise unvollständig. Auf diese Weise wird ein allgemeiner Wissenszuwachs im Hinblick auf das ökologische Bauen erschwert [164:1018]. Aufgrund der fehlenden Transparenz konnten keine allumfassenden Erkenntnisse bezüglich ökologisch bevorzugtem Bautyp, Konstruktionsweise, Beheizungsart etc. gewonnen werden. Daher lassen sich, bis zum Vereinheitlichen der Rechenregeln, Rahmenbedingungen und Systemgrenzen, nur ungefähre Trends aus der existierenden Literatur ableiten.

Anzumerken bleibt, dass die analysierten Gebäude in den Fallstudien nicht auf gleichen Datenbanken und Fassungen basieren. Wie von verschiedenen Autoren ([44:400], [46:315], [74:163], [101:29], [137:2441]) diskutiert, können unterschiedliche Datenbanken die Ergebnisse teilweise erheblich beeinflussen. Trotzdem erfolgt nun ein quantitativer Vergleich hinsichtlich der Primärenergie und des Treibhauspotenzials. Aufgrund der Tatsache, dass derzeit – wie im Kapitel 2.3.2 auf Seite 23 beschrieben – bei der ökologischen Betrachtung von Gebäuden die Primärenergie und das Treibhauspotenzial fokussiert werden, können angesichts teilweiser fehlender Daten in den Fallstudien andere Wirkungskategorien nicht analysiert werden.

Verallgemeinernd bleibt festzuhalten, dass eine transparente Darstellung essentiell für die Nachvollziehbarkeit und folglich für die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist. Mit Zunahme der zeitlichen Entfernung steigt die Unsicherheit; demzufolge wird die Herstellung und Nutzung häufiger und exakter als die Entsorgung betrachtet. Generell werden Zeiträume kleiner als 100 Jahre betrachtet, wobei sich eine Tendenz zu 50 Jahren erkennen lässt. Als Gesamterkenntnis bezüglich der funktionellen Einheit kann festgestellt werden, dass eine spezifische Angabe – für die nachträgliche Vergleichbarkeit – sinnvoll ist, wobei andere Bezugsflächen mit angegeben werden sollten.

²⁹Dient als Vergleichseinheit bei quantifizierten Nutzen [18:10], d.h. auf Gebäude bezogen, wird durch die funktionelle Einheit die Gleichwertigkeit der wesentlichen Gebäudeeigenschaften sichergestellt.

3.2.2 Gebäudetechnik

Die Herstellungsphase der Gebäudetechnik wurde heterogen betrachtet. Insgesamt wurden in 71 % der Fallstudien der Herstellungsprozess der Gebäudetechnik in irgendeiner Form berücksichtigt. Allerdings ist hierbei die Nachvollziehbarkeit, welche Baukomponenten betrachtet wurden, nicht immer gegeben. *Abbildung 3.2* zeigt, dass, falls eine Beachtung stattfand, die Erzeugung am häufigsten erfasst wurde. Ebenso ist ersichtlich, dass ein relativ hoher Anteil (57 % (Erzeugung) bis 86 % (Übergabe)) keine Angaben zur Gebäudetechnik gemacht hat bzw. diese vernachlässigt. Beides bestätigt die im Kapitel 1.2 auf Seite 3 und Kapitel 2.3.2 auf Seite 23 getroffenen Aussagen, dass die Gebäudetechnik ökologisch ungenau betrachtet wird.

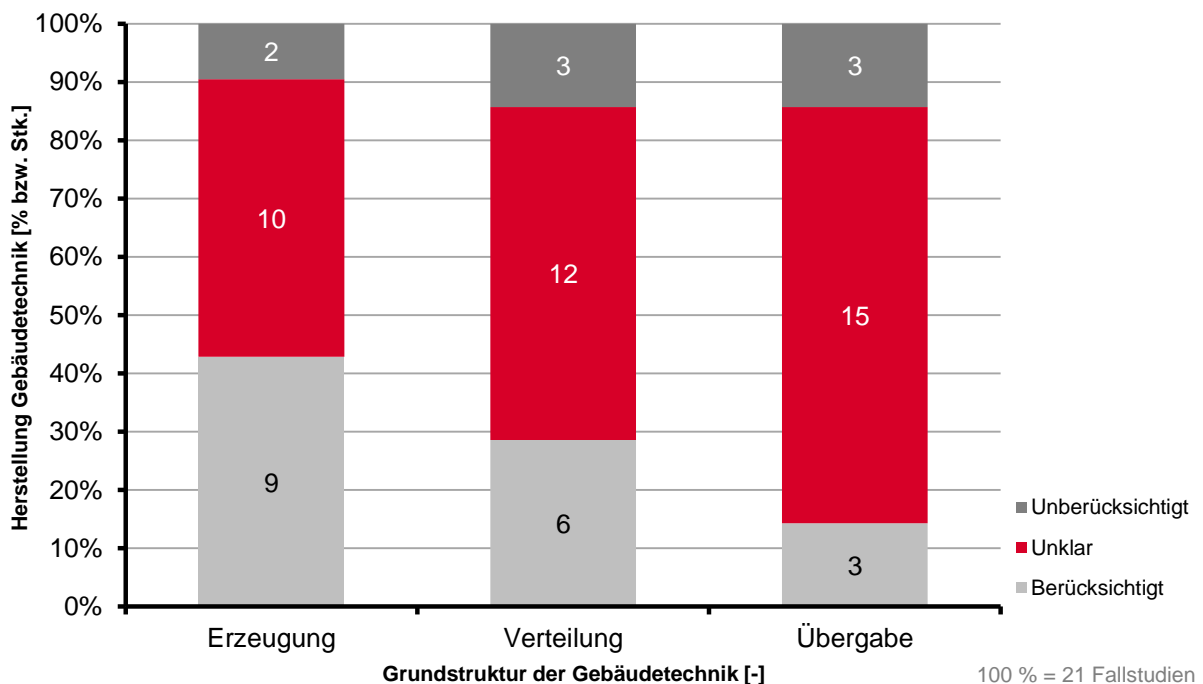


Abbildung 3.2: Betrachtung der Gebäudetechnik (Herstellungsphase)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – Tabelle A.1 auf Seite 178)

Der Energieverbrauch im Betrieb (B6 nach DIN EN 15978 [71]) wurde – wie im Kapitel 3.2.1 auf Seite 32 bereits erwähnt – bei allen Fallstudien berücksichtigt. Die Heizenergie wurde als einziges zu 100 % betrachtet. Andere Energieverbräuche in der Nutzungsphase werden unterschiedlich betrachtet. Beispielsweise wurde der elektrische Energieverbrauch des Nutzers im Gebäude in 76 % der Fallstudien berücksichtigt, in 3 von 21 Fallstudien (14 %) bewusst vernachlässigt und bei einer Fallstudie wurde hierüber keine Aussage getroffen³⁰.

Bei der Metaanalyse der 21 Fallstudien konnte eine deckungsgleiche Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung der Gebäudetechnik nicht erkannt werden. Generell bedeutet dies, dass die Gebäudetechnik nicht einheitlich und meist zu ungenau betrachtet wurde.

³⁰Weitere Daten zum Energieverbrauch im Betrieb, siehe hierzu auch *Tabelle A.1 auf Seite 178* im Anhang.

3.2.3 Eingebundene Energie

Abbildung 3.3³¹ zeigt, dass bei abnehmender Primärenergie im Betrieb des Gebäudes die Lebenszyklus-Energie (Herstellung, Nutzung, Entsorgung) sowie der f_{LZE} sinkt, folglich nimmt die Bedeutung der Eingebundenen Energie bzw. des Bauwerks zu. Zudem steht in den Fallstudien, die betriebsbedingte Energie in der Nutzungsphase nahezu linear der Lebenszyklus-Energie gegenüber, d.h. sinkt im Betrieb die Primärenergie wird der Primärenergieinhalt des Lebenszyklus geringer³². Nach dem Korrelationskoeffizienten nach Pearson ist ein sehr hoher signifikanter linearer Zusammenhang ($r = 0,94$, p -Wert $< 0,001$) zwischen Lebenszyklus-Energie und Betriebsbedingter Energie gegeben. Hierbei soll die Linearität nicht darüber hinwegtäuschen, dass energieeffizientere Gebäude im Betrieb einen höheren Ressourcenaufwand und somit höhere potenzielle Umweltauswirkungen für das Bauwerk haben. Der lineare Zusammenhang zwischen Betrieb und Lebenszyklus bezieht sich auf die Fallstudien und kommt hier zustande, da die Betriebseinsparungen größer sind als die Zunahme der Aufwendungen für das Bauwerk. Die Linearität ist konform mit Ergebnissen von anderen Metaanalysen von Gebäuden (siehe [67:1596], [68:252], [100:385]).

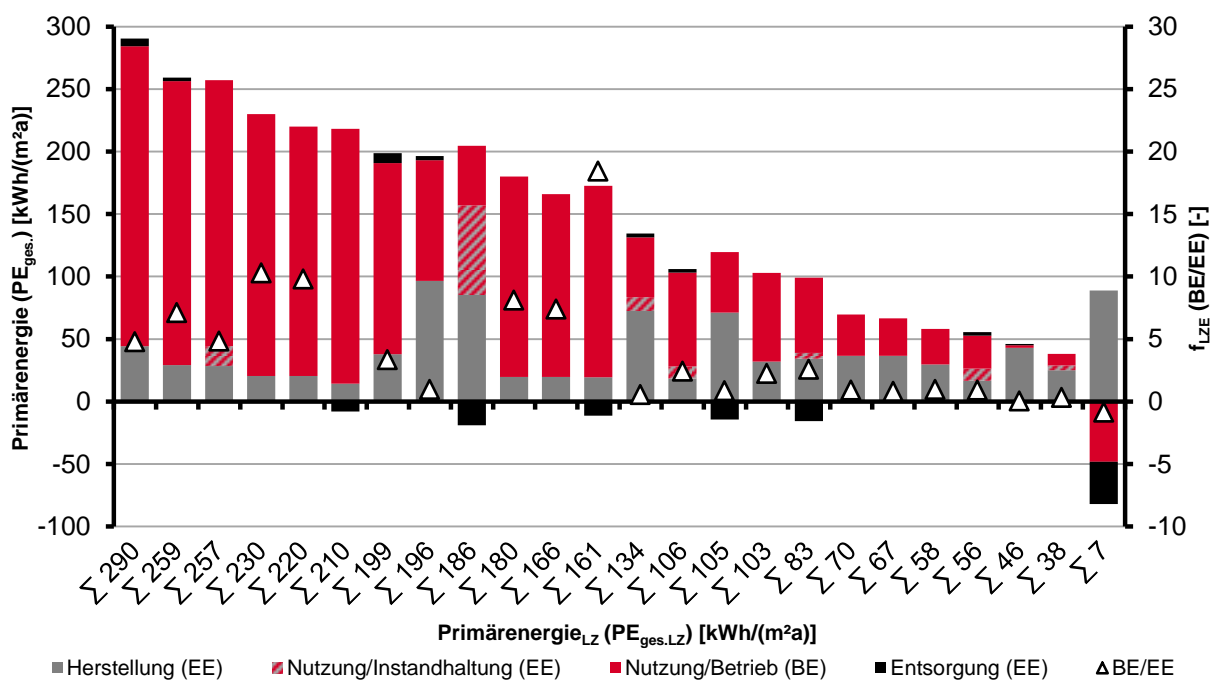


Abbildung 3.3: Primärenergie für Herstellung, Nutzung (Instandhaltung und Betrieb) sowie Entsorgung inkl. Faktor f_{LZE}
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – Tabelle A.1 auf Seite 178)

³¹Die Daten der Metaanalyse wurden auf Extremwerte überprüft und bereinigt – siehe hierzu auch Anhang A auf Seite 177. Sichtbar ist dies in *Abbildung 3.3* bei dem Wert 210 kWh/(m²a), dieser enthält keinen f_{LZE} , da mit 32 der Wert als Extremausreißer gewertet wurde und folglich unberücksichtigt bleibt; ebenso bei 186 kWh/(m²a), aufgrund des sehr hohen Aufwandes durch die Instandhaltung.

³²Siehe hierzu auch *Abbildung A.1 auf Seite 177* im Anhang.

Für diese wie auch für alle zukünftigen Abbildungen sei anzumerken, dass der Index bzw. Zusatz „LZ“ bei den Bewertungsparametern für Lebenszyklus steht, d.h. es wurde die Herstellung, die Nutzung (Betrieb und Instandhaltung) sowie Entsorgung betrachtet; „BE“ steht für die Betriebsbedingte Energie / Emissionen bzw. „EE“ für Eingebundene Energie / Emissionen.

Des Weiteren kann allgemein festgestellt werden, dass der Gebäudebetrieb bei Standardgebäuden dominiert, jedoch bei hohem Energiestandard die Herstellungs- und Entsorgungsphase an Bedeutung gewinnt. Beispielsweise beträgt die Eingebundene Energie 10 % bis 20 % [67:1594] bzw. 2 % bis 38 % [68:253] bei Standardenergiegebäuden und verschiebt sich zu 9 % bis 46 % [68:253] bei Niedrigenergiegebäuden. Optis u.a. [47] weisen das Bauwerk bzw. die Eingebundene Energie von Gebäuden mit 3 % bis 54 % aus [47:645]. Dies entspricht einen f_{LZE} von 0,9 bis 32. Hall [165] gibt als Mittelwert für die Graue Energie (nur nicht erneuerbare Primärenergie) bei Minergie-A- und Nullenergiewohngebäuden 36 % bis 42 % (f_{LZE} 1,4 bis 1,8) an [165:201]. Wie ersichtlich wird, liegt bei Niedrigstenergiewohngebäuden der Faktor f_{LZE} bei - 0,9 bis 18. Betrachtet man Fallstudien, die einen $PE_{ges.LZ}$ von $< 150 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ haben, beläuft sich der Faktor f_{LZE} im Durchschnitt auf ca. 1 (- 0,9 bis 2,6). Folglich sinkt f_{LZE} im Mittel von ca. 5,7 bzw. ca. 4 für Wohngebäude mit normalem Standard auf ca. 1 für Gebäude mit einem sehr hohen Energiestandard, d.h. Standardgebäude benötigen 5,7-mal mehr Betriebsenergie als Energie in den Baumaterialien (inklusive deren Vorketten) im Bauwerk gebunden sind; demgegenüber verschiebt sich das Verhältnis zu 1 zu 1.

Aufgrund der Tatsache, dass voraussichtlich der Baustandard steigen wird und hierdurch mehr Ressourcen, z.B. Dämmmaterial benötigt werden, wird neben zunehmender Bedeutung der verbauten Materialien der quantitative Anteil der potenziellen Umweltauswirkungen des Bauwerks weiter steigen. Die SIA 2032 [57] beziffert derzeit die Graue Energie (nur nicht erneuerbare Primärenergie) mit $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bis $28 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [57:4]. Bei Standardenergiewohngebäuden liegt die Eingebundene Energie bei ca. $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bis $80 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [67:1598]. Die EE in Niedrigstenergiewohngebäuden macht $8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bis $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ³³ über den kompletten Lebenszyklus aus. Die große Bandbreite hinsichtlich der Eingebundenen Energie beruht auf den mannigfaltigen Rahmenbedingungen in den Fallstudien. Durchschnittlich beträgt die Eingebundene Energie des Bauwerks in den Fallstudien ca. $39 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Es lässt sich schlussfolgern, je höher die Energieeinsparung im Betrieb, desto (linear) weniger Primärenergie wird, bei steigender Eingebundener Energie, im Gebäudelebenszyklus benötigt. Hierbei kommt es zu einer Verschiebung der Verhältnisse zwischen Eingebundener Energie und Betriebsbedingter Energie, d.h. das Bauwerk bzw. die Baumaterialien haben teilweise einen größeren Einfluss als der Betrieb. Insgesamt betrachtet, haben Gebäude mit einem niedrigeren Baustandard einen geringeren Anteil (prozentual und absolut) an der Eingebundenen Energie, bei höherer Lebenszyklus-Energie.

³³Hierbei bleibt anzumerken, dass die Werte für das Bauwerk konservativ sind, da der Aufwand für die Instandhaltung mitunter in der Nutzungsphase integriert ist und aufgrund mangelnder Daten bzw. der fehlenden Transparenz in den untersuchten Fallstudien nicht herausgerechnet werden konnte – siehe hierzu auch *Tabelle A.1 auf Seite 178* im Anhang.

3.2.4 Treibhauspotenzial

Wie in *Abbildung 3.4* ersichtlich, sind das Treibhauspotenzial und der Primärenergieinhalt abhängig voneinander, d.h. verbraucht ein Gebäude im Lebenszyklus weniger Energie, werden ebenso weniger Treibhausgase emittiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Energie überwiegend fossil erzeugt wurde bzw. wird. Bei den Fallstudien liegt das Treibhauspotenzial zwischen $-1 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ und $51 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$. Gleichermäßen wie bei der Eingebundenen Energie ist die relativ große Bandbreite auf die unterschiedlichen Rahmenbedingungen in den Studien zurückzuführen. Der Durchschnittswert für die analysierten Niedrigstenergiewohngebäude beträgt ca. $21 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ ³⁴. Zum Vergleich³⁵: (1) Zertifizierte NaWoh-Wohngebäude [24] erfüllen mindestens einen Wert von $24 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$; Werte geringer als $17 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ werden in die Kategorie „übererfüllt“ eingeordnet bzw. $< 12 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ in „deutlich übererfüllt“ [27]. (2) Wohngebäude haben nach dem Bewertungssystem BNK [25] als Bewertungsmaßstab $24,6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ (Minimalwert), $17,8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ (Referenzwert) oder $9,4 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ (Maximalwert) [167].

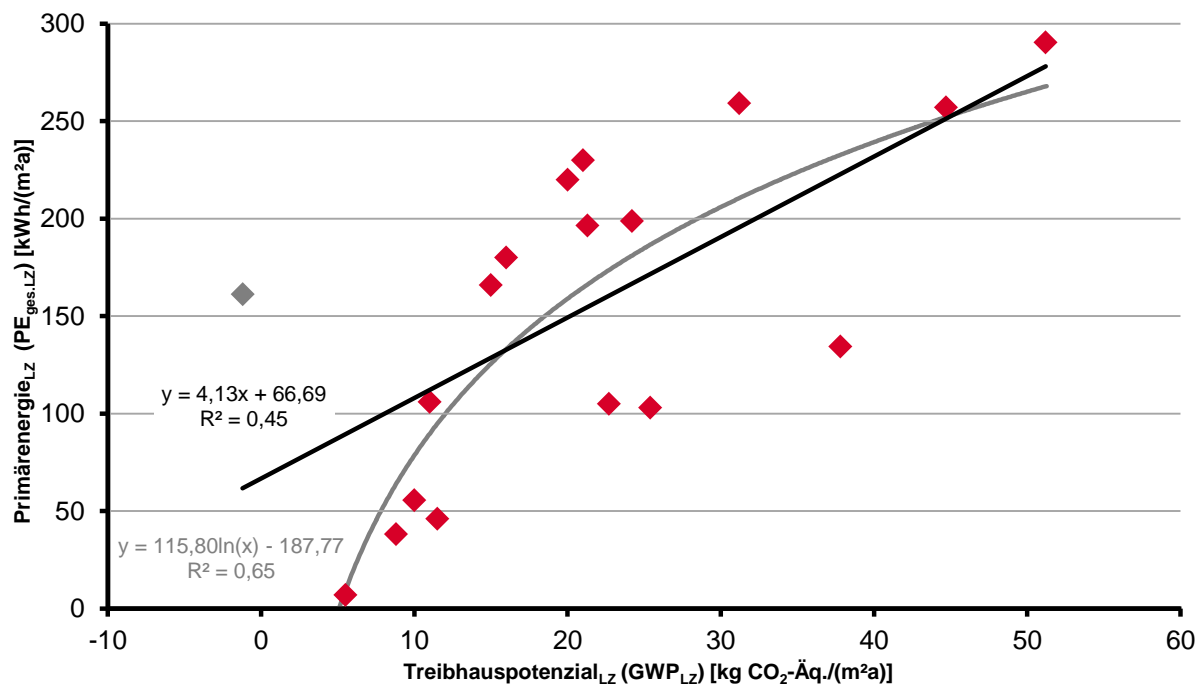


Abbildung 3.4: Zusammenhang: Treibhauspotenzial und Primärenergieinhalt
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[123], [125], [126], [129]–[131], [134]–[136] – siehe Tabelle A.1 auf Seite 178)

Anzumerken ist, dass der GWP-Wert von Gustavsson u.a. [128] mit $-1 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2\text{a})$ (grau in *Abbildung 3.4*) von den anderen Daten abweicht, jedoch das Ergebnis nur geringfügig beeinflusst. Der einzige negative Emissionswert gründet auf der relativ hohen Gutschrift für die Rückgewinnung der

³⁴ *Abbildung 3.4* basiert auf 18 Datenpunkten, hingegen die quantitativen Werte auf 20 Datensätzen, da in 2 Berechnungen keine Angaben zur Primärenergie gemacht wurden – siehe hierzu auch *Tabelle A.1 auf Seite 178*.

³⁵ Zertifizierungssysteme beurteilen anhand von definierten Grenzwerten Zielkategorien, wobei niedrige Emissionen eine bessere Einstufung zur Folge haben. Die Werte beziehen sich auf $\text{m}^2_{\text{NGF}_a}$ bzw. nach neuer DIN 277-1 [166]: $\text{m}^2_{\text{NRF}_R}$.

Biomasse in der Herstellungsphase [128:233+239]. Bleibt dieser Wert unberücksichtigt, beträgt das Treibhauspotenzial im Mittel ca. 23 kg CO₂-Äq./((m²a)) (3 kg CO₂-Äq./((m²a)) bis 51 kg CO₂-Äq./((m²a))). Des Weiteren steigt das Bestimmtheitsmaß R² von 0,45 auf 0,56. In beiden Fällen korreliert das Treibhauspotenzial mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,67 (mit) bzw. 0,75 (ohne), d.h. ein mittlerer linearer Zusammenhang zwischen Treibhauspotenzial und Primärenergieinhalt ist über den kompletten Lebenszyklus vorhanden. Diese Werte erwiesen sich zudem als statistisch signifikant (p-Wert = 0,002 bzw. p-Wert = 0,001). Sofern der GWP-Wert von - 1 kg CO₂-Äq./((m²a)) nicht berücksichtigt wird, beschreibt eine logarithmische Trendlinie diesen Sachverhalt sogar noch besser (R² = 0,65); dies bedeutet, dass je nach Datenauswahl das GWP und PE_{ges.} linear oder logarithmisch abhängig sind; jedenfalls besteht ein Zusammenhang.

Im Allgemeinen kann bezüglich des Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen festgestellt werden, dass im kompletten Lebenszyklus eines Gebäudes ein Zusammenhang zwischen Primärenergieinhalt und Treibhauspotenzial besteht; folglich kann durch effizienten Umgang mit dem Thema Energie das Treibhauspotenzial von Gebäuden gesenkt werden.

3.3 Kurzzusammenfassung

- 3.1 Grundlagen zur Metaanalyse:

⇒ Der Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE} = Verhältnis von Betriebsbedingter Energie bzw. Emissionen zu Eingebundener Energie bzw. Emissionen) stellt eine Erweiterung der derzeitigen Betrachtungsweise dar; hierdurch ist die Berücksichtigung der Eingebundenen Energie bzw. Emissionen für alle Gebäudestandards realisierbar.

- 3.2 Analyse der Fallstudien:

⇒ Die Rahmenbedingungen sowie Vernachlässigungen sind mannigfaltig; folglich wird ein allumfassender Wissenszuwachs gehemmt. Die Gebäudetechnik wird meist zu unpräzise berücksichtigt. Bei geringerem Verbrauch im Gebäudebetrieb sinkt nahezu linear die Primärenergie im Lebenszyklus, bei einem steigenden Anteil der Eingebundenen Energie. Der f_{LZE} verschiebt sich im Mittel von ca. 4 bzw. 5,7 (Standardgebäude) zu ca. 1 (PE_{ges.LZ} < 150 kWh/(m²a)). Es herrscht ein Zusammenhang zwischen Primärenergieinhalt und Treibhauspotenzial.

(Eingebundene Energie bzw. Treibhauspotenzial bei den Fallstudien über Niedrigstenergiewohngebäuden: 8 kWh/(m²a) bis 100 kWh/(m²a) bzw. - 1 kg CO₂-Äq./((m²a)) bis 51 kg CO₂-Äq./((m²a)))

► **Es kann ein Trend zu mehr Eingebundener Energie bei sinkender Gesamtprimärenergie und (abhängig hiervon) fallendem Treibhauspotenzial erkannt werden; wenngleich die Fallstudien uneinheitliche Rahmenbedingungen aufweisen. Die Gebäudetechnik wird unzureichend betrachtet.**

KAPITEL 4

Berechnungsgrundlagen für die ökologische Analyse

4.1 Rahmenbedingungen

4.1.1 Life cycle assessment

In dieser Arbeit wird das prozessbasierte LCA³⁶ auf Basis der DIN EN ISO 14040 [18], DIN EN ISO 14044 [19], DIN EN 15643-2 [8] und DIN EN 15978 [71] angewandt. Wie im Kapitel 2.2.1 auf Seite 9 beschrieben, besteht das LCA nach DIN EN ISO 14040 [18] aus vier sich gegenseitig beeinflussenden Elementen. Für die ökologische Betrachtung in dieser Arbeit bedeutet dies:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens:
Das Ziel ist die ökologische Untersuchung von Niedrigstenergiewohngebäuden (Ein- und Mehrfamiliengebäude³⁷), um deren potenziellen Umweltauswirkungen bei unterschiedlichen Niedrigstenergiebaustandards zu quantifizieren sowie die Hauptkomponenten bzw. Leitpositionen des Bauwerks einschließlich der Gebäudetechnik zu analysieren. Untersucht wird der komplette Lebenszyklus des Gebäudes, von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung einschließlich Recyclinggutschrift. Funktionelle Einheit ist 1 m² Netto-Raumfläche (Regelfall) (NRF_R)³⁸ nach DIN 277-1 [166] des Wohngebäudes bei gleichen technischen und funktionellen Anforderungen über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Der Untersuchungsrahmen ist im Kapitel 4.1.2 auf der nächsten Seite ausführlich dargestellt.
- Sachbilanz:
Zu Beginn werden alle Stoffmengen und -arten der Baukomponenten für die Herstellung einschließlich der jeweiligen Instandhaltungszyklen berechnet bzw. ermittelt. Ebenso werden

³⁶Die unterschiedlichen Arten mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen wurden bereits im Kapitel 2.2.1 auf Seite 9 diskutiert.

³⁷Wohngebäude mit maximal zwei Wohnungen repräsentieren ca. 92 % der fertiggestellten Neubauten (2000 bis 2014) [168:4–9]. Zudem ergeben Einfamilien- und Reihenhäuser sowie Mehrfamiliengebäude in Summe ca. 98 % des deutschen Gebäudebestands [169:2], aus diesem Grund und u.a. wegen ihrer andersartigen Bauausführung werden große Wohnobjekte nicht berücksichtigt.

³⁸Alt: Netto-Geschossfläche Bereich a (NGF_a) – eine Umrechnung auf andere Basiseinheiten (z.B. Brutto-Geschossfläche) ist leicht möglich (siehe hierzu auch Kapitel 3.2.1 auf Seite 32 mit einer Beispielrechnung).

die Energiemengen, die für den Gebäudebetrieb notwendig sind, erfasst. Die Sachbilanz ist im Anhang B auf Seite 179 hinterlegt. Die Basis, auf der die Sachbilanzdaten beruhen, ist im Kapitel 4.2 auf Seite 55 und Kapitel 4.3 auf Seite 59 sowie Kapitel 4.4 auf Seite 64 erläutert.

- Wirkungsabschätzung:
Diese ermittelten Energie- und Stoffwerte (Sachbilanz) werden mit ökologischen Daten (Datenbank ÖKOBAUDAT 2016-I [76]) verbunden. Schließlich lassen sich durch die Verknüpfung zwischen der Sachbilanz der Gebäude und den LCA-Daten die potenziellen Umweltauswirkungen (Wirkungsabschätzung) über alle Lebenszyklusphasen aufzeigen. Die Bewertungsparameter sind im Kapitel 4.1.2 und die Datengrundlage im Kapitel 4.1.4 auf Seite 50 beschrieben.
- Auswertung:
Zuletzt erfolgt die Auswertung, hier im Kapitel 5 auf Seite 73.

4.1.2 Untersuchungsrahmen

Räumliche Systemgrenze

Wie in *Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite* dargestellt, wird die Gebäudeaußenkante als räumliche Systemgrenze angesehen, d.h. es werden nur Materialien bilanziert, die direkt mit dem Haus verbunden sind. Demzufolge wird die Außenanlage (KG 500 nach DIN 276-1 [170]) und die Baugrube³⁹ (KG 310 nach DIN 276-1 [170]) der Gebäude nicht berücksichtigt, da diese zum einen keinen Einfluss auf den Gebäudestandard haben; zum anderen bei allen Gebäudevarianten gleich und folglich unabhängig von der Betrachtung sind. Ebenso wird die öffentliche Infrastruktur ökologisch vernachlässigt. Dieses Vorgehen entspricht auch den Vorgaben [26], [27] des DGNB [22] / NaWoh [24].

Zeitliche Systemgrenze

Der Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wird als zeitliche Systemgrenze angenommen (*Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite*). Zum einen werden in Deutschland beim Zertifizierungsprozess des DGNB [22] / NaWoh [24] 50 Jahre als Rahmenbedingung vorgeschrieben [26], [27]; zum anderen hat die Metaanalyse⁴⁰ 50 Jahre als häufigsten Betrachtungszeitraum ergeben. Beides sind Gründe dafür, dass in dieser Arbeit mit 50 Jahren gerechnet wird⁴¹.

³⁹Anzumerken sei hierbei, dass der Gebäudeaushub einen wesentlichen Anteil in der Abfallbilanz darstellt, beispielsweise macht der Bodenaushub in Bayern 66 % der Bauabfälle aus [171:16]. Allerdings relativiert sich diese Bewertung, da hiervon der Großteil (82 % in 2012) für die Verfüllung von übertägigen Abbaustätten wiederverwendet wurde [171:16]. Im Allgemeinen wurden in 2012 in Bayern 90 % des Bodenaushubs verwertet (Verfüllung, Recycling etc.) [171:16].

⁴⁰Siehe hierzu auch Kapitel 3.2.1 auf Seite 32.

⁴¹Eine Betrachtung mit unterschiedlichen Gebäudelebensdauern hat Passer [74], König u.a. [172], Paleari u.a. [173] und Stranska u.a. [174] durchgeführt.

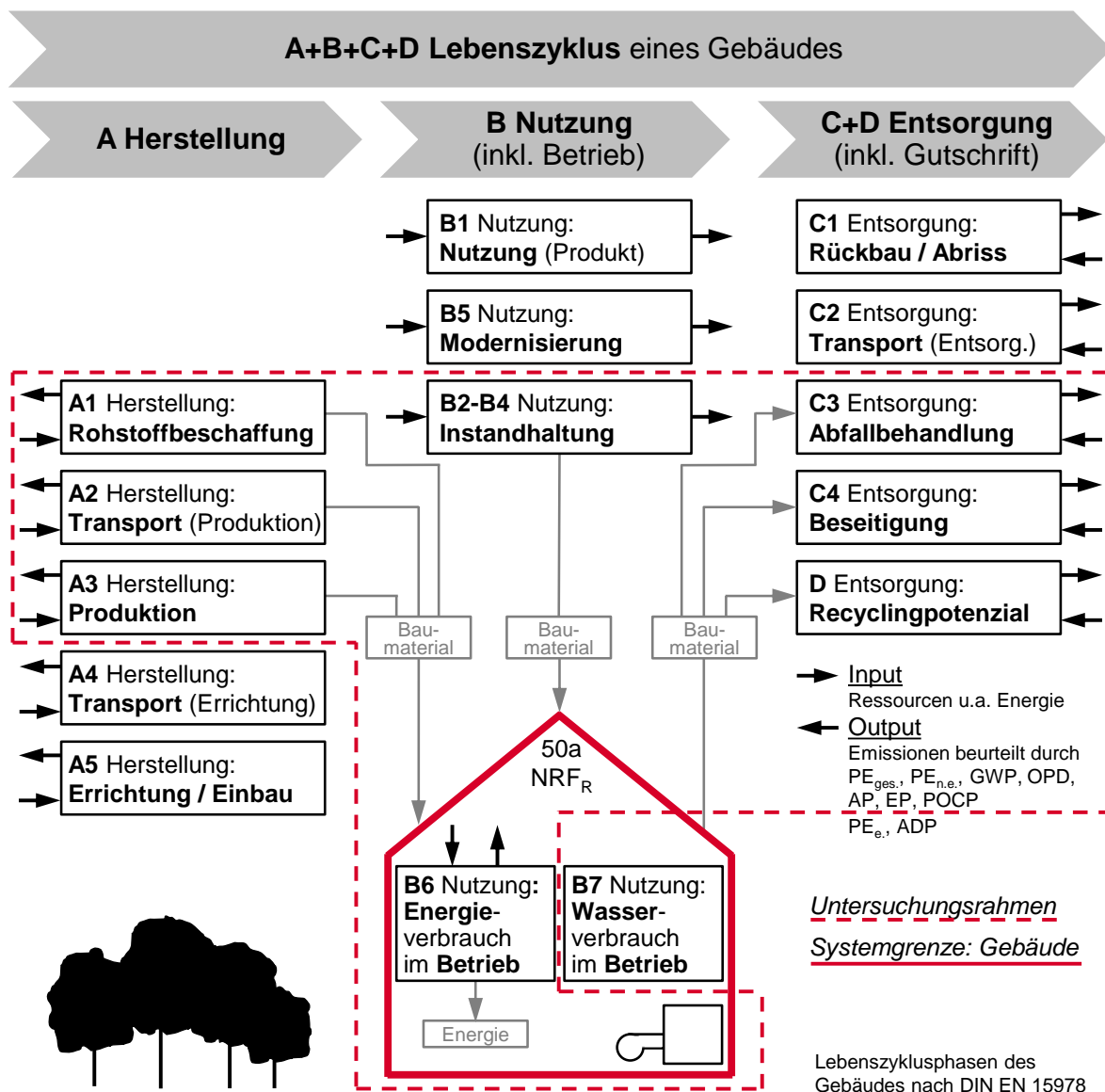


Abbildung 4.1: LCA-Untersuchungsrahmen und LCA-Systemgrenzen

A1-A3 Herstellung: Rohstoffbeschaffung, Transport (Produktion), Produktion

Die Module A1 Rohstoffbeschaffung, A2 Transport (Produktion) und A3 Produktion werden zusammengefasst berücksichtigt. Die Module A1-A3 stellen die Grundlage jeder EPD dar, d.h. A1-A3 sind Informationen bezüglich „Cradle to Gate“ („Wiege bis zum Werkstor“). Demzufolge werden der Ressourcenverbrauch und die hieraus resultierenden potenziellen Umweltauswirkungen – u.a. auch vom Transport – von der Rohstoffgewinnung bis zum Werkstor berücksichtigt. *Abbildung 4.1* verdeutlicht nochmals den Untersuchungsrahmen. Hierbei werden folgende Bauteile nach DIN 276-1 [170] spezifisch betrachtet:

- KG 320 Gründung: Fundamente, Bodenplatte inkl. Fußbodenaufbau und -beläge
- KG 330 Außenwände: Wände sowie Stützen die gegen Außen, Erdreich bzw. andere Bauwerke grenzen inkl. Außentüren und -fenster
- KG 340 Innenwände: Innenwände sowie -stützen inkl. Innentüren
- KG 350 Decken: Geschossdecken inkl. Fußbodenaufbau und -beläge sowie Treppen
- KG 360 Dächer: Dach inkl. Dachfenster und Dachbeläge
- KG 410 Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen: Sanitärtechnik (Rohrleitungen, Sanitärobjekte etc.)
- KG 420 Wärmeversorgungsanlagen: Heizungstechnik (Wärmeerzeugungsanlagen, Wärmeverteilnetz, Raumheizflächen etc.)
- KG 430 Lufttechnische Anlagen: Lüftungs-, Klima- und Kältetechnik (Lüftungsanlage etc.)
- KG 440 Starkstromanlagen: Elektrotechnik (Unterverteiler, Kabel etc.)
- KG 450 Fernmelde- und informationstechnische Anlagen: Schwachstromtechnik (Fernsehanlagen, Kabel etc.)
- KG 460 Förderanlagen: Fahrstuhl (Aufzug)

Einige Bauteile bzw. Gewerke bleiben begründeterweise unberücksichtigt (KG nach DIN 276-1 [170]):

- KG 310 Baugrube: Wie bereits erwähnt, ist die Baugrubenherstellung und -umschließung unabhängig vom Gebäudestandard und kann bei jedem Gebäude als gleich angesehen werden. Zudem ist die räumliche Systemgrenze die Gebäudeaußenkante, folglich liegt die Baugrube außerhalb des Untersuchungsrahmens.
- KG 370 Baukonstruktive Einbauten: Diese Einbauten (z.B. Einbaumöbel, Kellertrennwände) sind aktiv schwer beeinflussbar und wirken sich nicht auf das Untersuchungsziel aus.
- KG 470 Nutzungsspezifische Anlagen: Sonderanlagen (Sprinkler-, Staubsaugeranlage etc.) sind in Wohngebäuden unüblich und werden deshalb nicht bilanziert.
- KG 480 Gebäudeautomation: Automationssysteme etc. sind bei den Beispielgebäuden nicht vorhanden⁴².
- KG 500 Außenanlagen: Außer Acht gelassen wird die Außenanlage, da diese außerhalb der räumlichen Systemgrenze liegt sowie – wie bereits erwähnt – unabhängig vom Baustandard ist und als Konstante angesehen werden kann⁴³.
- KG 600 Ausstattung und Kunstwerke: Nicht betrachtet werden die Einrichtungsgegenstände (Innenausstattung, Mobiliar, Haushaltsgeräte), da diese nicht bekannt und in jedem Gebäude als gegeben sowie nicht beeinflussbar angesehen werden.

⁴²Die Gebäudeautomation ist derzeit in Wohngebäuden unüblich; aufgrund der zunehmenden Beliebtheit erfolgt trotzdem eine Abschätzung im Kapitel 5.3.6 auf Seite 104.

⁴³Ausgenommen hiervon sind die Wärmequellen der Wärmepumpen, diese werden berücksichtigt.

A4 Herstellung: Transport (Errichtung)

Wie in *Abbildung 4.1 auf Seite 41* ersichtlich, wird der Transport vom Werkstor des Herstellers bzw. Produzenten bis zur Baustelle vernachlässigt. Nach SIA 2032 [57] ist es zulässig den Baustellentransport nicht zu berücksichtigen [57:14]. Ebenso vernachlässigt das Zertifizierungssystem der DGNB [22] / NaWoh [24] den Transport für die Errichtung [26], [27]. Beispielsweise werden für den Anteil des Baustellentransports am gesamten Lebenszyklus Werte zwischen 3% [131:877] bis 7% [129:318] angegeben. Jedoch hat Schneider u.a. [175] aufgezeigt, dass Helikoptertransporte über 30% der Auswirkungen an der Umwelt verursachen können und daher unbedingt zu berücksichtigen sind [175:3] (hier ist dies nicht der Fall).

A5 Herstellung: Errichtung / Einbau

Die Errichtung und der Baustellenbetrieb einschließlich Verschnitt sowie die Planung des Gebäudes werden nicht berücksichtigt (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*). Die Bauarbeiten können als vernachlässigbar gering angenommen werden [48:80], [131:876], [173:1653], [174:1915]. Zudem haben die Bauarbeiten keinen Einfluss auf das Ziel. Die Vorgehensweise entspricht auch den Vorgaben [26], [27] der DGNB [22] / NaWoh [24]. Anzumerken ist noch, dass verlässliche und belastbare Daten zur Ermittlung der potenziellen Umweltauswirkungen des Baustellenbetriebs generell fehlen.

B1 Nutzung: Nutzung (Produkt)

Das Modul B1 bleibt unberücksichtigt (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*), da nach DIN EN 15978 [71] die notwendigen Informationen für die eingebauten Produkte in der Nutzung derzeit nicht zur Verfügung stehen [71:23]. In diesem Modul sollen Auswirkungen und Aspekte der üblichen Produktnutzung der Gebäudekomponenten ermittelt werden, z.B. Freisetzung von Stoffen aus der Fassade oder dem Bodenbelag [71:23].

B2-B4 Nutzung: Instandhaltung, Instandsetzung, Austausch

Wie in *Abbildung 4.1 auf Seite 41* dargestellt, werden die Module B2 Instandhaltung, B3 Instandsetzung und B4 Austausch unter der Begrifflichkeit Instandhaltung zusammengefasst und infolgedessen in die ökologische Betrachtung mit einbezogen. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Grenzen zwischen Instandhaltung, Instandsetzung und Austausch praktisch fließend sind; wobei unter Instandhaltung eher der planmäßige Vorgang bzw. der Überbegriff für Instandsetzung, Wartung und Inspektion verstanden wird. Die Instandsetzung setzt sich in der Regel aus ungeplanten Prozessen zusammen, diese werden aufgrund der Unregelmäßigkeit vernachlässigt.

Die Instandhaltungszyklen des Bauwerks (Kostengruppe 300 nach DIN 276-1 [170]) basieren auf der BBSR-Tabelle [176] „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

(BBSR)); die der Anlagenkomponenten (KG 400 nach DIN 276-1 [170]) orientieren sich an der VDI 2067-1 [177]. Die Zyklen beinhalten die Annahme, dass ebenso die Instandsetzung und der Austausch abgedeckt sind. Alle eingebauten und berücksichtigten Bauteile, die eine kürzere Lebensdauer als den Betrachtungszeitraum haben, werden innerhalb dieses Zeitraumes ausgetauscht, z.B. werden bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zwei Heizkessel mit einer Lebensdauer von jeweils 25 Jahren benötigt. Die Aufrechterhaltung und Wiederherstellung sowie Rückführung in den funktionsfähigen Zustand erfolgen unter der Annahme eines Wechsels mit der anfänglich verwendeten Komponente bzw. des ursprünglichen Bauteils. Die Bauteillebensdauer und somit die Instandhaltungszyklen beeinflussen die eingesetzten Materialien und folglich die Sachbilanz; eine detaillierte Aufschlüsselung befindet sich im Anhang B auf Seite 179.

B5 Nutzung: Modernisierung

Das Modul B5 Modernisierung liegt außerhalb des Untersuchungsrahmens (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*) und wird folglich vernachlässigt. Beispiele für Modernisierung sind nach DIN EN 15978 [71:24] umfangreiche Änderungen der Raumaufteilung oder geplante bzw. erwartete Nutzungsänderung [71:24]. Bei den untersuchten Wohngebäuden kann davon ausgegangen werden, dass keine außerplanmäßigen Umbauten stattfinden.

B6 Nutzung: Energieverbrauch im Betrieb

Der Energieverbrauch im Betrieb wird, wie *Abbildung 4.1 auf Seite 41* zeigt, als Betriebsbedingte Energie bzw. Emissionen berücksichtigt, d.h. die Versorgung der Gebäude mit Energie und die hieraus resultierenden potenziellen Umweltauswirkungen werden betrachtet. Die Heizungs-, Lüftungs-, Klima-, Sanitär-, Elektro- und Kältetechnik werden in den Energieverbrauch mit den jeweiligen Bewertungsparametern eingerechnet. Der Energiebedarf der Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung (Sanitär) wird nach EnEV [20] bzw. nach der DIN 4108-6 [178] und DIN 4701-10 [179] ermittelt, d.h. die Nutzung wird mittels Standardverbrauchsprofilen berechnet. Nach selbigen Richtlinien wird die Hilfsenergie berücksichtigt. Nach EnEV [20] bleibt bei Wohngebäuden der elektrische Energieverbrauch durch den Nutzer aktuell unberücksichtigt. Allerdings ist es zukünftig wichtig, bei der Bilanzierung von Gebäuden, den gesamten elektrischen Energieverbrauch zu beachten [143:27].

Demzufolge wird für den Haushaltsstrom pro Jahr 3500 kWh für das Einfamilienhaus bzw. 2700 kWh für das Mehrfamilienhaus (pro Wohnung) angenommen. Diese Annahmen beruhen auf dem deutschen durchschnittlichen Stromverbrauch für Einfamilienhäuser von 3483 kWh bzw. für Mehrfamilienhäuser von 2614 kWh [180:7]. Diese Werte kongruieren mit den Messwerten von Stockinger [143], der als Mittelwert für den Haushaltsstrom pro Person und Jahr 924 kWh angibt [143:82]; dies entspricht für einen 4-Personenhaushalt ca. 3700 kWh. In allen Wohngebäuden ist keine aktive Luftbefeuchtung und Kühlung vorgesehen, folglich beträgt der Energieverbrauch im Betrieb für die Klima- und Kältetechnik Null. Um die Varianz und somit die Einflussnahme des Verbrauchs an Trinkwarmwasser und elektrischer Energie auf das Endergebnis zu minimieren, werden diese beiden

Werte für alle Berechnungen als konstant angenommen. Als Klimazone wird Potsdam (Referenzklima der EnEV 2014 [20]) herangezogen.

B7 Nutzung: Wasserverbrauch im Betrieb

Der Wasserverbrauch im Betrieb bleibt unberücksichtigt (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*). Aufgrund der Zielstellung ist der Wasserverbrauch im Betrieb nicht von Bedeutung. Der Trinkkaltwasserverbrauch hat keine Auswirkungen auf die Effizienz der Wohngebäude. Hingegen beeinflusst der Trinkwarmwasserverbrauch die Energiebilanz (Energieverbrauch im Betrieb) des Wohngebäudes. Wie bereits erwähnt, wird der energetische Aufwand mit den einhergehenden umweltbezogenen Auswirkungen für die Erwärmung des Trinkwassers berücksichtigt (Modul B6), der Wasserverbrauch an sich allerdings nicht.

C1 Entsorgung: Rückbau / Abriss

Der Rückbauprozess mit allen stattfindenden Arbeitsgängen wird, wie in *Abbildung 4.1 auf Seite 41* ersichtlich, vernachlässigt. Derzeit liegen keine fundierten Erkenntnisse und belastbaren ökologischen Daten über den Rückbau bzw. Abriss vor. Diese Vernachlässigung entspricht auch den Vorgaben [26], [27] des DGNB [22] / NaWoh [24].

C2 Entsorgung: Transport (Entsorgung)

Aus den gleichen Gründen wie im Modul A4 (Transportprozesse bei der Errichtung) wird auch hier im Modul C2 der Transport außer Acht gelassen (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*). Es wird angenommen, dass die umweltbezogenen Auswirkungen sich in ähnlicher Größenordnung bewegen.

C3-C4 Entsorgung: Abfallbehandlung, Beseitigung

Die Phasen C3 Abfallbehandlung und C4 Beseitigung werden unter Entsorgung zusammengefasst und in die ökologische Betrachtung mit einbezogen (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*). Die Entsorgungsprozesse für Herstellung und Instandhaltung werden, mit den Datensätzen der ÖKOBAUDAT [76], nach den derzeit üblichen Entsorgungsverfahren⁴⁴ (Deponie, thermische Verwertung etc.) betrachtet.

D Entsorgung: Recyclingpotenzial

Das Recyclingpotenzial Phase D wird betrachtet und in dieser Arbeit unter dem Überbegriff Entsorgung geführt (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*). Das Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling wird in der Gesamtberechnung berücksichtigt; und somit im Gegensatz zur Norm [71] nicht

⁴⁴Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.4 auf Seite 50.

nur als „Informationsmodul“ angesehen. Nach Autorenmeinung wird hierdurch ein ganzheitlicherer Denkansatz verfolgt, z.B. sollte eine durchdachte Planung bzw. ein wohl überlegter Bau mit einem hohen Recyclinganteil „belohnt“ werden. Auf Basis der ÖKOBAUDAT [76] erfolgen die Gutschriften für die thermische Verwertung, Recycling etc..

Bewertungsparameter

Für die ökologische Betrachtung werden energetische und umweltbezogene Bewertungsparameter⁴⁵ betrachtet (*Abbildung 4.1 auf Seite 41*; hier: spezifische Einheit pro m² und Jahr):

- Primärenergieinhalt, gesamt (PE_{ges.}) in kWh/(m²a)
- Primärenergieinhalt, nicht erneuerbar (PE_{n.e.}) in kWh/(m²a)
- Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO₂-Äq./(m²a)
- Ozonabbaupotenzial (ODP) in kg CFC11-Äq./(m²a)
- Versauerungspotenzial (AP) in kg SO₂-Äq./(m²a)
- Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial (EP) in kg PO₄⁻³-Äq./(m²a)
- Sommersmogpotenzial (POCP) in kg C₂H₄-Äq./(m²a)

Nicht detailliert betrachtet wird der Primärenergieinhalt, erneuerbar (PE_{e.}) und der Abiotische Ressourcenverbrauch (ADP). Dies ist der Fall, da der PE_{e.} im PE_{ges.} enthalten ist und die Materialien der Gebäudetechnik fast ausschließlich aus nicht erneuerbaren Baustoffen bestehen. Des Weiteren wird auf eine Unterteilung in energetische und stoffliche Nutzung des jeweiligen Primärenergieinhalts verzichtet, da die Datenstruktur oftmals noch inkonsistent ist. Beim ADP wird auf Grundlage der ÖKOBAUDAT 2016 [76] die Ergebnisrobustheit sowie -vollkommenheit als wissenschaftlich kritisch eingeschätzt.

4.1.3 Berechnungsmethode

Im Rahmen der ökologischen Betrachtung werden die Sachbilanzergebnisse in der Wirkungsabschätzung in verschiedene potenzielle Umweltauswirkungen unterteilt. Nach DIN EN ISO 14044 [19] ist es verbindlich, nach der Auswahl von Wirkungskategorien, Charakterisierungsmodellen und Wirkungsindikatoren, die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung) zu den ausgewählten Wirkungskategorien vorzunehmen [19:33+34]. Anschließend erfolgt die Charakterisierung, d.h. die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte nach *Gleichung 4.1* [19:33+34].

$$\text{Wirkungsindikatorwert} = \text{Sachbilanzwert} \times \text{Charakterisierungsfaktor} \quad (4.1)$$

Dies soll nun an einem einfachen Beispiel der Klimaänderung verdeutlicht werden:

⁴⁵Die Bewertungsparameter wurden bereits detailliert im Kapitel 2.2.2 auf Seite 10 erläutert.

Beispiel zu *Gleichung 4.1 auf der vorherigen Seite*:

(Anmerkung: Charakterisierungsfaktor – Werte aus DIN EN 15804 [54:55+56]:

1 CO₂ (Kohlendioxid) = 1 CO₂-Äq.

1 CH₄ (Methan) = 25 CO₂-Äq.

1 N₂O (Distickstoffoxid / Lachgas) = 300 CO₂-Äq.)

$$\left. \begin{aligned} &= 1000 \text{ kg CO}_2 \times 1 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg CO}_2} = 1000 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} \\ &= 200 \text{ kg CH}_4 \times 25 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg CH}_4} = 5000 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} \\ &= 30 \text{ kg N}_2\text{O} \times 300 \frac{\text{kg CO}_2\text{-Äq.}}{\text{kg N}_2\text{O}} = 9000 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} \end{aligned} \right\} \sum 15\,000 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} = \text{Wirkungsindikatorwert}$$

Diese Beispielrechnung zeigt, dass die Berechnung für ein einzelnes Gebäude komplex ist und deshalb vereinfacht wurde. Die Handhabbarkeit der Klassifizierung und Charakterisierung wurde u.a. für die unzähligen Baumaterialien und -elemente durch generische Datenbanken erleichtert. Folglich ist das Ergebnis der Wirkungsabschätzung durch Multiplikation mit dem spezifischen Datenbankwert erreichbar. Nach DIN EN 15978 [71] erfolgt die Berechnungsmethodik für jedes einzelne Modul bzw. für jede einzelne Phase im Gebäudelebenszyklus nach dem Matrizenrechenverfahren (z.B. B6 Energieverbrauch im Betrieb). Ziel ist es, jedes Bauprodukt und jede Dienstleistung, die im Gebäudelebenszyklus anfällt und quantifiziert ist, mit dem entsprechenden Wert für jeden Umweltindikator zu multiplizieren [71:45]. *Gleichung 4.2* entspricht hierbei der DIN EN 15978 [71:45].

$$EP_i = \vec{a}_j \times M \quad (4.2)$$

EP_i	Indikatorwert des Moduls bzw. Phase i des Gebäudes
\vec{a}_j	Vektor, der die Bruttomengen aller im Modul bzw. Phase i des Gebäudes genutzten Produkte und Dienste enthält
M	Matrix, deren Spalten die Umweltindikatorwerte je Einheit aller im Modul bzw. Phase i des Gebäudes genutzten Produkte und Dienste enthalten

Gleichung 4.3 stellt den Sachverhalt für die Berechnung der Wirkungsabschätzung je Wirkungskategorie und Phase wiederum vereinfacht dar:

$$\text{Wirkungsabschätzung je Wirkungskategorie und Phase} = \sum \text{Sachbilanzwert} \times \text{spezifischer Datenbankwert je Phase} \quad (4.3)$$

Jedem Sachbilanzwert (z.B. Bauteilschicht) wird ein passender Datenbanksatz, der die Bewertungsgrundlage bildet, zugeordnet. Bauteile werden beispielsweise hierfür in einzelne Schichten zerlegt. Der Sachbilanzwert der Bauteile ergibt sich oftmals aus der spezifischen Angabe pro m² multipliziert mit der jeweiligen Bauteilfläche. Hierzu soll ein kleines Beispiel mit zwei Baumaterialien zum Treibhauspotenzial (GWP) für die Herstellungsphase (Modul A1-A3) die Berechnungsmethode erläutern:

Beispiel zu Gleichung 4.3 auf der vorherigen Seite:

(Anmerkung: 200 m² 24 cm Kalksandsteinwand und 200 m² 18 cm EPS bzw. „Styropor“ – spezifische Datenbankwerte aus ÖKOBAUDAT 2016-I [76])

$$\text{GWP: } EE_{A1-A3} = \sum (456 \frac{\text{kgKalksandstein}}{\text{m}^2} \times 200 \text{ m}^2) \times 0,156 \frac{\text{kgCO}_2\text{-Äq.}}{\text{kgKalksandstein}} + (3,59 \frac{\text{kgEPS}}{\text{m}^2} \times 200 \text{ m}^2) \times 2,62 \frac{\text{kgCO}_2\text{-Äq.}}{\text{kgEPS}}$$

$$\text{GWP: } EE_{A1-A3} = \sum 14\,227 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.} + 1881 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}$$

$$\text{GWP: } EE_{A1-A3} = 16\,108 \text{ kg CO}_2\text{-Äq.}$$

Jede einzelne Wirkungskategorie besteht aus mehreren Teilergebnissen der Wirkungsabschätzung: zum einen aus den Teilergebnissen der jeweiligen Module bzw. Phasen (z.B. Modul A Herstellung) sowie der Bauteile (z.B. Außenwände), in diesem Beispiel wurde nur das Modul A1-A3 für zwei Materialien aufgezeigt; zum anderen aus den Teilergebnissen der einzelnen Wirkungskategorie (z.B. Klimaänderung, Versauerung), hier wurde nur das Treibhauspotenzial beispielhaft skizziert, d.h. die Wirkungsabschätzung beinhaltet mehrere Endergebnisse, z.B. 25 000 kg CO₂-Äq., 150 kg SO₂-Äq.. Gewissermaßen besteht die Wirkungsabschätzung aus Ergebnissen von unterschiedlichen input- und outputbezogenen Wirkungskategorien über verschiedene Lebenszyklusphasen. Jede Wirkungskategorie bewertet eine andere potenzielle Wirkung auf die Umwelt, deshalb können Ergebnisse in den einzelnen Kategorien unterschiedlich ausfallen, z.B. kann ein Gebäude beim Treibhauspotenzial hervorragend abschneiden, jedoch beim Versauerungspotenzial unterdurchschnittliche Werte aufweisen. Für die Zusammenfassung der unterschiedlichen Wirkungskategorien zu einem einzelnen Wert fehlt derzeit die wissenschaftliche Grundlage [18:19].

Basierend auf den vorherigen Gleichungen spiegeln die Gleichungen 4.4 – 4.8 die Berechnung über den Gebäudelebenszyklus wider:

$$LZE = EE + BE \quad (4.4)$$

LZE Primärenergetische Lebenszyklus-Energie oder Lebenszyklus-Emissionen des Gebäudes, d.h. Bauwerk inklusive Betrieb [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.⁴⁶]

EE Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des Bauwerks, d.h. Baukonstruktion und Gebäudetechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

BE Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des Energieverbrauchs im Betrieb durch die Gebäudetechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

$$EE = EE_A + EE_B + EE_C + EE_D \quad (4.5)$$

Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]

EE_A Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des Moduls A: Herstellungs- und Errichtungsphase [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

⁴⁶Jeweilige Einheit des Bewertungsparamters, wobei die Äquivalenzeinheiten durch eine Massenangabe präzisiert werden müssen, z.B. kg CO₂-Äq., t CO₂-Äq..

- EE_B Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des Moduls B: Nutzungsphase (B1 - B5 – ohne Verbrauch im Betrieb: B6 und B7) [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- EE_C Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des Moduls C: Entsorgungsphase [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- EE_D Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des Moduls D: Recyclingpotenzial [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

$$BE = BE_{B6} + BE_{B7} \quad (4.6)$$

Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]

- BE_{B6} Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des Teilmoduls (B6) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb abzüglich ggf. Energieproduktion bzw. deren Gutschriften) [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- BE_{B7} Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des Teilmoduls (B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb abzüglich ggf. Gutschriften) [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

$$EE_A = \sum_{i=1}^{i=5} EE_{A,i} = \sum_{i=1}^{i=5} \sum_{n=1}^N m_{i,n} \times ee_{i,n} \quad (4.7)$$

Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]

- $EE_{A,i}$ Primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen des jeweiligen Teilmoduls i (A1, A2, A3, A4, A5) vom Modul A Herstellungs- und Errichtungsphase [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- $m_{i,n}$ Quantität der Ressourcen (Materialien, Rohstoffe) des jeweiligen Teilmoduls i (mit n = 1, 2, 3, ..., N) [Funktionelle Einheit, z.B. kg, m³, Stk.]
- $ee_{i,n}$ Spezifische primärenergetische Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen von Ressourcen (Datenbankwert der Materialien, Rohstoffe) des jeweiligen Teilmoduls i (mit n = 1, 2, 3, ..., N) [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc. pro funktionelle Einheit, z.B. kg, m³, Stk.]
- EE_B wie Gleichung 4.7 mit i = 5 (B1, B2, B3, B4, B5)
- EE_C wie Gleichung 4.7 mit i = 4 (C1, C2, C3, C4)
- EE_D wie Gleichung 4.7 mit i = 1 (D)

$$BE_{B6/B7} = HE + LE + SE + ELE + KE + SOE \quad (4.8)$$

Module bzw. Phasen nach DIN EN 15978 [71]

- HE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der Heizungstechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- LE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der Lüftungs- und Klimatechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- SE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der Sanitärtechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- ELE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der Elektrotechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- KE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der Kältetechnik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]
- SOE* Primärenergetische Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen des jeweiligen Teilmoduls (B6, B7) vom Modul B Nutzungsphase (Verbrauch im Betrieb) der sonstigen Technik [kWh, CO₂-Äq., SO₂-Äq. etc.]

4.1.4 Datengrundlage

Die Datengrundlage⁴⁷ für die LCA-Berechnung sind die Sachbilanzdaten. Diese Sachbilanzdaten, d.h. die Massen- und Materialermittlung, gründen hauptsächlich auf Planungsunterlagen und den Angaben (Aufmaß, Bestellscheine, Nachkalkulation) der Bauunternehmer [181], [182] sowie auf ingenieurmäßigen Berechnungen einschließlich Annahmen. Folglich beruht die Basis der ökologischen Berechnung auf den tatsächlich benötigten Mengen. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Sachbilanz befindet sich im Anhang B auf Seite 179.

⁴⁷Die Randbedingungen wie Gebäudekubatur, -bauform, -einteilung, -standort, -fläche (Netto-Raumfläche), Himmelsausrichtung und Bewohneranzahl werden als konstant angenommen. Ebenso sind die technischen und funktionellen Anforderungen (z.B. Schall-, Brandschutz, Standsicherheit) vergleichbar. Genauso werden die identischen Bewertungsprogramme und die gleiche Datenbank verwendet. All dies soll gleichbleibende und somit vergleichbare Voraussetzungen schaffen.

Wegen des hohen Arbeitsaufwandes bei der ökologischen Betrachtung ist die Zuhilfenahme einer Software unabdingbar. Für die vorliegenden Berechnungen wurden die Programme LEGEP (Version 2.7.640) [103] und Microsoft-Excel (Version Microsoft Office Professional 2010) verwendet⁴⁸.

Als Datenbank dient die ÖKOBAUDAT 2016-I [76]. Die bundeseigene Datenbank besteht aus generischen (durchschnittlichen) wie auch verbands- sowie firmenspezifischen Datensätzen [76] (Abbildung 4.2) und ist in Deutschland allgemein anerkannt. Deshalb wird diese Baustoffdatenbank (Version 2016-I vom 18.05.16) ausgewählt. Bei der Datenauswahl haben generische Datensätze Vorrang, sind keine durchschnittlichen oder ähnliche Daten vorhanden, werden vorzugsweise spezifische Datensätze von Verbänden und erst anschließend Daten von Firmen verwendet. Die Datensätze enthalten Sicherheitszuschläge von 10 % bis 20 %, um Unsicherheiten auszugleichen. Des Weiteren erfolgt die Skalierung linear in Abhängigkeit des angegebenen Referenzgewichtes. Als Basis für das LCA der elektrischen Energie wird der deutsche Strom-Mix 2015 verwendet. Durch die ÖKOBAUDAT [76] sind die Charakterisierungsmodelle und Wirkungsindikatorwerte ebenfalls bestimmt.

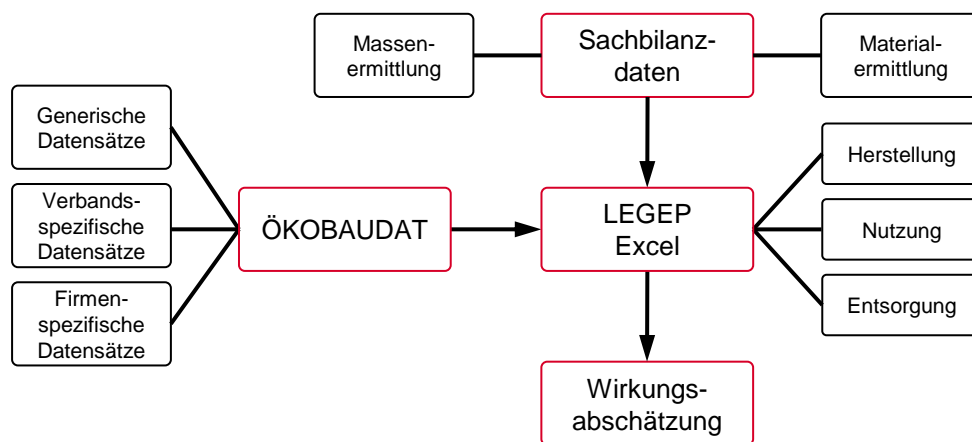


Abbildung 4.2: Sachbilanzdaten verknüpft mit der Datenbank (ÖKOBAUDAT) durch die Software (LEGEP / Excel) ergibt die Wirkungsabschätzung

Aufgrund der Tatsache, dass bei der ÖKOBAUDAT 2016-I [76] v.a. hinsichtlich Gebäudetechnik einige Datensätze fehlerhaft und unvollständig erscheinen, werden folgende Annahmen getroffen sowie Entsorgungsszenarien (Recycling, thermische Verwertung, Deponie) gewählt:

(1) Der Datensatz „Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor)“ wird nicht verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass dieser um den Faktor 5 bis 12 – je nach Bewertungsparameter – höhere umweltbezogene Auswirkungen als der Datensatz für Erdsonden hat. Zusätzlich ergab eine Abschätzung eine unrealistische Rohrlänge für den Erdkollektor (> 8000 m DN 25 (PE) für 10 kW – keine weiteren Komponenten berücksichtigt) – Vergleich mit der Erdsonde: ca. 850 m. Deshalb wird der Erdkollektor nach eigenen Annahmen (Sachbilanz im Anhang B auf Seite 179) berechnet.

⁴⁸Ein interner Vergleich zwischen LEGEP und der selbst erstellten Berechnung in Excel über den kompletten Lebenszyklus bei je zwei Decken, Dächern, Außen- und Innenwänden ergab eine vertretbare Ergebnisabweichung. Die maximale Abweichung lag bei 2,6%, diese ist auf Ergebnisrundungen und unterschiedliche Verwendung von Entsorgungsdatensätzen zurückzuführen. Bei den untersuchten Komponenten lag im Mittel die Abweichung bei $\pm 0,3\%$.

(2) In der ÖKOBAUDAT 2016-I [76] existiert kein Datensatz für Glykol, folglich kann dieses Frostschutzmittel für den Erdkollektor sowie die Solaranlage nicht berücksichtigt werden und fehlt hierdurch bei den umweltbezogenen Auswirkungen.

(3) Der Datensatz der Erdkollektor-Wärmepumpe wird für den Wärmeerzeuger Sole-Wasser-Wärmepumpe angewandt. „Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde)“ und „Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor)“ sind praktisch von identischer Bauweise und unterscheiden sich je Einsatzfall (Erdkollektor oder Erdsonde) nicht, allerdings unterscheiden sich die genannten Original-Datensätze enorm, z.B. 248 % beim $PE_{ges.}$ oder 270 % beim POCP (10 kW Wärmepumpe). Es scheint, dass die Wärmepumpe Erdsonde (ohne Wärmequelle) zu hohe Werte aufweist, da beispielsweise für eine 10 kW Wärmepumpe 468 kg Glykol angegeben sind, bei der Erdkollektor-Wärmepumpe hingegen 89 kg. Im Grunde enthalten nur die Rohrleitungen und der Wärmetauscher in der Wärmepumpe Glykol, sofern die Wärmequelle separat betrachtet wird (hier der Fall); deshalb ist bei beiden Wärmepumpen dieser Anteil zu hoch. Des Weiteren ist das Nettogewicht zu gering, beispielsweise mit 95 kg (563 kg - 468 kg bzw. 184 kg - 89 kg) bei einer 10 kW Wärmepumpe; zum Vergleich der ermittelte Durchschnitt⁴⁹ beträgt ca. 154 kg (+ 62 %). Nichtsdestotrotz wird der Datensatz „Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor)“ verwendet, da bei einer eigenen Berechnung sonst die massiven Umweltbelastungen – beim ODP – des Kältemittels unterschlagen würden. Zudem werden Pufferspeicher und Ausdehnungsgefäß aufgrund unpräziser Beschreibung in der ÖKOBAUDAT [76] und hier unterschiedlicher Heizungskonzepte separat berechnet.

(4) Basierend auf eigenen Recherchen wird das gemittelte Gewicht für die Gebäudetechnik zugrunde gelegt. Dies bedeutet, dass die Datensätze auf Basis ihres angegebenen Referenzgewichtes in der ÖKOBAUDAT [76] linear interpoliert werden. Beispielsweise liegt für einen Pelletheizkessel kein spezifischer Wert vor, sondern nur je Stück: ein Wert für < 20 kW und 20 kW bis 120 kW; deshalb werden die angegebenen Bewertungsparameter durch das angegebene Gewicht geteilt (hier: < 20 kW bei 335 kg), um anschließend individuell mit dem gemittelten Gewicht je Heizleistung multipliziert zu werden, z.B. 310 kg (15 kW).

(5) Beim Datensatz „Photovoltaiksystem (ohne Stromgutschrift)“ werden aufgrund der fehlenden transparenten Dokumentation der getroffenen Annahmen für die Einzelkomponenten (Wechselrichter, Verkabelung, Befestigung) und deren pauschalen Berücksichtigung diese separat in die ökologische Betrachtung mit einbezogen. Folglich wird der Datensatz (Durchschnitt von verschiedenen PV-Modultypen) nur für die PV-Module angesehen und bildet somit den ökologisch ungünstigsten Fall ab.

(6) Der Datensatz „Bitumenbahn V 60“ wird anstelle des „Bitumen Kaltkleber“ angewandt, da der Kaltkleber-Datensatz beim Sommersmogpotenzial (POCP) 420 bis 650-fach höhere Werte aufweist als andere bitumenhaltige Baustoffe (z.B. Bitumenbahn, Bitumen Emulsion). Es kann vermutet werden, dass dieser POCP-Wert falsch ist. Die fehlende Sachbilanz in der ÖKOBAUDAT [76] ermöglicht keine Plausibilitätsüberprüfung. Zudem sollten Extremwerte in einer Kategorie – für eine bessere Nachvollziehbarkeit – in der Datenbank dokumentiert werden.

⁴⁹n = 57 – Siehe hierzu auch *Abbildung 6.8 auf Seite 134*.

(7) Grundsätzlich ist durch die Auswahl von differenzierten Nutzungsdatensätzen in der ÖKOBAUDAT [76] für unterschiedliche Kesselgrößen ein Widerspruch zur Berechnung des Endenergiebedarfs nach EnEV [20] festzustellen. Dies beruht auf dem Hintergrund, dass bereits im Berechnungsverfahren die Erzeugergröße mit einfließt. Deshalb wird für die Nutzungsphase bei Wärmepumpen der Strommix und bei den übrigen Erzeugerarten der mittlere Datensatz (20 kW bis 120 kW) verwendet.

(8) Es wird für den Beton C25/30 mit dem generischen Datensatz C30/37 gerechnet, da hierfür kein generischer Datensatz in der ÖKOBAUDAT [76] vorhanden ist. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um eine Vergleichbarkeit herzustellen, da alle tragwerksbezogenen Datensätze generisch sind (auch Beton C20/25). Anzumerken ist hierbei, dass dies nicht auf den Mauerziegel zutrifft, hier sind keinerlei generische Datensätze verfügbar.

(9) Primärmetalle werden nach dem Entsorgungs- und Verwertungsweg Recycling bewertet. Enthält ein Metalldatensatz kein Modul C oder D, werden generische Datensätze verwendet bzw. Datensätze mit ähnlichem Entsorgungsweg, beispielsweise werden verzinkte Schrauben mit dem allgemeinen Datensatz „End of Life von verzinktem Stahl“ gerechnet bzw. Messing und Rotguss (Kupferlegierungen) werden mit dem Kupferdatensatz für die Entsorgung kalkuliert. Sekundärmetalle (z.B. Bewehrungsstahl) erhalten keine Gutschrift.

(10) Mineralische Baustoffe werden wiederverwertet (Bauschuttzubereitung) und recycelt. Enthält ein Datensatz für mineralische Baustoffe kein Modul C oder D, wird die allgemeine Bauschuttzubereitung (Modul C) berücksichtigt und es erfolgt eine Gutschrift durch den Datensatz (A1-A3) „Kies 2/32“ (negativer Herstellungsdatensatz). Derzeit erfolgt bei Beton bzw. mineralischen Bauteilen (z.B. Ziegelwand, Dachziegeln) ein Downcycling, d.h. mineralische Baustoffe werden im Straßenunterbau, bei Lärmschutzwällen sowie für die Verfüllung von Gruben und Brüchen verwendet. Gegenwärtig existiert keine wissenschaftlich fundierte detaillierte Unterscheidung bezüglich der Recyclingquoten von unterschiedlichen mineralischen Baustoffen. Bei dieser Betrachtung wird generell davon ausgegangen, dass eine Mischung der Materialien erfolgt und somit eine uneingeschränkte Verwertung der Recycling-Baustoffe erfolgen kann; so dass auch schwer verwertbare mineralische Baustoffe eine weitere Anwendung als Bauschutt-Rezyklat finden.

(11) Baumaterialien mit einem Heizwert (z.B. Holz, Kunststoff) werden thermisch verwertet. Zum Beispiel erfährt Holz durch die (angenommene zukünftige) energetische Verwertung in einer Müllverbrennungsanlage mit Strom- und Wärmenutzung eine Gutschrift; diese leitet sich aus dem deutschen Strommix ab, denn es wird unterstellt, dass Holz andere – meist fossile – Brennstoffe substituiert. Dämmstoffe erhalten die Gutschrift aus dem Datensatz „Verbrennung PS in MVA incl. Gutschrift“.

(12) Wärmeerzeuger sind dem entsprechenden Datensatz der Phase C und D zugeordnet.

(13) Alle sonstigen Materialien (z.B. Gips, Gipskartonplatten, Mineralwolle, Glas) werden auf der Deponie entsorgt, sofern kein Modul C angegeben ist; Modul D wird (falls vorhanden) berücksichtigt (z.B. Farbe).

4.1.5 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen

Tabelle 4.1 fasst die wichtigsten Kriterien der Rahmenbedingungen für die lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften des Einfamilien- und Mehrfamilienhauses mit seinen Varianten zusammen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der wichtigsten Kriterien der Rahmenbedingungen

Kriterium	Kurzbeschreibung
Ziel	Lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden, v.a. der Gebäudetechnik
Funktionelle Einheit	m ² _{NRFA}
Räumliche Systemgrenze	Gebäudeaußenkante
Zeitliche Systemgrenze	50 Jahre
Phasen berücksichtigt	A1-A3: Herstellungsphase, B2-B4: Nutzungsphase (Instandhaltung), B6: Nutzungsphase (Energieverbrauch im Betrieb: Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung, (Kühlung), elektrische Energie), C3-C4+D: Entsorgungsphase (inkl. Recyclinggutschrift)
Phasen unberücksichtigt	A4: Transport (Errichtung), A5: Errichtung / Einbau, B1: Nutzung (Produkt), B5: Modernisierung, B7: Wasserverbrauch im Betrieb, C1: Rückbau / Abriss, C2: Transport (Entsorgung)
Bauwerk berücksichtigt	KG 320-360: Baukonstruktion und KG 410-460: Gebäudetechnik
Bauwerk unberücksichtigt	KG 310, KG 370: Baukonstruktion, KG 470, KG 480: Gebäudetechnik, KG 500: Außenanlagen und KG 600: Ausstattung
Instandhaltungszyklen	KG 300: BBSR-Tabelle, KG 400: VDI 2067
Bewertungsparameter	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, OPD, AP, EP, POCP
Sachbilanzdaten	Plandaten, Bauunternehmerangaben, Berechnungen, Annahmen
Software	LEGEP / Excel
Datenbank	ÖKOBAUDAT 2016

4.2 Untersuchungsobjekte

4.2.1 Einfamilienhaus

Abbildung 4.3 zeigt das Untersuchungsobjekt, ein Einfamilienhaus (EFH), das von der Firma Taglieber [181] als individuelles Holzhaus errichtet wurde. Neben dem Gebäude existiert eine Garage, die aufgrund der Zielsetzung und des Untersuchungsrahmen bei der ökologischen Betrachtung unberücksichtigt bleibt. Das freistehende Einfamilienhaus verfügt über drei Stockwerke (Keller-, Erd-, Dachgeschoss).



Abbildung 4.3: Außenansicht des Einfamilienhauses (Süd-Westseite)
(Datenquelle: [181])

Table 4.2 auf der nächsten Seite stellt die wichtigsten Eckdaten des Einfamilienhauses dar. Die deutsche durchschnittliche Wohnfläche beträgt laut Statistischem Bundesamt [183] 43 m^2 je Person [11:151], folglich spiegelt das betrachtete 4-Personen-EFH mit 39 m^2 je Person annähernd den deutschen Durchschnitt wider. Des Weiteren korrespondiert die Wohnfläche von 154 m^2 mit der durchschnittlichen deutschen Einfamilienhauswohnfläche von 143 m^2 (Paare mit Kindern) [11:153]. Der Erdgeschossgrundriss und der Schnitt sind in Abbildung 4.4 auf der nächsten Seite dargestellt. Das Einfamilienhaus wurde in Holzständerkonstruktionsweise einschließlich eines Stahlbetonkellers errichtet. Die Gebäudetechnik umfasst zwei Bäder (Dusch- und Badewanne), ein Gäste-WC, eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Fußbodenheizung (FBH) und eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) sowie eine PV-Anlage⁵⁰.

⁵⁰Aufgrund der Tatsache, dass die Gebäudeparameter (Gebäudehülle und -technik) variiert werden sollen, wird eine detaillierte Beschreibung des Gebäudes vernachlässigt. Im Anhang B auf Seite 179 befinden sich die notwendigen Sachbilanzdaten einschließlich der Flächenermittlung. Es ist nur der Erdgeschossgrundriss aufgezeigt, da die Sachbilanzdaten für die ökologische Betrachtung von Bedeutung sind und die anderen beiden Geschosse dem Erdgeschossgrundriss größtenteils ähneln.

Tabelle 4.2: Übersicht über die Eckdaten des Einfamilienhauses
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Pläne von [181])

Bezeichnung	Abk.	Wert	Einheit	Bezeichnung	Abk.	Wert	Einheit
Gebäudelänge	L	12,2	m	Netto-Raumfl. Regelfall	NRF _R	222	m ²
Gebäudebreite	B	8,12	m	Netto-Raumfl. beheizt	NRF _b	187	m ²
Mittlere Geschosshöhe	H	2,86	m	Wohnfläche	A _{Wo}	154	m ²
Brutto-Geschossfläche	BGF	289	m ²	Wärmeü. Umfassungsf.	A	576	m ²
Netto-Raumfläche	NRF	222	m ²	Beheiztes Volumen	V _e	891	m ³
Bruttorauminhalt	BRI	913	m ³	A/V-Verhältnis	A/V _e	0,65	-

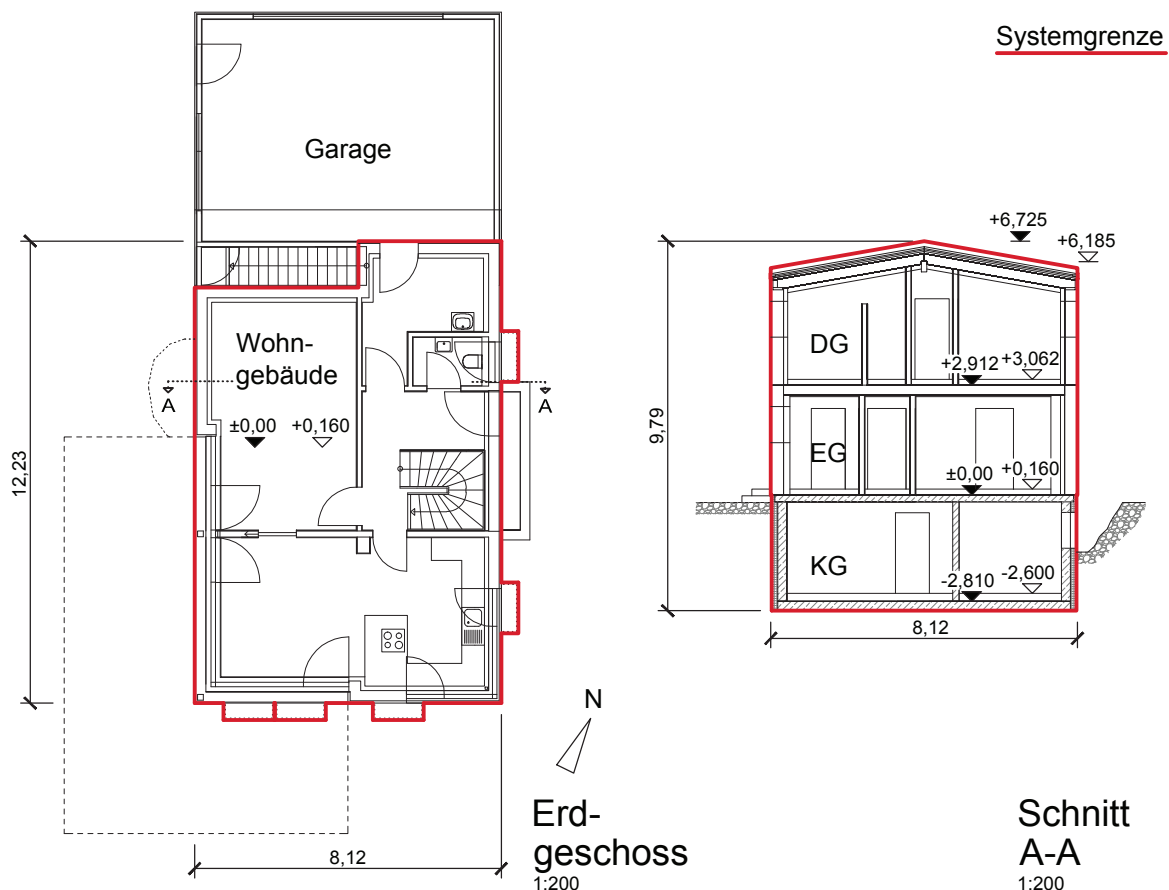


Abbildung 4.4: Grundriss Erdgeschoss (links) und Schnitt (rechts) des Einfamilienhauses
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [181])

4.2.2 Mehrfamilienhaus

Das in *Abbildung 4.5* dargestellte Mehrfamilienhaus (MFH) wurde von der Firma Bau-Fritz [182] geplant und errichtet. Das Gebäude besteht aus einem Geschäfts- und Wohnbereich, wobei aufgrund der Zielsetzung dieser Dissertation nur das Wohngebäude mit seinen 3 Wohnungen einschließlich des Treppenhauses analysiert wird. Insgesamt besteht das, an einer leichten Geländesteigung stehende, Mehrfamilienhaus aus fünf Stockwerken (Keller-, Erd-, 1. Ober-, 2. Ober-, Dachgeschoss).



Abbildung 4.5: Außenansicht des Mehrfamilienhauses (Süd-Ostseite)
(Datenquelle: [182])

Die Eckdaten des Mehrfamilienhauses sind in *Tabelle 4.3* zusammengefasst. Die Wohnfläche einer Person (3 Wohnungen je 4 Personen) beträgt 39 m^2 , was annähernd dem deutschen Mittelwert von 43 m^2 je Person [11:151] entspricht. Demzufolge repräsentiert das Gebäude (*Abbildung 4.6 auf der nächsten Seite*) in etwa den deutschen Wohnflächendurchschnitt. Konzipiert wurde es in Holzständerbauweise mit einem Keller und Treppenhaus aus Stahlbeton. Das Gebäude wird durch eine Pelletheizung inklusive Solaranlage und mit FBH beheizt, sowie durch drei Lüftungsanlagen mit WRG belüftet und verfügt über drei Bäder (Dusch- und Badewanne) mit jeweils separatem WC⁵¹.

Tabelle 4.3: Übersicht über die Eckdaten des Mehrfamilienhauses
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Pläne von [182])

Bezeichnung	Abk.	Wert	Einheit	Bezeichnung	Abk.	Wert	Einheit
Gebäudelänge	L	22,1	m	Netto-Raumfl. _{Regelfall}	NRF_R	672	m^2
Gebäudebreite	B	7,83	m	Netto-Raumfl. _{beheizt}	NRF_b	528	m^2
Mittlere Geschosshöhe	H	2,87	m	Wohnfläche	A_{W_o}	466	m^2
Brutto-Geschossfläche	BGF	976	m^2	Wärmeü. Umfassungsf.	A	838	m^2
Netto-Raumfläche	NRF	829	m^2	Beheiztes Volumen	V_e	1817	m^3
Bruttorauminhalt	BRI	2849	m^3	A/V-Verhältnis	A/V_e	0,46	-

⁵¹ Aus gleichen Gründen wie beim Einfamilienhaus, wird hier ebenfalls auf die detaillierte Beschreibung und Grundrissdarstellung verzichtet; jedoch befindet sich im Anhang B auf Seite 179 die notwendige Sachbilanz mit Flächenangaben.

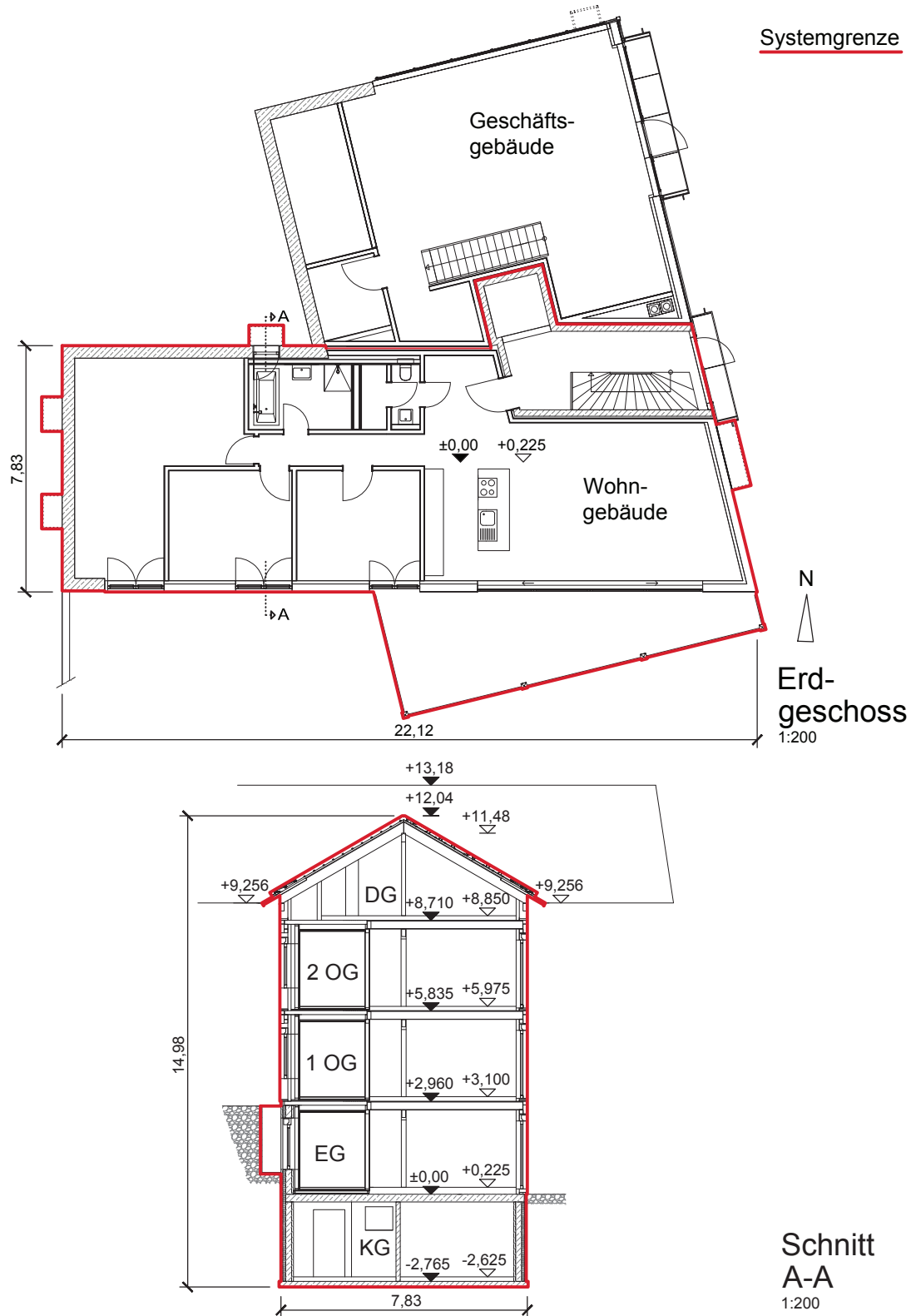


Abbildung 4.6: Grundriss Erdgeschoss (oben) und Schnitt (unten) des Mehrfamilienhauses
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [182])

4.3 Standardgebäude: Gebäude mit den überwiegend verwendeten Baumaterialien und -komponenten

4.3.1 Baukonstruktion

Der überwiegend verwendete Baustoff für die tragende Konstruktion (Tragwerk) bei deutschen Wohngebäuden ist Mauerwerksziegel. Nach dem Statistischen Bundesamt [183] sind die drei – im Zeitraum von 2000 bis 2014 – am häufigsten verwendeten Baustoffe mit ca. 42 % sonstiger Mauerstein⁵² sowie Ziegel (ca. 37 %) und Holz (ca. 13 %) [168:4-9]. *Abbildung 4.7* zeigt für die Jahre 2013 und 2014⁵³ die überwiegend verwendeten Baustoffe bei den fertiggestellten Wohngebäudeneubauten. Hierbei dominiert der Ziegelstein mit 31 %. Demzufolge ist Ziegelstein derzeit der meist verbaute Baustoff für die Konstruktion und wird somit als Standardmaterial für die Außen- und Innenwand festgelegt.

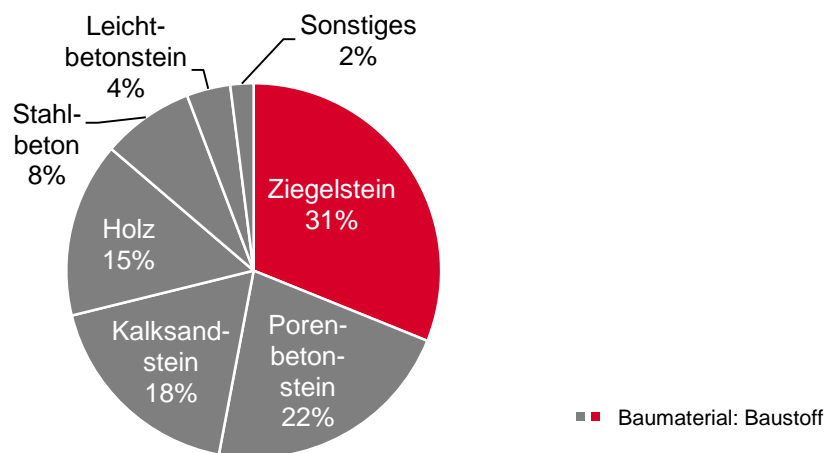


Abbildung 4.7: Baustoffaufteilung bei deutschen Wohngebäudeneubauten (Basisjahr 2013 und 2014)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [168:8+9])

Das häufigste angewandte Dämmmaterial in Deutschland ist seit Jahren Mineralwolle. Seit 1989 ist beim deutschen Baustoffhandel der Anteil zwischen den unterschiedlichen Dämmstoffen annähernd gleichbleibend [184:73]. Die prozentualen Marktverhältnisse der verschiedenen Rohstoffe am Gesamtmarkt für Dämmstoffe von 2011 zeigt *Abbildung 4.8 auf der nächsten Seite*⁵⁴. Hieraus wird deutlich, dass Mineralwolle die meist verwendete Dämmung in Deutschland darstellt. Demnach wird davon ausgegangen, dass bei Ein- und Mehrfamilienhäusern in Summe aller Dämmmaßnahmen Mineralwolle der Standard bezüglich der Dämmstoffe ist.

⁵²Eine detaillierte Aufschlüsselung erfolgt seit 2010 [168:8+9].

⁵³Aufgrund der Datenauswertung und -aufbereitung durch das Statistische Bundesamt [183] kommt es zu zeitlichen Verzögerungen; deshalb stehen derzeit keine aktuelleren Daten zur Verfügung.

⁵⁴Die prozentuale Verteilung erfolgt ohne Berücksichtigung der Gebäudeart (z.B. Wohngebäude, Bürogebäude) und des Montageorts (z.B. Außenwand, Dach). Im Kleinwohnungsbau wird erfahrungsgemäß bei Außenwänden häufig EPS, auch als „Styropor“ bekannt, verbaut. Eine diesbezügliche Analyse erfolgt im Kapitel 5.2.1 auf Seite 74.

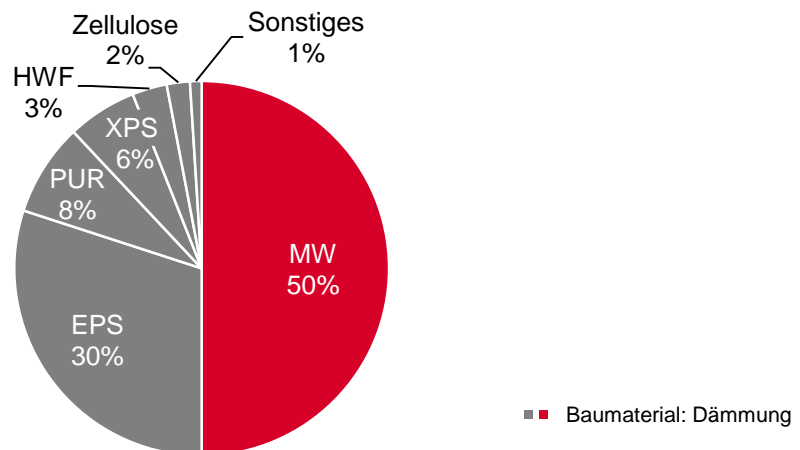


Abbildung 4.8: Dämmstoffaufteilung für den deutschen Gesamtmarkt Dämmstoffe (Basisjahr 2011)
 [MW: Mineralwolle, EPS: Expandierter Polystyrolschaum, PUR: Polyurethan-Hartschaum, XPS: Extrudierter Polystyrolschaum, HWF: Holzweichfaser]
 (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [185], [186:706])

4.3.2 Gebäudetechnik

Prinzipiell ist die statistische Datenlage bezüglich üblich verwendeter Gebäudetechnikkomponenten und -systeme unzulänglich⁵⁵, v.a. hinsichtlich der eingesetzten Materialien. Für die Sanitärtechnik (Verteilung, Übergabe) konnten keine aussagekräftigen Unterlagen gefunden werden. Bei der Heizungstechnik ist die Datenlage am besten, hier liegen Daten für die Erzeugungsart und die Übergabeart vor. Bei der Lüftungstechnik existieren nur Angaben zum System (Erzeugung), jedoch keine zur Verteilung und Übergabe. Die einzigen Angaben für den Standard der Elektrotechnik beziehen sich auf die Berücksichtigung von Eigenstromversorgungsanlagen (Erzeugung).

Die Sanitärtechnik wird mit der durchschnittlichen Standardausstattung angenommen. Dies erfolgt in Anlehnung an den derzeit üblichen Ausstattungsgrad „gehobene Ausstattung“ nach VDI 6000-1 [188]. Basis ist hierfür die Ausstattung der in Kapitel 4.2 auf Seite 55 beschriebenen Wohngebäude.

Die Beheizung von Gebäuden erfolgt zumeist zentral und mit Erdgas. Im gesamten deutschen Wohngebäudebestand hat die Zentralheizung einen Anteil von ca. 79 % [189:38]. Dieser Wert steigt auf durchschnittlich 90 % bei Neubauten, die 2013 und 2014 fertig gestellt wurden [190:39]. Die Warmwasserbereitung erfolgt bei KfW-Gebäuden (Basisjahr 2013) zu 97 % durch das Heizsystem [187:59]. Ferner sind laut Statistischem Bundesamt [183] die drei überwiegenden Heizenergiearten in deutschen Haushalten Erdgas mit 57 %, gefolgt von Heizöl mit 28 % und Strom mit 7 % [191:16]. Bei 2014 neu errichteten Wohngebäuden spielt der Einsatz von erneuerbarer Energie eine größere Rolle: hier beträgt der erneuerbare Energieanteil ca. 39 % [190:48]. Zum Vergleich: 2000 betrug dieser Anteil ca. 1 % bzw. 2005 ca. 7 % [190:45]. Seit 2011 ist die Dynamik der Verdrängung von konven-

⁵⁵ Aufgrund fehlender statistischer gesamtdeutscher Daten wurde bei der Gebäudetechnik hauptsächlich die KfW-Studie [187] zur Ermittlung des Standards herangezogen. Hierbei sei anzumerken, dass die KfW-Gebäude staatlich geförderte Gebäude darstellen und somit einen überdurchschnittlichen Gebäudestandard einschließlich Gebäudetechnik aufweisen. Die Studie [187] repräsentiert ca. 54 % des deutschen Wohnungsneubaus in 2013 [187:5].

tionellen Energieträgern (Erdgas, Öl) durch erneuerbare Energien etwas gebremst [192:24]. Wie in *Abbildung 4.9* deutlich zu sehen, repräsentiert Erdgas mit 51 % weiterhin die überwiegende Heizenergieart bei deutschen Wohnungsneubauten (2008: 64 %, 2011: 52 % [190:45+46]). Folglich kann angenommen werden, dass ein zentrales Erdgas-Brennwertgerät mit zentraler Warmwasserbereitung die heutige Heizenergieerzeugung am besten widerspiegelt.

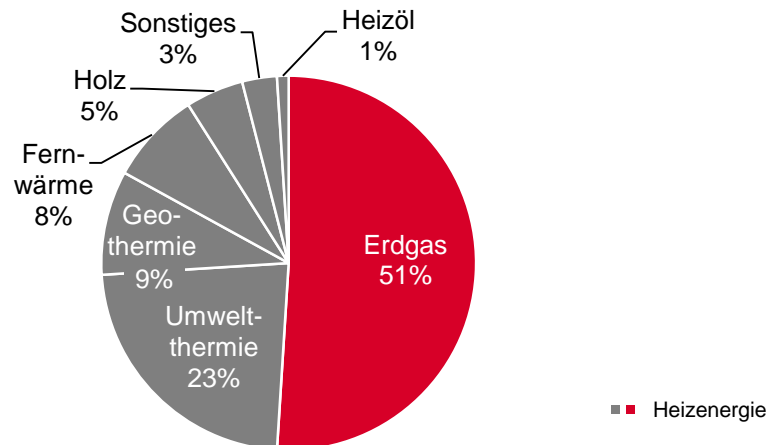


Abbildung 4.9: Heizenergieaufteilung bei deutschen Wohngebäudeneubauten (Basisjahr 2013 und 2014)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [190:47+48])

Mittels einer solaren Warmwasserbereitung und der Kombination mit Ersatzmaßnahmen wird beim Standard das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [56] eingehalten⁵⁶. Dies beruht auf der Tatsache, dass ca. 40 % mit Kombinationen bzw. 58 % der Wohnneubauten das EEWärmeG [56] nur durch Ersatzmaßnahmen erfüllen [192:23]. Die EnEV [20] berücksichtigt das EEWärmeG [56] insofern, als dass es beim Referenzwohngebäude eine Solaranlage für die Warmwasserbereitung annimmt [20:Anl.1 Tab.1]. Dies bildet ebenso die Grundlage für die Solaranlagengröße. Es wird davon ausgegangen, dass die solare Warmwasserbereitung kombiniert mit Ersatzmaßnahmen (Wärmerückgewinnung, bessere Dämmung, etc.) das EEWärmeG [56] erfüllen. Deshalb wird beim Standard der Heizungstechnik eine solare Warmwasserbereitung angenommen (Solaranlagengröße: EnEV [20] Referenzgebäude).

Die häufigste Übergabe bei der Heizungstechnik ist die Fußbodenheizung (FBH). Bei 88 % aller geförderten Gebäude wurde in 2013 FBH eingesetzt [187:59]. Aufgrund der Tatsache, dass niedrige Heiztemperaturen für die Energieeffizienz von Heizungsanlagen von Vorteil sind und die Flächenheizung bei den meisten KfW-Gebäuden eingesetzt wurde, wird die FBH als Standard für die Heizungsübergabe gewählt.

⁵⁶Neu zu errichtende Gebäude müssen seit 2009 das EEWärmeG [56] erfüllen und somit einen gewissen Anteil des Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien decken [56:§3]. Hierbei kann dies durch solarthermische Anlagen (Solaranlage), Biomasse bzw. Biogas, Geothermie bzw. Umweltwärme (Wärmepumpe) oder Ersatzmaßnahmen (z.B. verbesserte Wärmedämmung) erfolgen [56:§5+§7]. Eine Kombination der erneuerbaren Energien und Ersatzmaßnahmen zur Erfüllungspflicht ist möglich [56:§3].

Die meist eingesetzte Lüftungsvariante im Neubau ist die mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG). 2013 wurden 58 % der KfW-Neubauten mit einer Lüftungsanlage ausgestattet [187:61]. Sofern eine mechanische Lüftungsanlage zum Einsatz kommt ist diese zu 86 % mit einer WRG ausgestattet [187:62]. Daher wird als Standard eine zentrale Lüftungsanlage mit WRG angenommen.

Die Elektrotechnik wird anhand des gängigen Standards angenommen. Basis ist hierfür die Ausstattung der in Kapitel 4.2 auf Seite 55 beschriebenen Wohngebäude (in etwa „Ausstattungswert ***“⁵⁷ [193]). Beim Standardgebäude kommt keine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) zum Einsatz, da nur in 14 % der KfW-Gebäude eine PV-Anlage installiert wurde [187:60].

4.3.3 Übersicht über die Eigenschaften

Bestandteile des Standardgebäudes

Das Standardgebäude besteht aus den üblichsten Baumaterialien und -komponenten, d.h. aus Bauteilen, die derzeit am häufigsten in deutschen Wohnneubauten verwendet werden. Das Standardgebäude repräsentiert keinen energetischen Baustandard, sondern nur die Baukonstruktion und Gebäudetechnik mit den dementsprechenden Materialien. Hierbei wird unterstellt, dass bei unterschiedlichen Gebäudetypen (z.B. Ein- oder Mehrfamilienhaus) die Standardmaterialien gleich bleiben. Wie bereits dargestellt, besteht das Standardgebäude weitgehend aus mineralischen, synthetischen und metallischen Rohstoffen und wird überwiegend durch fossile Energie beheizt. Grundlage für die Gebäudeform ist die jeweilige Geometrie der im Kapitel 4.2 auf Seite 55 beschriebenen Wohngebäude.

Tabelle 4.4 auf der nächsten Seite fasst die typischen Eigenschaften des deutschen Durchschnittsgebäudes bzw. Standardgebäudes nochmals zusammen. Hierbei sind die Hauptbaumaterialien der Wände durch statistische Werte belegt. Die Bauteilschichten und Baumaterialien für die restliche Baukonstruktion werden nach gängiger Baupraxis angenommen, z.B. Außenfenster aus Kunststoff oder Innenanstrich mit Dispersionsfarbe. Die Gebäudetechniksysteme sind durch statistische Daten begründet. Die Materialien der Gebäudetechnik sind praxisnahe Festlegungen, z.B. Fußbodenheizung aus Mehrschichtverbundrohr oder Sanitärobjekte aus Keramik. Eine detaillierte Aufschlüsselung befindet sich im Anhang B auf Seite 179.

Vergleichsgröße der Varianten (Standardgebäude)

Für die Komponentenbetrachtung (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) werden als jeweiliger Bezugswert die Baukomponenten und -materialien des Standardgebäudes zugrunde gelegt. Die Baukonstruktionsvarianten werden bei allen Bauteilen mit dem Standardaufbau bei identischem

⁵⁷Nach [193] ist der „Ausstattungswert ***“ die Standardausstattung mit beispielsweise 10 Küchensteckdosen; zum Vergleich: „Ausstattungswert **“ (Mindestausstattung) 5 Küchensteckdosen bzw. „Ausstattungswert ****“ (Komfortausstattung) 12 Küchensteckdosen.

Tabelle 4.4: Übersicht über die Baukonstruktion und Gebäudetechnik des Standardgebäudes

Bezeichnung	Baustoffe / Baukomponenten
Baukonstruktion	
Gründung (KG 320)	Stahlbeton (2% Bewehrung) mit XPS und Sauberkeitsschicht
Außenwände (KG 330)	Ziegel mit Mineralwolle sowie Kalkzementputz (außen) und Gipsputz (innen) (Wärmedämmverbundsystem) (Außenluft) bzw. Stahlbeton (2% Bewehrung) mit XPS (Erdreich) und Kunststofffenster
Innenwände (KG 340)	Ziegel und Gipsputz sowie Holzinrentüren
Decken (KG 350)	Stahlbeton (2% Bewehrung) mit Zementestrich und Mineralwolle
Dächer (KG 360)	Steildach-Holzkonstruktion mit Mineralwolle und Holzweichfaserunterdeckplatte und Tondachziegeln sowie mit Gipskartonplatten (innen)
Gebäudetechnik	
Sanitärtechnik (KG 410)	Standardausstattung: „gehobene Ausstattung“
Heizungstechnik (KG 420)	Zentrales Erdgas-Brennwertgerät mit Fußbodenheizung und zentraler Warmwasserbereitung sowie Solaranlage (Trinkwarmwasser)
Lüftungstechnik (KG 430)	Zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
Kältetechnik (KG 434)	Keine Kühlung
Elektrotechnik (KG 440, 450, 480)	Standardausstattung: „Ausstattungswert ***“
Sonstige Technik (KG 460, 470)	-- (kein Aufzug, keine Feuerlöschanlage etc.)

U-Wert verglichen. Beispielsweise besteht die Außenwand aus Ziegelstein mit einem Mineralwolle-Wärmedämmverbundsystem (WDVS), während bei einem U-Wert von $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ die Dämmstärke 25 cm beträgt und ein Gewicht von $17,6 \text{ kg}/\text{m}^2$ hat, ist die äußere Dämmschicht des Wärmedämmverbundsystems mit grauer EPS-Dämmung („graues Styropor“) 16 cm dick und $2,8 \text{ kg}/\text{m}^2$ schwer.

Als Vergleichsgröße bei der Berechnung der unterschiedlichen Energiekonzepte oder verschiedener Gebäudestandards dient das Standardgebäude mit der modifizierten Anlagentechnik des Referenzgebäudes (EnEV 2014 [20]). Die Ausführung (Anlage 1 Tab. 1 [20:Anl.1 Tab.1]) zum Referenzgebäude ist geringfügig anders und entspricht dem Standardgebäude; beispielsweise erfolgt die Beheizung mit Erdgas anstelle von Heizöl. Die Änderungen sind im Anhang B auf Seite 179 dokumentiert. Der Energiebedarf wird, wie im Kapitel 4.1.2 auf Seite 40 beschrieben, nach der EnEV 2014 [20] einschließlich elektrischem Energieverbrauch berechnet. Die U-Werte entsprechen der jeweiligen Variante, z.B. repräsentiert der Basisstandard hierbei die U-Werte des Referenzgebäudes nach EnEV 2014 [20].

4.4 Varianten

4.4.1 Energetischer Gebäudestandard

Die in *Tabelle 4.5 auf der nächsten Seite*⁵⁸ dargestellten deutschen energetischen Gebäudestandards werden in dieser Arbeit untersucht; wobei nicht alle Standards einem Niedrigstenergiestandard entsprechen. Das Basisgebäude als eine energetische Variante dient als Referenz. Des Weiteren werden noch der KfW 70- und KfW 55- sowie KfW 40-Standard betrachtet, mit ca. 25 %, 34 % bzw. 48 % durchschnittlich besseren U-Werten als das Referenzgebäude nach EnEV [20]; hierbei entspricht die KfW 70-Variante annähernd dem EnEV 2014-Standard neu bzw. somit dem EnEV 2016-Standard. Ferner werden noch sehr gut gedämmte Gebäude untersucht: zum einen der Passivstandard⁵⁹; zum anderen ein sehr extrem gedämmtes Gebäude mit minimal realisierbaren U-Werten (Min. U.). Die Gebäudestandards werden anhand ihrer U-Werte definiert und nicht mittels Primärenergiebedarf und spezifischem Transmissionswärmeverlust bestimmt. Die Gebäudebauteile bzw. Baukomponenten werden hinsichtlich ihres energetischen Baustandards variiert und ökologisch untersucht.

4.4.2 Baukonstruktion

Es werden alle Bauteile sowohl in Massiv- als auch in Leichtbauweise berechnet; hiervon ausgenommen sind das Dach (nur Leichtbauweise) und Bauteile gegen Erdreich (nur Massivbauweise). Unter der Annahme, dass Flachdächer bei Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern eine untergeordnete Rolle spielen, werden nur Holz-Steildächer betrachtet. Die Materialien der Bauteile gegen Erdreich werden als konstant angenommen, da hier meist Stahlbeton und XPS-Dämmung (feuchteunempfindlich) zum Einsatz kommen. Ebenso werden die Außenfenster und -türen (Kunststoff) und die Innentüren (Holz) nicht verändert. Die Bauteilstärke des Tragwerks bleibt bei allen Bauteilen konstant; nur beim Steildach und bei der Außenwand gegen Außenluft (monolithisch und Holzrahmenbauweise) wird die Tragwerksstärke variiert.

Außenwände gegen Außenluft werden als Wärmedämmverbundsystem und als monolithische Variante, d.h. in Massivbauweise mit und ohne zusätzliche Dämmstoffschicht sowie als Leichtbauvariante in Holzrahmenbauweise untersucht. Bei den Massiv-Außenwänden wird nur die einschalige Bauweise betrachtet, da diese mit dem Holzbau ca. 77 % der Außenwände bei KfW-Gebäuden ausmachten (zweischaliges Mauerwerk ca. 17 %) [187:56]. Bei allen Außenwandvarianten bildet der Kalkzement-

⁵⁸Beim Basisgebäude werden die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) des Referenzwohngebäudes nach EnEV 2014 [20] zugrunde gelegt. Die U-Wertangaben der KfW-Gebäude beruhen auf KfW-Neubauten in 2013 (KfW-Studie [187]). Bei der Passivvariante und der mit minimalen U-Werten wurden die U-Werte die mit einem „*“ gekennzeichnet sind und die Außentüren festgelegt. Alle ungekennzeichneten U-Werte wurden mittels des durchschnittlichen prozentualen Unterschieds errechnet, z.B. bei einem Basis-U-Wert von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ multipliziert mit 75 % ergibt dies $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Folglich wird davon ausgegangen, dass die U-Werte im gleichen Maße sinken, wie die bekannten Werte (Außenwände gegen Außenluft, Außenfenster, Decken gegen unterschiedliche Temperaturen und Dach).

⁵⁹Allgemein sollen beim Passivhausstandard die opaken Außenbauteile (z.B. Außenwand) $< 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und transluzenten Bauteile (z.B. Fenster) $< 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sein. Allerdings wird kein Passivhauskonzept näher betrachtet.

Tabelle 4.5: Übersicht über die verwendeten U-Werte der energetischen Gebäudestandards
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Basis: [20:Anl.1 Tab.1], KfW: [187:63] und Berechnung, Passiv und Min. U.: Annahmen und Berechnung)

Bauteil	Basis	KfW 70	KfW 55	KfW 40	Passiv	Min. U.
			U-Wert [W/(m ² K)]			
Bodenplatte	0,35	0,26	0,23	0,18	0,15	0,12
Außenwand gegen Erdreich	0,35	0,26	0,23	0,18	0,15	0,12
Außenwand gegen Außenluft	0,28*	0,19*	0,16*	0,12*	0,10*	0,07*
Außentüre	1,80	1,34	1,18	0,93	0,80	0,80
Außenfenster	1,30*	0,94*	0,86*	0,80*	0,80*	0,70*
Innenwand gegen untersch. Temp.	0,35	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Innenwand gegen gleiche Temp.	-	-	-	-	-	-
Innentüre	-	-	-	-	-	-
Decke gegen Außenluft	0,28	0,21	0,18	0,15	0,13	0,10
Decke gegen untersch. Temp.	0,35*	0,24*	0,21*	0,15*	0,13*	0,10*
Decke gegen gleiche Temp.	-	-	-	-	-	-
Dach / Steildach	0,20*	0,18*	0,16*	0,12*	0,10*	0,07*
Dachfenster (n.v. = nicht vorhanden)	1,40	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Durchschnittlicher %-Unterschied der U-Werte (Grundlage: Werte mit *)	100%	75%	66%	52%	46%	36%

putz mit Dispersions-Silikatfarbe die Außenansicht, um eine optisch identische Gebäudefassade zu gewährleisten⁶⁰.

Neben dem energetischen Standard wird zusätzlich das Tragwerk- und Dämmmaterial variiert. Grundlage bilden hierfür die 98 % bzw. 99 % üblichsten Bau- bzw. Dämmstoffe in Deutschland. Die Bandbreiten hinsichtlich Dichte und Wärmeleitfähigkeit für Bau- sowie Dämmstoffe von Gebäuden sind enorm. In *Abbildung 4.10 auf der nächsten Seite* ist beispielsweise ersichtlich, dass die Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein um den Faktor 20 variiert. Gleichermaßen sind unter den Baustoffen große Unterschiede zu verzeichnen, z.B. bei der Dichte zwischen Stahlbeton und Porenbetonstein mit einem Verhältnis von ca. 1:7. Bei den Dämmstoffen für Gebäude sind die Bandbreiten ebenso beträchtlich. Beispielsweise bei Holzweichfaser (HWF) mit einer 237 % Varianz bei der Wärmeleitfähigkeit und einem Dichteunterschied um das 12-fache (*Abbildung 4.11 auf Seite 67*).

Die Baueigenschaften der Wärmeleitfähigkeit und Dichte haben einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse der ökologischen Betrachtung. Die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst direkt den Wärmedurchgangskoeffizienten und somit die Bauteildicke (v.a. Dämmstoffdicke). Hieraus wird mittels der Dichte das Gewicht ermittelt. Dieses ist wiederum die Grundlage der Sachbilanz, um mit dem spezifischen Datenbankwert multipliziert die Wirkungsabschätzung zu ergeben.

Für das LCA werden die zwei häufigsten Baueigenschaftspaarungen (Dichte und Wärmeleitfähigkeit) je Einsatzort festgelegt (*Tabelle 4.6 auf der nächsten Seite* und *Tabelle 4.7 auf Seite 67*). Dies hat

⁶⁰Alle detaillierten Bauteilaufbauten können dem *Anhang* in *Tabelle B.1 auf Seite 181* entnommen werden.

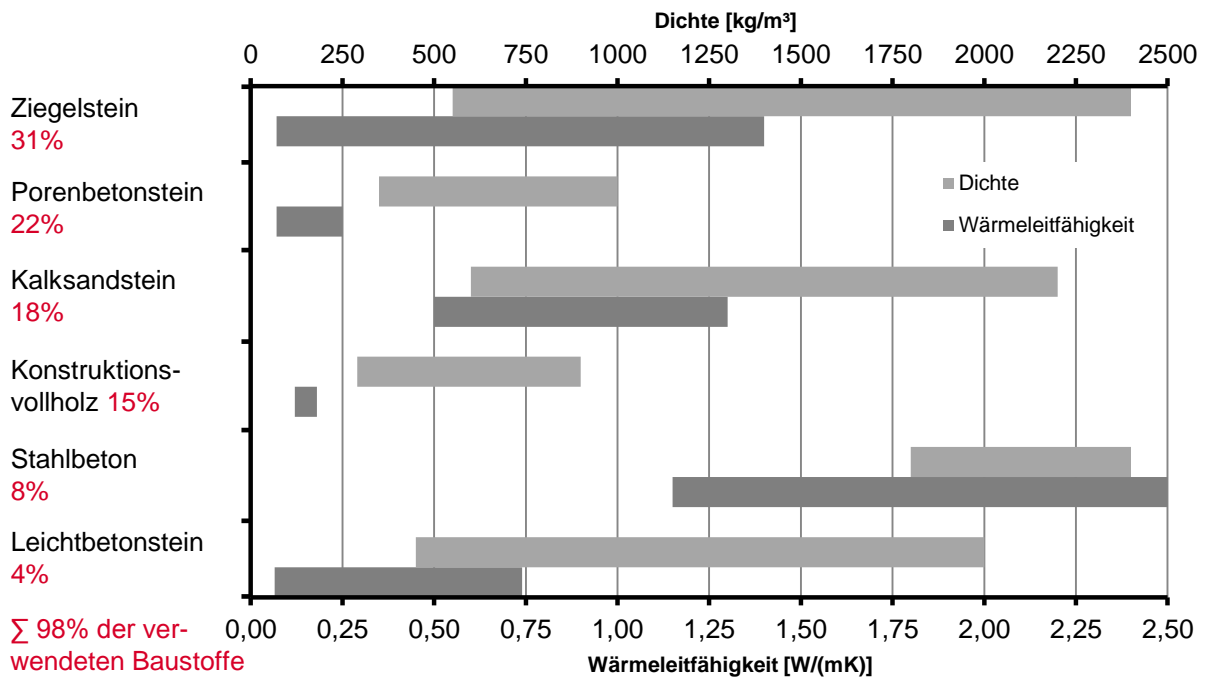


Abbildung 4.10: Bandbreite der Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe für Wohngebäude mit Angabe zur Verwendungshäufigkeit
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [168:8+9], [194:14–17], [195:15+19], [196:24], [197:7+9])

Tabelle 4.6: Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Hauptbaustoffs sowie die zugehörigen Mörtel- bzw. Metallanteile
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autoren-erfahrung)

Baustoff [-]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]	Mörtel / Metall [-]	Dichte [kg/m ³]	Volumenanteil [%]
Ziegelstein = Standard	1200	0,25	Mauermörtel	1800	5%
Ziegelstein (perlitgefüllt)	750	0,08	Dünnbettmörtel	1600	1%
Ziegelstein	1200	0,25	Mauermörtel	1800	5%
Porenbetonstein	350	0,08	Dünnbettmörtel	1600	1%
Porenbetonstein	500	0,13	Dünnbettmörtel	1600	3%
Konstruktionsvollholz	350	0,13	Verzinkter Stahl	7800	Bedarf
Konstruktionsvollholz	490	0,13	Verzinkter Stahl	7800	Bedarf
Brettschichtholz	380	0,13	Verzinkter Stahl	7800	Bedarf
Brettschichtholz	508	0,13	Verzinkter Stahl	7800	Bedarf
Kalksandstein	1800	0,99	Dünnbettmörtel	1600	1%
Kalksandstein	2000	1,10	Mauermörtel	1800	5%
Stahlbeton (C25/30)	2350	1,65	Bewehrungsstahl	7800	2%
Stahlbeton (C20/25)	2350	1,65	Bewehrungsstahl	7800	2%
Leichtbetonstein	450	0,09	Dünnbettmörtel	1600	1%
Leichtbetonstein	900	0,34	Mauermörtel	1800	5%

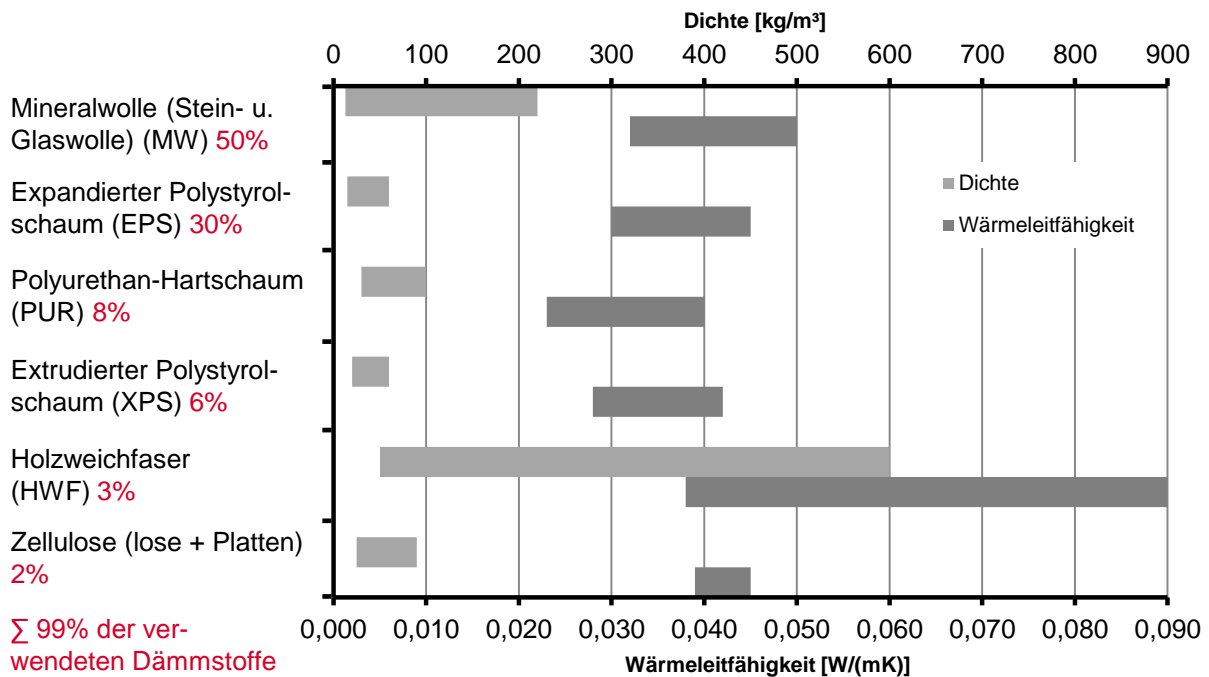


Abbildung 4.11: Bandbreite der Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe für Wohngebäude mit Angabe zur Verwendungshäufigkeit (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [185], [186:706], [184:23–54], [198:45–59], [199:176+178+250])

Tabelle 4.7: Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Wandaufbauten (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autoren-erfahrung)

Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]	Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]
Wand (WDVS - Massivbauweise)			Wand (Gefach - Holzrahmenbauweise)		
MW = Standard	70	0,035	WDVS = Standard		
MW (Steinwolle)	70	0,035	MW (Steinwolle)	70	0,035
MW (Glaswolle)	x	x	MW (Glaswolle)	30	0,035
EPS (weiß)	20	0,035	EPS (weiß)	-	-
EPS (grau)	17	0,032	EPS (grau)	-	-
PUR	30	0,027	PUR	x	x
PUR	30	0,023	PUR	x	x
XPS	x	x	XPS	x	x
XPS	x	x	XPS	x	x
HWF (Platten)	195	0,047	HWF (Platten)	55	0,039
HWF (Platten)	190	0,045	HWF (Platten)	110	0,040
Zellulose	-	-	Zellulose (lose)	54	0,040
Zellulose	-	-	Zellulose (lose)	58	0,040

- = keine genormte Anwendung; x = unkonventionell

drei Gründe, (1) da die „eine typische“ Paarung je Baustoff bzw. Dämmstoff praxisfern ist; (2) die niedrigste Dichte nicht automatisch die kleinste Wärmeleitfähigkeit zur Folge hat (und umgekehrt); (3) sich v.a. die Dichte bei Dämmstoffen je Einsatzort ändert, z.B. steigt die Dichte von Mineralwolle um das zwei- bis dreifache zwischen den Einsatzbereichen unbelastet (Zwischensparrendämmung) oder belastet (Trittschalldämmung) an. Eine vollständige und praxisnahe Zuordnung (Dichte und Wärmeleitfähigkeit) ist in der ÖKOBAUDAT [76] derzeit nicht gegeben.

Die Tabellen zeigen die gewählten Baueigenschaftspaarungen je Baustoff mit dem zugehörigen Mörtel- bzw. Metallanteil⁶¹ bzw. die zwei üblichsten Dichten und Wärmeleitfähigkeiten je Dämmstoff bei der Wanddämmung⁶². Eine regionale Abweichung bei den Baustoffen ist möglich, wird jedoch im gesamtdeutschen Durchschnitt als vernachlässigbar angenommen. Im [Anhang](#) sind die Baueigenschaften für Decke ([Tabelle B.2 auf Seite 189](#)) und Dach ([Tabelle B.3 auf Seite 189](#)) aufgeführt. Hierdurch ergeben sich beispielsweise für die Außenwand gegen Außenluft und das Dach 288 Varianten je U-Wert, für die Innenwand je Wandstärke 22 Varianten und bei den Decken gegen gleiche Temperatur (beheizt) 80 bzw. gegen unbeheizt 180 Varianten je U-Wert.

4.4.3 Gebäudetechnik

Erzeugung⁶³

Die in [Tabelle 4.8 auf der nächsten Seite](#)⁶⁴ dargestellte Gebäudetechnik dient als Basis für die Technikvarianten bei der ökologischen Betrachtung in dieser Arbeit. Hierbei unterscheiden sich nicht nur die Energiekonzepte, sondern ebenso die eingesetzten Materialien⁶⁵.

Bei allen Energieversorgungsvarianten findet eine zentrale Versorgung (Warmwasser, Heizwärme und Lüftung) statt. Das Trinkwarmwasser wird mittels eines indirekt beheizten Speichers erzeugt; die Beheizung erfolgt mit dem identischen Wärmeerzeuger wie für die Heizwärme. Die Auswahl der Erzeugungsvarianten beruht auf den überwiegend verwendeten Heizenergiearten von Wohngebäudeneubauten:

⁶¹Der Stahlanteil bei der Holzrahmenbauweise variiert je Bauteil und lässt sich folglich schwer pauschal ermitteln; deshalb wird dieser individuell je Bauteil berechnet und in der Sachbilanz im [Anhang B auf Seite 179](#) ausgewiesen.

⁶²x kennzeichnet Bauanwendungen, die in der Baupraxis unüblich sind; beispielsweise findet XPS als WDVS aufgrund möglicher Spannungsrisse am Außenputz fast keine Anwendung oder zum Beispiel PUR und XPS könnten theoretisch als Holzgefachdämmung eingesetzt werden, jedoch sind diese nicht flexibel und müssten in Maßarbeit eingepasst werden und es könnten Knackgeräusche durch Wärmespannungen auftreten; zudem widerspricht dies der Holzbauphilosophie, hauptsächlich nachwachsende Rohstoffe zu verbauen.

⁶³Die Gebäudetechnik wird üblicherweise nach Erzeugung, Verteilung und Übergabe gegliedert; wobei die Erzeugung für die Sanitär- und Elektrotechnik außerhalb der Systemgrenzen liegt und folglich nicht bilanziert wird.

⁶⁴x kennzeichnet Heizungskonzepte, die in der Baupraxis unüblich sind und folglich nicht betrachtet werden; hier die Kombination von Wärmepumpe mit Heizkörpern.

⁶⁵Alle Bauteile und Baukomponenten sowie deren Dimensionierung der Gebäudetechnik können dem [Anhang](#) in [Tabelle B.4 auf Seite 190](#) entnommen werden.

Tabelle 4.8: Übersicht über die ausgewählten Gebäudetechnikvarianten

Erzeugung	Verteilung		Übergabe
Sanitärtechnik Varianten: 40			
Keine Bilanzierung	-	-	Keine Variation
			Wasserleitung (Edelstahl, Kupfer, PB, PE-X, PP, PVC-C, Mehrschicht., Verz.) Abwasserleitung (PE, PE-HD, PVC-C, ABS, SML)
Heizungstechnik Varianten: 4768			
<u>Erdgas-Brennwert m. Solar^A</u>	<u>TWW-Sp.</u>	-	
Erdgas-Brennwert ^{B-J}	TWW-Sp.	-	
Luft-Wasser-WP ^{B-J}	TWW-Sp.	Puffer	Heizungsleitung (Kupfer, Edelstahl, PB, PE-X, PP, C-Stahl, Mehrschicht., Stahl)
Sole-Wasser-WP Sonde ^{B-J}	TWW-Sp.	Puffer	Solarleitung (Kupfer, Edelstahl, Edelstahlwellrohr)
Sole-Wasser-WP Koll. ^{B-J}	TWW-Sp.	Puffer	
Pelletkessel ^{B-J}	TWW-Sp.	Puffer	
Lüftungstechnik Varianten: 50+1			
Gerät v.a. Metall (schwer)			Geräteanschlussleitung (EPE, EPP, PE, PP, Verz.)
Gerät v.a. Kunststoff (leicht)	-	-	Anbindeleitung (flex. PE, flex. PP, PE, PP, Verz.)
Ohne (Fensterlüftung)			Keine Variation
^A warmwasserunterstützend Solar EnEV-Referenzgebäude, $A = 0,09 \times A_N^{0,8}$ ^B zusätzlich warmwasserunterstützend Solar klein, z.B. EFH 2 Kollektoren ^C zusätzlich warmwasserunterstützend Solar groß, z.B. EFH 3 Kollektoren ^D zusätzlich heizungsunterstützend Solar klein mit Puffer, z.B. EFH 6 Kollektoren ^E zusätzlich heizungsunterstützend Solar groß mit Puffer, z.B. EFH 8 Kollektoren ^F zusätzlich PV (maximal, keine Nordseite), z.B. EFH ca. 6,5kWp (mit EnEV-Solar ca. 5,2kWp) ^G zusätzlich PV mit warmwasserunterstützend Solar klein, z.B. EFH ca. 6,0kWp ^H zusätzlich PV mit warmwasserunterstützend Solar groß, z.B. EFH ca. 5,7kWp ^I zusätzlich PV mit heizungsunterstützend Solar klein mit Puffer, z.B. EFH ca. 4,6kWp ^J zusätzlich PV mit heizungsunterstützend Solar groß mit Puffer, z.B. EFH ca. 3,8kWp ^X unkonventionell: Wärmepumpe mit Heizkörper (HK); <u>Unterstrichen</u> : Standardvariante			

- 51 % Erdgas: Es werden nur Brennwertkessel berücksichtigt, Niedertemperaturkessel werden für Niedrigstenergiegebäude als nicht mehr zeitgemäß erachtet.
- 23 % Umweltthermie: Luft-Wasser-Kompressionswärmepumpen werden als Splitgerät bilanziert.
- 9 % Geothermie: Sole-Wasser-Kompressionswärmepumpen werden mit Wärmequelle Erdsonde und Erdkollektor betrachtet; Wasser-Wasser-Kompressionswärmepumpen werden aufgrund der genehmigungspflichtigen Hürden vernachlässigt.
- 8 % Fernwärme: Keine Berücksichtigung, da die Anlagentechnik hauptsächlich in der Fernwärmezentrale untergebracht ist und somit außerhalb der Systemgrenze liegt.
- 5 % Holz: Die Pelletheizung wird als Repräsentant gewählt, aufgrund der Tatsache, dass Hackschnitzelanlagen vornehmlich für Gebäude mit größerem Wärmebedarf eingesetzt werden.
- 4 % Sonstiges: Wird vernachlässigt (hierunter fällt auch Heizöl mit ca. 1 %).

Jede Heizungsvariante wird zusätzlich mit einer auf dem südorientierten Dach montierten warmwasser- oder heizungsunterstützten Solar- und / oder PV-Anlage in verschiedenen Größen kombiniert (Tabelle 4.8). Bei den Solarkollektoren wurden Flachkollektoren ausgewählt, da Vakuum-

röhrenkollektoren einen Marktanteil von nur 10 % haben [192:19]. Sofern eine PV-Anlage bilanziert wird, erfolgt die Darstellung unter der Heizungstechnik (separat gekennzeichnet); da die PV-Anlage – wie auch die Heizungstechnik – als Energieerzeugungsanlage angesehen wird und das Energiekonzept ergänzt. Des Weiteren deckt die PV-Anlage den Hilfsstromenergiebedarf der Heizung und, falls vorhanden, der Lüftungstechnik. Ein weiterer Vorteil ist, dass so die Elektrotechnik als einzelne Variante betrachtet werden kann und die Technikvarianten bei der Heizungstechnik analysiert werden können. Sofern eine Photovoltaikanlage zum Einsatz kommt, wird diese mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 13,3 % berechnet (Mittelwert nach ÖKOBAUDAT [76]).

Bei der Lüftungstechnik kommt eine zentrale mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (ohne Erdwärmetauscher) zum Einsatz oder alternativ keine Lüftungsanlage (Fensterlüftung). Hierbei wird im Einfamilienhaus ein zentrales Gerät und im Mehrfamilienhaus ein Zentralgerät pro Wohnung eingeplant. Die Wohnraumlüftungsgeräte teilen sich materialtechnisch in zwei Lager: das schwere Lüftungsgerät bestehend aus hauptsächlich verzinktem Blech und das leichtere Gerät aus Kunststoff.

Verteilung

Bei der Sanitärtechnik werden die Rohrmaterialien der Wasser- und Abwasserleitungen variiert (*Tabelle 4.8 auf der vorherigen Seite*). Zum Einsatz kommen bei den Wasserleitungen: Edelstahl-, Kupfer-, PB-, PE-X-, PP-, PVC-C-, Mehrschichtverbund- und verzinktes Rohr sowie bei den Abwasserleitungen: PP-, PE-HD-, PVC-C-, ABS- (alle HT-Rohr) und SML-Rohr⁶⁶. Die Wasserverteilung erfolgt einschließlich einer Trinkwasserzirkulation mittels üblicher unterer Verteilung („Kellerverteilung“). Die Wasserinstallation wird als T-Stück-Installation geplant, wobei die Anbindeleitungen der Zirkulation beim Einfamilienhaus bis kurz vor die Entnahmestelle und beim Mehrfamilienhaus bis zum Wohnungswasserzähler verlegt werden. Die Be- und Entlüftung der Abwasserleitung erfolgt über das Dach mittels Lüfterziegel.

In der Heizungstechnik werden ebenfalls die Rohrmaterialien verändert. Es werden die gleichen Rohrwerkstoffe verwendet wie in der Sanitärtechnik, nur dass das PVC-C- und verzinkte Rohr durch Präzisionsstahlrohr (C-Stahlrohr) und Stahlrohr ausgetauscht werden. Die Heizungsverteilung⁶⁷ erfolgt nach dem üblichen Zweistrangsystem mit geschlossener unterer Verteilung. Pufferspeicher sind ggf. notwendig, um einerseits häufiges Takten des Wärmeerzeugers zu verhindern (Pelletheizkessel, Wärmepumpe) oder andererseits als Wärmespeicher zu dienen (heizungsunterstützende Solaranlage). Die Solaranlagenanbindung entspricht der Heizung, allerdings können hier aufgrund der hohen Temperaturen Kunststoffrohre nicht verwendet werden (Kupfer-, Edelstahl-, Edelstahlwellrohr).

Die Luftleitungsmaterialien werden bei der Lüftungstechnik variiert: Geräteanschluss- und Verteilleitung mit EPE-, EPP-, PE-, PP- und verzinktem Rohr sowie Anbindeleitung mit flexiblem PE-, flexiblem PP-, PE-, PP- und verzinktem Rohr. Das zentrale Wohnraumlüftungsgerät verteilt die Zuluft in die Wohn- und Schlafräume und saugt die Abluft aus den Funktionsräumen (WC, Bad, Küche etc.) ab.

⁶⁶Mineralverstärktes Abwasserrohr konnte aufgrund fehlender Daten (ÖKOBAUDAT 2016-I [76]) nicht bilanziert werden.

⁶⁷Bei den unterschiedlichen Gebäudestandards und Materialien wird von identischen Nennweiten (DN) ausgegangen.

Die Verteilung erfolgt mittels Einzelrohrinstallation, d.h. vom Luftverteiler zum jeweiligen Aus- bzw. Einlass führt eine Luftleitung; hierdurch wird bei der Lüftungstechnik mehr Leitungslänge als bei der unüblicheren T-Stück-Installation bilanziert.

Für die Elektrotechnik werden keine Varianten gerechnet, da praktisch immer Kupferkabel mit PVC-Ummantelung zum Einsatz kommen. Steckdosen und Beleuchtung werden separat abgesichert, hierdurch steigt der Verkabelungsaufwand leicht. Im Keller erfolgt die Installation mit PVC-Stangenrohr sonst Unterputz. Die Deckenanschlüsse werden im flexiblen Leerrohr verlegt.

Übergabe

Eine Variation der Übergabematerialien oder -systeme findet nur bei der Heizungstechnik statt (*Tabelle 4.8 auf Seite 69*). Hier wird die Wärmeabgabe an den Raum durch die zwei gängigen Systeme variiert: (Platten-)Heizkörper (HK) und Fußbodenheizung (FBH). Bei letzterer wird zwischen Mehrschichtverbund-, PVC ummanteltem Kupfer-, PB- und PE-X-Rohr differenziert. Aufgrund der Tatsache, dass nach eigener Abschätzung die Bauteile für die anderen Nutzerübergaben ökologisch unwichtig erscheinen (Lüftungstechnik: Luftauslässe, Elektrotechnik: Schalter etc.) sowie üblicherweise aus einem Material bestehen (Sanitärtechnik⁶⁸: Keramik etc.) bleiben diese unverändert.

4.5 Kurzzusammenfassung

- 4.1 Rahmenbedingungen:

⇒ Ökologische Analyse bzw. LCA:

- Funktionelle Einheit: $1 \text{ m}^2_{\text{NRF}_a}$
- Systemgrenzen: Gebäudeaußenkante, 50 Jahre
- Berücksichtigt: A1-A3: Herstellungsphase, B2-B4: Nutzungsphase (Instandhaltung), B6: Nutzungsphase (Energieverbrauch im Betrieb), C3-C4+D: Entsorgungsphase inkl. Recyclingpotenzial der KG 320-360: Baukonstruktion und KG 410-480: Gebäudetechnik
- Unberücksichtigt: A4: Transport (Errichtung), A5: Errichtung / Einbau, B1: Nutzung (Produkt), B5: Modernisierung, B7: Wasserverbrauch im Betrieb, C1: Rückbau / Abriss, C2: Transport (Entsorgung)
- Bewertungsparameter: $PE_{\text{ges.}}$, $PE_{\text{n.e.}}$, GWP, OPD, AP, EP, POCP
- Software: LEGEP / Excel
- Datenbank: ÖKOBAUDAT 2016

⁶⁸Es wurden nur Acrylwannen beachtet, da in der ÖKOBAUDAT 2016-I [76] kein Datensatz für Stahlmail-Wannen existiert.

- 4.2 Untersuchungsobjekte:

⇒ Als Grundlage für die Abmaße fungieren ein existentes Einfamilienhaus ($222 \text{ m}^2_{\text{NRF}_R}$ über 3 Stockwerke) und ein reales Mehrfamilienhaus ($672 \text{ m}^2_{\text{NRF}_R}$ über 5 Stockwerke).

- 4.3 Standardgebäude:

⇒ Das Standardgebäude repräsentiert die am meist verbauten Baumaterialien und -komponenten in Deutschland, u.a. Ziegelaußenwand mit WDVS aus Mineralwolle und Erdgas-Brennwertgerät mit Solaranlage und Fußbodenheizung sowie Wohnraumlüftungsgerät; als Referenz für den Vergleich mit anderen Baukonstruktions- und Gebäudetechnikvarianten dient das Standardgebäude.

- 4.4 Varianten:

⇒ Es werden sechs Energiestandards betrachtet, z.B. Außenwand gegen Außenluft von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Ebenso werden die Baukonstruktion und die Gebäudetechnik hinsichtlich Materialien und Baukomponenten bzw. Anlagensystem variiert, z.B. Außenwand gegen Außenluft und Dach je U-Wert mit jeweils 288 Varianten bzw. Heizungstechnik mit 4768 Varianten oder Sanitärtechnik mit 40 Varianten.

► **Die ökologische Betrachtung findet anhand der LCA-Methode (50 Jahre, ÖKOBAUDAT 2016) statt. Berücksichtigt werden Herstellung, Nutzung (Energieverbrauch im Betrieb und Instandhaltung) sowie Entsorgung inklusive Recyclingpotenzial. Das bereits gebaute Ein- und Mehrfamilienhaus mit seinen Varianten dient als Berechnungsgrundlage; wobei das Standardgebäude die derzeit am meisten verwendeten Bauprodukte widerspiegelt und als Vergleichsgröße dient.**

KAPITEL 5

Ökologische Analyse von Niedrigstenergiewohngebäuden

5.1 Grundlagen zur ökologischen Analyse

5.1.1 Erklärung Box-Plot-Darstellung

Die Analysemethode des Box-Plots ist eine graphische Darstellung zur Veranschaulichung der Lage und Streuung von Daten (*Abbildung 5.1*). Der Box-Plot kennzeichnet sich durch eine „Box“ und zwei Whisker bzw. Antennen sowie ggf. Ausreißerwerten. In der „Box“, meist als Interquartilsabstand (IQR) bezeichnet, kennzeichnet ein Querstrich den Median (50 %-Quartil). Der Interquartilsabstand repräsentiert 50 % der mittleren Daten (25 %-Quartil bis 75 %-Quartil). Hierdurch ist der Interquartilsabstand resistent gegen Ausreißer [159:67]. Die Whisker bzw. Antennen haben maximal die 1,5-fache Länge der „Box“. Ausreißerwerte kennzeichnen sich durch den $> 1,5$ -maligen Interquartilsabstand und werden als Kreise dargestellt [158:1018], [159:67]. Sternchen im Box-Plot-Diagramm sind Extremausreißer und stellen Werte dar, welche dreimal größer oder kleiner sind als die „Boxlänge“ [158:1018]. Weiterhin sind durch die äußersten Datenpunkte im Box-Plot das Minimum und Maximum sichtbar.

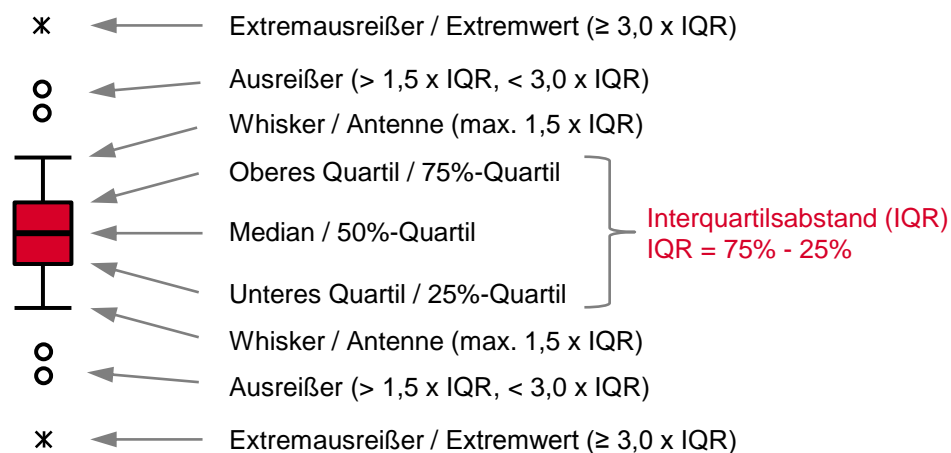


Abbildung 5.1: Erklärung der Box-Plot-Darstellung

5.1.2 Aufbau und Überblick über die ökologische Analyse

Im Folgenden werden die ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden mit einer Vielzahl von Variationen analysiert. Hierbei dienen die räumlichen Abmessungen des beschriebenen Einfamilien- und Mehrfamilienhauses (Kapitel 4.2 auf Seite 55) als Grundlage für die Kubatur. Des Weiteren werden verschiedenste Materialien und Systeme bei der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik variiert (Kapitel 4.4 auf Seite 64). Das Standardgebäude mit den üblichen Baumaterialien und Baukomponenten (Kapitel 4.3 auf Seite 59) ist die Vergleichsgröße für die unterschiedlichen Varianten des Bauwerks (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) und des Betriebs. *Abbildung 5.2 auf der nächsten Seite* gibt hierüber einen vereinfachten Überblick.

5.2 Baukonstruktion⁶⁹

5.2.1 Baukomponenten⁷⁰

Einführung

Nachstehend wird exemplarisch für die vielen Bauteile eines Gebäudes die Außenwand gegen Außenluft näher analysiert. Von der Gesamtfläche des Einfamilienhauses (inkl. Decken und Innenwände) nimmt der Flächenanteil der Außenwand gegen Außenluft den größten Anteil mit 20 % ein. Beim Mehrfamilienhaus sind es 11 %, nur die Decken gegen gleiche Temperaturen sind flächenmäßig größer. Bei Betrachtung der wärmeübertragenden Fläche hat die Außenwand gegen Außenluft bei beiden Wohngebäuden den größten Anteil (EFH: 36 %, MFH: 21 %). Deshalb wird die Außenwand gegen Außenluft detailliert analysiert und die anderen Baukomponenten eines Gebäudes nicht (Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Dach etc.) oder nicht im Detail (Decke, Innenwand) betrachtet.

PE und GWP weisen ähnliche Tendenzen auf⁷¹, deshalb werden in dieser Arbeit – sofern nicht alle Bewertungsparameter dargestellt – das GWP und das AP exemplarisch graphisch aufgezeigt; die anderen Bewertungsparameter ($PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, ODP, EP, POCP) werden im Text behandelt.

⁶⁹Die Bewertungsparameter wurden bereits detailliert im Kapitel 2.2.2 auf Seite 10 erläutert; dennoch werden für das bessere Verständnis die im Folgenden benützten Abkürzungen kurz wiederholt: **PE_{ges.}** = Primärenergieinhalt, gesamt; **PE_{n.e.}** = Primärenergieinhalt, nicht erneuerbar; **GWP** = Treibhauspotenzial; **ODP** = Ozonabbaupotenzial; **AP** = Versauerungspotenzial; **EP** = Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial; **POCP** = Sommersmogpotenzial.

⁷⁰Für die Baukomponenten wird als funktionelle Einheit der U-Wert herangezogen, so ist die energetische Qualität gleich. Die Abbildungen beziehen sich spezifisch (50 Jahre, $m^2_{Bauteil}$) auf den kompletten Lebenszyklus ohne Betrieb (Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung inkl. Gutschrift), d.h. die Eingebundene Energie bzw. Emissionen (EE) werden beurteilt; darüber hinaus werden die Rahmenbedingungen aus Kapitel 4.1 auf Seite 39 angewandt.

⁷¹Siehe hierzu auch Kapitel 3.2.4 auf Seite 37.

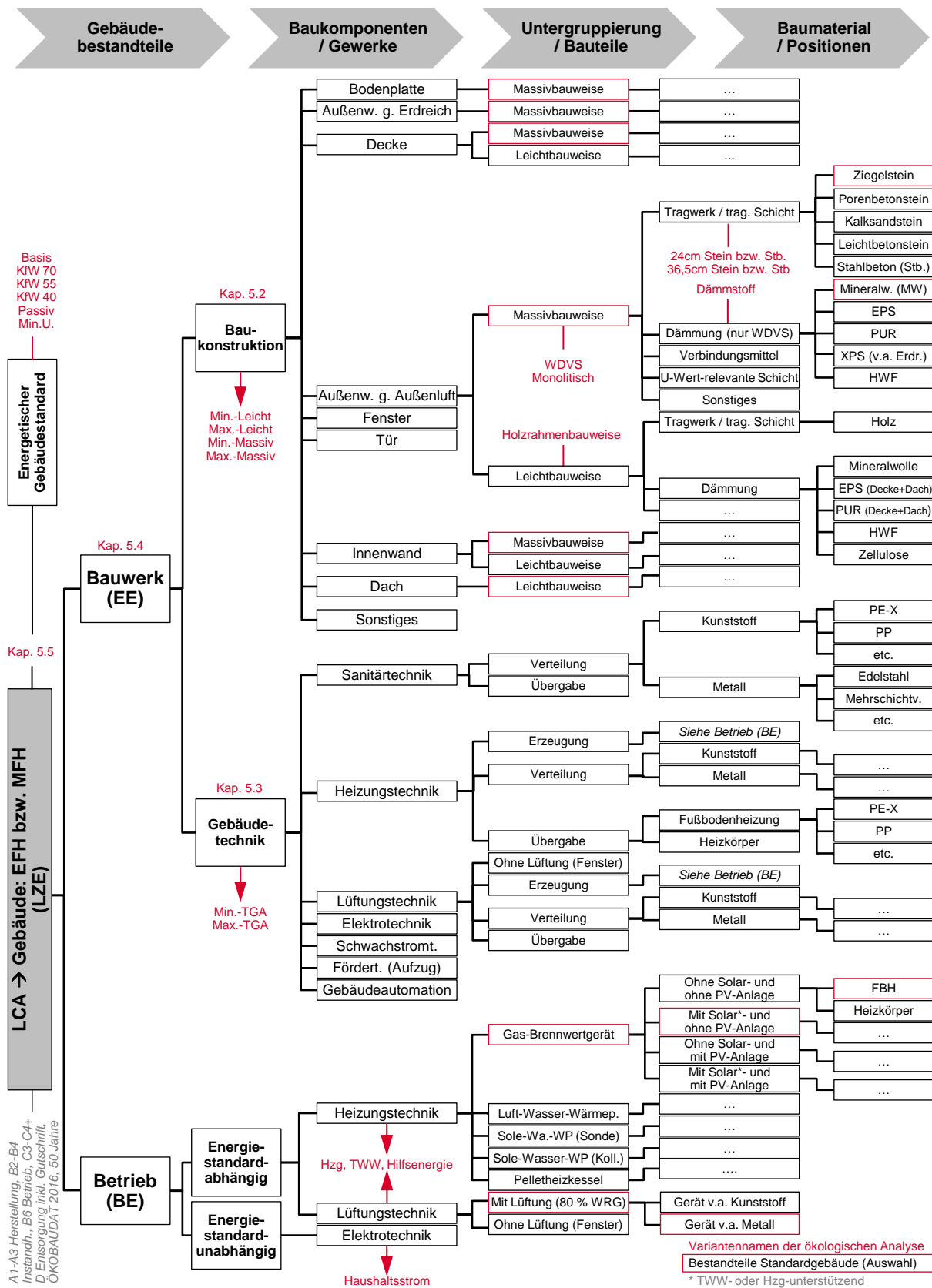


Abbildung 5.2: Aufbau und Überblick über die ökologische Analyse

Außenwand im Überblick

Abbildung 5.3 zeigt das GWP und AP über eine U-Wertbandbreite von 0,06 W/(m²K) bis 0,35 W/(m²K). Hierbei zeigt sich, dass die Massivbauweise einen größeren Bereich einnimmt als die Leichtbauweise. Dies lässt sich auf die anderen nicht gezeigten Bewertungsparameter (PE_{ges.}, PE_{n.e.}, ODP, EP, POCP) übertragen.

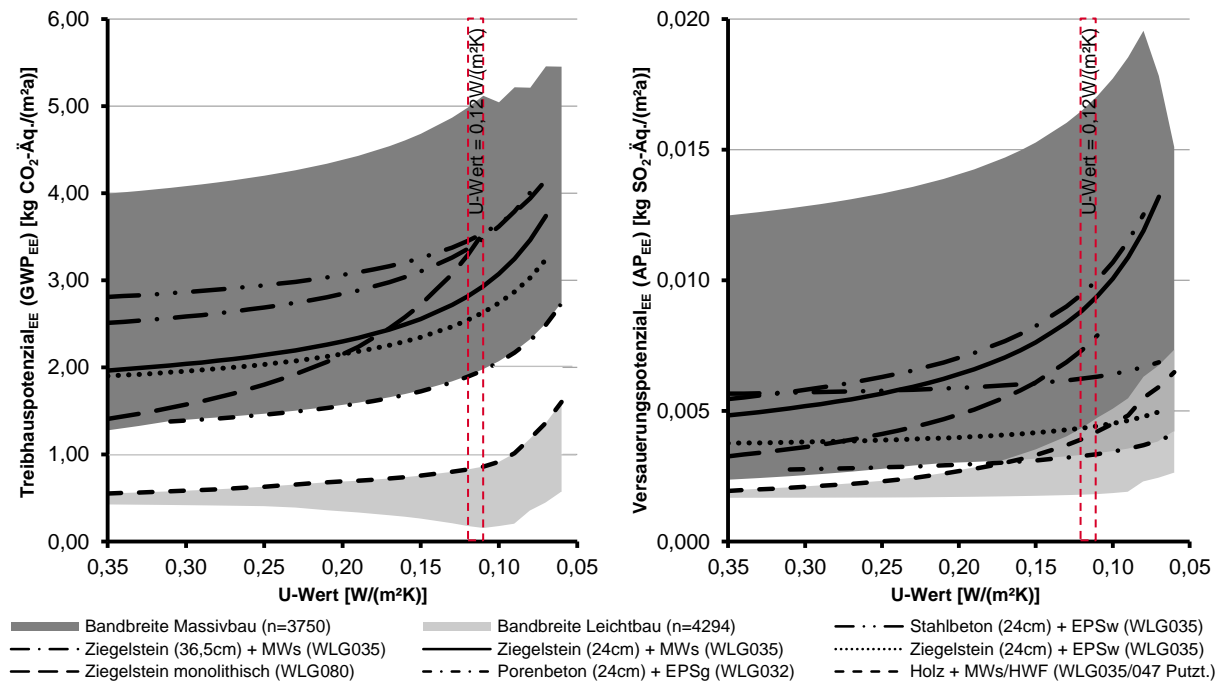


Abbildung 5.3: Abhängigkeit des U-Werts bei der Außenwand gegen Außenluft beim Treibhaus- (GWP) (links) bzw. Versauerungspotenzials (AP) (rechts) (Massivbauweise: WDVS, Monolithisch, Leichtbauweise: Holzrahmenbauweise) (Roter Rahmen: Siehe Abbildung 5.4 auf der nächsten Seite)

Mit besser werdendem U-Wert steigen bei der Massivbauweise immer und bei der Leichtbauweise meist die potenziellen Umweltauswirkungen an. Ausnahmen finden sich bei der Holzrahmenbauweise beim PE_{n.e.}, GWP und ODP. Dies ist auf die positive ökologische Bewertung des Baustoffes Holz zurückzuführen. Mit niedrigerem U-Wert wird beispielsweise eine dickere Zwischendämmung notwendig, was ein stärkeres Tragwerk zur Folge hat. Hierdurch wird mehr Konstruktionsvollholz und Brettschichtholz benötigt, welches sich positiv in den genannten Bewertungsparametern auswirkt.

Bei allen Bewertungsparametern ist es möglich, mit den gleichen umweltbezogenen Auswirkungen eine Außenwand mit unterschiedlicher energetischer Qualität zu bauen; beispielsweise ist es beim GWP möglich, in der Bandbreite von 2,8 kg CO₂-Äq./m²a bis 4 kg CO₂-Äq./m²a eine Massivwand mit U-Wert 0,06 W/(m²K) oder 0,35 W/(m²K) zu erstellen. Im Leichtbau ist der mögliche U-Wertbereich bei unveränderten möglichen Umweltauswirkungen geringer als beim Massivbau, z.B. 0,42 kg CO₂-Äq./m²a bis 0,55 kg CO₂-Äq./m²a für die vorgenannte U-Wertspanne.

Eine generelle Aussage zur Außenwand mit den geringsten potenziellen Umweltauswirkungen bzw. EE lässt sich nicht treffen. Es ist erkennbar, dass über alle U-Werte die Holzrahmenbauweise beim GWP wesentlich besser abschneidet als die Massivbauweise. Allerdings existieren Leichtbau-Außenwände, die ein höheres AP haben als Massivaußenwände. Diese Aussage wird unterstützt durch sieben beispielhaft eingezeichnete Konstruktionen einer Außenwand. Dies sind 7 von 144 Massivbau- (WDVS 24 cm und 36,5 cm Tragwerk, Monolithisch) und 144 Leichtbauvarianten (Holzrahmen) je U-Wertkategorie. Limitierend wirken die definierte maximale Wandstärke von 80 cm (z.B. monolithische Ziegelsteinwand) und bei hohen U-Werten bzw. geringen Dämmstandards die Minimalwandstärke von 24 cm bzw. 36,5 cm (z.B. Porenbeton).

Generell betrachtet existiert eine enorme ökologische Bandbreite, wie eine Außenwand gebaut werden kann. Einen Wandtyp pauschal – bei Berücksichtigung aller Bewertungsparameter – zu bevorzugen oder zu benachteiligen, entbehrt der wissenschaftlichen Grundlage. Deshalb wird im Folgenden am Beispiel des U-Wertes $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (roter Rahmen in *Abbildung 5.3 auf der vorherigen Seite*) die Außenwand gegen Außenluft näher untersucht.

Außenwand im Detail

In *Abbildung 5.4* sind die Box-Plots auf das Standardbauteil mit den Standardmaterialien normiert, vielmehr bildet ein Wärmeverbundsystem mit 24 cm Ziegelsteintragwerk und Mineralwolldämmung den Faktor 1. Dies hat den Vorteil, dass alle Bewertungsparameter in einer Abbildung darstellbar

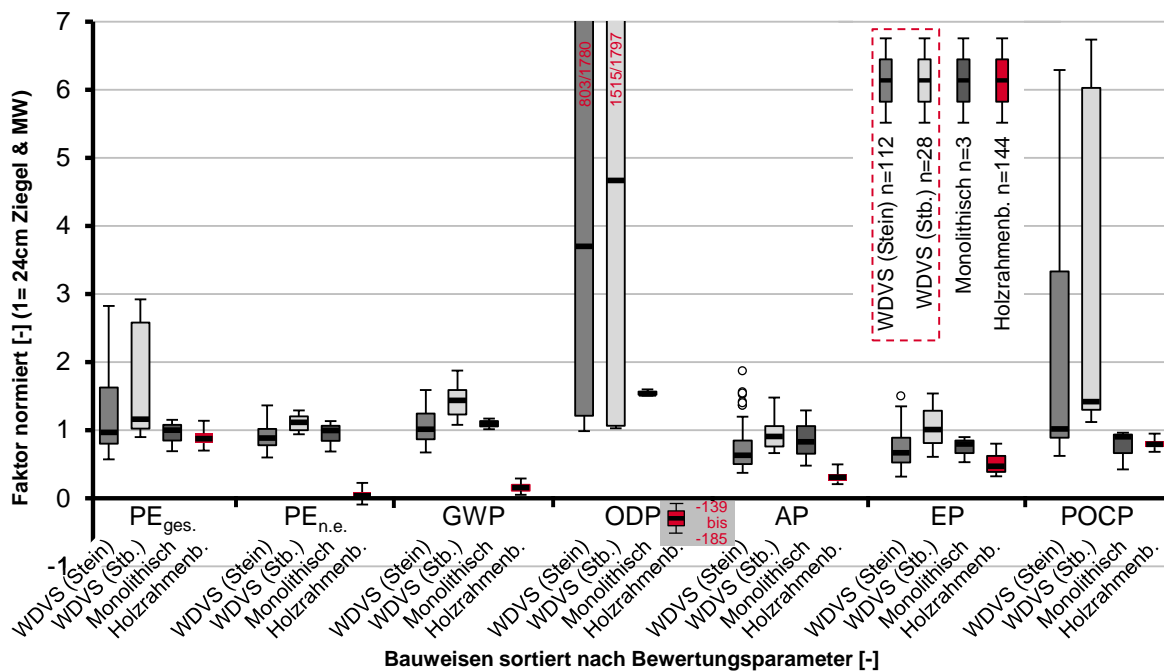


Abbildung 5.4: Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern (Roter Rahmen: Siehe *Abbildung 5.5 auf Seite 79* und *Abbildung 5.6 auf Seite 80*)

sind. Beispielweise bewegt sich der GWP-Faktor zwischen 0,05 und 1,88 bei der Außenwand gegen Außenluft mit gleichen U-Werten; d.h. es existiert eine Außenwand (Holzrahmenbauweise), die um 95 % besser ist als die Standardwand bzw. eine Außenwand (WDVS mit Stahlbeton), die ökologisch um 88 % schlechter ist. Des Weiteren kann sich im Extremfall – beim gleichem Energieverbrauch im Betrieb – das GWP um den Faktor 38 (1,88/0,05) unterscheiden.

Die Holzrahmenbauweise ist tendenziell die ökologischste Variante. In den betrachteten 287 Fällen für den U-Wert $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist die Leichtbauvariante unabhängig vom Wandaufbau beim $PE_{n.e.}$ und GWP sowie ODP immer ökologisch besser. Dies ist auf den Werkstoff Holz zurückzuführen. Diese pauschale Aussage trifft jedoch nicht für $PE_{ges.}$, AP, EP und POCP zu. Allerdings hat die Leichtbauweise insgesamt leichte ökologische Vorteile gegenüber der Massivbauweise. Diese Feststellung ist generell für alle U-Wertbereiche von $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ gültig: Holzrahmenbauweise ist bei $PE_{n.e.}$, GWP und ODP ökologisch die beste Variante und bei den anderen Bewertungsparametern ($PE_{ges.}$, AP, EP, POCP) größtenteils die Bauweise mit den geringsten umweltbezogenen Auswirkungen.

Tendenziell ist das WDVS mit Stahlbeton die ökologisch schlechteste Außenwand gegen Außenluft. Dies ist auf zwei Gründe zurückzuführen: erstens hat Stahlbeton eine hohe Wärmeleitfähigkeit und benötigt daher dickere Dämmstärken als andere Wärmedämmverbundsysteme; zweitens ist Stahlbeton durch die Zementherstellung und den Bewehrungsstahl ökologisch ungünstig. Es existieren ebenso WDVS mit Stahlbeton, die ökologischer sind als WDVS mit Mauerwerk, z.B. beim Bewertungsparameter GWP: Stahlbeton mit EPS ist vorteilhafter als Leichtbeton (WLG 034) mit Mineralwolle. Allerdings weist Stahlbeton als Tragwerk beim WDVS meist das Maximum bei den Bewertungsparametern auf. Über alle Bewertungsparameter und den gesamten U-Wertebereich betrachtet, sinkt der Unterschied zwischen Stahlbeton und Stein beim WDVS mit abnehmendem U-Wert. Während bei $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ein Unterschied vorherrscht – jedoch keine pauschale Benachteiligung von Stahlbeton –, egalisiert sich dieser fast, aufgrund des zunehmenden Einflusses der Dämmstoffe. Dennoch ist selbst Stahlbeton bei sehr kleinen U-Werten ($0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) tendenziell ökologisch schlechter.

Mit der monolithischen Bauweise ist ein sehr hoher Wärmedämmstandard bei geringen Wandstärken schwer zu erreichen. Bei den betrachteten monolithischen Bauweisen liegt die Wandstärke über 68 cm. Die Fallanzahl reduziert sich von 4 auf 3, da die definierte maximale Wandstärke von 80 cm limitierend wirkt. Ein U-Wert von $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist zum Beispiel mit keinem der untersuchten Steine realisierbar ($\leq 80 \text{ cm}$). Zudem zeigt sich, dass das WDVS mit Stein leicht ökologisch vorteilhafter ist als die monolithische Bauweise. Allgemein betrachtet ist im oberen U-Wert-Bereich ($0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) die monolithische Bauweise tendenziell ökologischer als WDVS (Stein und Beton). Allerdings verändert sich dieser Sachverhalt fließend mit kleiner werdenden U-Werten, beispielsweise beim U-Wert von $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist die monolithische Wand leicht vorteilhaft, beim GWP und beim AP etwas schlechter.

In allen U-Wertebereichen sind extreme Unterschiede beim POCP und v.a. beim ODP ersichtlich. Der sehr niedrige ODP bei der Holzrahmenbauweise ist auf das Holz zurückzuführen. Die positiven Aus-

reißer beim ODP und POCP sind u.a. mittels *Abbildung 5.5* und *Abbildung 5.6 auf der nächsten Seite* erklärbar. Beide Abbildungen beruhen auf dem gleichen Datensatz, nur sind diese unterschiedlich sortiert (roter Rahmen in *Abbildung 5.4 auf Seite 77*, $n = 140$).

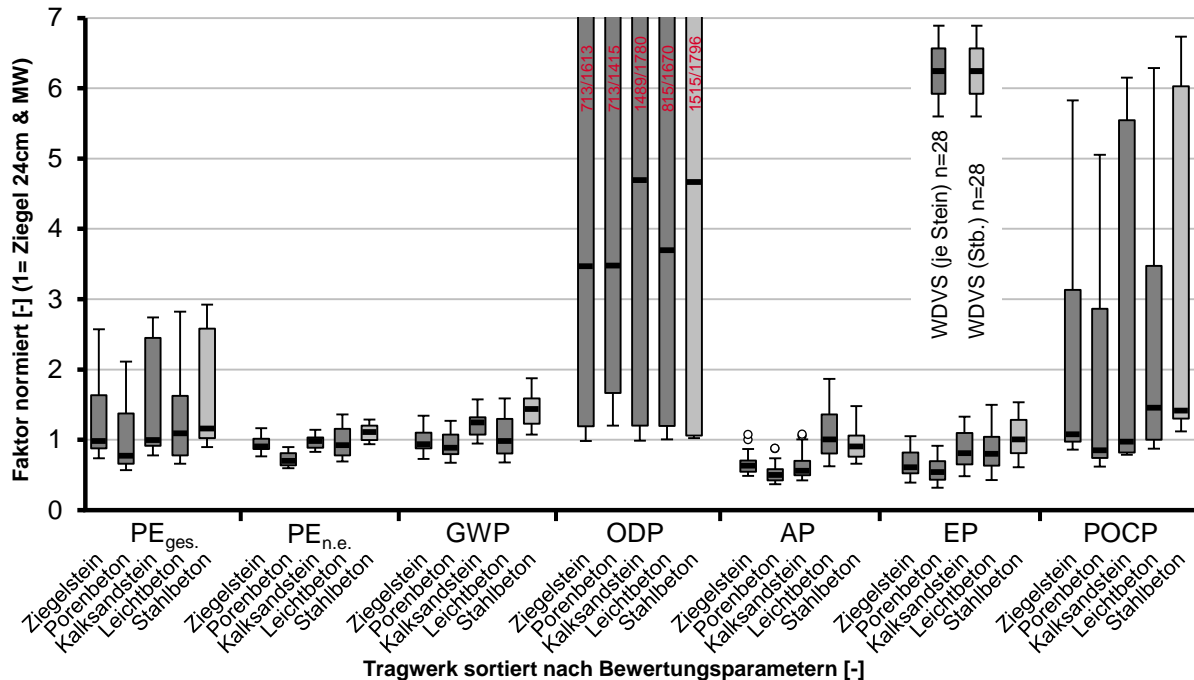


Abbildung 5.5: Außenwand gegen Außenluft (WDVS 24 cm und 36,5 cm tragende Schicht) sortiert nach Tragwerk am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ bei allen Bewertungsparametern

Ein klarer Trend ist für das WDVS bezüglich des Tragwerkes bzw. der tragenden Schicht in *Abbildung 5.5* ist nicht zu erkennen. Festzustellen ist, dass die Stahlbetonvariante beim WDVS eher die ökologisch unvorteilhafteste Lösung darstellt. Ferner ist bei den Steinen der Porenbeton tendenziell etwas ökologischer und der Leichtbeton hat leicht höhere potenzielle Umweltauswirkungen. Die letztendliche Auswahl ist jedoch von Dichte und Wärmeleitfähigkeit abhängig, welche schließlich Einfluss auf die ökologischen Eigenschaften haben, d.h. tragwerksbezogen existiert bei den Steinen kein wirklich großer ökologischer Unterschied.

Im Gegensatz hierzu sind bei den Dämmstoffen teilweise erhebliche Unterschiede ersichtlich. EPS (auch als „Styropor“ bekannt) wirkt sich sehr negativ in den Bewertungsparametern ODP und POCP aus. Die PUR-Dämmung ist – mutmaßlich durch das Treibmittel für die Aufschäumung – für die sehr großen Werte beim ODP verantwortlich. Die HWF-Dämmung hat beim $\text{PE}_{\text{ges.}}$ die größten Werte, dies ist auf den erneuerbaren Anteil zurückzuführen; denn beim $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ ist die HWF am ökologischsten. Aufgrund des vermeintlich energieintensiven Herstellungsprozesses⁷² schneidet die HWF – obwohl aus Holz – beim $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ und GWP sowie ODP nicht besser ab. Allerdings ist der generelle Unterschied zwischen den einzelnen Varianten eher gering, da die komplette Außenwand gegen Außenluft bilanziert wurde und hierdurch die Variation einer Bauteilschicht nicht so sehr von Bedeutung ist.

⁷²Generischer Datensatz ÖKOBAUDAT [76]: Nassverfahren.

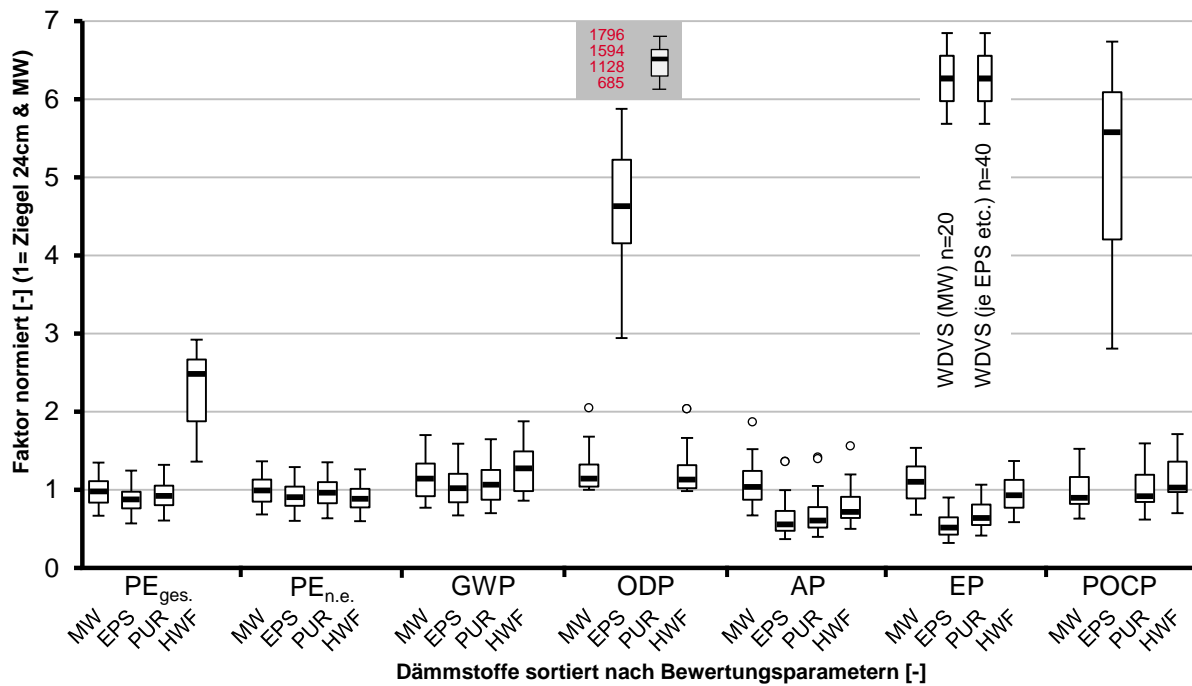


Abbildung 5.6: Außenwand gegen Außenluft (WDVS 24 cm und 36,5 cm tragende Schicht) sortiert nach Dämmstoffen am Beispiel 0,12 W/(m²K) bei allen Bewertungsparametern

Die bisherigen Betrachtungen beruhen auf einem Tragwerk bzw. einer tragenden Schicht aus 24 cm oder 36,5 cm; infolgedessen zeigt *Abbildung 5.7* beispielhaft für den U-Wert 0,12 W/(m²K) welches Tragwerk bei WDVS ökologisch vorteilhaft ist. Hierfür wurde das Verhältnis von 24 cm zu 36,5 cm gebildet⁷³, wodurch bei Werten von kleiner 100 % das 24 cm-Tragwerk vorteilhafter und bei größeren Prozentwerten (> 100 %) die 36,5 cm-Variante ökologischer wird.

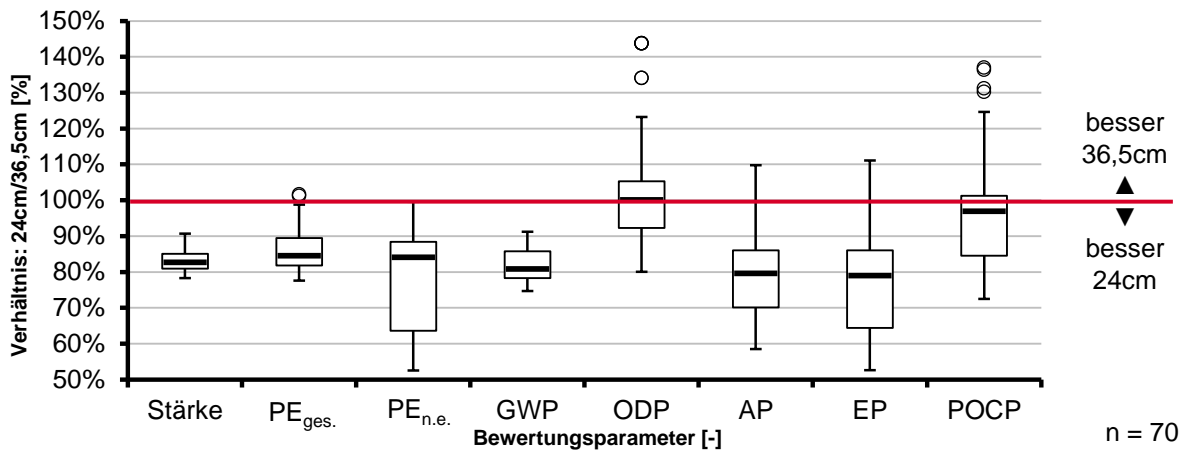


Abbildung 5.7: Vergleich 24 cm oder 36,5 cm tragende Schicht bei WDVS (Außenwand gegen Außenluft) am Beispiel 0,12 W/(m²K) bei allen Bewertungsparametern

⁷³Es wird angenommen, dass die Traglast von kleinen Wohngebäuden diesen Vergleich – bei gleichem U-Wert – zulässt.

Es lässt sich erkennen, dass das 24 cm-Tragwerk tendenziell ökologischer abschneidet als das 36,5 cm-Tragwerk. Bei der Wandstärke und den Bewertungsparametern $PE_{n.e.}$ und GWP ist das 24 cm-Tragwerk immer ökologisch vorteilhafter über den kompletten U-Wertbereich von $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei den anderen Bewertungsparametern ist die Sachlage nicht so eindeutig, beispielsweise beim EP: Ziegelstein (WLG 080) mit Mineralwolle (WLG 035) erreicht 103 %, d.h. es ist besser mit 36,5 cm-Tragwerk zu bauen; hingegen beim Ziegelstein (WLG 250) ebenfalls mit Mineralwolle (WLG 035) ist es ökologischer, mit 24 cm-Tragwerk zu bauen (95 %). Im U-Wert-Bereich von $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit 1328 untersuchten Außenwänden gegen Außenluft zeigt sich, dass generell Stahlbeton über alle Bewertungsparameter (außer ODP) mit Tragwerk 24 cm ökologischer ist als mit 36,5 cm. Tendenziell ist im U-Wertbereich $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ das 24 cm-Tragwerk bei allen WDVS ökologischer, doch bei folgenden Bewertungsparametern gibt es Abweichungen: 5 % $PE_{ges.}$, 53 % ODP, 1 % AP, 4 % EP, 40 % POCP.

Verallgemeinert kann, über den kompletten analysierten U-Wertbereich und alle Bewertungsparameter, festgehalten werden, dass eine generelle Bevorzugung einer Ausführung der Außenwand gegen Außenluft wissenschaftlich nicht vertretbar ist. Tendenziell ist das WDVS mit Stahlbeton die ökologisch ungünstigste und die Leichtbauweise die ökologischste Variante; beim $PE_{n.e.}$, GWP und ODP ist die Leichtbauweise immer die Bauweise mit den geringsten potenziellen Umweltauswirkungen. Beim Tragwerk des WDVSs ist eine Detailanalyse der jeweiligen Aufbauten zur optimalen Tragwerksstärke notwendig; allerdings sind die 24 cm meist am ökologischsten (immer beim $PE_{n.e.}$ und GWP).

Außenwand und deren Bauteile

In *Abbildung 5.8 auf der nächsten Seite* ist der Anteil der Verbindungsmittel am kompletten Lebenszyklus einer Außenwand dargestellt. Beim WDVS mit Stein ist Mörtel (Dünnbett- oder Mauermörtel) das Verbindungsmittel, für WDVS mit Beton ist es der Bewehrungsstahl und der Dünnbettmörtel für die monolithische Außenwand sowie das Metall (Schrauben, Nägel, ggf. Verbinder und Winkel)⁷⁴ für die Holzrahmenbauweise.

Es ist ersichtlich, dass überschlägig über alle Bewertungsparameter die Verbindungsmittel weniger als circa 9 % ausmachen (rotes Rechteck in *Abbildung 5.8 auf der nächsten Seite*), ausgenommen hiervon ist der Bewehrungsstahlanteil. Beim WDVS mit Stahlbeton hat der Bewehrungsstahl einen großen Anteil an den umweltbezogenen Auswirkungen der gesamten Außenwand. Dieser beträgt zwischen 3 % (POCP) und 36 % ($PE_{ges.}$), wobei der Interquartilsabstand meist zwischen 12 % und 33 % (außer ODP und POCP) liegt. Der Mörtelanteil befindet sich – außer beim ODP – immer unter ca. 17 %. Der hohe Anteil beim ODP (> 40 %) ist auf den Dünnbettmörtel zurückzuführen. Der Metallanteil bei der Leichtbauvariante beträgt maximal 5 % (AP; ausgenommen $PE_{n.e.}$ und GWP). Aufgrund der Tatsache, dass Holz positiv beim $PE_{n.e.}$, GWP und ODP bewertet wird, nehmen schon sehr kleine Bauteile bzw. Baukomponenten mit geringen potenziellen Umweltauswirkungen v.a.

⁷⁴Der Metallanteil wurde für die komplette Außenwand des Einfamilien- und Mehrfamilienhauses ermittelt und spezifisch auf 1 m^2 umgerechnet, hierdurch ist es möglich, den Anteil der Verbindungsmittel zu analysieren.

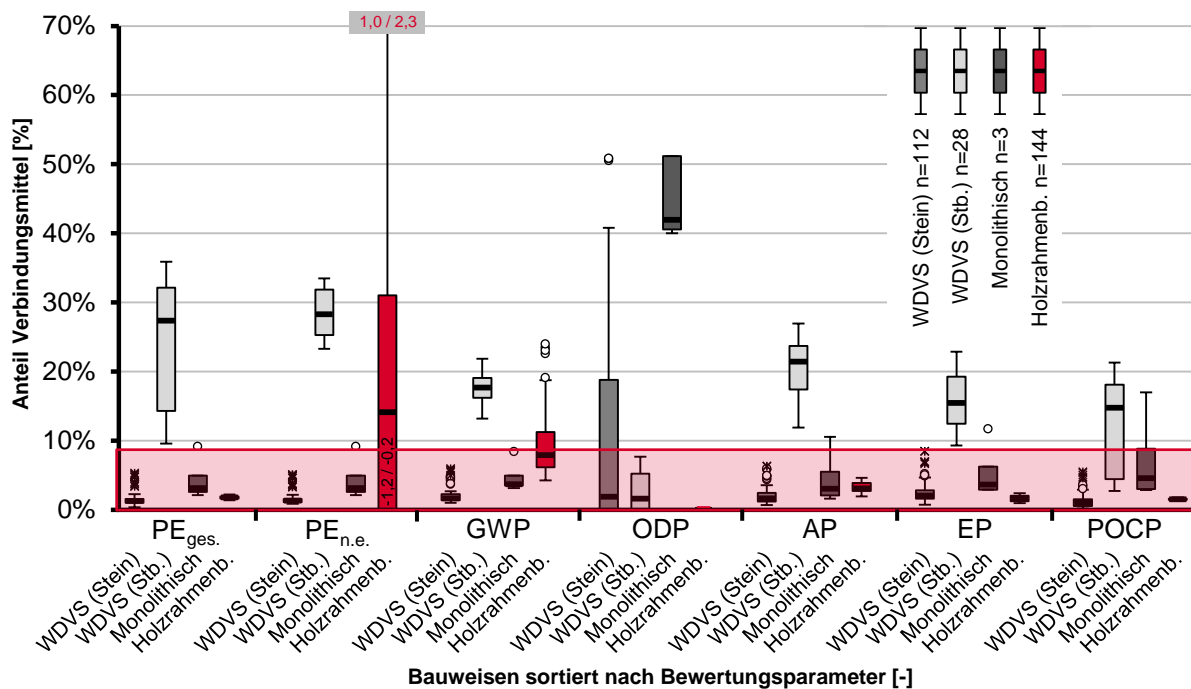


Abbildung 5.8: Anteil von Verbindungsmitteln (Mörtel bzw. Stahl oder Schrauben) bei Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern

in den Kategorien $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ ⁷⁵ und GWP großen Einfluss. Trotzdem sind – wie bereits beschrieben – Leichtbauaußenwände in diesen Bewertungsparametern die ökologischsten Außenwände von Gebäuden.

Bei kleinen und großen U-Werten ist der Anteil der Verbindungsmaterialien ähnlich. Aufgrund des geringeren Dämmanteils ist mit steigendem U-Wert ein leichter Anstieg bei den Verbindungsmittelanteilen zu verzeichnen, wobei die Grenze bei $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf ca. 10 % ansteigt bzw. bei $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf ca. 8 % fällt (jeweils ohne Berücksichtigung von Stahlbeton und ODP). Der Interquartilsabstand der Metallteile (Holzrahmenbauweise) beim $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ bewegt sich im U-Wertbereich $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ($n = 22 \times 144 = 3168$) zwischen 10 % und 22 %. Bei der Leichtbauweise hat der Verbindungsmaterialanteil beim GWP im U-Wertbereich von $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sein Maximum bei 29 %.

Auf Grundlage der detaillierten LCA-Berechnungen und vorangegangenen Analysen wird eine Vereinfachung für die teilweise aufwendige Bilanzierung der Verbindungsmittel in Außenwänden gegen Außenluft vorgeschlagen:

- Zuschlag von 14 % auf die gesamte Außenwand für die Verbindungsmittel für alle U-Wertbereiche von WDVS aus Stein sowie für die monolithische Bauweise und für die Holzrahmenkonstruktion über alle Bewertungsparameter

⁷⁵Negative Prozentwerte kommen zustande, da einzelne Außenwände ein negatives $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ haben.

- Zuschlag von nochmals 14 % für Verbindungsmittel für alle U-Wertebereiche für die Bewertungsparameter $PE_{n,e}$ und GWP bei der Holzrahmenbauweise, d.h. Zuschlag von 28 % (2x 14 %) auf die gesamte Außenwand bei $PE_{n,e}$ und GWP bei der Leichtbauweise
- Exakte Berücksichtigung des Bewehrungsstahls bei Stahlbetonbauteilen

Diese Vereinfachung basiert auf folgenden Grundlagen: In dem Zuschlag von 14 % ist ein Sicherheitszuschlag von 5 % (5 % + 9 % aus *Abbildung 5.8 auf der vorherigen Seite*) enthalten. Hierdurch soll eine exakte und detaillierte LCA-Berechnung durch bessere Ergebnisse belohnt werden. Der Sicherheitszuschlag sinkt bei großen U-Werten bzw. steigt bei besseren U-Werten als $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (KfW 40-Standard). Durch die Vereinfachung wird der Bewertungsparameter ODP grundsätzlich bei Einsatz von Dünnbettmörtel zu gut bewertet, was aufgrund der schnelleren Berechnung als tragbar angesehen wird. Ebenso wird bei der Leichtbauweise $PE_{n,e}$ teilweise unter- oder überbewertet; dies wird ebenfalls geduldet.

Im Gegensatz zu den Verbindungsmitteln haben „sonstige“ Baukomponenten einen größeren Einfluss auf den Lebenszyklus einer Außenwand (*Abbildung 5.9*). Zu den „sonstigen“ Baukomponenten zählen statisch und wärmetechnisch irrelevante Baumaterialien, wie beispielsweise Innen- oder Außenfarbe, Spachtelmaterial, Armierungsgewebe, Schlagdübel und Klebemörtel für die Dämmung. Zum Beispiel hat alleine der innere und äußere Farbanstrich im Lebenszyklus einen Anteil von bis zu 19 % (AP) an der gesamten WDVS-Außenwand ($0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit 24 cm Tragwerk)⁷⁶.

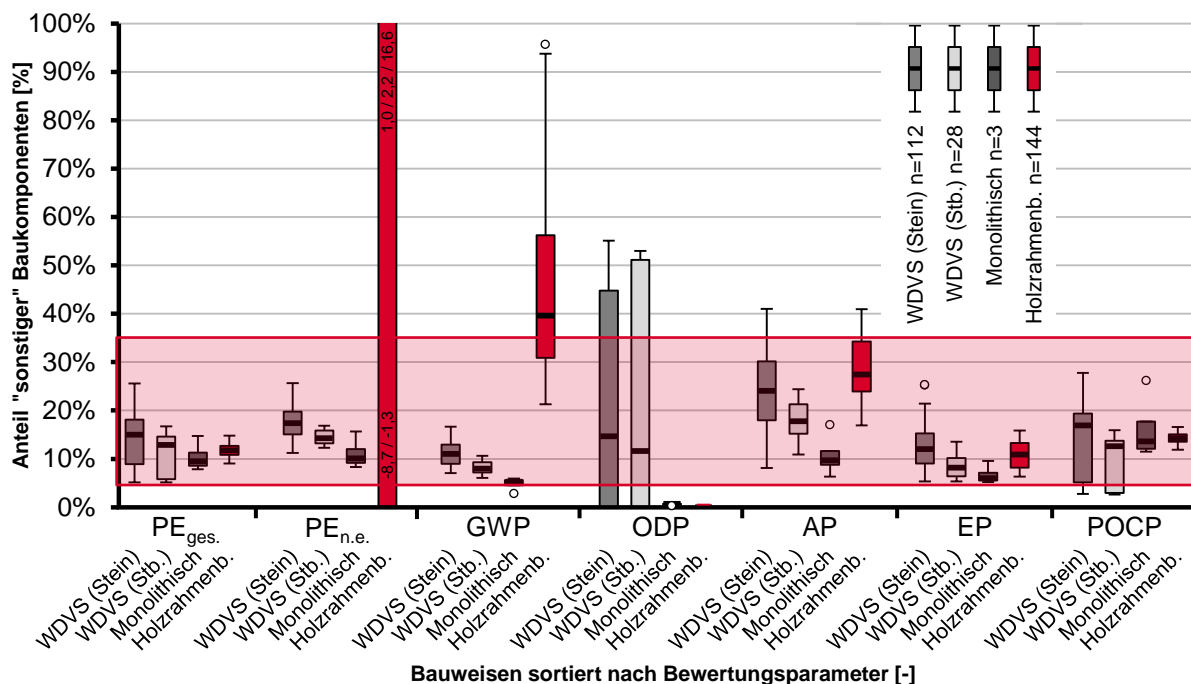


Abbildung 5.9: Anteil von „sonstigen“ Baukomponenten (statisch und wärmetechnisch irrelevant (z.B. Farbe), ohne Verbindungsmittel) bei Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern

⁷⁶Bis zu 16 % ($PE_{ges.}$ und $PE_{n,e}$), 8 % (GWP), 1 % (ODP), 14 % (EP), 15 % (POCP).

Über den kompletten U-Wertbereich ist eine fallende Tendenz des Anteils von großen U-Werten zu kleinen erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass „sonstige“ Baukomponenten größtenteils unabhängig vom Baustandard sind: beispielhaft wird ein Außenanstrich (Farbe) bei einer ungedämmten Kalksandsteinwand und bei einer Kalksandsteinwand mit sehr viel Dämmung benötigt. Bei einem U-Wert von $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bewegt sich der Anteil überschlägig zwischen 5 % bis 35 % (rotes Rechteck in *Abbildung 5.9 auf der vorherigen Seite*). Bei $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegt der Bereich ca. zwischen 10 % und 45 % bzw. bei $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zwischen 2 % und 30 %. Tendenziell ist der Anteil der statisch und wärmetechnisch irrelevanten Baumaterialien bei der Leichtbauweise höher, v.a. beim $\text{PE}_{\text{n.e.}}$ und GWP. Hier gegenüber steht die monolithische Bauweise, bei der in der Regel weniger „sonstige“ Baukomponenten verwendet werden, wie z.B. Klebemörtel für die Dämmung.

Verallgemeinert bleibt festzuhalten, dass Verbindungsmittel und statisch sowie wärmetechnisch irrelevante, d.h. meist gewichtsarme Baukomponenten nicht pauschal vernachlässigbar sind. Dies zählt für alle Baustandards und Baumaterialien bzw. Bauweisen, insbesondere für den Bewehrungsstahl sowie die Leichtbauweise und den Farbanteil. Die Summierung der Verbindungsmittel und „sonstigen“ Bauteile kann einen entscheidenden Einfluss haben; hierdurch kann zum einen das LCA verzerrt werden; zum anderen birgt es Einsparpotenzial.

Decke und Innenwand im Überblick

Tabelle 5.1 zeigt zum einen, mit welcher Bauweise das Minimum bzw. Maximum je Bewertungsparameter bei der Decke und Innenwand gegen gleiche Temperatur erreicht wird; zum anderen am Beispiel der Innenwand, wie groß die ökologischen Unterschiede sind. Beispielsweise ist der Unterschied zwischen der ökologisch besten und schlechtesten Innenwandvariante beim GWP 1250 % bzw. 12,5, d.h. es existieren enorme ökologische Unterschiede – u.a. für eine Wand die „nur“ die Räume trennt. Sofern man lediglich die Innenwand Massivbauweise intern vergleicht, beträgt der Unterschied beim GWP 1,7. Der Faktor zwischen Maximum zu Minimum beim Leichtbau beträgt 3,5

Tabelle 5.1: Übersicht über das Minimum und Maximum in Abhängigkeit von der Bauweise bei Decke und Innenwand bei allen Bewertungsparametern

	$\text{PE}_{\text{ges.}}$	$\text{PE}_{\text{n.e.}}$	GWP	ODP	AP	EP	POCP
Decke (gegen gleiche Temperatur)							
Minimum	Massiv	Leicht	Leicht	Leicht	Leicht	Leicht	Massiv
Maximum	Leicht	Massiv	Massiv	Massiv	Massiv	Massiv	Leicht
Innenwand (gegen gleiche Temperatur, nicht tragend)							
Minimum	Massiv	Leicht	Leicht	Leicht	Massiv	Massiv	Massiv
Maximum	Leicht	Massiv	Massiv	Massiv	Leicht	Leicht	Leicht
Max./Min.	1,7	7,0	12,5	-0,003	2,8	2,1	3,5
Massiv: Max./Min.	1,5	1,5	1,7	10,7	2,6	2,0	2,3
Leicht: Max./Min.	1,4	2,9	3,5	0,8	1,5	1,5	1,2

(GWP). Hierbei sei noch anzumerken, dass ein Minimum oder Maximum bei einem Bewertungsparameter nicht zwangsläufig bedeutet, dass die identischen Baukomponenten mit diesen Baumaterialien auch in den anderen Bewertungsparametern ein Minimum oder Maximum aufweisen. Ferner zeigt sich ein Wechsel der Bauweisen im Minimum und Maximum beim AP und EP. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass – ähnlich wie bei der Außenwand – keine Bauweise generell ökologisch bevorzugt werden kann und somit für die weiteren Betrachtungen zwischen Massiv- und Leichtbau unterschieden werden muss: in der Praxis wird wohl keine Leichtbaudecke mit einer massiven Innenwand kombiniert, d.h. es werden nur praxisrelevante Kombinationen betrachtet.

5.2.2 Baukomponentenanteile an der Baukonstruktion

In *Abbildung 5.10 auf der nächsten Seite* bzw. *Abbildung 5.11 auf Seite 87* sind die Anteile der Bauteile an der Baukonstruktion bei gleicher energetischer Qualität (KfW 40) für das Einfamilien- bzw. Mehrfamilienhaus aufgezeigt. Hierzu wurde je Bewertungsparameter das Minimum und Maximum für die Leicht- wie auch die Massivbauvariante bestimmt, z.B. minimale umweltbezogene Auswirkungen des Leichtbaus (Holzrahmenbauweise): „Min.-Leicht“; d.h. die Angaben spiegeln den (theoretischen) Minimal- bzw. Maximalwert je Kategorie wider. Anschließend wurden diese zur Standardausführung ins Verhältnis gesetzt. Das ODP wird in einer separaten Abbildung mit den Absolutwerten gezeigt, da aufgrund des negativen ODP der Holzwerkstoffe und dem extrem hohen ODP-Werten der PUR-Dämmung die Anteile bei den anderen Bewertungsparametern nicht sichtbar wären.

Es können vier Aussagen getroffen werden:

- (1) Bei gleichem energetischen Standard sind beachtliche Unterschiede zwischen und unter den einzelnen Bauweisen erkennbar; z.B. ist der Unterschied beim $PE_{n,e}$ zwischen der Maximalvariante bei der Massivbauweise („Max.-Massiv“) und dem Minimalwert bei der Leichtbauweise („Min.-Leicht“) mit 64 % (113 % zu 48 %) enorm. Ebenso existiert eine große Bandbreite der umweltbezogenen Auswirkungen unter derselben Bauweise, z.B. POCP bei Massivbau: Faktor 3,3 (268 % zu 80 %).
- (2) Die Außen- und Innentüren (*Abbildung 5.10 auf der nächsten Seite* rot ④) sind wie auch die „sonstigen“ Bauteile (Treppe inkl. Belag, Lichtschächte etc. in *Abbildung 5.10 auf der nächsten Seite* oberste Reihe ①) vernachlässigbar. Dies ist v.a. bei der Außentüre auf den sehr geringen Flächenanteil (1 %) am gesamten Gebäude zurückzuführen. Der Anteil an den ökologischen Ergebnissen ist bei allen Bewertungsparametern überschaubar (im Extremfall maximal 2 %). Die Fenster, mit einem Fensterflächenanteil von 17 %, sind trotz ihres geringen Flächenanteils von 5 % an den Gesamtflächen des Einfamilienhauses nicht zu vernachlässigen. Demzufolge sind keine weiteren Bauteile der Baukonstruktion nebensächlich. Zum einen, da die anderen Bauteile nicht bei jedem Bewertungsparameter eine untergeordnete Rolle spielen (z.B. Außenwand gegen Außenluft beim GWP); zum anderen, dass jedes Bauteil mit minimalem Anteil durch eines mit maximalen Werten substituiert werden kann; so hat beispielsweise die Innenwand (Porenbeton) bei AP und „Min.-Massiv“ einen geringen Anteil, wenn diese jedoch durch eine Innenwand aus Leichtbeton ausgetauscht würde („Max.-Massiv“), hätte diese einen höheren Anteil und folglich die anderen Bauteile einen geringeren.

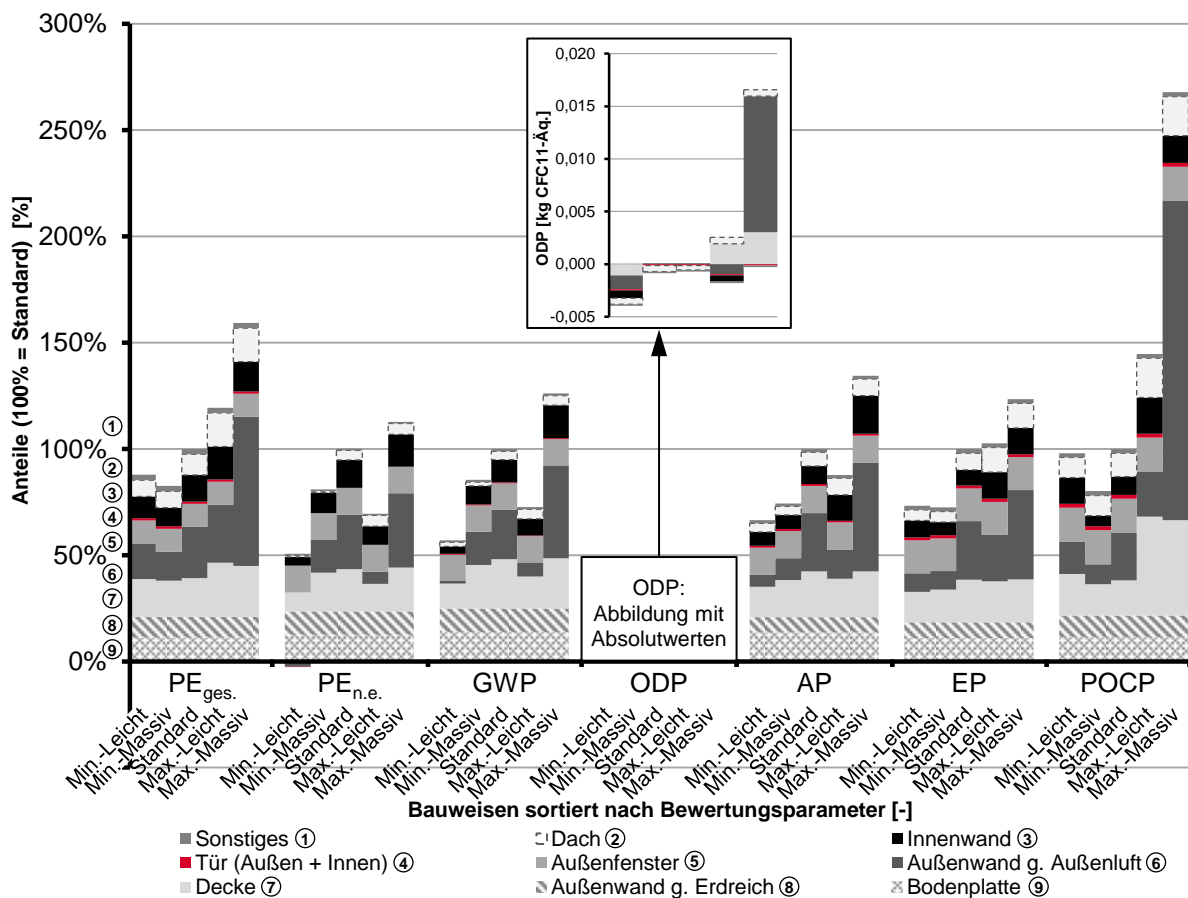


Abbildung 5.10: Anteile der Baukomponenten der Baukonstruktion am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern

(3) Die größten potenziellen Umweltauswirkungen sind meist auf die Bauteile Decke und Außenwand gegen Außenluft zurückzuführen. Dies ist jedoch vom betrachteten Bewertungsparameter und von der Bauweise abhängig, z.B. sind die umweltbezogenen Auswirkungen bei der Leichtbau-Außenwand gegen Außenluft beim GWP verhältnismäßig unbedeutend; sie können jedoch bei der Massivbauweise einen großen Beitrag einnehmen. Die Anteile von den restlichen Bauteilen (ohne Decke und Außenwand gegen Außenluft) schwanken – je nach Bewertungsparameter sowie Bauweise – in *Abbildung 5.10* im Bereich von 27 % bis 86 % (ohne ODP) und sollten deshalb nicht außer Acht gelassen werden; d.h. Decke und Außenwand gegen Außenluft haben in diesen Beispielen einen Anteil von 14 % und 73 %. Sofern die Extremfälle für Decke und Außenwand gegen Außenluft beim KfW 40-Einfamilienhaus betrachtet werden (maximale umweltbezogene Auswirkungen der Decke und der Außenwand bei minimalen umweltbezogenen Auswirkungen der anderen Bauteile) kann sich der Anteil zwischen 11 % und 78 % (ohne ODP) bewegen.

(4) Generell kann keine Bauweise bevorzugt oder benachteiligt werden, außer beim PE_{n.e.} und GWP, hier ist die Leichtbauweise am ökologischsten. Bei beiden Bewertungsparametern ist selbst die Maximalvariante des Leichtbaus ökologischer als der Minimalwert des Massivbaus. Ausschlaggebend ist hierfür der Werkstoff Holz. Bei den anderen Bewertungsparametern ist die ökologische Beurteilung

abhängig von den Ausführungsdetails, d.h. von den eingesetzten Materialien. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Leichtbauweise tendenziell geringere umweltbezogene Auswirkungen erreicht, z.B. liegen die Minimalwerte der Leichtbauweise meist unter denen der Massivbauweise. Angesichts der Objektivität soll allerdings angemerkt werden, dass mit der Leichtbauweise auch höhere potenzielle Umweltauswirkungen als mit der Massivbauweise erreicht werden können, da außer beim PE_{n.e.} und GWP die Minimalwerte der Massivbauweise („Min.-Massiv“) unter den Maximalwerten der Leichtbauweise („Max.-Leicht“) liegen.

Diese vier Erkenntnisse können auf die anderen Standards des Einfamilienhauses übertragen werden. Bei schlechterem energetischen Standard sind die Unterschiede nicht so groß, da hier weniger Baustoffe, v.a. Dämmung eingesetzt werden; und umgekehrt bei besserem Baustandard. Die Türen und „sonstigen“ Bauteile beeinflussen sowohl bei besserem als auch schlechterem Standard die Ergebnisse nicht maßgeblich. Die Bedeutung der Außenwand gegen Außenluft fällt bei höheren U-Werten bzw. steigt bei geringeren U-Werten (z.B. Außenwand und GWP: KfW 70-Standard max. 36 % bzw. KfW 40-Standard max. 39 %); hiermit steigen bzw. fallen die anderen Anteile, auch die der Decke. Dennoch bleiben Decke und Außenwand tendenziell die zwei bedeutendsten Bauteile. Die Aussage zur pauschalen Bevorzugung bzw. Benachteiligung ist ebenso übertragbar.

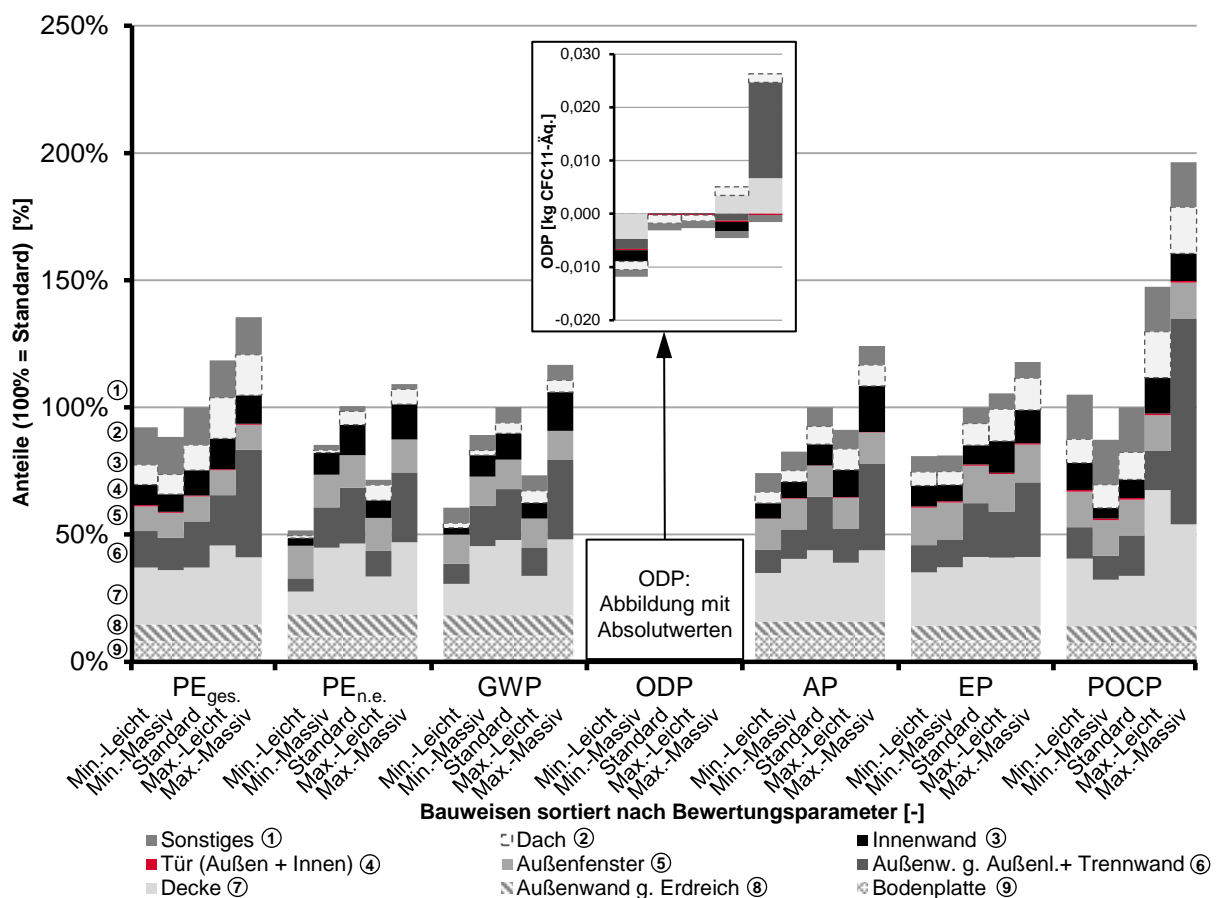


Abbildung 5.11: Anteile der Baukomponenten der Baukonstruktion am Beispiel des KfW 40-Mehrfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern

Abbildung 5.11 auf der vorherigen Seite bestätigt die getroffenen Aussagen für das Mehrfamilienhaus. Die ökologischen Unterschiede sind hier teilweise ebenfalls enorm, bei gleichem Baustandard. Die „sonstigen“ Bauteile nehmen einen größeren Stellenwert, wegen der umweltbezogenen Auswirkungen der Balkone ein. Die Treppen und Lichtschächte sind allerdings im Verhältnis zum Gesamtgebäude vernachlässigbar gering. Dementsprechend können Türen und „sonstige“ Bauteile vernachlässigt werden, sofern diese nicht offensichtlich das Ergebnis beeinflussen (z.B. große Balkone, extrem große Treppen). Es ist ersichtlich, dass – im Gegensatz zum Einfamilienhaus – beim Mehrfamilienhaus die Decken einen größeren Einfluss haben (z.B. Decke und GWP: EFH max. 27 % bzw. MFH max. 32 %). Folglich sind diese die Baukomponenten mit den größten potenziellen Umweltauswirkungen, unabhängig vom Gebäudestandard. Die Außenwand gegen Außenluft inklusive der Gebäudetrennwand zum Nachbargebäude ist ökologisch gesehen ebenfalls eine wichtige Baukomponente. Der Anteil der Decke und der Außenwand gegen Außenluft können sich beim KfW 40-Mehrfamilienhaus zwischen 24 % und 67 % (ohne ODP) bewegen. Des Weiteren sind die ökologischen Ergebnisse in Sachen Bauweise beim Vergleich zwischen Einfamilien- und Mehrfamilienhaus ähnlich.

Für die ökologische Betrachtung von Gebäuden bedeutet dies im Allgemeinen, dass pauschal kein Bauteil – bis auf die Türen, Lichtschächte und Treppen – vernachlässigt werden darf und die Decken und Außenwände den größeren ökologischen Einfluss haben. Zudem ist eine ausnahmslose Bevorzugung einer Bauweise (Leichtbau oder Massivbau) über alle Bewertungsparameter wissenschaftlich nicht haltbar.

5.3 Gebäudetechnik⁷⁷

5.3.1 Übersicht über die komplette Gebäudetechnik⁷⁸

Abbildung 5.12 auf der nächsten Seite zeigt das GWP und das AP für die Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs-, Elektro- und Schwachstromtechnik. Hierbei sei anzumerken, dass die Ergebnisse der Heizungstechnik⁷⁹ unterschiedliche Energiekonzepte und verschiedene Materialien vereinen ($n = 2384$ bzw. 4768). Des Weiteren, ergibt sich die Varianz bei der Sanitär- und Lüftungstechnik nur durch Materialunterschiede ($n = 40$ bzw. 50). Bei der Elektro- und Schwachstromtechnik wurden keine Materialien zusätzlich variiert ($n = 1$).

⁷⁷Die Bewertungsparameter wurden bereits detailliert im Kapitel 2.2.2 auf Seite 10 erläutert; dennoch werden für das bessere Verständnis die im Folgenden benützten Abkürzungen kurz wiederholt: **PE_{ges.}** = Primärenergieinhalt, gesamt; **PE_{n.e.}** = Primärenergieinhalt, nicht erneuerbar; **GWP** = Treibhauspotenzial; **ODP** = Ozonabbaupotenzial; **AP** = Versauerungspotenzial; **EP** = Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial; **POCP** = Sommersmogpotenzial.

⁷⁸Es werden die Rahmenbedingungen aus Kapitel 4.1 auf Seite 39 angewandt, d.h. die Abbildungen beziehen sich spezifisch (50 Jahre, $m^2_{NRF_R}$) auf den kompletten Lebenszyklus ohne Betrieb (Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung inkl. Gutschrift), d.h. die Eingebundene Energie bzw. Emissionen (EE) werden beurteilt.

⁷⁹Die Analyse der kompletten Heizungstechnik bezieht sich auf den Gebäudestandard KfW 40, bei den anderen Standards sind kleine Abweichungen vorhanden, z.B. durch geringfügig größere Heizkörperflächen bei jedoch identischer Dimension der Heizungsleitungen. Der Unterschied beim Einfamilienhaus mit der Standard-Heizungsanlage im KfW 40-Standard und Basis-Standard beträgt zwischen 0 % bis 5 % (je nach Bewertungsparameter) und im Durchschnitt ca. 2%. Aufgrund dieses vernachlässigbaren Unterschiedes wird auf eine Differenzierung verzichtet.

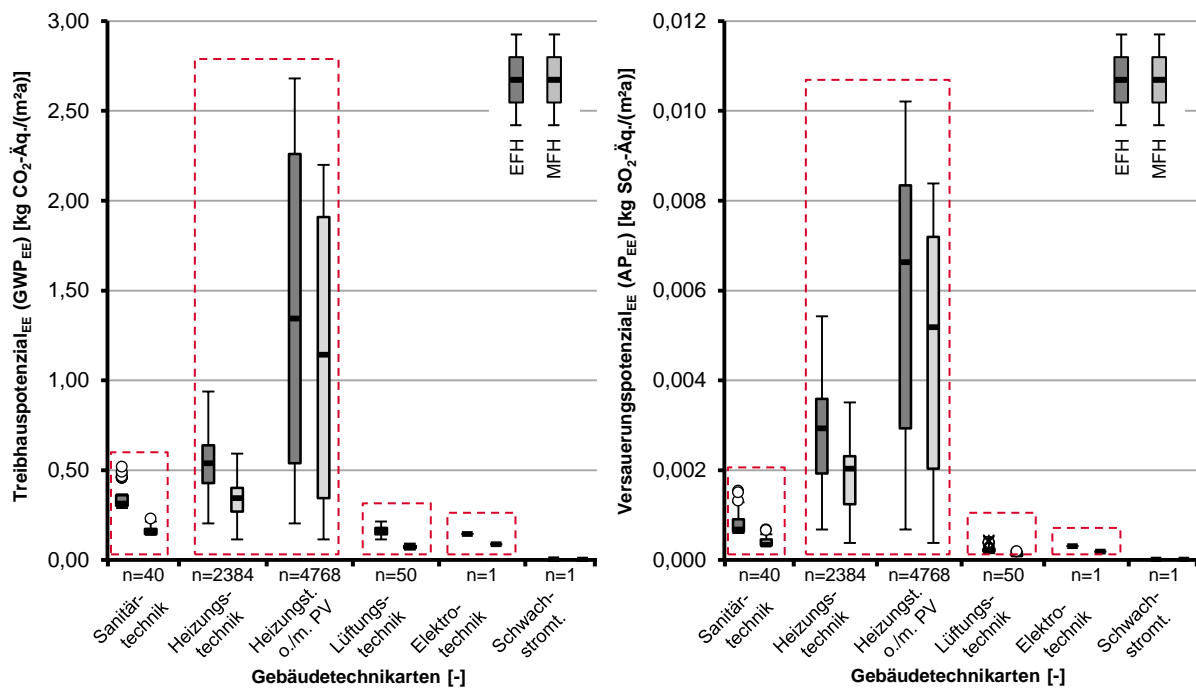


Abbildung 5.12: Größenordnungen der Gebäudetechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus beim Treibhaus- (GWP) (links) bzw. Versauerungspotenzial (AP) (rechts) (Roter Rahmen: Siehe jeweilige Unterkapitel 5.3.2 auf Seite 92 bis 5.3.5 auf Seite 103) [Heizungstechnik: Diverse Energieerzeuger ohne und mit Solaranlage; Heizungstechnik o./m. PV: Diverse Energieerzeuger ohne und mit Solaranlage sowie ohne und mit PV-Anlage]

Die Heizungstechnik weist tendenziell bei allen Bewertungsparametern die höchsten potenziellen Umweltauswirkungen auf, gefolgt von der Sanitärtechnik, außer beim ODP; hier ist diese mit der Elektrotechnik annähernd gleichwertig. Die möglichen Umweltauswirkungen der Lüftungs- und Elektrotechnik sind, mit vereinzelt Ausnahmen, bei allen Bewertungsparametern unterhalb der Sanitär- und Heizungstechnik. Die Schwachstromtechnik hat bei allen Kategorien immer die geringsten Auswirkungen. Ferner sind die Maxima bei allen umweltbezogenen Auswirkungen bei der Heizungstechnik einschließlich PV-Anlage zu finden. Die Heizungstechnik macht jedoch nicht immer die größten möglichen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik aus, beispielsweise beim Einsatz eines Gas-Brennwertgerätes mit Fußbodenheizung (Rohr: PE-X) weist die Sanitärtechnik (Wasserleitungsrohr: Edelstahl, Abwasserleitungsrohr: SML) ein doppelt so hohes GWP auf (EFH: 2,3 bzw. MFH: 1,8).

Bei den umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik ist ein nennenswerter Unterschied zwischen den einzelnen Varianten erkennbar. Zum einen ist aufgrund der großen Vielfalt bei der Heizungstechnik (4768 Varianten) die Bandbreite hier am größten; zum anderen ist bei der Sanitär- und Lüftungstechnik bei gleicher Funktion (nur Materialien variiert) ein Unterschied feststellbar. Dieser beträgt maximal je nach Bewertungsparameter zwischen dem 1,5- ($\text{PE}_{\text{ges.}}$ beim EFH – nicht dargestellt) und 3,8-fachen (POCP beim EFH – nicht dargestellt); d.h. bei der Sanitär- und Lüftungstechnik kann die Materialwahl im Extremfall knapp 4-fach höhere potenzielle Umweltauswirkungen verursachen.

Zudem ist ersichtlich, dass die spezifischen potenziellen Umweltauswirkungen des Mehrfamilienhauses geringer sind als die des Einfamilienhauses. Generell trifft dies auf alle Bewertungsparameter zu; Ausnahme ist hier das ODP mit der Konstellation: Gas-Brennwertgerät mit großer heizungsunterstützender Solaranlage und PV-Anlage (ca. 2 % der Varianten); hier weist das EFH im Gegensatz zum MFH spezifisch geringere Auswirkungen – ca. 3 % – auf. Es existiert ein moderater Unterschied zwischen den ökologischen Ergebnissen der beiden Gebäude, beispielsweise bei der Sanitärtechnik liegt das gemittelte Verhältnis von MFH zu EFH bei 46 % bis 55 % (je nach Bewertungsparameter); bei der Heizungstechnik nehmen die spezifischen Werte des MFH 61 % bis 66 % des EFH ein.

Tabelle 5.2 stellt dar, welche Art von Gebäudetechnik in welchem Bewertungsparameter welchen theoretischen Anteil an der Gesamttechnik einnimmt – minimal und maximal; um die Größenverhältnisse innerhalb der Gebäudetechnik bestimmen zu können. Hierzu wurde für das Minimum bei den anderen Gewerken das Maximum je Bewertungsparameter ausgewählt, z.B. Sanitärtechnik bei minimalen potenziellen Umweltauswirkungen sowie Heizungs-, Lüftungs-, Elektro- und Schwachstrom bei maximalem Wert pro Bewertungsparameter. Beim theoretischen Maximalwert wurde umgekehrt vorgegangen, wobei die Lüftungsanlage hier nicht betrachtet wurde, da diese optional eingebaut werden kann. Zudem wurde separiert zwischen „mit PV-Anlage“ und „ohne PV-Anlage“ (PV-Anlage wird als Energieerzeugung angesehen und ist deshalb der Heizungstechnik zugeordnet).

Tabelle 5.2: Übersicht über den theoretisch minimalen und maximalen Anteil der Gebäudetechnik untereinander für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (außer ODP) – mit PV-Anlage / ohne PV-Anlage

mit PV / ohne PV	PE _{ges.}	PE _{n.e.}	GWP	AP	EP	POCP
Sanitärtechnik						
EFH	7-17 % / 18-57 %	9-19 % / 19-58 %	9-21 % / 18-59 %	5-16 % / 9-61 %	6-19 % / 12-61 %	4-22 % / 11-68 %
MFH	5-8 % / 15-51 %	5-10 % / 16-51 %	6-11 % / 15-53 %	3-9 % / 7-54 %	4-10 % / 10-55 %	3-11 % / 9-60 %
Heizungstechnik						
EFH	73-89 % / 20-71 %	69-87 % / 20-68 %	66-86 % / 19-68 %	77-92 % / 23-85 %	72-91 % / 22-80 %	70-92 % / 16-79 %
MFH	85-93 % / 24-75 %	82-91 % / 23-73 %	80-90 % / 22-72 %	87-94 % / 26-87 %	84-94 % / 25-82 %	84-95 % / 19-82 %
Lüftungstechnik						
EFH	3-8 % / 7-25 %	4-9 % / 8-26 %	3-9 % / 7-25 %	1-5 % / 2-21 %	1-7 % / 3-24 %	2-6 % / 3-24 %
MFH	2-4 % / 6-21 %	2-5 % / 7-22 %	2-5 % / 6-21 %	1-3 % / 2-18 %	1-3 % / 3-20 %	1-3 % / 3-20 %
Elektrotechnik						
EFH	3-5 % / 7-21 %	4-6 % / 7-20 %	4-7 % / 8-23 %	2-4 % / 4-19 %	3-4 % / 5-20 %	3-5 % / 6-27 %
MFH	2-3 % / 8-23 %	3-4 % / 8-23 %	3-5 % / 9-25 %	2-3 % / 4-21 %	2-3 % / 6-22 %	2-3 % / 7-30 %
Schwachstromtechnik						
EFH	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %
MFH	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %	0-0 % / 0-1 %

Tabelle 5.2 zeigt, dass außer der Schwachstromtechnik kein weiterer Bestandteil der Gebäudetechnik vernachlässigt werden kann. Die mögliche Bandbreite der Anteile ist beträchtlich und abhängig von der eingesetzten Technik bzw. dem Material. Ebenso ist ersichtlich, dass die Sanitärtechnik innerhalb

der Gebäudetechnik bis zu 68 % (POCP beim EFH) ausmachen kann, d.h. die Sanitärtechnik kann im Extremfall bis zu ca. $\frac{2}{3}$ der potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik einnehmen. Dieser Fall tritt ein, sofern die Heizungs- und Elektrotechnik minimale Werte aufweisen (ohne PV-Anlage) und keine Lüftungsanlage eingebaut wird. Näherungsweise nimmt die Heizungstechnik im theoretischen Minimalfall einen gleichen Anteil ein wie die Lüftungs- oder Elektrotechnik im Maximalfall. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Heizungstechnik fast immer größeren Einfluss hat als die Lüftungs- und Elektrotechnik. Die Heizungstechnik dominiert den Bewertungsparameter ODP im Minimalfall durch die Pelletheizung (negatives ODP durch den Lagerraum aus Holz) und im Maximalfall durch die Wärmepumpen (hohes ODP mutmaßlich durch das Kältemittel). Das ODP wurde nicht dargestellt, da die Heizungstechnik Werte von 101 % bis 100 % (Minimalwert über 100 %, da negatives ODP) einnimmt und die anderen Gewerke hierdurch einen Anteil von 0 % im Minimal- und Maximalfall einnehmen. Trotzdem können die anderen Gewerke das ODP beeinflussen, sofern keine Wärmepumpe oder Schrägböden und deren Tragkonstruktion aus Holz im Pellet-Lagerraum eingesetzt werden. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Lüftungstechnik maximal zu $\frac{1}{4}$ zu den potenziellen Umweltauswirkungen an der Gebäudetechnik beiträgt. Die Elektrotechnik bewegt sich circa in der Größenordnung der Lüftungstechnik. Der Unterschied zwischen Einfamilien- und Mehrfamilienhaus ist gering.

Der große Einfluss der PV-Anlage ist ebenso erkennbar. Die Heizungstechnik hat Anteile ohne PV-Anlage von $> 16\%$ bzw. mit PV-Anlage von $> 66\%$. Die Mehrzahl der Heizungstechnikanteile bewegen sich zwischen 20 % und 80 % (ohne PV-Anlage) bzw. 75 % und 90 % (mit PV-Anlage), d.h. die Heizungstechnik nimmt v.a. in Verbindung mit einer PV-Anlage die größte Bedeutung innerhalb der Gebäudetechnik ein. Ferner sinkt der Einfluss der Sanitär-, Lüftungs- und Elektrotechnik innerhalb der Gebäudetechnik bedeutend, falls eine PV-Anlage genutzt wird. Demgemäß nimmt die Bandbreite der möglichen Anteile nennenswert ab, sofern der Einsatz einer PV-Anlage in Betracht gezogen wird.

Bei der ökologischen Betrachtung wird vom durchschnittlichen Gewicht der einzelnen Bestandteile der Gebäudetechnik ausgegangen. Sofern man für jede Baukomponente das minimale bzw. maximale Gewicht annimmt, verändern sich die potenziellen Umweltauswirkungen im Mittel über alle Varianten beim Einfamilienhaus wie folgt:

- Sanitärtechnik: - 24 % bzw. + 33 %
- Heizungstechnik (ohne PV): - 29 % bzw. + 58 %
- Heizungstechnik (ohne bzw. mit PV): - 19 % bzw. + 39 %
- Lüftungstechnik: - 17 % bzw. + 30 %
- Elektrotechnik: - 22 % bzw. + 37 %

Die gezeigten Abweichungen stellen Extremwerte dar. Nichtsdestotrotz ist ersichtlich, dass das gewählte Gewicht einen großen Einfluss auf das Endergebnis hat. Deshalb sollten bis zu einer allgemeingültigen Festlegung bzw. standardisierten Vorgaben die Gewichtsangaben, d.h. die Sachbilanz, für eine bessere Vergleich- und Nachvollziehbarkeit offengelegt werden.

Bei der ökologischen Analyse der Gebäudetechnik wurde erkannt, dass mit Ausnahme der Schwachstromtechnik bei Niedrigstenergiegebäuden kein Bestandteil der Gebäudetechnik vernachlässigbar ist; des Weiteren, dass die Heizungstechnik, v.a. mit PV-Anlage grundsätzlich die meisten potenziellen Umweltauswirkungen verursacht. Zudem sind die spezifischen umweltbezogenen Auswirkungen des Mehrfamilienhauses geringer als die des Einfamilienhauses. Eine detaillierte Analyse der einzelnen Bestandteile bzw. Kostengruppen (DIN 276-1 [170]) der Gebäudetechnik folgt in den nächsten Unterkapiteln.

5.3.2 Sanitärtechnik

In *Abbildung 5.13* sind die prozentualen Anteile der Hauptkomponenten an der gesamten Sanitärtechnik (KG 410 DIN 276-1 [170]) für 40 Materialvarianten aufgezeigt. Als Einzelbauteile mit den größten potenziellen Umweltauswirkungen wurden die (Acryl-)Bade- und Duschwannen, die Sanitärkeramik, d.h. WC und Waschtisch bzw. -becken sowie die Wasserrohrleitungen (inkl. Formstücke, ohne Dämmung und Befestigung) identifiziert.

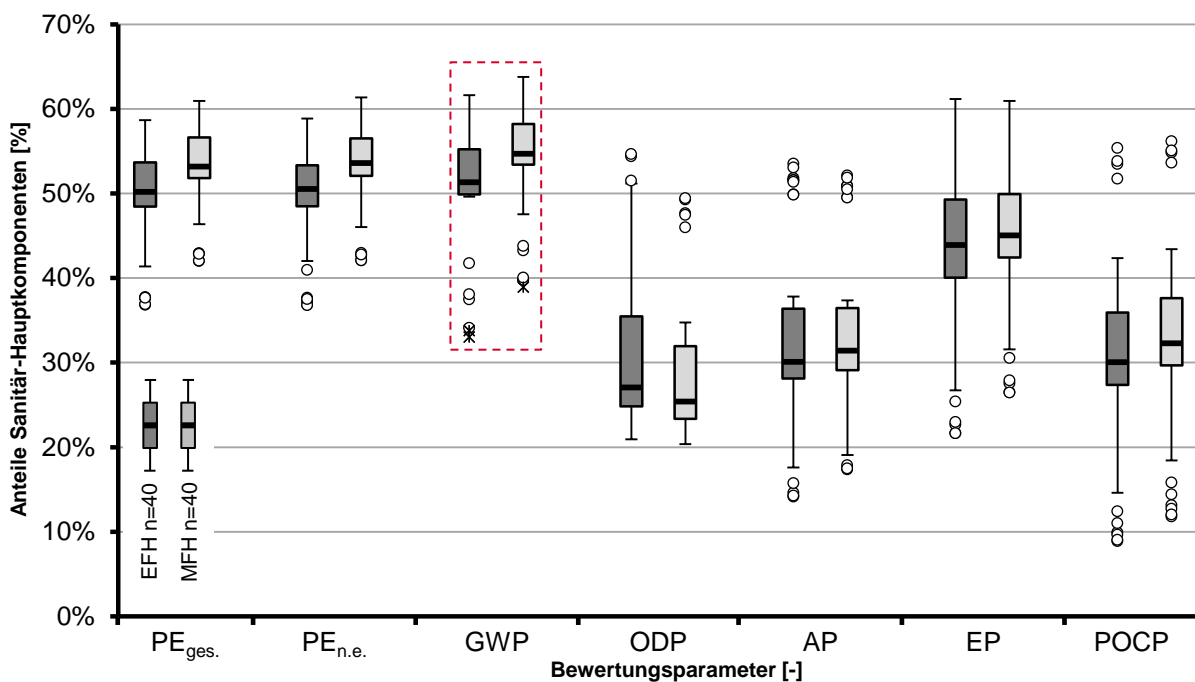


Abbildung 5.13: Anteil der Hauptkomponenten (Acryl-Wannen, Sanitärkeramik, Wasserrohrleitungen) an der Sanitärtechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Roter Rahmen: Siehe *Abbildung 5.14* auf der nächsten Seite)

Diese drei Baukomponenten (Wannen, Sanitärkeramik, Wasserrohrleitungen) teilen die Anteile in zwei Hauptgruppen auf. Diese Aufteilung ist auf die unterschiedlichen potenziellen Umweltauswirkungen der übrigen Materialien zurückzuführen. Beim Einfamilienhaus liegt der IQR beim PE_{ges.}, PE_{n.e.}, GWP zwischen 48 % und 55 % sowie beim EP annähernd an den vorherig genannten Bewertungsparametern (40 % bis 49 %). 50 % aller Werte liegen beim ODP, AP und POCP zwischen 25 %

und 36 %. Die Werte beim Mehrfamilienhaus sind ähnlich, wobei die Hauptkomponenten tendenziell höhere prozentuale Anteile einnehmen. Die fehlenden Prozentwerte zu 100 % sind auf viele Kleinteile (z.B. Wasserzähler, Absperrarmaturen, Rückschlagventil) zurückzuführen; der Anteil ist immer > 36 % (GWP und MFH) und < 82 % (POCP und EFH). Dementsprechend kann man festhalten, dass die kleinteiligen und meist gewichtsarmen Bauteile – die häufig vernachlässigt werden – einen nicht zu unterschätzenden Anteil an der gesamten Sanitärtechnik einnehmen.

Die Bandbreite der prozentualen Anteile der Hauptkomponenten rührt alleine auf verschiedenen Materialien (z.B. Kupfer- statt Edelstahlleitung) her, d.h. es wurden keine zusätzlichen Sanitärobjekte bilanziert. Die Ausreißerwerte über dem IQR beruhen auf dem hohen Einfluss einzelner Materialien der Wasserleitungen (ODP: Mehrschichtverbundrohr, AP: Edelstahlrohr, verzinktes Rohr, POCP: verzinktes Rohr). Die Extremwerte mit geringen Anteilen sind auf die Varianten zurückzuführen, bei denen als Abflussrohrmaterial SML bilanziert wurde. Beispielsweise bewegt sich der Minimalanteil des Abflussrohres an der Sanitärtechnik beim Einfamilienhaus je Bewertungsparameter zwischen 0 % und 9 % und das Maximum zwischen 16 % und 72 % bzw. alle Abflussrohrmaterialien ohne SML-Rohr: 9 % und 16 %. Dies bedeutet, dass das Abflussrohr – außer SML-Rohr – eine untergeordnete Rolle einnimmt. *Abbildung 5.14* zeigt u.a. diesen Sachverhalt an einem Beispiel für das EFH und MFH.

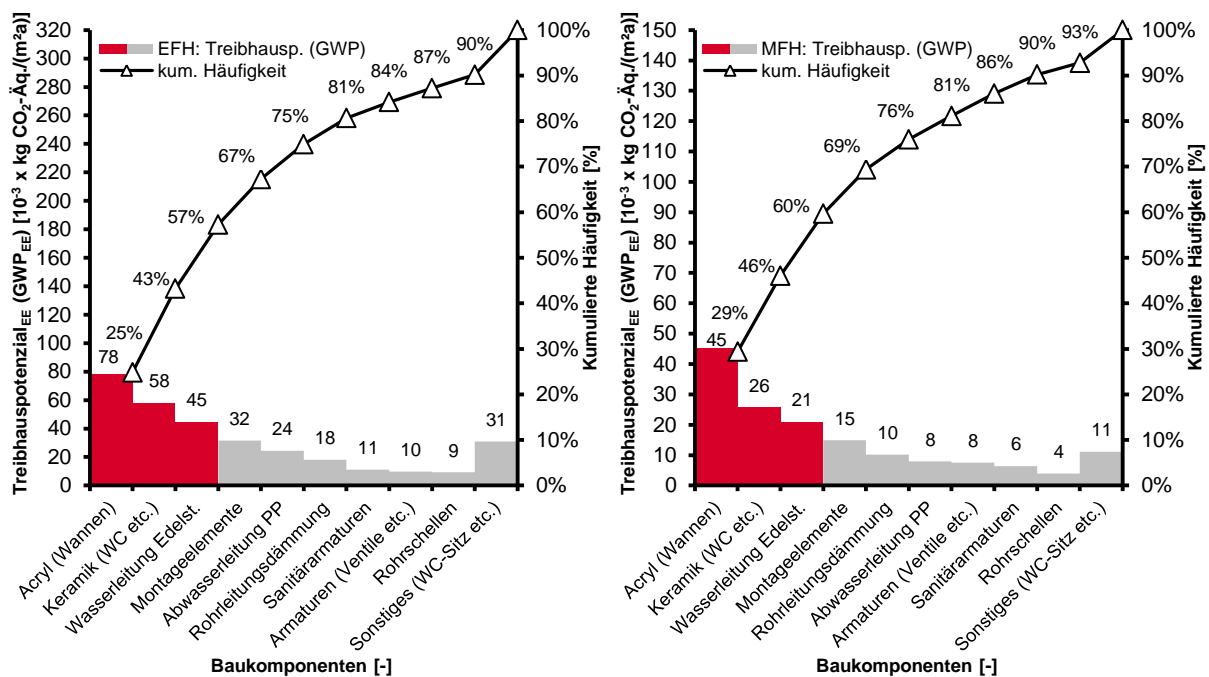


Abbildung 5.14: Kumulierte Häufigkeit der einzelnen Baukomponenten der Sanitärtechnik für das Einfamilien- (links) und Mehrfamilienhaus (rechts) an einem Beispiel (Wasserleitung Edelstahl und Abwasserleitung Polypropylen) beim Treibhauspotenzial (GWP)

Insgesamt besteht die Sanitärtechnik aus 47 (EFH) bzw. 51 (MFH) Einzelbestandteilen, diese sind gruppiert (Wasserleitung DN 15, DN 20 etc.) in *Abbildung 5.14* dargestellt. Hierbei sei anzumerken, dass *Abbildung 5.14* ein Ausschnitt eines Bewertungsparameters darstellt, d.h. die rot gekennzeichneten

ten Hauptbaukomponenten – (Acryl-)Bade- und Duschwannen, Sanitärkeramik, Wasserrohrleitungen – sind ein Datenpunkt (EFH: 57 % bzw. MFH: 60 %) beim GWP in *Abbildung 5.13 auf Seite 92*. Die anderen, meist kleinen, Baukomponenten repräsentieren 43 % bzw. 40 % des GWP und sollten somit Berücksichtigung in der ökologischen Betrachtung finden. Die wichtigsten Baukomponenten hiervon sind die Montageelemente für WC und Waschtisch bzw. -becken sowie die Abwasserleitung. Hierbei unterscheidet sich die Rangfolge je nach Bewertungsparameter und Gebäudetyp. Der Einsatz von Rotguss für die Armaturen (Ventile, Absperrungen, Sicherheitsventil etc.), mit ca. 20 % schlechteren ökologischen Werten als Messing (außer beim ODP), hat auf die ökologische Bilanz der Sanitärtechnik geringen Einfluss. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Rohrschellen einschließlich Befestigung einen sehr kleinen Anteil ausmachen; dies ist auf alle Bewertungsparameter übertragbar. Beispielsweise bewegt sich beim Einfamilienhaus bei allen Varianten der Anteil der Rohrschellen an den potenziellen Umweltauswirkungen der kompletten Sanitärtechnik je nach Kategorie zwischen 1 % und 4 %.

Die ökologischen Ergebnisse der Sanitärtechnik sind bei gegebener Menge (Sanitärobjekte, Rohrlänge etc.), nur durch die Materialwahl – beispielsweise der Rohrleitung – beeinflussbar. Die Trinkwasserrohrleitungen (TW) bieten hierbei ein größeres Optimierungspotenzial als die Abwasserrohrleitungen. *Abbildung 5.15* zeigt deshalb für Rohrleitungen bei allen Bewertungsparametern die (ökologischen) Verhältnisse zum Mehrschichtverbundrohr auf (Normierung auf Mehrschichtverbundrohr). Hierbei wurde die Betrachtung auf Heizungsrohrleitungen (Hzg) ausgeweitet, da diese oftmals aus dem identischen Rohrmaterial bestehen.

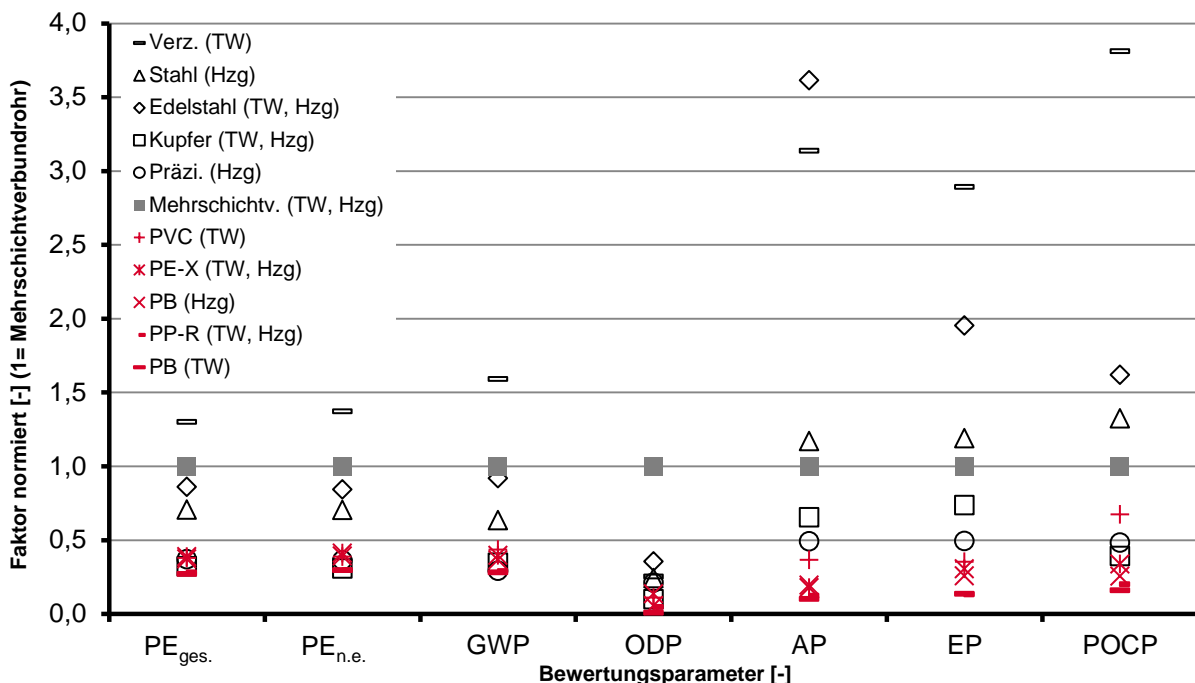


Abbildung 5.15: Wasser- bzw. Heizungsrohrleitung (normiert auf Mehrschichtverbundrohr) bei allen Bewertungsparametern

Es zeigt sich, dass die kunststoffbasierten Rohrleitungen (rot in *Abbildung 5.15 auf der vorherigen Seite*⁸⁰) tendenziell ökologisch vorteilhafter sind als die Metallrohre einschließlich Mehrschichtverbundrohre. Beim $PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP und ODP sind die Kupferleitungen und das Heizungspräzisionsstahlrohr (C-Stahl-Rohr) in der Größenordnung der Kunststoffrohre. Höhere potenzielle Umweltauswirkungen als das Mehrschichtverbundrohr hat bei allen Bewertungsparametern, außer beim ODP, nur die verzinkte Rohrleitung. Kupfer- und Edelstahlleitungen sind beim AP, EP und POCP ökologisch unvorteilhafter als das Mehrschichtverbundrohr. Die derzeit übliche Annahme für das Lebensende von Kunststoffrohrleitungen ist die Müllverbrennungsanlage mit hieraus resultierender Gutschrift. Diese Tatsache widerspricht allerdings dem Recyclinggedanken und v.a. der (künftigen) Kreislaufwirtschaft. Ohne Berücksichtigung der Gutschrift (Phase D) bei beiden Rohrtypen schneiden die Metallrohre noch ungünstiger im Vergleich zu Kunststoffrohren ab.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Wasserrohrleitungen und die gewichtigen Einrichtungsgegenstände, d.h. Sanitärkeramik und Wannen, die Baukomponenten mit den größten umweltbezogenen Auswirkungen der Sanitärtechnik sind; gleichwohl sind die kleinteiligen Baukomponenten nicht zu vernachlässigen. Ferner werden derzeit Kunststoffrohre ökologisch besser bewertet als Metall- und Mehrschichtverbundrohre.

5.3.3 Heizungstechnik

Die prozentualen Anteile der Hauptkomponenten der Heizungstechnik (KG 420 DIN 276-1 [170]) einschließlich der PV-Anlage sind in *Abbildung 5.16 auf der nächsten Seite* dargestellt. Die 4768 Varianten entstehen durch Materialvariationen und durch unterschiedliche Energiekonzepte. Deshalb sind die Hauptkomponenten jeweils der Wärmeerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher und die Wärmeübergabe (Heizkörper oder Fußbodenheizungsrohr) sowie ggf. die Solar- und / oder PV-Module.

Mittels der oben genannten drei bis maximal fünf Hauptkomponenten lässt sich der Hauptanteil der Heizungstechnik abbilden. Es zeigt sich, dass die Anteile beim EFH und MFH relativ ähnlich sind. Bei mehr als 75 % der Varianten ist der Anteil der Hauptkomponenten > 63 % (EFH) bzw. > 65 % (MFH). Mittels der Hauptkomponenten werden beim ODP 100 % erreicht, Grund hierfür sind die Wärmepumpen. Die negativen Extremausreißer beim ODP sind auf die Pelletanlagen zurückzuführen. Demzufolge repräsentieren die genannten Hauptkomponenten hier nicht das ODP; der Anteil des Holzes, das im Lagerraum verbaut ist, dominiert bei der Pelletheizung das ODP (negatives ODP durch Konstruktionsvollholz und OSB-Platten). Erwähnenswert ist noch der Umstand, dass bei Heizungstechnikvarianten ohne Solar- und PV-Anlage der Anteil der Hauptkomponenten am geringsten ist, d.h. diese 176 Varianten bilden die niedrigen Prozentwerte. Die Anteile bewegen sich bei beiden Gebäuden um die 60 % (außer ODP, hier zwischen 0 % und 100 %).

In *Abbildung 5.17 auf der nächsten Seite* mit zwei Beispielen ist u.a. sichtbar, dass die Heizungsrohrleitungen (ohne Fußbodenheizungsrohr) – im Gegensatz zur Sanitärtechnik – keine Hauptkomponenten

⁸⁰Datengrundlage auf Basis des Einfamilienhauses: 1/6 DN 20, 2/6 bzw. 1/3 DN 15, 3/6 bzw. 1/2 DN 12 ohne Formstücke, Rohrleitungsdämmung, Befestigung; Rahmenbedingungen: Kapitel 4.1 auf Seite 39.

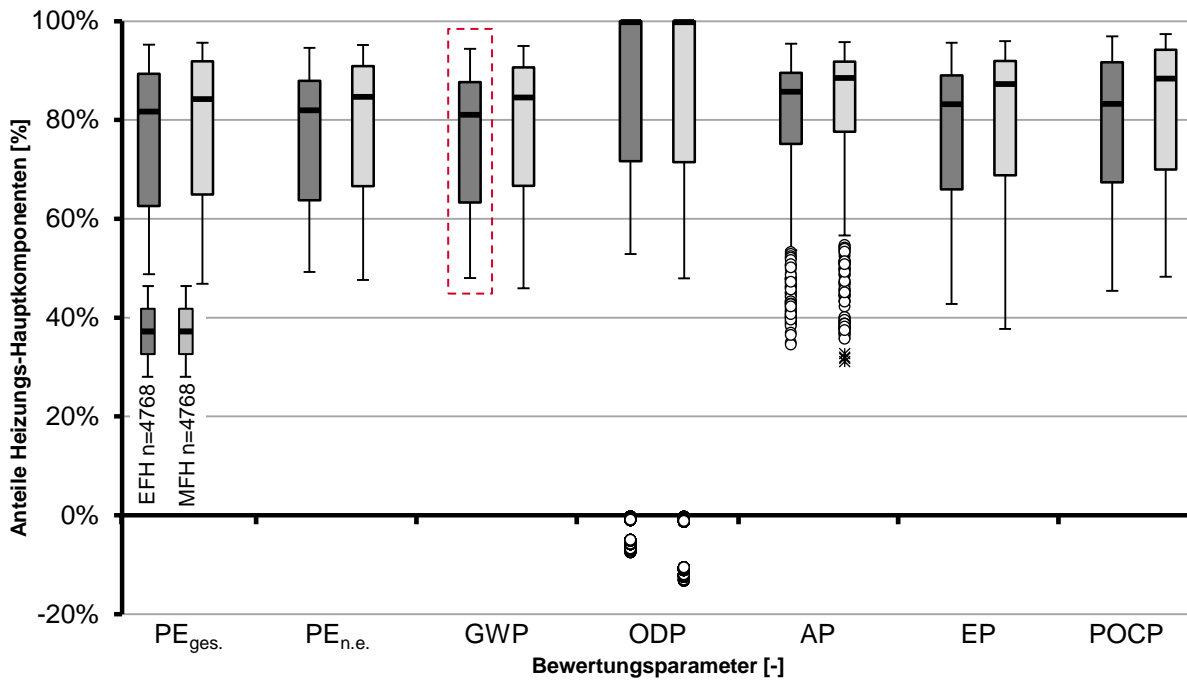


Abbildung 5.16: Anteil der Hauptkomponenten (Wärmeerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher, Wärmeübergabe (Heizkörper oder Fußbodenheizungsrohr) und ggf. Solar- / PV-Module) an der Heizungstechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Roter Rahmen: Siehe Abbildung 5.17)

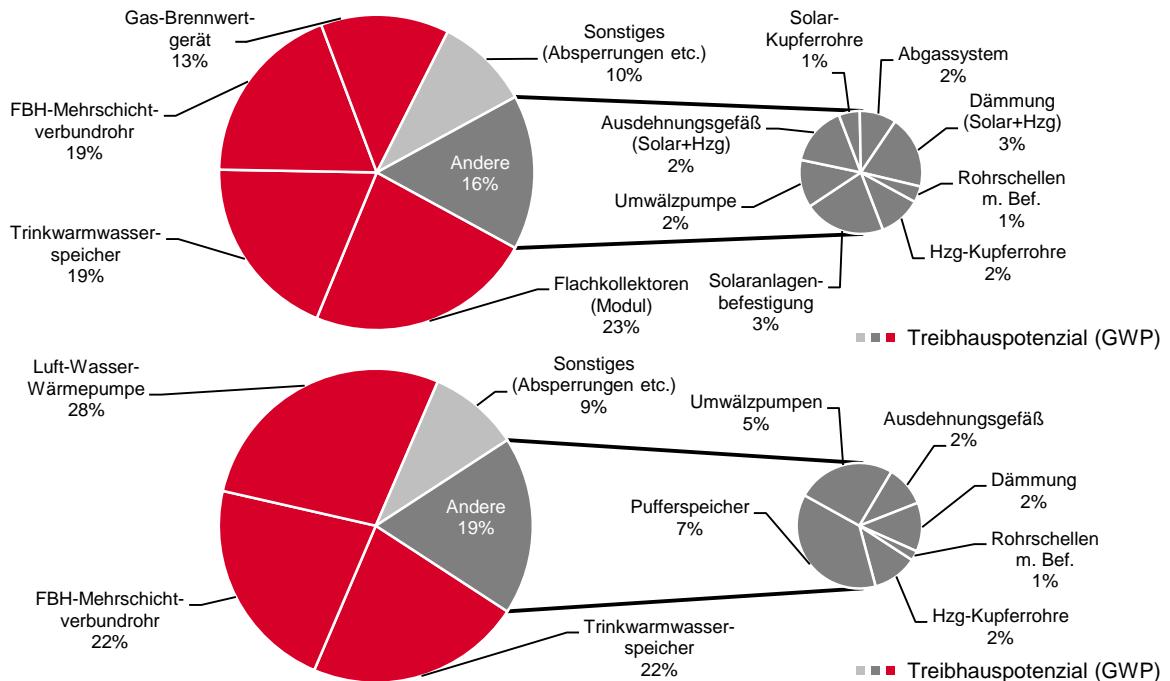


Abbildung 5.17: Haupt- und Nebenkomponten der Heizungstechnik für das Einfamilienhaus an den Beispielen Gas-Brennwertgerät und Solaranlage (Standardheizungsanlage) (oben) sowie Luft-Wasser-Wärmepumpe (unten) jeweils mit Fußbodenheizung beim Treibhauspotenzial (GWP)

sind. Diese sind Baukomponenten mit verhältnismäßig geringem Anteil bei der Heizungstechnik. Bei allen Bewertungsparametern der analysierten Gebäude bewegt sich die Mehrzahl der Anteile der Heizungsleitungen an der Heizungstechnik unter 6 %. Überschlägig sind die Heizungsrohranteile bei allen Bewertungsparametern < 10 % – mit Ausnahme weniger Extremausreißer.

Es werden die 49 bzw. 32 Einzelbestandteile der Heizungsanlage Gas-Brennwertgerät mit Solaranlage und Fußbodenheizung (derzeitige Standardheizung) bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe und Fußbodenheizung (möglicher zukünftiger Standard) beim GWP für das Einfamilienhaus dargestellt. Es ist klar sichtbar, dass 4 bzw. 3 Baukomponenten 74 % bzw. 72 % der gesamten Treibhausemissionen der jeweiligen Heizungstechnik repräsentieren. Bei den anderen Bewertungsparametern sind es ähnliche Größenordnungen, außer beim ODP; hier hat die Luft-Wasser-Wärmepumpe (mutmaßlich wegen des Kältemittels) einen Anteil von 100 %. Wie schon bei der Sanitärtechnik sind die vielen kleinteiligen und meist gewichtsarmen Baukomponenten (Umwälzpumpe, Ausdehnungsgefäß, Absperrung etc.) mit einem hier beispielhaften Anteil von 26 % (10 % + 16 %) bzw. 28 % (9 % + 19 %) nicht zu unterschätzen. Anzumerken sei noch, dass *Abbildung 5.17 auf der vorherigen Seite* oben bzw. unten je eine Variante von insgesamt 4768 zeigt. Deshalb wird im Folgenden (u.a. *Abbildung 5.18*) die Heizungstechnik nochmals näher beleuchtet.

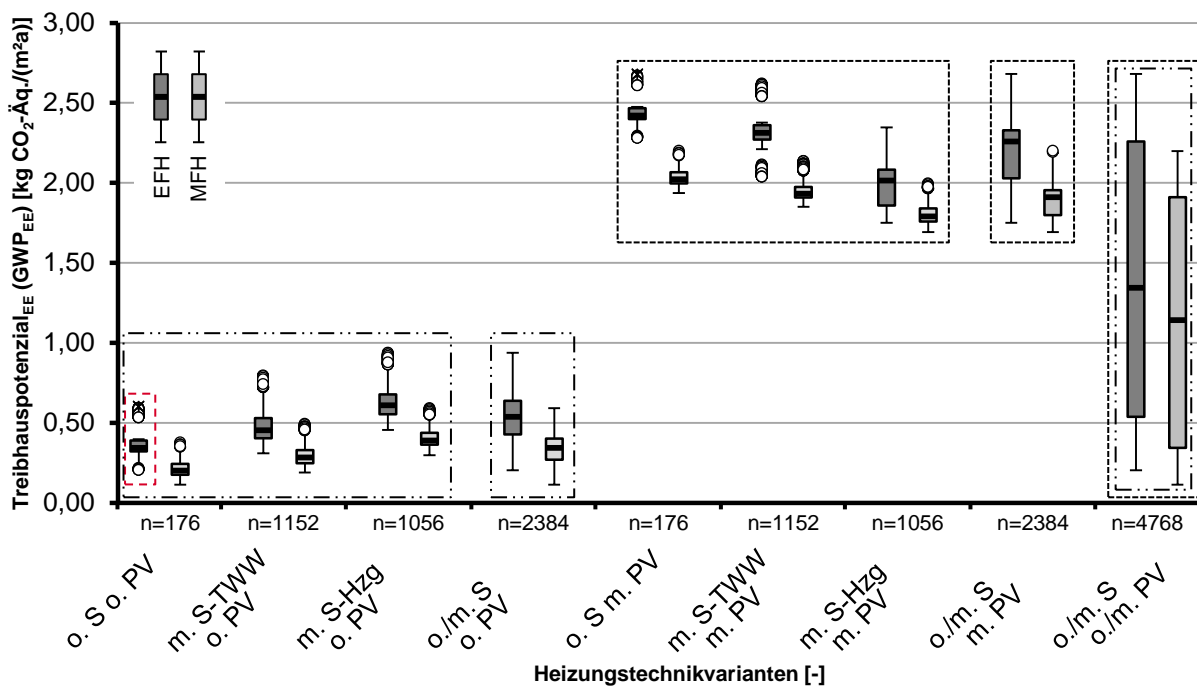


Abbildung 5.18: Heizungstechnik mit und ohne Solar- bzw. PV-Anlage für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus beim Treibhauspotenzial (GWP) (Roter Rahmen und Standardheizung: Siehe *Abbildung 5.19 auf der nächsten Seite*) [o./m. = ohne oder mit; S-TWW = trinkwarmwasserunterstützende Solaranlage; S-Hzg = heizungsunterstützende Solaranlage; S = Solaranlage; PV = PV-Anlage]

Es ist ersichtlich⁸¹, dass – wie zu erwarten – die potenziellen Umweltauswirkungen ansteigen, sofern man zusätzlich eine Solar- und / oder PV-Anlage einsetzt. Überraschend ist allerdings der enorme Unterschied zwischen Anlagen ohne und mit PV, unabhängig vom Energieerzeuger, der Übergabeart (Heizkörper oder Fußbodenheizung) oder den Materialien. Diese Differenz ist bei allen Bewertungsparametern zu beobachten; beim EFH beträgt der Faktor zwischen Anlagen ohne und mit PV im Mittel 3,6 bis 5,5 (je nach Bewertungsparameter) bzw. beim MFH 4,7 bis 7,7 (Basis: 2384 Varianten), d.h. Gebäude mit PV-Anlagen haben wesentlich höhere potenzielle Umweltauswirkungen als Anlagen ohne Photovoltaikmodule; sowohl beim EFH als auch beim MFH bei allen Bewertungsparametern. Hierbei liegt tendenziell das Maximum der umweltbezogenen Auswirkungen bei Heizungsanlagen mit reiner PV-Anlage (ohne Solaranlage) – außer beim AP, hier weisen generell Anlagen einschließlich PV- und Solaranlage die höchsten Werte auf. In *Abbildung 5.18 auf der vorherigen Seite* erfolgt keine Unterscheidung nach Erzeugerart (Wärmepumpe, Pelletkessel etc.); *Abbildung 5.19* untersucht diesbezügliche Unterschiede wiederum genauer.

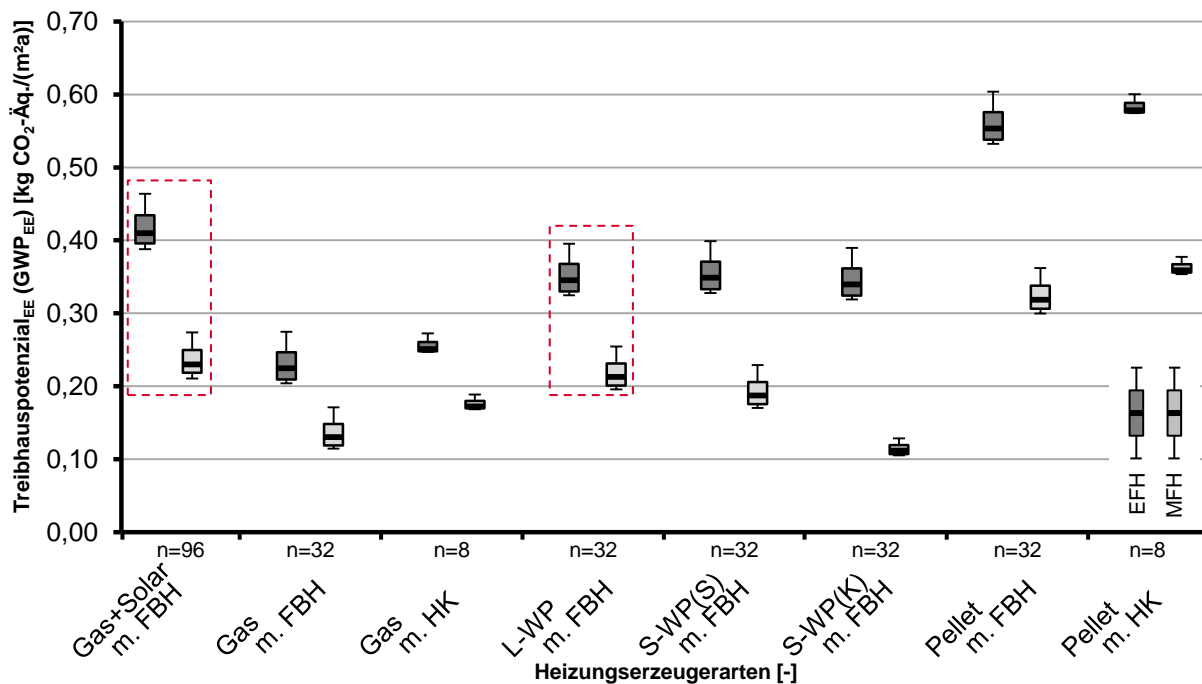


Abbildung 5.19: Heizungstechnik sortiert nach Erzeugerart für das Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus beim Treibhauspotenzial (GWP) (Roter Rahmen: Siehe *Abbildung 5.20 auf Seite 100*) [Gas = Gas-Brennwertgerät; L-WP = Luft-Wasser-Wärmepumpe; S-WP(S) = Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde; S-WP(K) = Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektor; Pellet = Pelletkessel; FBH = Fußbodenheizung; HK = Heizkörper]

Die unterschiedlichen Heizungserzeugerarten ohne Solar⁸² und PV-Anlage sind beispielhaft für das GWP beim Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus dargestellt. Es zeigt sich, dass Pelletkessel

⁸¹Für *Abbildung 5.18 auf der vorherigen Seite* ist zum einen anzumerken, dass hier der Solarertrag nicht berücksichtigt ist, der Betrieb wird im Kapitel 5.5 auf *Seite 111* behandelt; zum anderen dass die kleineren schwarzen Rahmen die zusammengeführten Daten der größeren schwarzen Rahmen sind; ebenfalls erkenntlich durch die Datenanzahl (n).

⁸²Außer bei der Standardvariante; hier ist eine Solaranlage zur Trinkwarmwasserunterstützung enthalten.

höhere potenzielle Umweltauswirkungen aufweisen als die Varianten mit Gas-Brennwertgerät und Wärmepumpe; dies trifft auf alle Bewertungsparameter – außer dem ODP – zu. Beim ODP (hier nicht dargestellt) übertreffen die Wärmepumpenvarianten alle anderen Anlagen, selbst beim Einsatz einer Solar- und / oder PV-Anlage. Ansonsten variieren je nach Bewertungsparameter und Gebäudetyp die Rangfolge von Gas-Brennwertgerät und Wärmepumpe. Prinzipiell liegen Bewertungsparameter aller Wärmeerzeugeranlagen nicht weiter auseinander als um den Faktor 1,9 (EFH) bzw. 2,4 (MFH), d.h. die Materialien haben einen maximalen Einfluss von ca. 90 % bzw. 140 %; im Mittel sind es ca. 20 %. Des Weiteren ist beim Vergleich zwischen Fußbodenheizung und Heizkörper beim Gas-Brennwertgerät bzw. bei der Pelletheizung ersichtlich, dass die Fußbodenheizung niedrigere als auch höhere umweltbezogene Auswirkungen als die Varianten mit Heizkörper einnehmen kann. Welches Übergabesystem ökologisch günstiger ist, ist abhängig vom verwendeten Rohrmaterial (z.B. Mehrschichtverbund- oder PE-X-Rohr) und den örtlichen Gegebenheiten (z.B. Anzahl und Größe der Heizkörper). Tendenziell sind bei den beiden untersuchten Gebäuden niedrigere potenzielle Umweltauswirkungen bei Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einschließlich Recycling (EE) mit Fußbodenheizung als Übergabesystem zu erreichen.

Abbildung 5.20 auf der nächsten Seite zeigt für zwei Beispiele am Einfamilien- und Mehrfamilienhaus auf, wie sich die prozentualen Anteile hinsichtlich Erzeugung, Verteilung und Übergabe aufteilen. Hierfür wurden folgende Systeme mit den Standardmaterialien ausgewählt: Das Standardsystem, d.h. Gas-Brennwertgerät mit Solaranlage und Fußbodenheizung (Gas+Solar m. FBH) sowie der mögliche zukünftige Standard, Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Fußbodenheizung (L-WP m. FBH).

Beim Vergleich vom Einfamilien- zum Mehrfamilienhaus kommt es zu einer leichten Verschiebung der umweltbezogenen Auswirkungen der Erzeugung. Der Erzeugeranteil ist beim EFH (links) etwas höher als beim MFH (rechts), diese Erkenntnis kann von den beiden Beispielen, bis auf vereinzelte Ausnahmen, auf alle 4768 betrachteten Varianten mit deren Bewertungsparameter übertragen werden; Erzeugeranteil ohne PV-Anlage (2384 Varianten) IQR: 14 % bis 55 % (EFH) bzw. 10 % bis 53 % (MFH). Hierfür ist der Anteil bei der Heizungsübergabe beim EFH (links) in den beiden Beispielen geringer als beim MFH (rechts). Allerdings kann festgestellt werden, dass dies nicht auf alle Varianten zutrifft. Folglich verschieben sich die Anteile der Erzeugung zur Verteilung, Übergabe und ggf. Solar- und PV-Anlage. Sofern keine Solar- und / oder PV-Anlage vorhanden ist, nimmt die Erzeugung deutlich größere Anteile als die Verteilung und Übergabe ein, ähnlich wie im Beispiel in *Abbildung 5.20 auf der nächsten Seite* unten. 50 % der Heizungsverteilungen der Anlagen ohne / mit Solaranlage haben einen Anteil zwischen 7 % und 19 % (EFH) bzw. 6 % und 18 % (MFH); somit liegen die Beispiele teilweise nicht im IQR. Bilanziert man für diese 2384 Varianten eine PV-Anlage mit, dann bewegen sich 50 % der Werte (IQR) nur noch zwischen 2 % und 5 % (EFH) bzw. 1 % und 3 % (MFH). Die gesamte Solaranlage nimmt in diesem Beispiel einen Anteil von 33 % ein; über alle Varianten und Bewertungsparameter sind es zwischen 0 % (keine Solaranlage) und 84 %. Sofern eine PV-Anlage verbaut wird (hier nicht enthalten), dominiert diese mit Anteilen von mindestens 44 % (EFH) bzw. 58 % (MFH). Prinzipiell lässt sich hieraus schlussfolgern: Keine Untergruppierung der Heizungstechnik ist pauschal vernachlässigbar; wobei eine vorhandene PV-Anlage den größten Anteil einnimmt sowie die Heizungserzeugung größere Werte als die Verteilung und Übergabe aufweist.

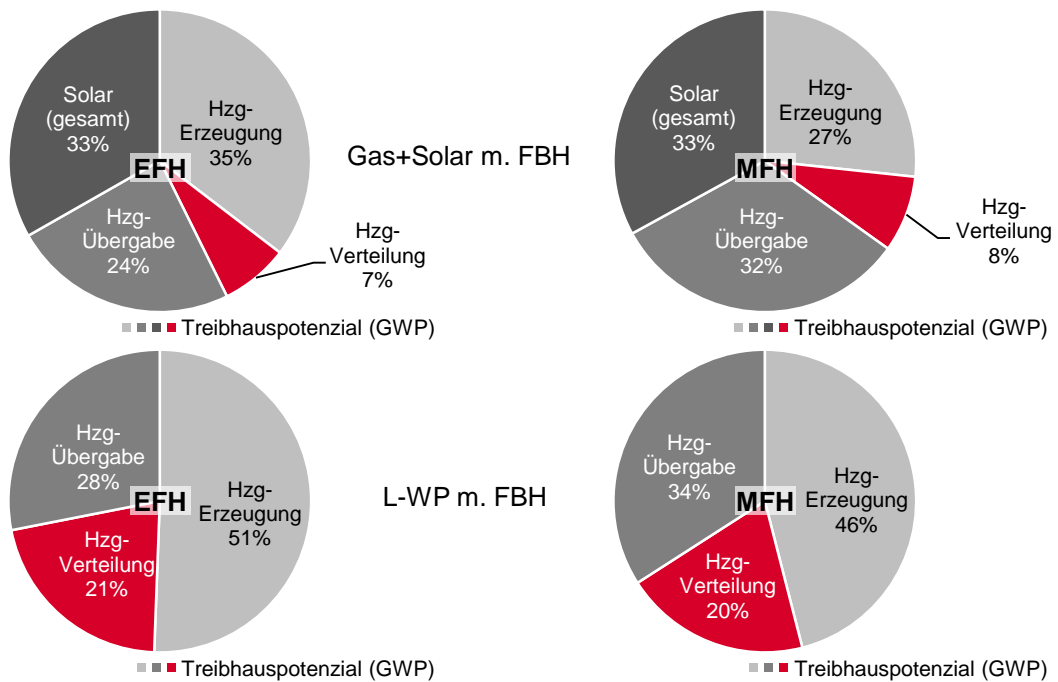


Abbildung 5.20: Anteil der Heizungserzeugung, -verteilung und -übergabe für das Einfamilien- (links) und Mehrfamilienhaus (rechts) am Beispiel der Standardmaterialien für Gas-Brennwertgerät und Solaranlage (Standardsystem) (oben) und der Luft-Wasser-Wärmepumpe (unten) jeweils mit Fußbodenheizung beim Treibhauspotenzial (GWP)

Zuletzt wird bei der Heizungstechnik der Einfluss der Herstellung (Phase A⁸³), Instandhaltung (Phase B), Entsorgung (Phase C) und Recyclinggutschrift (Phase D) je Bewertungsparameter analysiert. *Abbildung 5.21 auf der nächsten Seite* stellt dies für die komplette Heizungstechnik einschließlich Solar- und / oder PV-Anlage beim Einfamilienhaus dar (n = 4768 Varianten). Anzumerken sei noch, dass es bei Herstellung und Instandhaltung zu Prozentwerten von > 100 % kommen kann; diese jedoch durch negative Prozentwerte durch die Gutschrift ausgeglichen werden, d.h. in Summe sind es 100 %.

Bei der Heizungstechnik ist die Instandhaltung die wichtigste Phase. Über alle Bewertungsparameter hat die Instandhaltung die größten Anteile, gefolgt von der Herstellung. Die Entsorgung, d.h. die Abfallbehandlung und Beseitigung (z.B. auf Deponien) spielt eine untergeordnete Rolle bei der Heizungstechnik. Dies ist auf die Annahme in der ÖKOBAUDAT [76] zurückzuführen, dass ein Großteil der Gebäudetechnik recyclingfähig ist. Überall, außer bei allen Wärmepumpenvarianten mit dem Bewertungsparameter ODP, ist ein Recyclingpotenzial vorhanden. Der IQR bei den Recyclinggutschriften bewegt sich – außer beim ODP – zwischen - 27 % und - 64 %. Das Recycling aus Herstellung und Instandhaltung hat nahezu die gleiche Größenordnung bzw. Anteile wie die Herstellungsphase.

⁸³Phasen bzw. Module nach DIN EN 15978 [71].

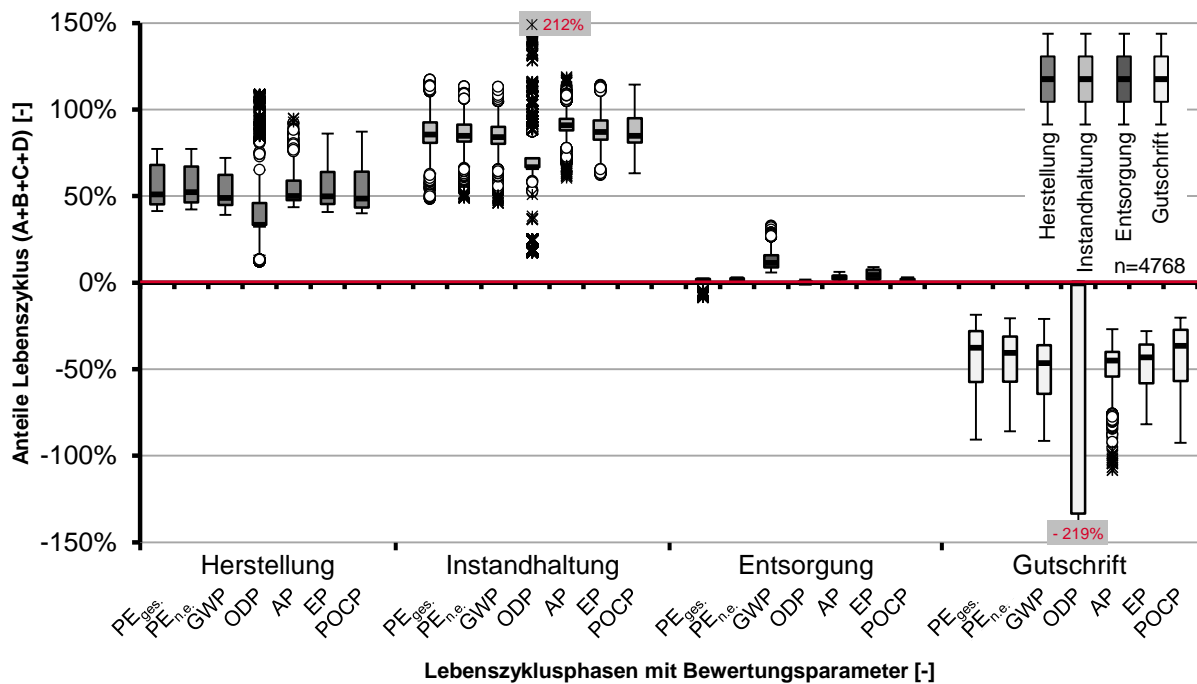


Abbildung 5.21: Anteil der Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung und Gutschrift der Heizungstechnik (ohne / mit Solar- und ohne / mit PV-Anlage) für das Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern

Für die Bilanzierung der Gebäudetechnik hat dies zum einen die Auswirkung, dass die Instandhaltung betrachtet werden muss; zum anderen, dass bei Vernachlässigung der Phase D ein wesentlicher bilanzieller Teil der Gebäudetechnik unterschlagen wird und somit höhere umweltbezogene Auswirkungen hat. Die Anteile beim Mehrfamilienhaus sind ähnlich und folglich sind die Aussagen übertragbar.

Verallgemeinernd bleibt festzuhalten, dass mittels Energieerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher, Übergabesystem (Fußbodenheizung oder Heizkörper) und ggf. Solar- oder / und PV-Modul überschlägig ca. $\frac{3}{5}$ bis gut $\frac{4}{5}$ der potenziellen Umweltauswirkungen der Heizungstechnik beschrieben werden können. Allerdings sind die kleinteiligen Bauteile nicht zu unterschätzen. Des Weiteren weisen Energiekonzepte mit PV-Anlage hinsichtlich Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung ein um ein vielfach höheres Umweltpotenzial auf als Anlagen ohne PV. Außerdem sollten bei der ökologischen Betrachtung der Technik die Instandhaltungszyklen und das Recycling nicht vernachlässigt werden.

5.3.4 Lüftungstechnik

Abbildung 5.22 auf der nächsten Seite zeigt – wie bei der Sanitär- und Heizungstechnik – die prozentualen Anteile der Hauptkomponenten an der gesamten KG 430 nach DIN 276-1 [170], d.h. der Lüftungstechnik mit 50 Materialvarianten. Die Hauptkomponenten sind das Lüftungsgerät, der (Rohr-)Schalldämpfer und die Lüftungsanbindeleitung, respektive der Leitungslänge: Luftverteiler bis zu den einzelnen Zuluftauslässen bzw. von den Ablufteinlässen.

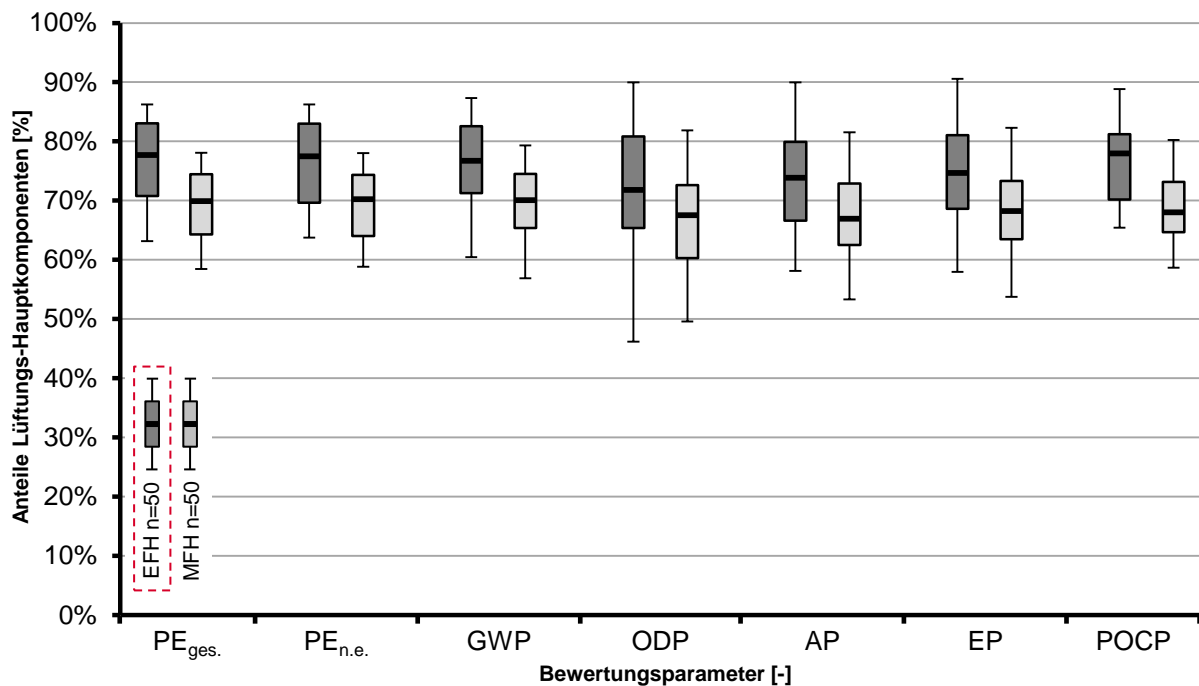


Abbildung 5.22: Anteil der Hauptkomponenten (Lüftungsgerät, Schalldämpfer, Lüftungsanbindeleitung) an der Lüftungstechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Roter Rahmen: Siehe Abbildung 5.23 auf der nächsten Seite.)

Die potenziellen Umweltauswirkungen sind über alle Bewertungsparameter relativ konstant. Der IQR bewegt sich beim EFH in einer Bandbreite zwischen 67 % und 83 % bzw. beim MFH zwischen 60 % und 75 %; Extremausreißer sind nicht vorhanden. Kleinteilige Baukomponenten (Wetterschutzgitter, Auslässe, Luftverteiler etc.) können beim EFH zwischen 9 % (EP) und 54 % (ODP) bzw. beim MFH zwischen 18 % (ODP, AP, EP) und 50 % (ODP) der potenziellen Umweltauswirkungen ausmachen. Beim MFH sind die Werte überschlägig um 7 % geringer als beim EFH. Der geringere Anteil der Hauptkomponenten beim MFH ist auf die Anordnung der Wohnraumlüftungsgeräte (je Wohnung ein Gerät) zurückzuführen; hierdurch ist der Anteil der Anbindeleitungen geringer, und es sind mehr „Kleinteile“ (z.B. Wetterschutzgitter) verbaut. *Abbildung 5.23 auf der nächsten Seite* zeigt die jeweiligen Anteile der Baukomponenten detailliert an einem Beispiel für das EFH (eine Datenreihe in *Abbildung 5.22*).

Im Folgenden sind die drei Haupt- (rot in *Abbildung 5.23 auf der nächsten Seite*) und drei Nebenkomponenten sowie sechs weitere Baukomponenten (Luftverteiler, Wetterschutzgitter etc.) der Lüftungstechnik dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hauptkomponenten die größten potenziellen Umweltauswirkungen ausmachen; allerdings kann sich die Reihenfolge je nach Bewertungsparameter unterscheiden. Zudem ist ersichtlich, dass die Lüftungsanschlussleitungen (Leitung zwischen Außen und Luftverteiler) einen geringen Einfluss auf die gesamte Lüftungstechnik haben. Noch geringer sind die umweltbezogenen Auswirkungen der Zuluft- und Abluftauslässe sowie die Befestigung. Insgesamt bewegt sich der summierte Anteil der restlichen neun Baukomponenten (grau – außer die drei Hauptkomponenten) zwischen 2 % und 13 % (je nach Bewertungsparameter – ohne ODP).

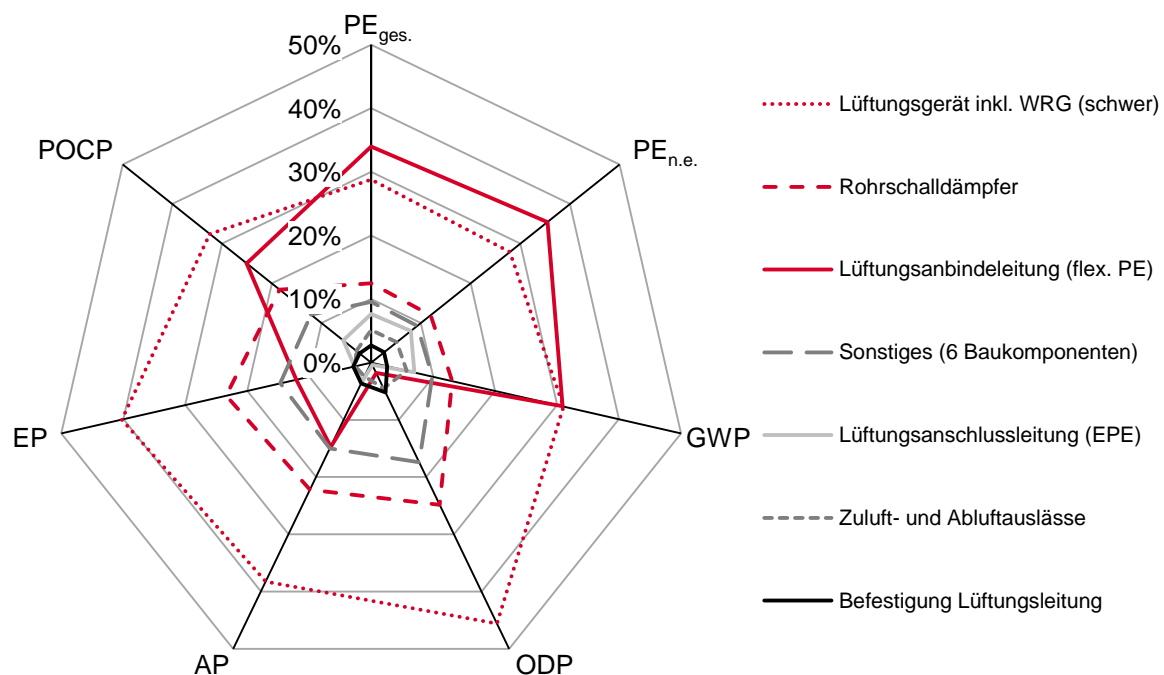


Abbildung 5.23: Einzelbestandteile der Lüftungstechnik für das Einfamilienhaus an einem Beispiel (Lüftungsleitung: EPE- und flexibles PE-Rohr) bei allen Bewertungsparametern

Es kann konstatiert werden, dass mittels der Hauptkomponenten (Lüftungsgerät, Schalldämpfer, Lüftungsanbindeleitung) ca. $\frac{2}{3}$ (MFH) bzw. beim EFH etwas mehr, der potenziellen Umweltauswirkungen der Lüftungstechnik erfasst werden, d.h. kleinteilige Bauteile sind auch hier nicht zu vernachlässigen.

5.3.5 Elektrotechnik

Die potenziellen Umweltauswirkungen der einzelnen Bestandteile der Elektrotechnik (KG 440 DIN 276-1 [170]) sind in *Tabelle 5.3 auf der nächsten Seite* dargestellt. Diese zeigt die Anteile am Beispiel des Einfamilienhauses auf; die des Mehrfamilienhauses haben eine ähnliche Größenordnung. Im Gegensatz zur Sanitär-, Heizungs- und Lüftungstechnik konzentrieren sich die Anteile im Wesentlichen auf zwei Baukomponenten: Kabel für die Beleuchtung (üblich $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$) und für die Steckdosen (üblich $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$). Trotzdem beeinflussen die anderen 17 Baukomponenten (Steckdosen, Kippschalter, Leerrohr etc.) mit ca. $\frac{1}{3}$ die ökologischen Ergebnisse der Elektrotechnik.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Kabel für Beleuchtung und Steckdosen den größten Einfluss auf die potenziellen Umweltauswirkungen der Elektrotechnik haben. Allerdings ist der Einfluss der vielen kleinteiligen Baukomponenten nicht zu unterschätzen.

Tabelle 5.3: Anteile der Baukomponenten der Elektrotechnik für das Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern

Baukomponenten	PE _{ges.}	PE _{n.e.}	GWP	ODP	AP	EP	POCP
Kabel NYM-J 3x2,5 mm ²	41 %	41 %	41 %	43 %	41 %	37 %	39 %
Kabel NYM-J 3x1,5 mm ²	26 %	26 %	26 %	28 %	26 %	24 %	25 %
Zählerschrank	6 %	6 %	6 %	1 %	10 %	10 %	9 %
Steckdosen	6 %	6 %	4 %	3 %	5 %	7 %	3 %
Stangenrohr PVC DN 16-32	4 %	4 %	5 %	5 %	2 %	4 %	6 %
Kabel NYM-J 5x4,0 mm ²	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Kleinverteiler / Etagenverteiler	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	3 %
Sonstiges (12 Baukomp.)	12 %	12 %	12 %	15 %	10 %	13 %	12 %
Elektrot. ohne Kabel NYM-J 3x1,5 mm ² und 3x2,5 mm ²	33 %	33 %	33 %	29 %	33 %	39 %	36 %

5.3.6 Restliche Gebäudetechnik

Im Folgenden werden die restlichen drei Kostengruppen der Gebäudetechnik diskutiert:

(1) Auf eine Analyse der Schwachstromtechnik (KG 450 DIN 276-1 [170]) wird verzichtet, da diese bei einem zukünftigen LCA vernachlässigbar ist⁸⁴.

(2) Dass die umweltbezogenen Auswirkungen der KG 460 nach DIN 276-1 [170] (Fördertechnik) erheblich sein können, zeigt *Abbildung 5.24 auf der nächsten Seite*. Überschlägig bewegt sich der Anteil des Aufzugs beim Mehrfamilienhaus zwischen 10 % und 60 % (rotes Rechteck in *Abbildung 5.24 auf der nächsten Seite*). Logischerweise sinkt mit zunehmendem Technologisierungsgrad der Gebäudetechnik der prozentuale Anteil des Aufzugs und umgekehrt. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies: Beim Verzicht auf eine Solar- und PV-Anlage ist der Anteil immer > 35 %; beim Einsatz einer PV-Anlage mit oder ohne Solaranlage ist der prozentuale Anteil immer < 20 %, ausgenommen das ODP (ODP wird von den Wärmepumpen dominiert). Der IQR des Verhältnisses vom Aufzug zur gesamten Gebäudetechnik⁸⁵ für alle 4768 Varianten (rote Box) bewegt sich zwischen 12 % und 44 %; somit beeinflusst die Fördertechnik das ökologische Ergebnis der gesamten Gebäudetechnik als einzelne Kostengruppe enorm. Aus ökologischer Sicht ist von einem Aufzug abzuraten; hingegen kann aus sozio-kulturellen Gründen (z.B. Barrierefreiheit) ein Aufzug durchaus sinnvoll und notwendig sein. Anzumerken sei noch, dass der Datensatz in der ÖKOBAUDAT [76] für den Fahrstuhl relativ pauschal gehalten und der Aufzug mit 13 Personen (1000 kg Nutzlast) zu groß für das MFH ausgelegt ist. Nichtsdestotrotz kann die Fördertechnik einen großen Einfluss auf die umweltbezogenen Auswirkungen eines Gebäudes haben und birgt somit Optimierungspotenzial.

(3) Eine Gebäudeautomation (KG 480 DIN 276-1 [170]) mit Bussystem und nachgeschalteter Managementebene existiert in den betrachteten Gebäuden nicht; die möglichen Umweltauswirkungen

⁸⁴Siehe hierzu auch Kapitel 5.3 auf Seite 88 – Nichtsdestotrotz erfolgt für die weitere Betrachtung eine Berücksichtigung, um die Gebäudetechnik möglichst detailliert abbilden zu können.

⁸⁵Sanitär- (Standardausführung), Heizungs-, Lüftungs- (Standardausführung), Elektro-, Schwachstrom-, Fördertechnik.

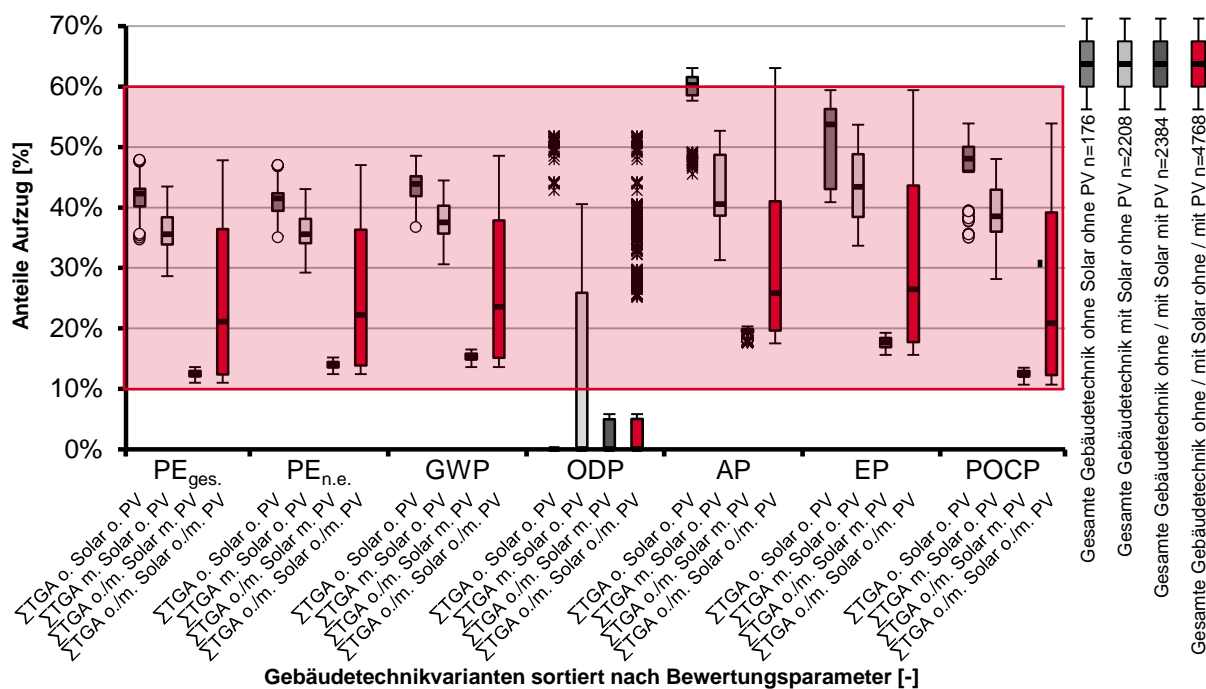


Abbildung 5.24: Anteile des Aufzugs an der Gebäudetechnik für das Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern

sollen jedoch abgeschätzt werden. Als Annahme dienen für das Einfamilienhaus 250 m CAT 7-Kabel und 400 m 2x2x0,6 mm-Kabel bei einmaliger Instandhaltung innerhalb von 50 Jahren einschließlich eines Sicherheitszuschlags von $\frac{1}{3}$ für kleinteilige bzw. vernachlässigte Bauteile. Im Vergleich zur gesamten Gebäudetechnik nimmt die Gebäudeautomation im theoretischen Maximalfall (alle anderen Werte der Gebäudetechnik sind minimal) zwischen 0 % und 4 % – je nach Bewertungsparameter – ein. Folglich kann der Materialeinsatz der Gebäudeautomation als vernachlässigbar angenommen werden.

Schlussendlich kann man hervorheben, dass der Aufzug enorme Anteile an den umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik haben kann und die Gebäudeautomation, wie auch die Schwachstromtechnik hinsichtlich ihrer potenziellen Umweltauswirkungen für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung vernachlässigbar sind.

5.4 Bauwerk: Baukonstruktion und Gebäudetechnik⁸⁶

Das Bauwerk bzw. die Eingebundene Energie bzw. Emissionen (EE) eines Gebäudes besteht aus der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik, d.h. dieses Kapitel ist eine Zusammenführung aller betrachteten Varianten und der Ergebnisse aus Kapitel 5.2 auf Seite 74 (Baukonstruktion)

⁸⁶Die Bewertungsparameter wurden bereits detailliert im Kapitel 2.2.2 auf Seite 10 erläutert; dennoch werden für das bessere Verständnis die im Folgenden benutzten Abkürzungen kurz wiederholt: **PE_{ges.}** = Primärenergieinhalt, gesamt; **PE_{n.e.}** = Primärenergieinhalt, nicht erneuerbar; **GWP** = Treibhauspotenzial; **ODP** = Ozonabbaupotenzial; **AP** = Versauerungspotenzial; **EP** = Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial; **POCP** = Sommersmogpotenzial.

und Kapitel 5.3 auf Seite 88 (Gebäudetechnik). *Abbildung 5.25* zeigt den jeweiligen Minimal- und Maximalwert je Baukonstruktion bei minimal oder maximal möglichen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik sowie die Standardvariante beim GWP und AP, z.B. minimale umweltbezogene Auswirkungen bei der Gebäudetechnik und maximale potenzielle Umweltauswirkungen bei der massiven Baukonstruktion: „Min.TGA+Max.-Massiv“. Hierbei sei anzumerken, dass die Varianten der Baukonstruktionen jeweils dem gleichen energetischen Standard entsprechen, d.h. den identischen U-Wert haben; die Gebäudetechnik kann jedoch aufgrund der Heizungstechnik aus unterschiedlichen Versorgungskonzepten bestehen. Die Gebäudetechnik setzt sich aus Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs-, Elektro- und Schwachstromtechnik zusammen.

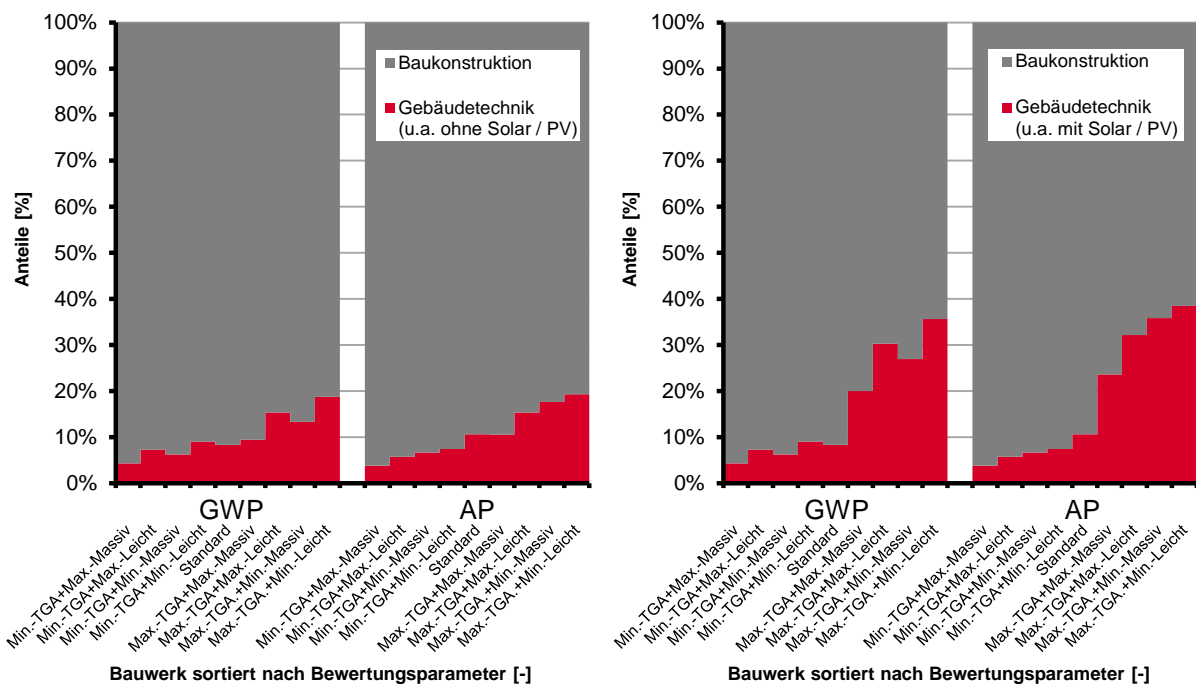


Abbildung 5.25: Anteile der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik (u.a. Heizungstechnik ohne Solar- bzw. PV-Anlage (links) sowie mit / ohne Solar- und mit / ohne PV-Anlage (rechts)) für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Treibhaus- (GWP) bzw. Versauerungspotenzial (AP)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Gebäudetechnik einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Bauwerk bzw. an der EE einnehmen kann. Bei der Gebäudetechnik, in der die Heizungstechnik keine Solar- bzw. PV-Anlage enthält (*Abbildung 5.25* (links)), liegt der Maximalwert bei 19 % bzw. sofern man $PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP, AP, EP und POCP betrachtet bei 26 %. Vorausgesetzt eine Solar- und / oder PV-Anlage kommt zum Einsatz erhöht sich der maximale Anteil der Gebäudetechnik (*Abbildung 5.25* (rechts)) auf 39 % bzw. 48 % bei allen Bewertungsparametern⁸⁷; folglich kann für das Einfamilienhaus festgestellt werden, dass der Technikanteil 48 % nicht übersteigt. Die genannten Maximalwerte zählen nicht für das ODP, hier kann der Anteil 100 % betragen, d.h. das Bauwerk kann beim Einsatz einer Wärmepumpe von der Gebäudetechnik in diesem Bewertungsparameter völlig beeinflusst

⁸⁷ Im Anhang in *Abbildung C.1 auf Seite 200* sind alle Bewertungsparameter für *Abbildung 5.25* (rechts) dargestellt.

werden. Selbst beim Vernachlässigen der Heizung (z.B. Trinkwarmwasser erfolgt elektrisch, Lüftung deckt Heizlast) kann die Gebäudetechnik in Ausnahmefällen bis zu 17 % (KfW 40-EFH) ausmachen. Insgesamt bilden die genannten Maximalanteile die theoretische Obergrenze des Einfamilienhauses ab, da zum einen die Baukonstruktion minimal ist; zum anderen die Gebäudetechnik maximale potenzielle Umweltauswirkungen aufweist.

Der Minimalwert beträgt 4 % bzw. bei Berücksichtigung aller Bewertungsparameter im Extremfall sogar 0 % (z.B. ODP: Pelletanlage mit Holz-Lagerraum bei Gebäude mit PUR-Dämmung) – ohne ODP 2 %. Bei minimaler Gebäudetechnik nimmt diese maximal einen Anteil von 14 %⁸⁸ ein. Prinzipiell kann selbst bei minimalem Gebäudetechnikeinsatz – je nach Baukonstruktion und Bewertungsparameter – der Technikanteil am Bauwerk bedeutsam sein.

Das bei der ökologischen Betrachtung derzeit häufig verwendete Abschneidekriterium – Kriterium welche Baukomponenten betrachtet werden – von 1 % der Gebäudemasse ist bei der Gebäudetechnik unangebracht. Beispielsweise hat die Standard-Gebäudetechnik einen Anteil (ohne ODP) zwischen 6 % (EP) und 11 % (PE_{n.e.}) am Standard-Bauwerk des Einfamilienhauses; allerdings liegt der Gewichtsanteil der kompletten Technik bei < 1 %.

In *Abbildung 5.26* ist der Median aller Gebäudetechnikvarianten aufgetragen. Hierbei wurde der Median gebildet aus 40 Varianten der Sanitärtechnik, 176 (ohne Solar- und ohne PV-Anlage) bzw. 4768 (ohne / mit Solar- und ohne / mit PV-Anlage – alle) Heizungstechnikvarianten, 50 Varianten der

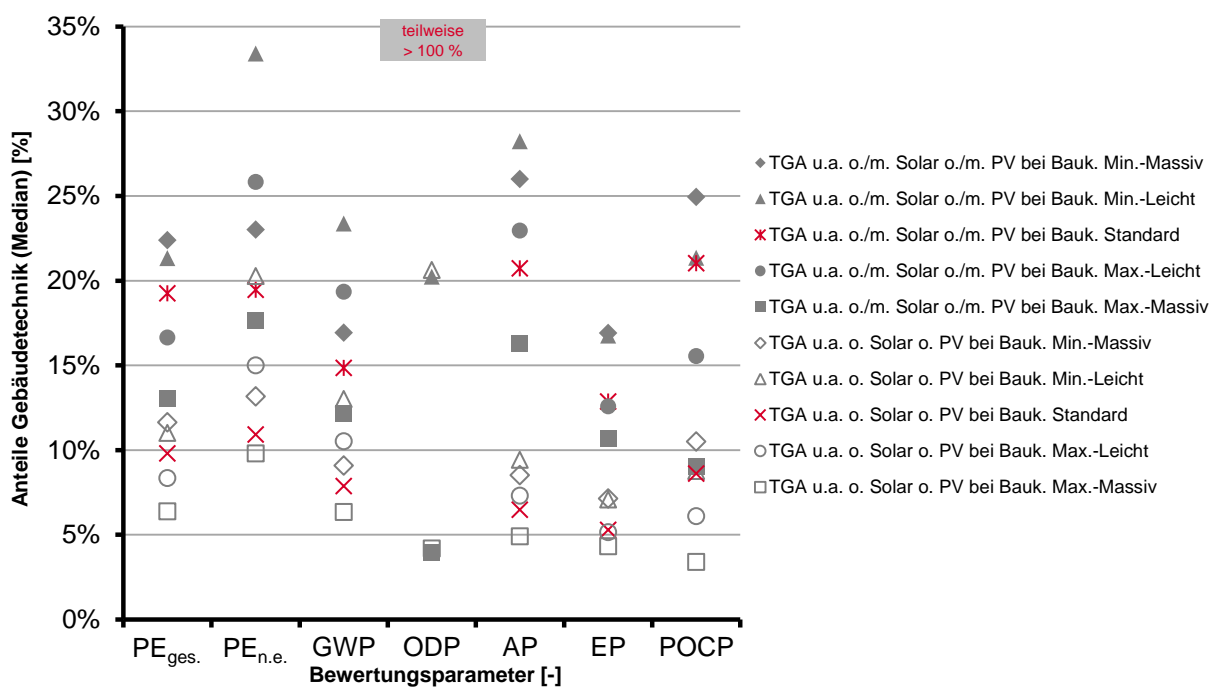


Abbildung 5.26: Anteile des Medians der Gebäudetechnik für das KfW 40-Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern

⁸⁸Siehe hierzu auch *Abbildung C.1 auf Seite 200*.

Lüftungstechnik und je eine bei der Elektro- und Schwachstromtechnik. Diese Werte wurden verschiedenen Bauwerksarten gegenübergestellt (Baukonstruktionen aus Kapitel 5.2.2 auf Seite 85).

Die Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs-, Elektro- und Schwachstromtechnik können gemeinsam einen teilweise großen Einfluss auf die EE bzw. das Bauwerk haben. Bei einer Gebäudetechnik, in der die Heizungstechnik keine Solar- und PV-Anlage enthält, liegt der Anteil beim Einfamilienhaus für den maximalen Median bei 20 % (Symbole ohne Füllung in *Abbildung 5.26 auf der vorherigen Seite*). Sofern alle möglichen Heizungstechnikkonzepte berücksichtigt werden (mit / ohne Solar- und / oder PV-Anlage), ist der Anteil des Medians bei maximal 33 % (Symbole mit Füllung in *Abbildung 5.26 auf der vorherigen Seite*). Ebenso ist die unterschiedliche Verteilung in den einzelnen Bewertungsparametern ersichtlich. Allgemein ist zum einen anzumerken, dass beim ODP die Anteile der Gebäudetechnik 100 % übersteigen können, da das ODP der Baukonstruktion negativ sein kann; zum anderen, liegen beim Median 50 % der Daten unter diesem Wert bzw. darüber. Hierzu ein Beispiel: Der höchste Medianwert beim GWP liegt bei 23 % (Dreieck mit Füllung), d.h. 50 % der möglichen Varianten bewegen sich zwischen 9 % und 23 % bzw. 23 % und 36 %⁸⁹. Dementsprechend hat die Gebäudetechnik – v.a. beim Einsatz zusätzlicher Aktivtechnik – eine Relevanz am Bauwerk.

Die Ergebnisse zeigen ebenso, dass der gegenwärtige Zuschlag beim vereinfachten Verfahren der Zertifizierungssysteme (z.B. DGNB [22], NaWoh [24]) viel zu gering sein kann. Zudem soll der Zuschlag in den Nachhaltigkeitssystemen auch etwaige vernachlässigte Baudetails ausgleichen. Folglich ist der derzeitige 10 %-ige Zuschlag auf KG 300 und KG 400 (DIN 276-1 [170]) beim vereinfachten Rechenverfahren bei Einsatz einer Solar- und v.a. einer PV-Anlage zu gering. Bei konventioneller Technik existiert ebenso die Möglichkeit, dass der Zuschlag die gewünschte Wirkung verfehlt. Erwartungsgemäß soll ein Malus eine detaillierte Berechnung im Vergleich zu einer vereinfachten, in Form von besseren Ergebnissen, belohnen; diesem Charakter wird mit den 10 % nicht Rechnung getragen. *Tabelle 5.4* stützt diese Aussagen ebenfalls.

Tabelle 5.4: Theoretische Minimal- und Maximalanteile der Gebäudetechnik beim Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei verschiedenen energetischen Gebäudestandards bei allen Bewertungsparametern

* m. Aufzug		PE _{ges.}	PE _{n.e.}	GWP	ODP	AP	EP	POCP
Basis-Standard	EFH	5-39 %	7-48 %	5-37 %	0-100 %	4-41 %	4-31 %	4-46 %
	MFH	4-32 %	5-45 %	3-32 %	0-100 %	3-35 %	2-26 %	2-37 %
KfW 40-Standard	EFH	4-35 %	6-48 %	4-36 %	0-100 %	4-39 %	3-28 %	2-41 %
	MFH	3-31 %	5-45 %	3-31 %	0-100 %	3-34 %	2-24 %	2-35 %
		6-33 %*	9-48 %*	6-34 %*	0-100 %*	8-38 %*	6-27 %*	4-37 %*
Min. U-Standard	EFH	4-32 %	6-48 %	4-34 %	0-100 %	4-37 %	3-27 %	2-35 %
	MFH	3-29 %	4-46 %	3-30 %	0-100 %	3-33 %	2-23 %	1-32 %

⁸⁹Wert aus *Abbildung 5.25 auf Seite 106* (rechts) bei „Min.-TGA+Min.-Leicht“ bzw. „Max.-TGA.+Min.-Leicht“.

Es zeigt sich, dass die Gebäudetechnik weder bei den unterschiedlichen Gebäudetypen noch bei den verschiedenen Standards vernachlässigbar ist; mehr noch: Die Gebäudetechnik kann einen enormen Einfluss auf das Bauwerk haben. Die (theoretischen) Minimal- und Maximalanteile – ohne ODP – bewegen sich zwischen 2 % und 48 % (EFH) bzw. 1 % und 45 % (MFH). Mit steigendem Gebäudestandard fällt der Gebäudetechnikanteil leicht, kann jedoch immer noch beträchtlich sein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sanitär-, Elektro- und Schwachstromtechnik unabhängig vom energetischen Standard sind. Gleiches gilt für die Lüftungstechnik, da keine thermischen Lasten abgedeckt werden müssen. Die Heizungstechnik variiert je nach Gebäudestandard; allerdings beeinflusst der energetische Baustandard nur die Heizungsübergabe. Die Erzeugergröße wird bei den betrachteten Wohngebäudegrößen vom Trinkwarmwasserbedarf bestimmt und nicht von der Heizlast. Die Dimensionierung der Heizungsverteilung wurde als praktisch gleich erachtet.

Das Mehrfamilienhaus weist etwas geringere Werte (ca. 3 % bis 5 %) auf als das Einfamilienhaus. Dies trifft sowohl auf die Minimal- und Maximalanteile (*Tabelle 5.4 auf der vorherigen Seite*), wie auch auf den Median (*Abbildung C.2 auf Seite 200*) zu. Ebenso ist der beispielhafte Unterschied zwischen den Gebäudetechnikanteilen ohne und mit Aufzug (Kennzeichnung durch „*“ in *Tabelle 5.4 auf der vorherigen Seite*) beim KfW 40-Standard ersichtlich.

Die genannten Sachverhalte sollen sechs Beispiele konkreter und etwas greifbarer machen:

Bsp. 1: Standard: Gas-Brennwertgerät mit Solaranlage (Kupferrohr) sowie Verteilung aus Kupferrohr und Fußbodenheizung (Mehrschichtverbundrohr) für das Einfamilienhaus im KfW 70-Standard (ca. EnEV-Standard 2016) in Standardausführung (u.a. Ziegel mit Mineralwolle-WDVS)

Bsp. 2: Wie Bsp. 1 nur ohne Recyclingpotenzial (ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71])

Bsp. 3: Pelletheizkessel mit heizungsunterstützender Solaranlage (Solar groß), sonst wie Bsp. 1

Bsp. 4: Wie Bsp. 3 nur ohne Recyclingpotenzial (ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71])

Bsp. 5: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Verteilung und Fußbodenheizung aus PE-X-Rohr für das Einfamilienhaus im KfW 40-Standard in Leichtbauweise mit Holzweichfaserdämmung (komplett)

Bsp. 6: Wie Bsp. 5 nur mit maximal möglicher PV-Anlage auf dem südorientieren Dach

Die Beispiele (Bsp. 1 bis Bsp. 6) sind jeweils mit Sanitärtechnik (Edelstahl-, PP-Rohr) und Lüftungstechnik (EPE-, flexibles PE-Rohr) sowie Elektro- und Schwachstromtechnik berechnet, d.h. die komplette Gebäudetechnik (*Abbildung 5.27 auf der nächsten Seite*⁹⁰) ist berücksichtigt.

Die durchaus realistischen Beispiele verdeutlichen nochmals den nicht zu vernachlässigenden Anteil der Gebäudetechnik. Ebenso ist ersichtlich, dass durch den hohen Recyclinganteil der Gebäudetechnik, der Anteil der selbigen ansteigt, sofern die Recyclinggutschrift bei der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik vernachlässigt wird, d.h. wird die Phase D nach DIN EN 15978 [71] nicht berücksichtigt, nimmt die Bedeutung der Gebäudetechnik weiter zu. Die Gebäudetechnik kann mittels dreier Ansätze berücksichtigt werden:

⁹⁰Prozentwerte über 100 % kommen zustande, da das ODP für das Bauwerk durch den Werkstoff Holz negativ ist, d.h. die großen Prozentwerte, werden durch negative Werte der Baukonstruktion ausgeglichen (Summe ist 100 %).

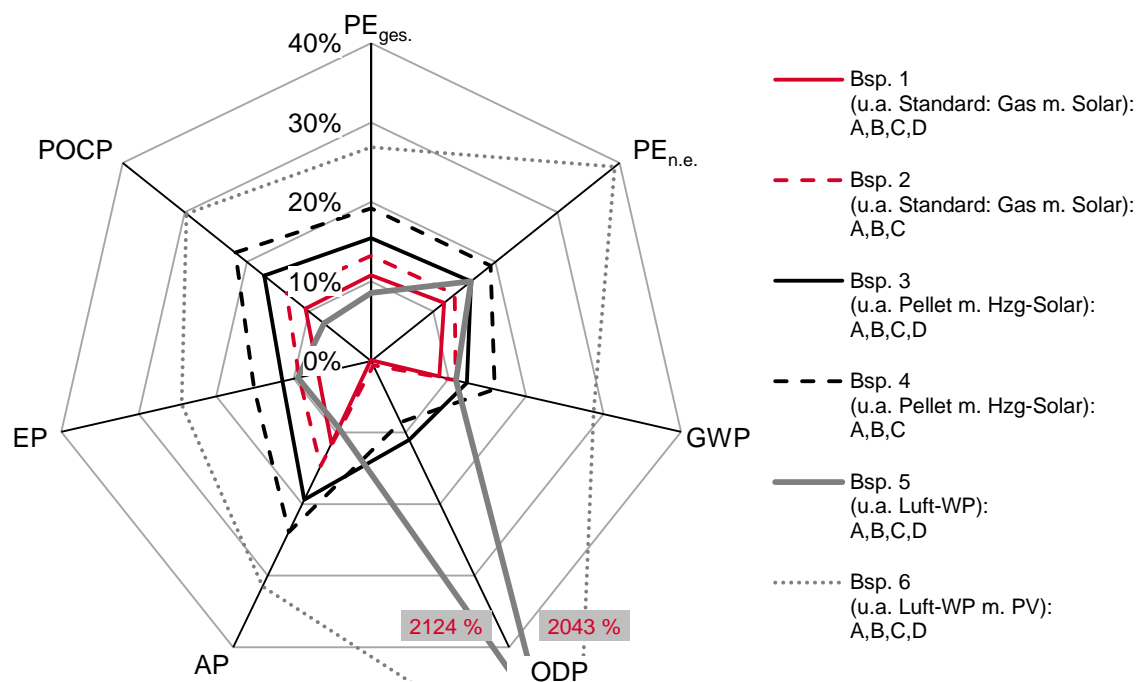


Abbildung 5.27: Anteil der Gebäudetechnik am Einfamilienhaus bei Beispielen mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Varianten bei allen Bewertungsparametern

(1) Die pauschale Ermittlung durch einen prozentualen Zuschlag bzw. Malus: Dieser Weg wird derzeit beim vereinfachten Verfahren von den deutschen Zertifizierungssystemen angewandt. Allerdings kann der gegenwärtige Zuschlag viel zu gering sein. Ein pauschaler Zuschlag wird den vielfältigen Möglichkeiten (Energiekonzepte, Materialien etc.) der Gebäudetechnik nicht gerecht. Zudem wird hierdurch indirekt eine Optimierung der kompletten Gebäudetechnik verhindert. Des Weiteren vernachlässigt ein pauschaler Faktor die unterschiedlichen Auswirkungen je Bewertungsparameter.

(2) Die detaillierte Ermittlung: Diese ist allerdings aufgrund der feingliedrigen Gebäudetechnik und der daraus resultierenden, sehr aufwendigen Bearbeitung in der Praxis schwer umzusetzen. Zudem stehen im Regelfall die Massen, v.a. der Gebäudetechnik, erst relativ spät im Planungs- und Bauprozess zur Verfügung.

(3) Die Vereinfachung der detaillierten Berechnung mittels Hauptkomponenten und individuellen Zuschlagsfaktoren: Das neuartige vereinfachte Verfahren wird im Kapitel 6 auf Seite 123 vorgestellt; mit diesem ist es möglich, die Gebäudetechnik schnell und dennoch genau zu berücksichtigen.

Für eine grobe Abschätzung bzw. Einordnung der gesamten Gebäudetechnik zum Bauwerk können, auf Grundlage der untersuchten Gebäude, folgende äußerst pauschalisierte gemittelte Richtwerte dienen (ausgenommen ODP):

- Gesamte Gebäudetechnik u.a. keine Solar- bzw. PV-Anlage: ca. 10 %
- Gesamte Gebäudetechnik u.a. mit Solar- und keiner PV-Anlage: ca. 13 %

- Gesamte Gebäudetechnik u.a. mit / ohne Solar- und mit / ohne PV-Anlage: ca. 20 % (kompletter Freiheitsgrad; alle Gebäudetechnikvarianten sind möglich)
- Gesamte Gebäudetechnik u.a. mit / ohne Solar- und mit PV-Anlage: ca. 25 %

Allerdings soll zum einen bewusst sein, dass die hier angegebenen Gebäudetechnikanteile ebenso leicht mehr als die Hälfte sowie den doppelten Anteil am Bauwerk einnehmen können; zum anderen, dass das Mehrfamiliengebäude ca. 3 % bis 5 % geringere Werte aufweist.

Festzuhalten bleibt, dass die Gebäudetechnik enormen Einfluss auf den Lebenszyklus – Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einschließlich Recyclinggutschrift – eines Bauwerks haben kann. Folglich birgt diese ein Optimierungspotenzial und sollte somit nicht pauschal berücksichtigt oder gar vernachlässigt werden. Dies muss Folgen haben: Die Gebäudetechnik bzw. Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs- und Elektrotechnik müssen in die ökologische Betrachtung von Gebäuden mit einfließen.

5.5 Niedrigstenergiewohngebäude: Bauwerk und Betrieb⁹¹

Als nächstes werden der komplette Lebenszyklus sowie die Anteile des Bauwerks (EE) und des Betriebs (BE), am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses mit den Standardmaterialien, aufgezeigt. Hierbei repräsentieren die Heizungs- und Lüftungstechnikvarianten (EE) die jeweiligen Minimal- bzw. Maximalwerte je Bewertungsparameter aller betrachteter Varianten. Auf diese Weise ist bei Varianten mit minimaler Eingebundener Energie / Emissionen für die Gebäudetechnik keine Lüftungsanlage enthalten. Bei der Sanitär-, Elektro- und Schwachstromtechnik wurden die Standardmaterialien gewählt. Zum einen wurden zwei Heizungssysteme eruiert, die mit unterschiedlichen Rohrmaterialien jeweils das Minimum für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einschließlich Gutschrift (EE) je Bewertungsparameter ausmachen⁹²; zum anderen sind es, in Abhängigkeit vom Bewertungsparameter, beim Maximum vier unterschiedliche Systeme⁹³. Durch den Einsatz der PV-Anlage erfolgt aufgrund der Produktion von elektrischer Energie eine Gutschrift im Betrieb. Deshalb ist der Lebenszyklus entscheidend: symbolisiert durch das Dreieck in *Abbildung 5.28 auf der nächsten Seite*.

⁹¹Die Bewertungsparameter wurden bereits detailliert im Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#) erläutert; dennoch werden für das bessere Verständnis die im Folgenden benützten Abkürzungen kurz wiederholt: **PE_{ges.}** = Primärenergieinhalt, gesamt; **PE_{n.e.}** = Primärenergieinhalt, nicht erneuerbar; **GWP** = Treibhauspotenzial; **ODP** = Ozonabbaupotenzial; **AP** = Versauerungspotenzial; **EP** = Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial; **POCP** = Sommersmogpotenzial.

⁹²Gebäudetechnikvariante mit minimaler EE: Gas-Brennwertgerät mit Fußbodenheizung (Gas+FBH: PE_{ges.}, PE_{n.e.}, GWP, AP, EP, POCP) und Pelletheizkessel mit Heizkörper (Pel+HK: ODP).

⁹³Gebäudetechnikvariante mit maximaler EE: Pelletheizkessel mit Heizkörper und maximaler PV-Anlage (Pel+HK+PV: PE_{ges.}, PE_{n.e.}, EP, POCP) bei unterschiedlichen Rohrmaterialien, das gleiche nur anstatt Heizkörper Fußbodenheizung (Pel+FBH+PV: GWP) und Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Fußbodenheizung und maximaler PV-Anlage (L-WP+FBH+PV: ODP) sowie Pelletanlage mit Heizkörper und trinkwarmwasserunterstützender Solaranlage einschließlich einer PV-Anlage auf der Restfläche des Dachs (Pel+HK+S-TWW+PV: AP).

Die wichtigste Erkenntnis aus *Abbildung 5.28*⁹⁴ ist, dass der von der Gebäudetechnik verursachte Energieverbrauch und die -produktion im Betrieb (BE) bedeutsamer sind als die eingesetzten Materialien (EE) derselben – außer beim ODP. Dieser Sachverhalt lässt sich daran erklären, dass selbst bei maximalen umweltbezogenen Auswirkungen der Heizungs- und Lüftungstechnik in Summe die potenziellen Umweltauswirkungen geringer sind als bei minimalem Technikeinsatz. Zum Beispiel hat die Heizungstechnik beim PE_{ges.} im Minimalfall (Gas-Brennwertgerät und Kupferrohrleitungen sowie PE-X-Fußbodenheizung) die geringsten umweltbezogenen Auswirkungen für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einschließlich Recyclinggutschrift („Bauwerk: TGA (EE) ④“ in *Abbildung 5.28*); allerdings ist der Anteil des Gebäudes mit 140 % (Dreiecke in *Abbildung 5.28*) relativ hoch. Im Vergleich liegen die umweltbezogenen Auswirkungen bei der Maximalvariante – EE ist bei der Gebäudetechnik maximal – durch die Einsparung der Lüftungsverluste durch eine Lüftungsanlage und v.a. aufgrund der Gutschrift der PV-Anlage bei nur 45 % (Dreiecke in *Abbildung 5.28*). Dies bedeutet für die Gebäudetechnik: Das Energiekonzept für den Betrieb ist wichtiger als die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudetechnik.

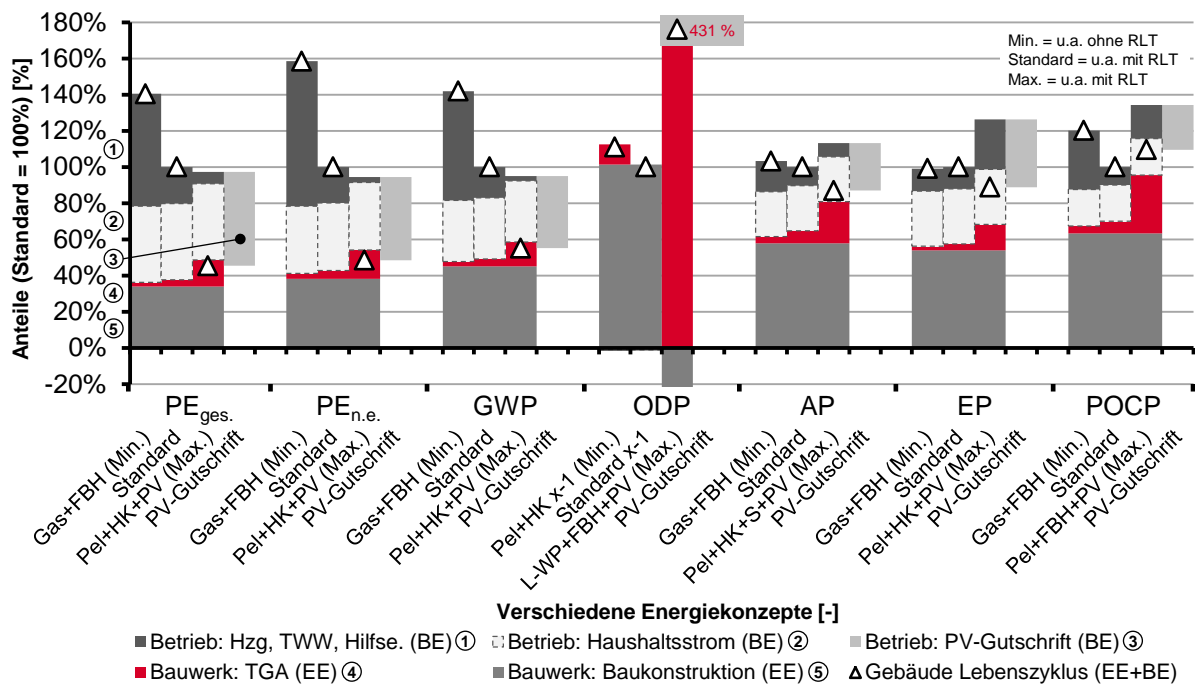


Abbildung 5.28: Anteile des Bauwerks, Betriebs und Gebäudelebenszyklus bei unterschiedlichen Energiekonzepten (minimale bzw. maximale Heizungs- und Lüftungstechnik je Bewertungsparameter) am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses mit der Standard-Baukonstruktion bei allen Bewertungsparametern

Des Weiteren ist in *Abbildung 5.28* ersichtlich, dass die Gebäudetechnik – im Gegensatz zu den derzeit üblichen ökologischen Berechnungen – einen nicht zu vernachlässigenden Anteil einnehmen kann. Die EE der Gebäudetechnik nehmen allerdings (mit Ausnahme des ODP) nicht die

⁹⁴Die Abbildung wurde beim ODP optisch angepasst: Mit „x-1“ gekennzeichnete Varianten wurden mit -1 multipliziert, da diese ursprünglich ein negatives ODP wegen des Werkstoffs Holz aufweisen. Ebenso sind hierdurch Prozentwerte größer 100 % möglich.

höchste Priorität ein. Demzufolge sollte bei der ökologischen Optimierung der Schwerpunkt bei der Baukonstruktion und dem Betrieb der Gebäudetechnik liegen; allerdings ohne die potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung zu vernachlässigen. Anzumerken sei hierzu noch, dass das Standardgebäude (u.a. Ziegelmauerwerk mit WDVS aus Mineralwolle) als Grundlage dient, hierdurch können bei anderen Materialien sich die Bauwerksanteile verschieben, d.h. die Gebäudetechnik kann im Verhältnis zur Baukonstruktion eine wichtigere oder auch unbedeutendere Rolle einnehmen⁹⁵.

Ebenso wird die Wichtigkeit der Lebenszyklusbetrachtung hervorgehoben. Bei der Berechnung nach den gesetzlichen Vorgaben, sprich nach EnEV [20] wird nur der Betrieb für Heizung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergie (ggf. abzüglich PV-Anlage) für den $PE_{n.e.}$ ermittelt. Der Großteil der potenziellen Umweltauswirkungen im Lebenszyklus eines Gebäudes bleiben unberücksichtigt sowie das komplette Bauwerk (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) und der Haushaltsstrom werden vernachlässigt; folglich findet hierdurch auch keine Optimierung statt, aus der eine Ressourcen- und Emissionseinsparung resultieren könnte.

Der Haushaltsstrom nimmt in diesem Beispiel mindestens einen Anteil von 17 % (ohne ODP) ein, d.h. lebenszyklusbasiert betrachtet ist der Haushaltsstrom wichtig. Teilweise dominiert der elektrische Verbrauch für die Haushaltsgeräte und Beleuchtung sogar die umweltbezogenen Auswirkungen des Betriebs, beispielsweise beim GWP und der Standardanlage. Derzeit wird allerdings der Haushaltsstrom bei der gesetzlichen Bilanzierung von Wohngebäuden vernachlässigt.

Abbildung 5.29 auf der nächsten Seite und *Abbildung C.3 auf Seite 201* im *Anhang* zeigen für alle Bewertungsparameter die umweltbezogenen Auswirkungen bei unterschiedlichen Energiekonzepten. Die Nummern „1“ bis „4“ kennzeichnen die Basis bzw. Grundvarianten (jeweils mit FBH und Lüftungsanlage), hierzu sind jeweilige Varianten kombiniert: ohne Lüftungsanlage („-RLT“), mit trinkwarmwasser- bzw. heizungsunterstützender Solaranlage („+S ...“), mit PV-Anlage („+PV“) sowie mit Solar- und PV-Anlage („+S ...+PV“)⁹⁶.

Die bereits getroffenen Aussagen können bestätigt werden:

- Bei der Gebäudetechnik ist der Betriebsbedingte Energieverbrauch (BE) wichtiger als die eingesetzten Materialien (EE), z.B. Standard und $PE_{ges.}$: hier macht der BE zur Gebäudetechnik (EE) das 16-fache aus – außer beim ODP, hier hat der Betrieb fast keinen Einfluss.
- Die Gebäudetechnik ist hinsichtlich des Bauwerks nicht zu vernachlässigen, z.B. beim $PE_{ges.}$ bis zu 30 % des Bauwerks (EE); und birgt somit ein generelles Optimierungspotenzial.
- Der Lebenszyklus eines Gebäudes sollte entscheidend sein; sofern nur der Energieverbrauch im Betrieb für Heizung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergie berücksichtigt wird, werden die Mehrzahl der potenziellen Umweltauswirkungen eines Gebäudes vernachlässigt, z.B. bei der Gebäudetechnik ohne PV-Anlage und dem GWP sind es bis zu 86 % am Lebenszyklus.

⁹⁵Siehe hierzu auch Kapitel [5.4 auf Seite 105](#).

⁹⁶Die Gutschrift der PV-Anlage wird durch einen negativen Balken dargestellt und verrechnet, d.h. das Dreieck in *Abbildung 5.29 auf der nächsten Seite* bzw. *Abbildung C.3 auf Seite 201* stellt den Lebenszyklus dar und ist maßgebend.

Abkürzung:

Standard = Brennwertgerät Erdgas mit Solaranlage u. RLT
 Gas (1) = Brennwertgerät Erdgas mit RLT
 WP-Luft (2) = Luft-Wasser-Wärmepumpe mit RLT
 WP-Sole (3) = Sole-Wasser-Wärmep. (Erdsonde) mit RLT
 Pellet (4) = Pelletkessel mit RLT
 RLT = Raumlüftungstechnische Anlage / Lüftungsanlage
 S = Solaranlage (thermisch)
 T. = Trinkwarmwasserunterstützende Solaranlage
 H. = Heizungsunterstützende Solaranlage
 k. = klein
 g. = groß
 PV = Photovoltaikanlage (elektrisch)
 Anmerkung: Sofern eine Solar- und PV-Anlage kombiniert werden, wird die PV um die Solaranlagengröße reduziert.

Berechnungsgrundlage (NRF_R):

Untersuchungsrahmen:
 - Räumliche Systemgrenze: Gebäudeaußenkante
 - Zeitliche Systemgrenze: 50 Jahre
 - Phasen: A1-A3 Herstellung | B2-B4 Nutzung (Instandhaltung) | B6 Nutzung (Betrieb) | C3-C4+D Entsorgung

Datengrundlage:
 - ÖKOBAUDAT 2016
 - DIN 4108 / DIN 4701

■ Betrieb: Hzg, TWW, Hilfe. (BE)
 □ Betrieb: Haushaltsstrom (BE)
 ▒ Betrieb: PV-Gutschrift (BE)
 ■ Bauwerk: TGA (EE)
 ■ Bauwerk: Baukonstruktion (EE)
 ▲ Gebäude Lebenszyklus (EE+BE)

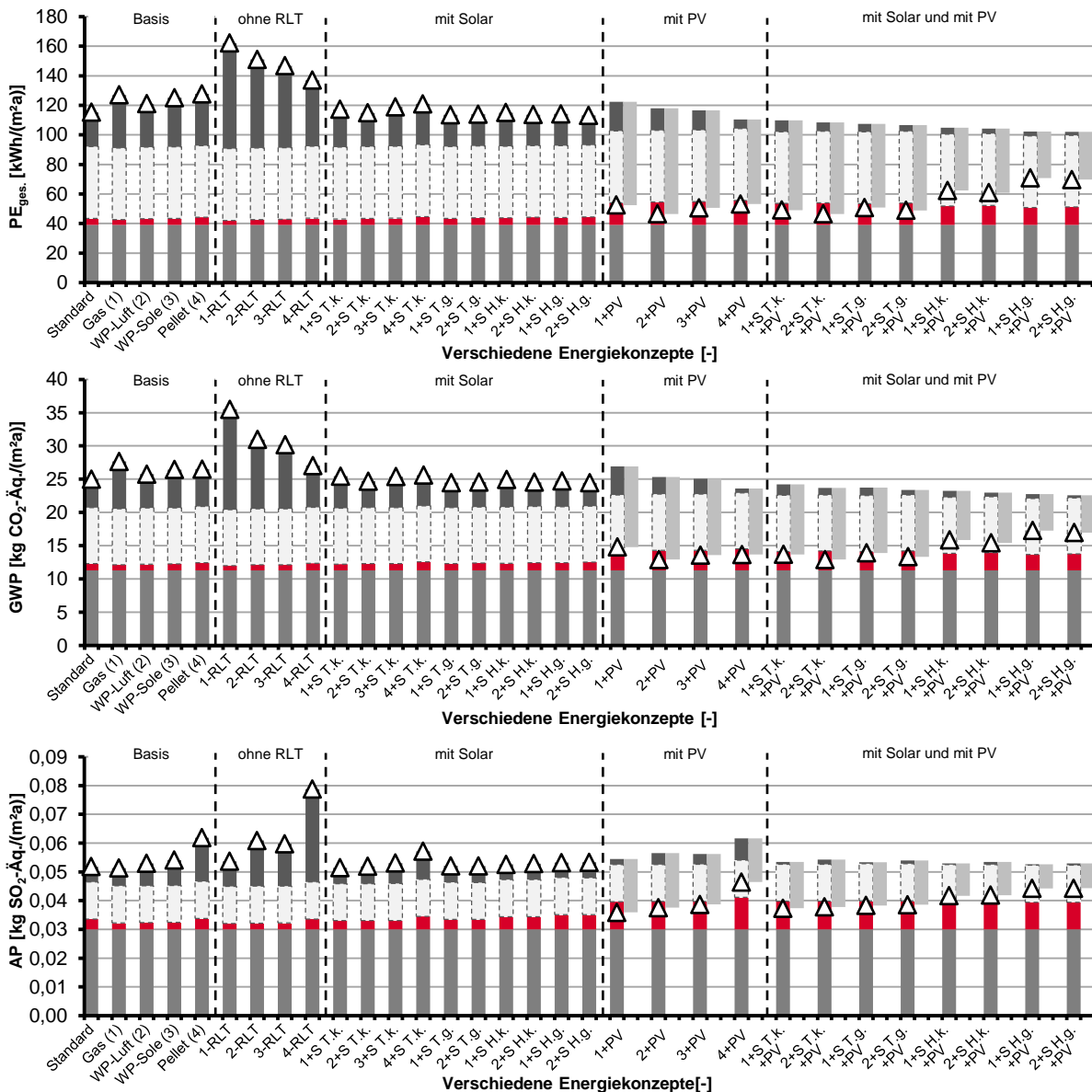


Abbildung 5.29: Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Betriebs bei unterschiedlichen Energiekonzepten für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Primärenergieinhalt gesamt (PE_{ges.}), Treibhaus- (GWP) und Versauerungspotenzial (AP) (Fortsetzung siehe Abbildung C.3 auf Seite 201)

- Der Haushaltsstrom ist ein wichtiger Bestandteil der Betriebsphase und sollte bei der Bilanzierung von Wohngebäuden berücksichtigt werden, z.B. beim GWP (ohne PV-Anlagen) beträgt der Maximalanteil des Stroms in der Betriebsphase 71 %.

Ebenso können folgende Erkenntnisse dazugewonnen werden:

- Die Lüftungstechnik verursacht höhere potenzielle Umweltauswirkungen beim Bauwerk (EE), spart diese jedoch im Betrieb (BE) ein, d.h. eine Lüftungsanlage ist bei allen Bewertungsparametern über den Lebenszyklus sinnvoll (vgl. c mit „1-RLT“ bis „4-RLT“).
- Der Einsatz von zusätzlicher Technik (Aktivtechnik), trotz eines höheren Materialaufwands bzw. mehr EE, ist empfehlenswert – v.a. PV-Anlagen⁹⁷. PV-Anlagen wirken sich immer und bei allen Bewertungsparametern positiv auf den Lebenszyklus aus (vgl. Varianten ohne Kennzeichnung mit „+PV“). Solaranlagen sind meist vorteilhaft (vgl. Varianten ohne Kennzeichnung mit „+S ...“); hierbei erweisen sich vereinzelte Varianten, aufgrund des geringen rechnerischen Bedarfs nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179], bei manchen Kategorien (hier AP und EP) als ungünstig.
- Keine Beheizungsart kann über alle Bewertungsparameter pauschal bevorzugt werden (vgl. z.B. bei „1“ bis „4“ und $PE_{ges.}$ ist die Luft-Wasser-Wärmepumpe die ökologischste Variante, jedoch beim AP ist es die Gas-Brennwertanlage).

Alle Berechnungen hinsichtlich des Energieverbrauchs im Betrieb sind EnEV-konform; allerdings ist anzumerken, dass bei sehr niedrigem Energieverbrauch im Betrieb das Berechnungsverfahren nach EnEV [20] mittels Monatsbilanzverfahren (DIN 4108 [178] und DIN 4701 [179]) an seine Grenzen stößt. Dies bedeutet beispielsweise, dass beim Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung beim KfW 40-Standard (theoretisch) fast keine Endenergie für Heizen benötigt wird; dies basiert u.a. auf den durchschnittlichen Monatswerten für innere und solare Gewinne, die die Transmissionsverluste decken. Real wird jedoch Heizenergie – wenn auch wenig – benötigt. *Abbildung 5.30 auf der nächsten Seite*⁹⁸ vergleicht deshalb die Standardvariante und die vier Basis-Heizungskonzepte hinsichtlich Berechnung des Betriebs nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] bzw. DIN V 18599 [200].

Hierbei zeigt sich ein beträchtlicher Unterschied zwischen den Bilanzierungsverfahren für die Betriebsphase. Bei der Bilanzierung des Energiebedarfs für Heizung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergie nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (*Abbildung 5.30 auf der nächsten Seite* linke Hälfte) werden geringere Werte errechnet als bei der Berechnung nach DIN V 18599 [200] (*Abbildung 5.30* rechte Hälfte). Besonders ist der große Unterschied hinsichtlich der Heizenergie (roter Balken für „Betrieb: Heizung (BE) ③“ in *Abbildung 5.30 auf der nächsten Seite*) festzustellen; nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] und dem KfW 40-Standard beträgt der Heizenergieverbrauch annähernd null. Allerdings beruhen beide Berechnungen auf denselben Annahmen (Tabellenverfahren mit Standardwerten)

⁹⁷Durch den Einsatz von Aktivtechnik ist es möglich einen Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE}) von < 0 zu erreichen, d.h. ein „Plusenergiegebäude“, bei dem kein bilanzieller Verbrauch bzw. Emissionen im Betrieb vorherrschen und sogar ein Teil der Eingebunden Energie bzw. Emissionen für die Baumaterialien wieder – über den Lebenszyklus – zurückgewonnen werden kann, ist möglich.

⁹⁸Normiert auf die Standardvariante mit der Betriebsphase nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179]. Auf die Darstellung des ODP wird verzichtet, da der Betrieb hierauf sehr wenig bis keinen Einfluss hat.

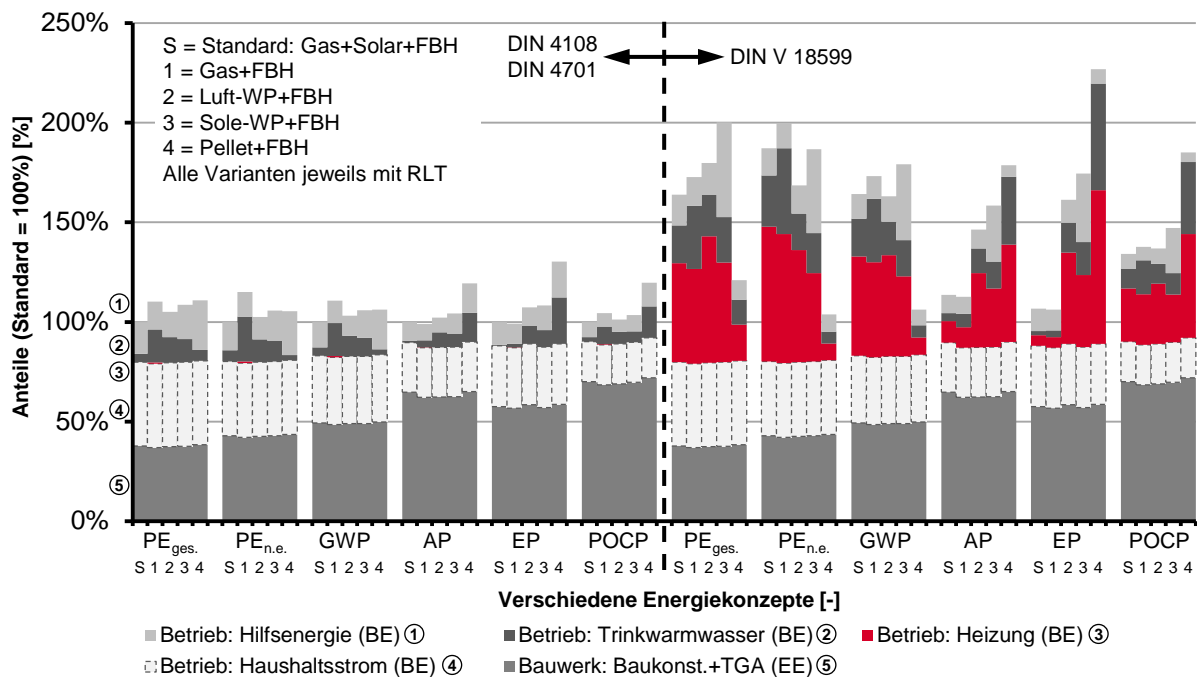


Abbildung 5.30: Heizung-, Trinkwarmwasser-, Hilfsenergieanteile (Betrieb) bei unterschiedlichen Berechnungsverfahren sowie Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Haushaltsstroms (Betrieb) am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern (außer ODP)

und wurden mit dem gleichen Programm (LEGEP [103]) ermittelt. Schlussendlich sollten deshalb zukünftig die Berechnungsverfahren (realitätsgetreu) angepasst werden.

Durch die unterschiedliche Berechnung der Betriebsphase kann es zu einer verschiedenen Rangordnung des bevorzugten Systems kommen. Beispielsweise sind beim GWP und der Betriebsphasenberechnung nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (Abbildung 5.30 linke Hälfte), die minimalen potenziellen Umweltauswirkungen bei der Standardvariante und die maximalen beim Gas-Brennwertgerät mit Fußbodenheizung festzustellen; hingegen beim GWP und der Ermittlung nach DIN V 18599 [200] (Abbildung 5.30 rechte Hälfte) liegt das Minimum beim Pelletheizkessel und das Maximum bei der Sole-Wasser-Wärmepumpe. Bei den Varianten „1“ bis „4“ in Abbildung 5.30 erreicht nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] die Luft-Wasser-Wärmepumpe (PE_{ges.}, PE_{n.e.}, GWP, POCP) bzw. nach DIN V 18599 [200] die Pelletanlage (PE_{ges.}, PE_{n.e.}, GWP) am häufigsten das Minimum.

Der Nutzer kann einen enormen Einfluss auf die Varianz der Ergebnisse haben, unabhängig vom angewandten Verfahren für die Betriebsphasenberechnung. Hier hat der gesamte Energieverbrauch im Betrieb (①, ②, ③, ④ in Abbildung 5.30) einen Anteil zwischen 30 % und 66 % (DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179]) bzw. 43 % und 81 % (DIN V 18599 [200]). Neben dem Energieverbrauch für Heizung, Trinkwarmwasser und Hilfsenergie beeinflusst der Nutzer zudem den Haushaltsstrom. Durch verschiedenartiges Nutzerverhalten kann es einerseits im Lebenszyklus zu bedeutsamen Abweichungen (z.B. unterschiedlicher elektrischer Verbrauch) kommen und andererseits die Rangfolge der zu priorisierenden Gebäudetechnik variieren (z.B. siehe oben).

Bei beiden Berechnungsverfahren wird allerdings deutlich: Sofern nur der Betrieb, der durch die Gebäudehülle und den Energieträger beeinflussbar ist (Heizung, Trinkwarmwasser, Hilfsenergie), bilanziert wird, wird ein Großteil des Lebenszyklus vom Gebäude vernachlässigt. Hierdurch ist kein Anreiz für eine Ressourcen- und Emissionseinsparung geschaffen. Bei der Berechnung nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] sind es in diesem Beispiel grob zwischen 70 % und 90 % bzw. bei der Betriebsphasenberechnung nach DIN V 18599 [200] sind es für das Bauwerk und den Haushaltsstrom ca. 40 % bis 80 % – je nach Variante und Bewertungsparameter.

Abbildung 5.31 auf der nächsten Seite und *Abbildung C.4 auf Seite 202* im *Anhang* zeigen die Anteile des Bauwerks und des Betriebs am Beispiel des Einfamilienhauses über verschiedene Niedrigstenergiestandards. Hierbei wurde die Betriebsphase nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (links) und identisch mit der DIN V 18599 [200] (rechts) gerechnet. Zudem wurde der Energieverbrauch im Betrieb, auf Grundlage der derzeitigen Anteile im Wohngebäudeneubau prozentual verteilt bzw. auf 100 % normiert: 58 % Erdgas-Brennwertgerät, 26 % Luft-Wasser-Wärmepumpe, 10 % Sole-Wasser-Wärmepumpe (mit Erdsonde), 6 % Pelletheizkessel. Diese Wärmeerzeuger bilden zusammen ca. 88 % der verwendeten Heizenergien in 2013 und 2014⁹⁹. Dementsprechend ist der Betrieb ein Wärmemix. Zudem wurde eine Lüftungsanlage bilanziert. Beim Bauwerk wurden die Minimal- und Maximalwerte der Leicht- bzw. Massivbauweise dargestellt¹⁰⁰; wobei für die Heizungs-technik beim Bauwerk die Materialanteile gewichtet (jeweils die Minimal- oder Maximalwerte je Beheizungsart und Bewertungsparameter) bzw. die Standardmaterialien bei Sanitär-, Lüftungs-, Elektro- und Schwachstromtechnik angewendet wurden.

Die Notwendigkeit der Lebenszyklusbetrachtung wird ebenfalls deutlich: Bei zunehmend höherwertigem Baustandard nimmt die Betriebsphase bei allen Bewertungsparametern ab, unabhängig vom Berechnungsverfahren; die Einsparungen werden teilweise durch eine höhere EE durch das Bauwerk aufgebraucht. Ebenso ist die mögliche Bandbreite (rot in *Abbildung 5.31 auf der nächsten Seite*) des Bauwerks ersichtlich, beispielsweise erreichen beim GWP mit ca. 26 kg CO₂-Äq./((m²a)) (links) bzw. ca. 43 kg CO₂-Äq./((m²a))¹⁰¹ (rechts) sowohl der KfW 70-Standard, als auch alle vermeintlich höherwertigen energetischen Standards diesen Wert, obwohl in der Betriebsphase wesentlich weniger Emissionen vorherrschen; dementsprechend kann durch die Materialwahl der Lebenszyklus entscheidend beeinflusst werden. Infolgedessen wird bei Vernachlässigung des Bauwerks ein enormer Anteil des Gebäudelebenszyklus unterschlagen – unabhängig vom Berechnungsverfahren für den Betrieb.

Das Verhältnis zwischen Betrieb und Bauwerk sowie das Optimum hinsichtlich des Energiestandards sind abhängig vom gewählten Berechnungsverfahren für den Betrieb und vom betrachteten Bewertungsparameter. Auf diese Weise ergibt sich eine große Bandbreite, quantitativ bedeutet dies für das dargestellte Beispiel im KfW 40-Standard, dass die im Bauwerk gebundene Energie bzw. Emissionen

⁹⁹Siehe hierzu auch *Abbildung 4.9 auf Seite 61*.

¹⁰⁰Siehe hierzu auch Kapitel *5.2.2 auf Seite 85*.

¹⁰¹Die GWP-Werte bewegen sich im Rahmen der ermittelten Werte aus der Metaanalyse (Kapitel *3 auf Seite 29*: - 1 kg CO₂-Äq./((m²a)) bis 51 kg CO₂-Äq./((m²a))); ebenso verhält es sich mit den Werten für das Bauwerk bzw. der Eingebunden Energie: *Abbildung 5.31 auf der nächsten Seite* zwischen 32 kWh/(m²a) und 78 kWh/(m²a), bei der Metaanalyse 8 kWh/(m²a) bis 100 kWh/(m²a).

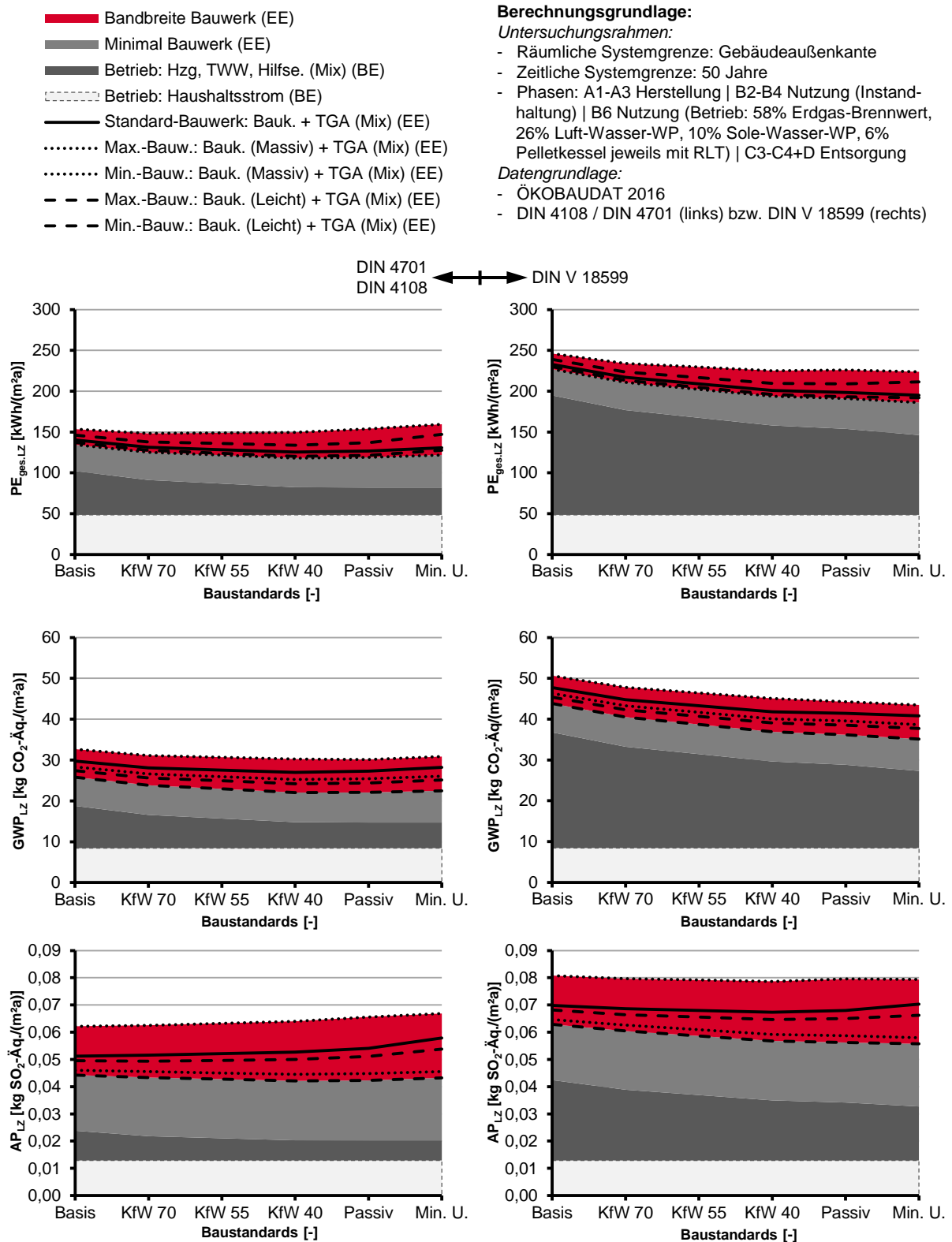


Abbildung 5.31: Anteile am Lebenszyklus des Einfamilienhauses (Betrieb mit Wärmemix nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (links) bzw. DIN V 18599 [200] (rechts)) über verschiedene Baustandards beim Primärenergieinhalt gesamt ($PE_{ges.}$), Treibhaus- (GWP) und Versauerungspotenzial (AP) (Fortsetzung siehe Abbildung C.4 auf Seite 202)

zwischen 25 % und 84 % (DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179]) bzw. 13 % und 71 % (DIN V 18599 [200]) im Lebenszyklus einnehmen können. Über alle Standards und Bewertungsparameter schwankt bei diesem Beispiel der Bauwerksanteil zwischen 20 % und 88 % bzw. 11 % und 79 %¹⁰². Ebenso verhält es sich beim ökologischen Optimum (unterste schwarze Linie bzw. ohne rote Bandbreite in *Abbildung 5.31 auf der vorherigen Seite*). Bei der Berechnung nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] bewegt sich das Optimum um den KfW 40-Standard; durch die höhere Betriebseinsparung bei der Berechnung nach DIN V 18599 [200] bewegt sich das Optimum um den Passiv-Standard¹⁰³ und der Variante mit praktisch minimal möglichem U-Wert. Deshalb sollte der Niedrigstenergiestandard aus ökologischer Sicht zwischen dem KfW 40- und Min. U.-Standard¹⁰⁴ liegen.

Bei einem abweichenden Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ergeben sich folgende Tendenzen: Bei längerem Betrachtungszeitraum wird die Nutzungsphase und hier v.a. der Energieverbrauch im Betrieb wichtiger, folglich verliert das Bauwerk bzw. die EE an Bedeutung. Die Relevanz der Gebäudetechnik nimmt im Bezug auf die potenziellen Umweltauswirkungen durch die Instandhaltungszyklen innerhalb des Bauwerks mit steigendem Betrachtungszeitraum zu, da die primäre Baukonstruktion keine Instandhaltung erfährt. Bei kürzerer Gebäudelebensdauer drehen sich beide Aussagen um.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die derzeitige EnEV [20] und das üblich angewandte vereinfachte LCA-Berechnungsverfahren weiterentwickelt werden sollten. Bei der EnEV [20] sollte der Betrachtungshorizont auf den kompletten Gebäudelebenszyklus mit zusätzlichen Bewertungsparametern (z.B. GWP) erweitert werden. Ebenso sollten die Berechnungsverfahren auf Gebäude mit sehr niedrigem Energiebedarf und möglicher Energieproduktion in der Betriebsphase angepasst werden. Denn nur so behält die EnEV [20] als energiepolitisches Instrument ihr Ziel im Blick: Erhöhung der Energieeffizienz, um so zum Erreichen der Klimaschutzziele beizutragen. Sofern von den deutschen Zertifizierungssystemen eine ganzheitliche und genaue Betrachtung gewünscht ist, sollte der Zuschlag für die Gebäudetechnik wesentlich erhöht werden oder alternativ – und besser – das vorgeschlagene Verfahren für die Gebäudetechnik (Kapitel 6 auf Seite 123) angewandt werden.

Zum Abschluss kann festgehalten werden, dass Gebäude einschließlich der Gebäudetechnik über den kompletten Lebenszyklus betrachtet werden sollten. Auf diese Weise werden einerseits die enormen umweltbezogenen Auswirkungen des Bauwerks und des Haushaltsstroms erfasst und können hierdurch optimiert werden; andererseits kann die Sinnhaftigkeit von Aktivtechnik – Lüftungs-, Solar-, PV-Anlage – aufgezeigt bzw. überprüft werden. Für die korrekte Betriebsphasenberechnung sollten jedoch die Verfahren praxisnah angepasst werden. Allerdings ist bei Berücksichtigung der derzeitigen Rahmenbedingungen und aller Bewertungsparameter kein Energieträger uneingeschränkt zu bevorzugen oder zu benachteiligen. Hinsichtlich des Energiestandards ist das Optimum abhängig vom Bewertungsparameter und dem angewandten Verfahren für die Betriebsphase und bewegt sich um den KfW 40-Standard bis hin zu einem Gebäude mit praktisch minimal möglichen U-Werten.

¹⁰²Dies entspricht einem Lebenszyklus-Energiefaktor / -Emissionsfaktor (f_{LZE}) von 0,1 bis 4,0 bzw. 0,3 bis 8,0.

¹⁰³Es wurde kein Passivhauskonzept näher betrachtet (z.B. Begrenzung des Haushaltsstroms). Zudem wurden die Gebäudestandards anhand ihrer U-Werte definiert.

¹⁰⁴Sehr extrem gedämmtes Gebäude mit minimal realisierbaren U-Werten – siehe hierzu auch Kapitel 4.4.1 auf Seite 64.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Abbildung 5.32 fasst die Ergebnisse der ökologischen Analyse pauschal zusammen. Hierbei beruht die Bandbreite der potenziellen Umweltauswirkungen ($PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP, AP, EP, POCP) auf den beschriebenen Varianten. Anzumerken sei zum einen, dass das ODP vernachlässigt wurde, da dies innerhalb des Bauwerks 0 % bis 100 % einnehmen kann; zum anderen, dass die angegebenen Anteile auf dem KfW 40-Einfamilienhaus beruhen. Die Anteile innerhalb der Gebäudetechnik sind beim Mehrfamilienhaus und anderen energetischen Baustandards in etwa identisch. Der Gebäude-technikanteil am Bauwerk ist beim Mehrfamilienhaus um ca. 3 % bis 5 % geringer. Des Weiteren ändert sich dieser Anteil mit unterschiedlichem Baustandard leicht (ca. $\pm 1\%$ bis 5 %).

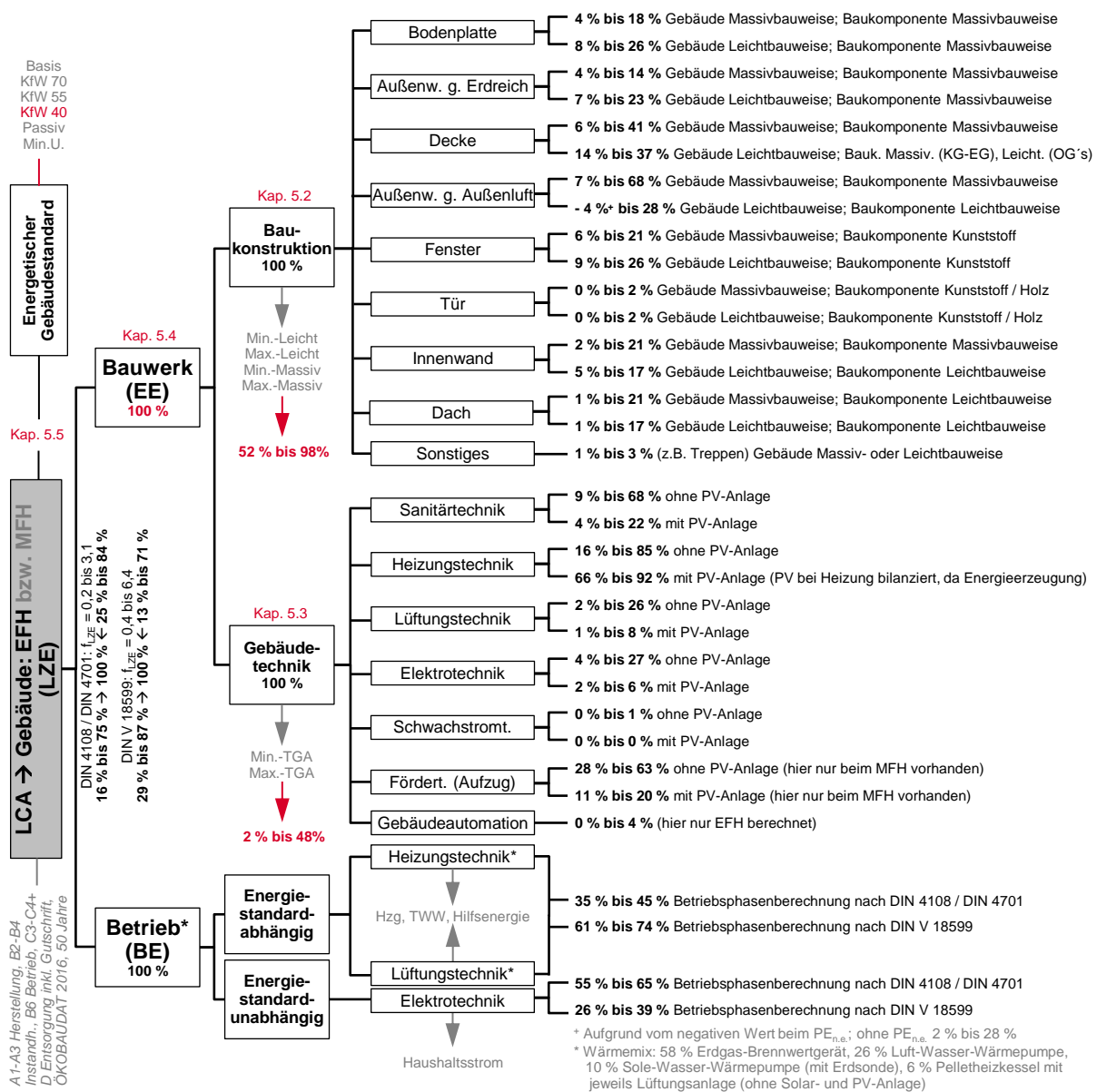


Abbildung 5.32: Ergebniszusammenfassung der ökologischen Analyse am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses

5.7 Kurzzusammenfassung

- **5.1 Grundlagen zur ökologischen Analyse:**
 - ⇒ Der Box-Plot ist eine graphische Darstellung, um die Lage und Streuung von (vielen) Daten sichtbar zu machen; hierbei repräsentiert die „Box“ (Interquartilsabstand) immer 50 % der Daten. *Abbildung 5.2 auf Seite 75* gibt einen Überblick über die Varianten und den Aufbau der ökologischen Analyse.
- **5.2 Baukonstruktion:**
 - ⇒ Eine generelle Aussage zur Baukonstruktion mit den geringsten potenziellen Umweltauswirkungen kann pauschal für alle Bewertungsparameter und U-Werte wissenschaftlich nicht getroffen werden; wobei die Leichtbauweise tendenziell ökologisch vorteilhafter ist als die Massivbauvarianten. Prinzipiell sind bei der Gebäudekonstruktion keine Bauteile, bis auf die Türen (max. 2 % (ohne ODP)), vernachlässigbar; besonders betrachtet werden sollten Decken und Außenwände (Anteil z.B. beim KfW 40-Einfamilienhaus: 11 % bis 78 % (ohne ODP)).
- **5.3 Gebäudetechnik:**
 - ⇒ Ökologisch gesehen ist meistens die Heizungstechnik mit ggf. Solar- und / oder v.a. PV-Anlage innerhalb der Gebäudetechnik am bedeutendsten (ca. 20 % bis 80 % ohne PV bzw. ca. 75 % bis 90 % mit PV). Die Schwachstromtechnik und Gebäudeautomation sind vernachlässigbar (ca. 0 % bis 4 %); Sanitär- (ca. 5 % bis 60 %), Lüftungs- und Elektrotechnik (ca. je 2 % bis 25 %) jedoch nicht.
- **5.4 Bauwerk: Baukonstruktion und Gebäudetechnik:**
 - ⇒ Die Gebäudetechnik muss zukünftig genauer in die Bilanzierung der ökologischen Eigenschaften von Gebäuden mit einfließen; denn je nach Bewertungsparameter und eingesetzter Technikvariante können die Einflüsse am Bauwerk enorm sein, beispielsweise beim KfW 40-Einfamilienhaus kann die gesamte Gebäudetechnik im Extremfall bis zu $\frac{1}{4}$ bzw. $\frac{1}{2}$ (u.a. Heizungstechnik ohne bzw. mit Solar- und / oder PV-Anlage) des Bauwerks ausmachen; beim Ozonabbaupotenzial (ODP) ist sogar eine komplette Beeinflussung durch die Gebäudetechnik möglich.
- **5.5 Niedrigstenergiewohngebäude: Bauwerk und Betrieb:**
 - ⇒ Die Analyse des Gebäudelebenszyklus ist wichtig, um die Ressourcen- und Emissions-einsparung zu fördern: zum einen durch die Optimierung der bisher vernachlässigten potenziellen Umweltauswirkungen des Bauwerks und Haushaltsstroms (Anteil 40 % bis 90 %); zum anderen durch den Nachweis der Wirksamkeit von Aktivtechnik; in allen betrachteten Fällen ist eine Lüftungsanlage und v.a. eine PV-Anlage ökologisch sinnvoll. Die Verteilung zwischen Bauwerk und Betrieb sowie das Optimum sind abhängig vom Berechnungsverfahren der Betriebsphase und vom Bewertungsparameter; der Bauwerksanteil

bewegt sich zwischen 20 % und 88 % sowie das ökologische Optimum zwischen KfW 40-Standard und der Variante mit praktisch minimal möglichem U-Wert.

- **5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse:**

⇒ *Abbildung 5.32 auf Seite 120* fasst die Ergebnisse der ökologischen Analyse mit dessen Bandbreite am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses zusammen.

► **Niedrigstenergiewohngebäude müssen zukünftig über den kompletten Lebenszyklus ökologisch betrachtet werden; hierbei müssen die Heizungs-, Sanitär-, Lüftungs,- und Elektrotechnik, d.h. die Gebäudetechnik wegen ihres potenziellen Anteils am Bauwerk genauer berücksichtigt werden.**

KAPITEL 6

Vereinfachte ökologische Ermittlung der Gebäudetechnik

6.1 Ökologische Betrachtung von Gebäuden

Neben den anerkannten Begrifflichkeiten für die ökonomische Gebäudebetrachtung wird die „LCA-Ermittlung“ für die ökologische Berücksichtigung als Begriff vorgeschlagen (*Abbildung 6.1*). Parallel zur Kostenermittlung für die Herstellungsphase (DIN 276-1 [170]) existiert die DIN 18960 [201] für die Nutzungskostenermittlung. Folglich schließt die LCA-Ermittlung mit deren Unterbegriffen eine Lücke für die ganzheitliche Beschreibung über alle HOAI-Leistungsphasen (HOAI-LPh siehe [21:§55]).

HOAI (Leistungsphasen LPh)	Ökonomische Betrachtung		Ökologische Betrachtung
	DIN 276: Kosten- ermittlung	DIN 18960: Nutzungs- kostenermittlung	LCA Ermittlung
Grundlagen- ermittlung (LPh 1)	Kosten- rahmen	Nutzungskosten- rahmen	LCA-Rahmen
Vorplanung (LPh 2)	Kosten- schätzung	Nutzungskosten- schätzung	LCA-Schätzung (generisch)
Entwurfs- planung (LPh 3)	Kosten- berechnung	Nutzungskosten- berechnung	LCA-Berechnung vereinfacht detailliert (generisch) (generisch)
Ausführungsplanung / Vergabe (LPh 4-7)	Kosten- anschlag	Nutzungskosten- anschlag	LCA-Anschlag detailliert (EPD)
Objektüberwachung / Dokumentation (LPh 8-9)	Kosten- feststellung	Nutzungskosten- feststellung	LCA-Feststellung detailliert (EPD)

Abbildung 6.1: LCA-Ermittlung und die Kosten- und Nutzungskostenermittlung

Wie in *Abbildung 6.1* ersichtlich ist, lehnt sich die LCA-Ermittlung an die Kosten- und Nutzungskostenstruktur an. Hierbei nimmt die Genauigkeit und der Detaillierungsgrad mit Planungs- und Baufortschritt zu, z.B. beruhen die LCA-Ermittlungen zu Beginn auf generischen Daten und im späteren Verlauf auf EPDs, sobald die Hersteller der Baukomponenten bekannt sind. Die detaillierte LCA-Berechnung, der LCA-Anschlag und die LCA-Feststellung benötigen aufgrund ihrer Art keine Vereinfachung und werden folglich nicht weiter betrachtet. Ebenso wurde im Kapitel 5.4 auf Seite 105 der Anteil der Gebäudetechnik am Bauwerk beschrieben; dies kann als LCA-Rahmen verstanden werden.

6.2 Gebäudetechnik

Ziel einer LCA-Schätzung bzw. vereinfachten LCA-Berechnung der Gebäudetechnik ist es, ohne großen Aufwand relativ nahe an den Ergebnissen der detaillierten LCA-Berechnung zu liegen. Hierbei weist die LCA-Schätzung durch höhere Unsicherheiten größere Streubreiten und ungenauere Ergebnisse als die vereinfachte LCA-Berechnung auf. Das entwickelte Verfahren schafft durch konservativere Ergebnisse bei der LCA-Schätzung einen Anreiz, durch mehr Daten exaktere LCA-Ergebnisse zu erhalten. Wie in *Abbildung 6.2* dargestellt und unten beschrieben, sind für die Vereinfachung der LCA der Gebäudetechnik generell folgende Schritte notwendig:

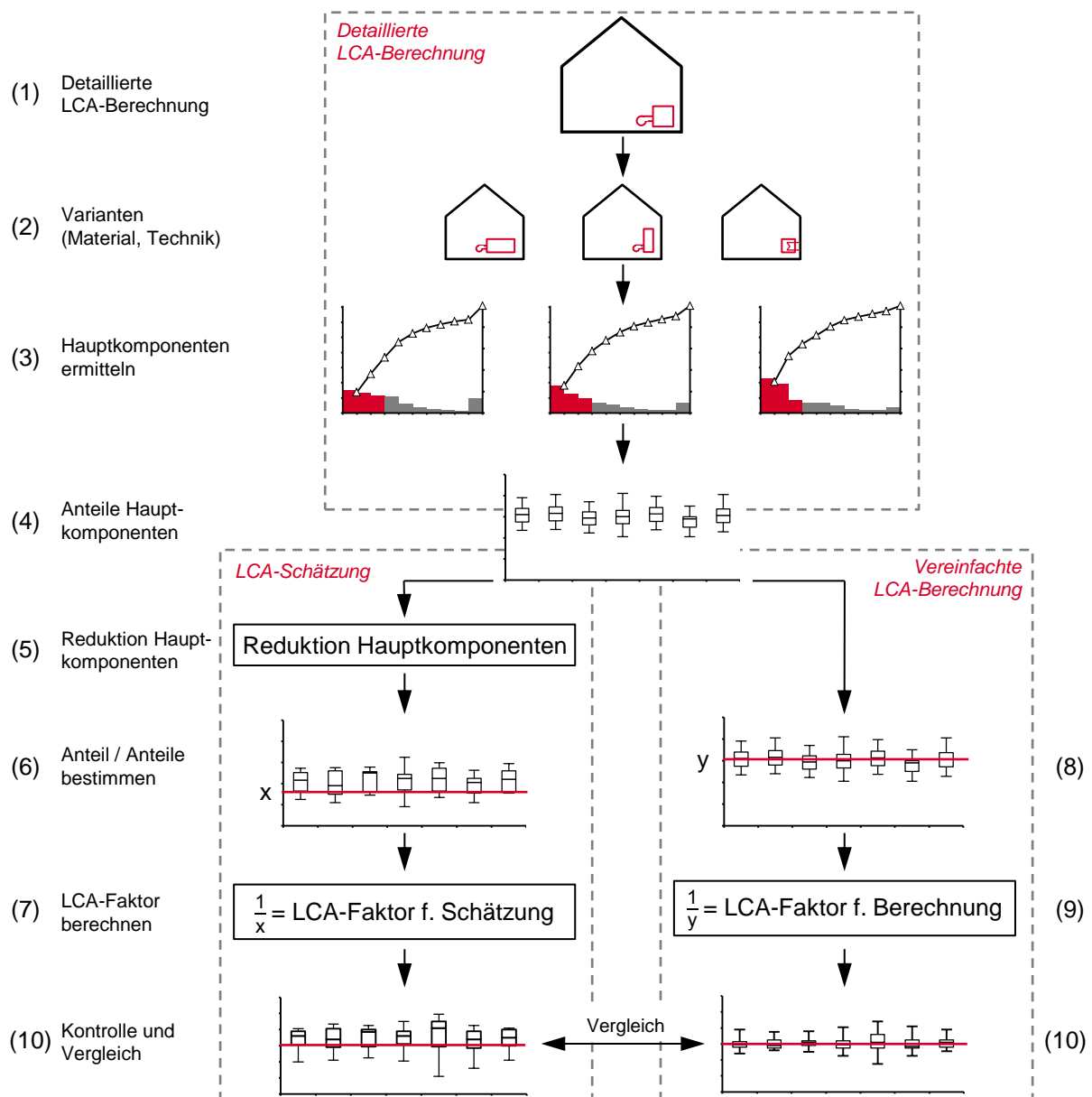


Abbildung 6.2: Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten LCA-Berechnung der Gebäudetechnik mittels LCA-Schätzung und vereinfachter LCA-Berechnung

- (1) *Detaillierte LCA-Berechnung*: Sehr kleingliedrige und detaillierte LCA-Berechnung eines Gebäudes, selbst gewichtsarme und „kleine“ Gebäudetechnikkomponenten berücksichtigen
- (2) *Varianten (Material, Technik)*: Genaue LCA-Berechnung, um mögliche Baumaterial- und / oder Technikvarianten erweitern
- (3) *Hauptkomponenten ermitteln*: Hauptkomponenten ausfindig machen, wobei ein hoher prozentualer Anteil – bei möglichst wenigen Komponenten – anzustreben ist
- (4) *Anteile Hauptkomponenten*: Prozentualer Anteil dieser Hauptkomponenten über alle Varianten im Box-Plot bei allen Bewertungsparametern aufzeigen
- (5) *Reduktion Hauptkomponenten (LCA-Schätzung)*: Hauptkomponenten auf die wesentlichen Bauteile minimieren, die zur Vorplanung möglichst feststehen sollten
- (6) *Anteil / Anteile bestimmen (LCA-Schätzung)*: Mittels Box-Plot Anteil / Anteile des unteren Quartils bestimmen, ggf. Bewertungsparameter und / oder Hauptkomponenten zusammenfassen oder separat betrachten
- (7) *LCA-Faktor berechnen (LCA-Schätzung)*: Kehrwert des Anteils bzw. der Anteile bilden, ergibt den LCA-Faktor bzw. die LCA-Faktoren (Zuschlagsfaktor/en) für die LCA-Schätzung
- (8) *Anteil / Anteile bestimmen (LCA-Berechnung)*: Aus (4) Anteil / Anteile anhand des Medians bestimmen, ggf. Bewertungsparameter und / oder Hauptkomponenten bündeln oder getrennt beurteilen, sowie evtl. erneuten Box-Plot mit getrennten Hauptkomponenten erstellen
- (9) *LCA-Faktor berechnen (LCA-Berechnung)*: LCA-Faktor / LCA-Faktoren für die LCA-Berechnung mittels Kehrwert des Anteils / der Anteile bilden
- (10) *Kontrolle und Vergleich*: Ergebnisabweichung der LCA-Schätzung und der vereinfachten LCA-Berechnung mit der detaillierten LCA-Berechnung bei allen Bewertungsparametern überprüfen sowie beide Verfahren zur Einordnung der Ergebnisgenauigkeit gegenüberstellen¹⁰⁵.

Generell ist die Vorgehensweise bei der Anwendung der LCA-Faktoren zur überschlägigen LCA-Ermittlung identisch. Sind einmalig die LCA-Faktoren¹⁰⁶ für ein Gebäudetechniksystem bestimmt und validiert, minimieren diese den Aufwand der ökologischen Betrachtung der Gebäudetechnik erheblich. Bei der letztendlichen Anwendung muss zuerst bei der LCA-Schätzung bzw. vereinfachten LCA-Berechnung die Sachbilanz der Hauptkomponenten erstellt werden (Menge und Masse der Basis der LCA-Faktoren). Anschließend wird die Stoffmasse mit dem spezifischen Gesamtwert¹⁰⁷ je Bewertungsparameter aus der ÖKOBAUDAT [76] verknüpft. Zuletzt wird das Ergebnis je Bewertungsparameter mit dem jeweiligen LCA-Faktor (Zuschlag für Hauptkomponenten) multipliziert.

¹⁰⁵Bei großer Ergebnisabweichung: Korrektur des LCA-Faktors durch zusammenlegen oder trennen von Bewertungsparametern und / oder Hauptkomponenten.

¹⁰⁶Es werden keine Absolutwerte zur Verwendung vorgeschlagen, da die ökologische Verbesserung von Materialien sonst keinen Einfluss in die Ermittlung finden. Nichtsdestotrotz sollen die Zuschlagsfaktoren zuweilen überprüft werden, da davon ausgegangen wird, dass branchenweit die gleichen ökologischen Fortschritte eintreten.

¹⁰⁷Derzeit liegen wenig „Technikwerte“ in der Referenzeinheit kg vor, jedoch können diese (meist) umgerechnet werden.

6.3 Sanitärtechnik

6.3.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Die Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten LCA-Berechnung orientiert sich an den zuvor erläuterten Schritten. Demzufolge beruht die Bestimmung der LCA-Faktoren bzw. Zuschlagsfaktoren für die LCA-Schätzung und vereinfachte LCA-Berechnung auf zehn Schritten.

Eine genaue Erläuterung und Darstellung der Schritte **(1)** bis **(4)** entfällt. Da zum einen, für Schritt **(1)** die Rahmenbedingungen (Kapitel 4 auf Seite 39) und die notwendige Sachbilanz (Anhang B auf Seite 179) vorhanden sind; zum anderen, die detaillierte LCA-Berechnung mit den Varianten (Schritt **(1)** und **(2)** – Kapitel 4.4.3 auf Seite 68) erweitert und für die Sanitärtechnik ausgewertet wurde (Schritt **(3)** und **(4)** – Kapitel 5.3.2 auf Seite 92). Schritt **(4)** ist notwendig, um die Anteile und deren Streuung visuell beurteilen zu können.

Schritt **(5)** umfasst die Minimierung der Hauptkomponenten. Für die Sanitärtechnik wurden als Hauptkomponenten die Sanitärkeramik, die Wannen und die Wasserrohrleitungen identifiziert (Schritt **(3)** und **(4)** – Kapitel 5.3.2 auf Seite 92). In der Vorplanung sind die Trassenplanung und somit die Rohrleitungslängen noch vage; deshalb wird vorgeschlagen diese für die LCA-Schätzung zu vernachlässigen. Folglich wird die Schätzung ungenauer, da eine Baukomponente nicht in die Bilanzierung einfließt. Allerdings wird hierdurch der Aufwand für die Massenermittlung und somit für die Sachbilanz geringer. *Abbildung 6.3* zeigt den prozentualen Anteil der Sanitärkeramik und der Acryl-Wannen an der gesamten Sanitärtechnik beim Einfamilienhaus.

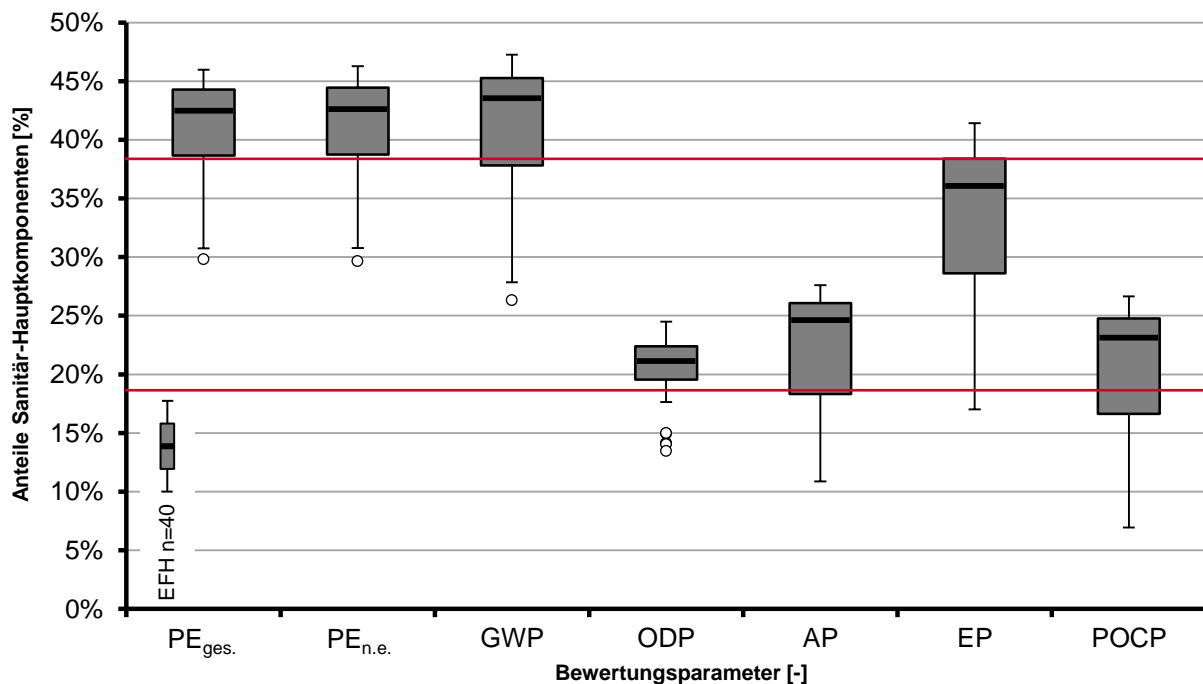


Abbildung 6.3: Anteil der Sanitärkeramik (WC, Waschbecken) und Acryl-Wannen beim Einfamilienhaus an der Sanitärtechnik bei allen Bewertungsparametern

Als nächstes – Schritt **(6)** – muss der Anteil bzw. müssen die Anteile der Hauptkomponenten ermittelt werden. Es ist eine Zweiteilung ersichtlich. Deshalb werden zwei Gruppen aus den Bewertungsparametern gebildet und folglich zwei Anteile bestimmt. Bei den Bewertungsparametern $PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP und näherungsweise EP liegt das untere Quartil bei ca. 38 % und beim ODP, AP und POCP bei ca. 18 % / 19%. Anzumerken sei, dass der Bewertungsparameter EP nicht optimal in der ersten Kategorie eingruppiert ist, jedoch wird diese Unschärfe akzeptiert, um möglichst wenige Anteile und letztendlich LCA-Faktoren zu erhalten, und damit eine einfache Handhabung zu ermöglichen. Demnach liegt die Bestimmung der jeweiligen Anteile im Ermessensspielraum des Bewerter.

Mit den ermittelten Anteilen werden im Schritt **(7)** die Zuschlagsfaktoren bzw. LCA-Faktoren errechnet. Für dieses Beispiel wäre der Kehrwert von 38 % bzw. 0,38: 2,6 und der Kehrwert von 0,185: 5,4¹⁰⁸. Mit Beendigung des Schrittes **(7)** ist – mit Ausnahme der Überprüfung – die Vereinfachung der ökologischen Betrachtung hinsichtlich der LCA-Schätzung abgeschlossen.

Bei der vereinfachten LCA-Berechnung erfolgt die Bestimmung der Anteile (Schritt **(8)**) ähnlich wie bei der LCA-Schätzung (Schritt **(6)**). Allerdings werden die Anteile auf Grundlage des Medians gebildet. Ähnlich wie bei *Abbildung 6.3 auf der vorherigen Seite* ist in *Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite* eine Zweiteilung ersichtlich; deshalb werden hier ebenfalls die Bewertungsparameter zusammengefasst. Eine weiterführende Analyse ergab zudem, dass die Wasserrohrleitungen ebenso aufgeteilt werden sollten: In Kunststoffrohrleitungen sowie Metall- und Mehrschichtverbundrohrleitungen. Für die Sanitärtechnik des Einfamilienhauses ergeben sich somit nach *Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite* links (Kunststoffrohr) für $PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP und EP im Median ein Anteil von ca. 50 % und beim ODP, AP und POCP von ca. 27 %. Bei der Ermittlung nach der rechten *Abbildung 6.4 auf der nächsten Seite* (Metall- und Mehrschichtverbundrohr) wird ein Wert von um die 53 % ($PE_{ges.}$, $PE_{n.e.}$, GWP und EP) bzw. 38 % (ODP, AP und POCP) bestimmt. Ersichtlich sind die Ausreißer im Box-Plot; diese sind auf das SML-Abflussrohr zurückzuführen.

Schritt **(9)** umfasst die Bildung der LCA-Faktoren; diese wären bei der vereinfachten LCA-Berechnung für die Kunststoffrohrleitungen 2,0 und 3,7 (Kehrwert von 50 % bzw. 27 %) sowie für die Metall- / Mehrschichtverbundrohrleitungen 1,9 und 2,6 (Kehrwert von 53 % bzw. 38 %). Sofern SML-Abflussrohr verbaut werden soll, wird wegen der Ausreißer und dem geringen Anteil der Hauptkomponenten ein Zuschlag benötigt. Dieser wurde mit 1,4 ermittelt, d.h. falls SML-Rohr zum Einsatz kommt, muss bei der vereinfachten LCA-Berechnung ein Faktor von 1,4 zusätzlich multipliziert werden.

Als letzter Schritt **(10)** erfolgen die Ergebniskontrolle und der Ergebnisvergleich. Zum einen werden mittels der Ergebnisabweichungen die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung bei allen Bewertungsparametern mit der detaillierten LCA-Berechnung abgeglichen, um die Diskrepanz im Ergebnis feststellen zu können; zum anderen werden die LCA-Schätzung und die vereinfachte

¹⁰⁸Zu den LCA-Faktoren sind drei Anmerkungen zu machen: (1) Sinnigerweise sollten die LCA-Faktoren nur mit einer Nachkommastelle angegeben werden, da das Berechnungsverfahren sonst eine Genauigkeit vortäuscht, die mit dieser nicht zu erreichen ist. (2) Die LCA-Faktoren sind immer > 1 ; wobei ein Wert nahe 1 einen hohen Hauptkomponentenanteil aufzeigt und hierdurch im Endergebnis robust auf zusätzliche Baukomponenten reagiert. (3) Es wird vorgeschlagen, nur LCA-Faktoren ≤ 7 zu verwenden, da sonst das Berechnungsverfahren auf zusätzliche Kleinbauteile anfällig reagiert und die Ergebnisabweichung größer wird; bei einem Faktor von ≤ 7 beträgt der Hauptkomponentenanteil mindestens 14 %. Sofern der LCA-Faktor > 7 ist, müssen mehr Hauptkomponenten betrachtet werden.

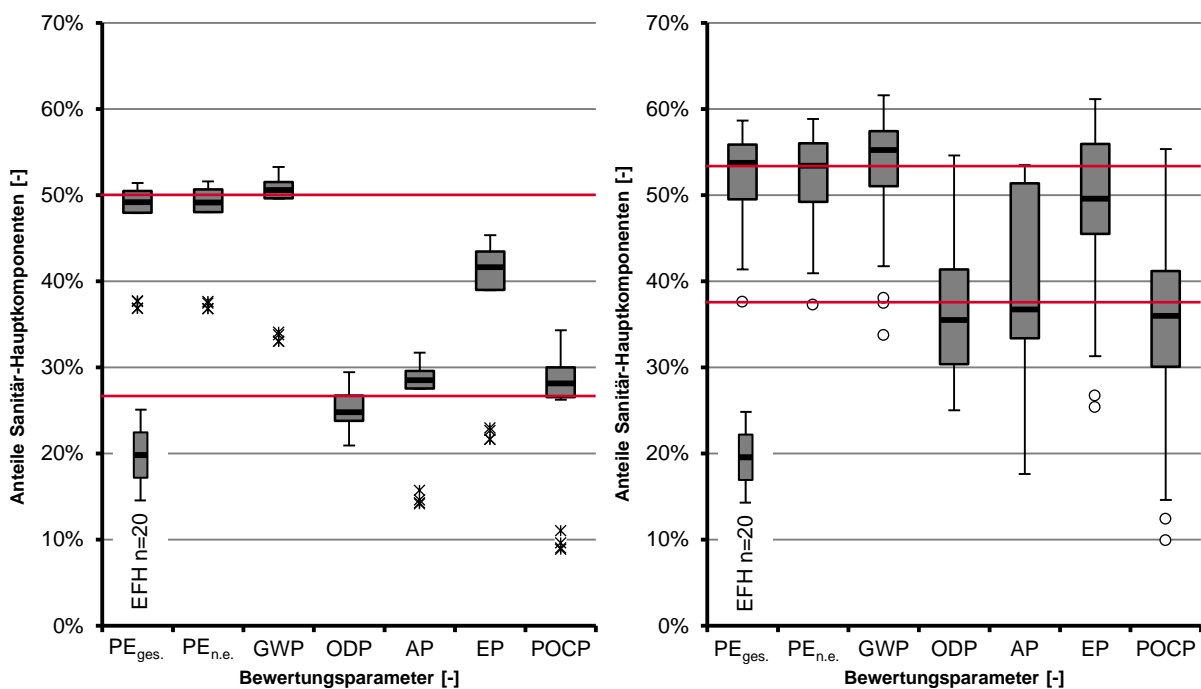


Abbildung 6.4: Anteil der Sanitärkeramik, Acryl-Wannen sowie Kunststoff- (links) bzw. Metall- und Mehrschichtverbundwasserrohrleitungen (rechts) beim Einfamilienhaus an der Sanitärtechnik bei allen Bewertungsparametern

LCA-Berechnung gegenübergestellt: dies hat zum Zweck, beide Verfahren für die Ergebnisgenauigkeit einzuordnen. [Abbildung 6.5 auf der nächsten Seite](#)¹⁰⁹ zeigt drei Sachverhalte:

Erstens werden die „Boxlängen“ (Interquartilsabstand) und größtenteils die Whisker- bzw. Antennenabstände von LCA-Schätzung (links) zu vereinfachten LCA-Berechnung (rechts) geringer, d.h. der Fehler zur detaillierten Berechnung nimmt ab. Dies ist auf die genauere LCA-Ermittlung durch mehr Baukomponenten und zusätzlichen LCA-Faktoren zurückzuführen. Bei einem Faktor von 1,0 existiert keine Abweichung zwischen überschlägigen Verfahren und detailliertem Berechnungsverfahren. Eine exaktere LCA-Ermittlung ist durch Berücksichtigung von mehr Bauteilen und eine präzisere Unterteilung der Bewertungsparameter möglich; allerdings erhöht sich hierdurch der Rechenaufwand.

Zweitens ist ersichtlich, dass die LCA-Schätzung konservativer ist als die vereinfachte LCA-Berechnung. Durch Bestimmung der Anteile am unteren Quartil der Box-Plots bei der LCA-Schätzung wird diese bewusst in den Ergebnissen ungünstiger bewertet, d.h. da die meisten Interquartilsabstände über der 1,0-Linie liegen, werden ca. 75 % der Sanitärtechnikvarianten ökologisch schlechter bewertet und ca. 25 % schneiden in der LCA-Schätzung besser ab als in der detaillierten Berechnung. Hierdurch soll ein Anreiz geschaffen werden, eine genauere LCA-Ermittlung mit vertretbarem Mehraufwand durchzuführen. Dies ist beispielsweise beim Nachweis des Wärmeschutzes bekannt: Beim pauschalen Verfahren beträgt der Wärmebrückenzuschlag nach DIN 4108-6 [178] $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [178:16]. Sofern man den Aufwand erhöht und den Normbeispielen folgt, reduziert sich der Zuschlag

¹⁰⁹Im [Anhang Abbildung D.1 auf Seite 203](#) befindet sich die Ergebnisabweichung des Mehrfamilienhauses.

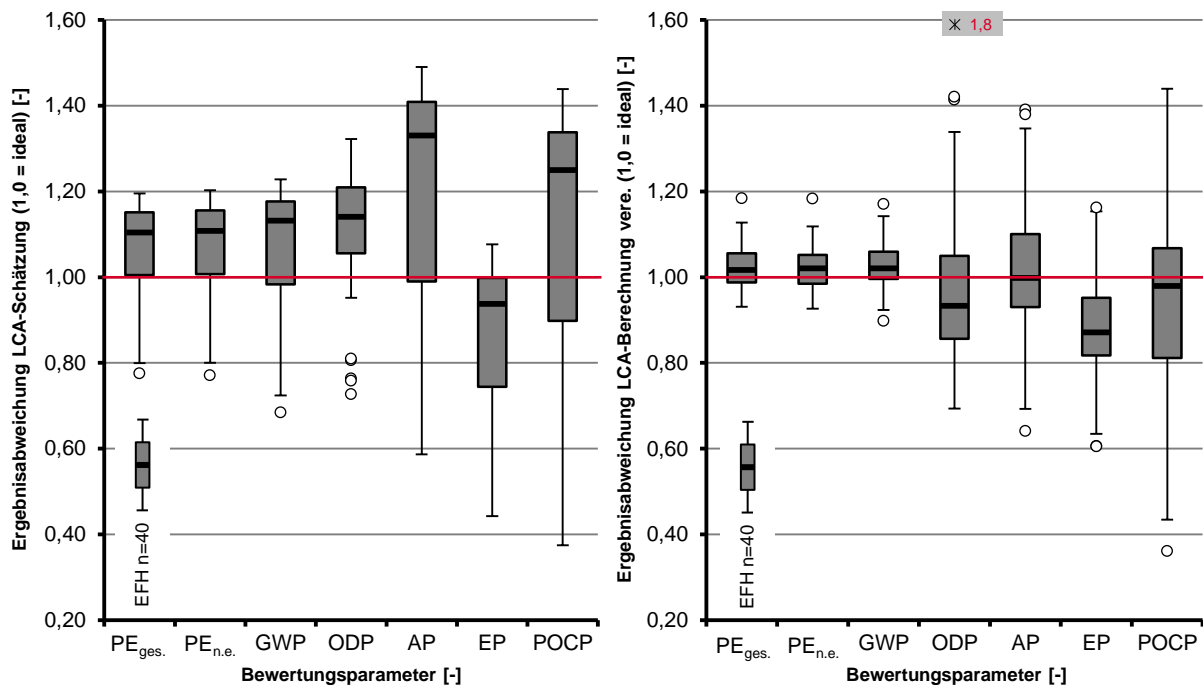


Abbildung 6.5: Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Sanitärtechnik beim Einfamilienhaus

(0,05 W/(m²K)) [178:16]. Des Weiteren existiert noch ein detailliertes Nachweisverfahren [178:24]. Allerdings sind beide detaillierten Berechnungsverfahren, v.a. die LCA-Berechnung, sehr aufwendig.

Drittens wird das Eutrophierungspotenzial (EP) unterbewertet, d.h. die Ergebnisse sind in diesem Bewertungsparameter geringer als in der detaillierten LCA-Berechnung. Diese Abweichung wird – im Rahmen dieser Arbeit – aufgrund der schnelleren und einfacheren LCA-Ermittlung toleriert. Überdies ist der Fehler akzeptabel, da 50 % (Interquartilsabstand) der Sanitärtechnikvarianten bei der LCA-Schätzung und der vereinfachten LCA-Berechnung eine Abweichung von ca. < 25 % (zwischen 0,75 und 1,00) haben. Eine genauere Bestimmung wäre durch zusätzliche LCA-Faktoren möglich, würde allerdings die Komplexität erhöhen und folglich die letztendliche Anwendung erschweren.

Im Anbetracht des später investierten Aufwands, ist die Bandbreite der Ergebnisabweichung in *Abbildung 6.5* gering. Bei der LCA-Schätzung bewegen sich die Ergebnisse für den Interquartilsabstand zwischen 0,74 und 1,41; d.h. 50 % der abgeschätzten Ergebnisse liegen im Bereich - 26 % und + 41 %. Vergleichend schwanken bei der vereinfachten LCA-Berechnung die Werte zwischen - 19 % und + 14 %, jedoch bei tendenziell kleineren „Boxen“. Die maximale Ergebnisabweichung nach „unten“ bzw. „oben“ ist bei beiden annähernd identisch.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung eine LCA-Ermittlung bei angemessener Genauigkeit und überschaubarem Aufwand möglich machen. Hierbei beinhaltet die LCA-Schätzung höhere Unsicherheiten und stellt durch das Berechnungsverfahren die Ergebnisse konservativer dar als die vereinfachte LCA-Berechnung.

6.3.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Nach der beschriebenen Vorgehensweise (generell: Kapitel 6.2 auf Seite 124, detailliert: Kapitel 6.3.1 auf Seite 126) wurden weitere LCA-Faktoren identisch berechnet. *Tabelle 6.1* gibt eine Übersicht für die Anwendung der konkreten LCA-Faktoren für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus.

Tabelle 6.1: LCA-Faktoren der Sanitärtechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus

Phasen: A + B + C + D	Bewertungsparameter	LCA-Faktor	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,6 ^A	ODP, AP, POCP	5,4 ^A
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,4 ^A	ODP, AP, POCP	5,2 ^A
^A Basis: Sanitärkeramik (WC, Waschbecken etc.) + Acryl-Wanne (Duschwanne, Badewanne)				
LCA-Berechnung (vereinfacht)				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,0 ^{B,D} 1,9 ^{C,D}	ODP, AP, POCP	3,5 ^{B,D} 2,6 ^{C,D}
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	1,8 ^{B,D} 1,7 ^{C,D}	ODP, AP, POCP	3,7 ^{B,D} 2,6 ^{C,D}
^B Basis: Wie A + Kunststoff-Wasserrohrleitungen (PE-X, PP, PB, PVC)				
^C Basis: Wie A + Metall- (Edelstahl, Kupfer, Verzinkt) oder Mehrschichtverbund-Wasserrohrleitungen				
^D Zusätzlich zu B oder C bei Abflussrohr SML: x 1,4 (Faktor ^B oder ^C x 1,4)				

Mit Hilfe der LCA-Faktoren (*Tabelle 6.1*) und den Gewichtsangaben der Hauptkomponenten (*Abbildung 6.6 auf der nächsten Seite*) sowie den spezifischen Werten aus der ÖKOBAUDAT [76] ist eine möglichst genaue Ermittlung der Sanitärtechnik mit geringem Aufwand umsetzbar; folglich kann die Gebäudetechnik mittels LCA-Schätzung oder vereinfachter LCA-Bewertung bestimmt werden:

Sachbilanz der Hauptkomponenten (Mengen- und Massen- sowie Materialermittlung) → umweltbezogene Auswirkungen der Hauptkomponenten → Zuschlag mittels der LCA-Faktoren → Endergebnis: potenzielle Umweltauswirkungen des Gewerks bzw. in Summe der Gebäudetechnik

Die LCA-Faktoren haben derzeit noch Einschränkungen bei der Anwendung: zum einen sollte bewusst sein, dass die LCA-Faktoren auf den Berechnungsgrundlagen¹¹⁰ (Kapitel 4 auf Seite 39) beruhen; zum anderen sind diese noch nicht validiert. Hierbei sind zwei Möglichkeiten denkbar: entweder die Bestätigung anhand ausgewählter Beispielgebäude mittels hinreichend vieler Varianten (u.a. Schritt (2)) oder die Validierung mit Hilfe einer statistisch ausreichenden Stichprobengröße, d.h. detaillierte Untersuchung von genügend Einzelgebäuden (Schritt (2) nicht notwendig). Hierdurch wird sich eine

¹¹⁰Die Faktoren basieren u.a. auf Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einschließlich Gutschrift; im Anhang D auf Seite 203 befinden sich LCA-Faktoren für die Anwendung ohne Recyclinggutschrift (Phase D nach DIN EN 15978 [71]).

Bandbreite der LCA-Faktoren ergeben; beispielsweise ähnlich wie bei der Baukostenermittlung im BKI [202] („von ... bis“). Für die spätere Anwendung und Beurteilung sollte die Größenordnung der Ergebnisabweichung zwischen detailliertem Verfahren und überschlägiger Ermittlung bekannt sein.

6.3.3 Gewichtsbestimmung der Sanitär-Hauptkomponenten

In *Abbildung 6.6* sind die Hauptkomponenten der Sanitärtechnik mit deren Gewicht abgebildet. Prinzipiell sollten projektspezifische Gewichtsangaben verwendet werden. Die Angaben hier dienen als Orientierungshilfe, sofern keine genaueren Daten verfügbar sind. Der graue Rahmen bildet Richt- bzw. Anhaltswerte für praxisübliche Abmessungen bzw. Größen ab. Zur Unterstützung einer computergestützten LCA-Ermittlung wurde die Gleichung aus der Regressionsanalyse – soweit möglich – mit angegeben; sofern es die Übersichtlichkeit zulässt, wurden zur besseren Nachvollziehbarkeit die jeweiligen Datenpunkte eingezeichnet¹¹¹.

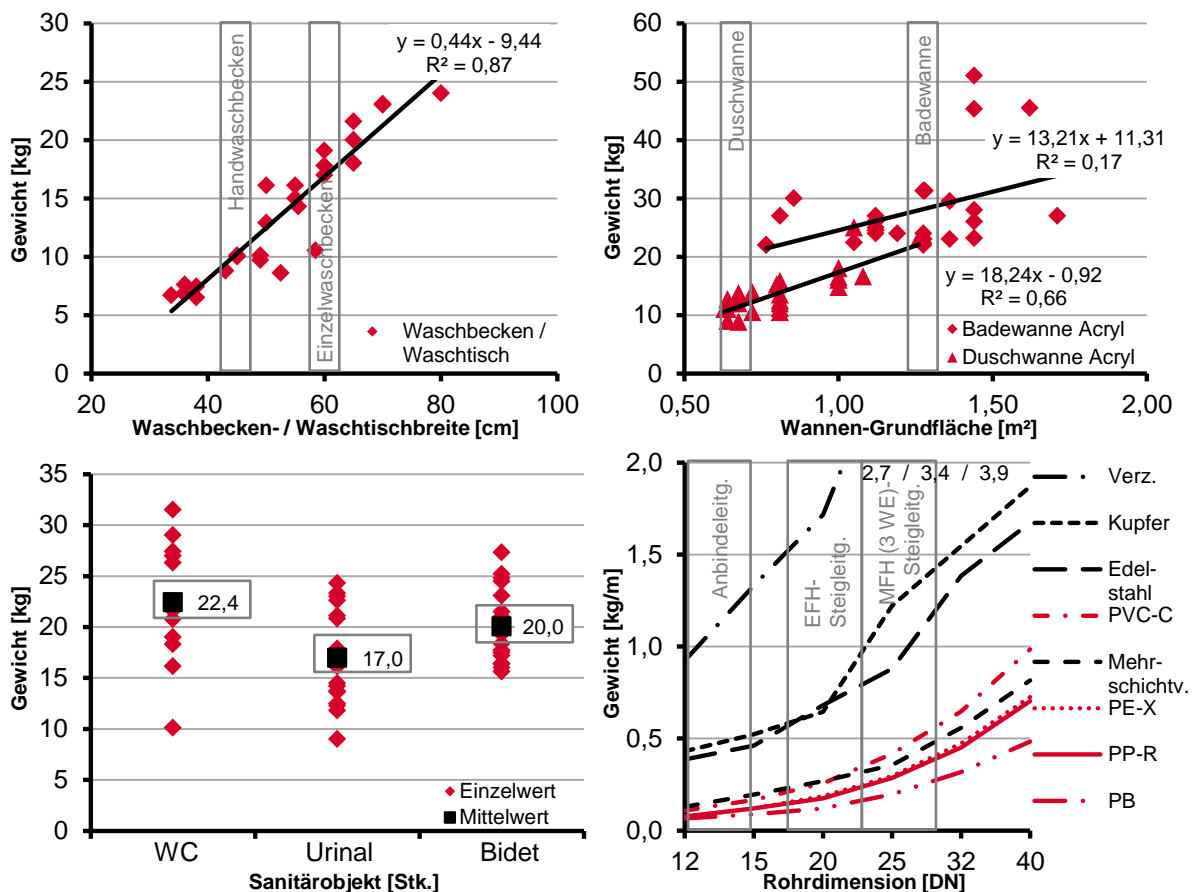


Abbildung 6.6: Gewicht der Sanitär-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Waschbecken, Wannen, Sanitärobjekte: Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, Rohrleitung: [203] (inkl. Formstücke +10 %), grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)

¹¹¹Diese Anmerkungen treffen ebenso für *Abbildung 6.8 auf Seite 134* (Heizungstechnik) und *Abbildung 6.10 auf Seite 137* (Lüftungstechnik) zu.

6.4 Heizungstechnik

6.4.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Die Vereinfachung der detaillierten LCA-Berechnung der Heizungstechnik beruht auf der beschriebenen Vorgehensweise¹¹². Bei der Heizungstechnik wurden für die LCA-Schätzung der Wärmeerzeuger, der Trinkwarmwasserspeicher und, falls vorhanden, die Solar- und PV-Module ausgewählt; diese sind im Anfangsstadium eines Projektes abschätzbar. Bei der vereinfachten LCA-Berechnung sind es zusätzlich das Fußbodenheizungsrohr bzw. die Heizkörper und bei der Sole-Wasser-Wärmepumpe die Wärmequelle (Erdkollector, Erdsonde) sowie beim Pelletheizkessel, sofern aus Holz, der Lagerraum.

Abbildung 6.7 zeigt die Ergebnisabweichung für das Einfamilienhaus. Bei 1,0 würde keine Differenz zwischen detaillierter und vereinfachter Ermittlung bestehen. Bei der LCA-Schätzung und -Berechnung bestehen vertretbare Abweichungen, z.B. ist bei der vereinfachten LCA-Berechnung (rechts) der Fehler, bei mehr als 75 % der Varianten, kleiner als $\pm 20\%$. Dieser könnte durch detaillierteres aufteilen (z.B. ohne Solar, mit PV) oder durch bündeln von Bewertungsparametern (z.B. AP, POCP) verringert werden. Es sollte jedoch die einfache – wenn auch etwas ungenauere – ökologische Ermittlung bevorzugt werden, z.B. werden bei der Schätzung (links) und dem ODP die reinen Pelletanlagen ungenau bewertet (Ausreißerwerte), jedoch ist die Schätzung mit einem LCA-Faktor möglich. Die Aussagen sind auf das Mehrfamilienhaus (Abbildung D.2 auf Seite 204) übertragbar.

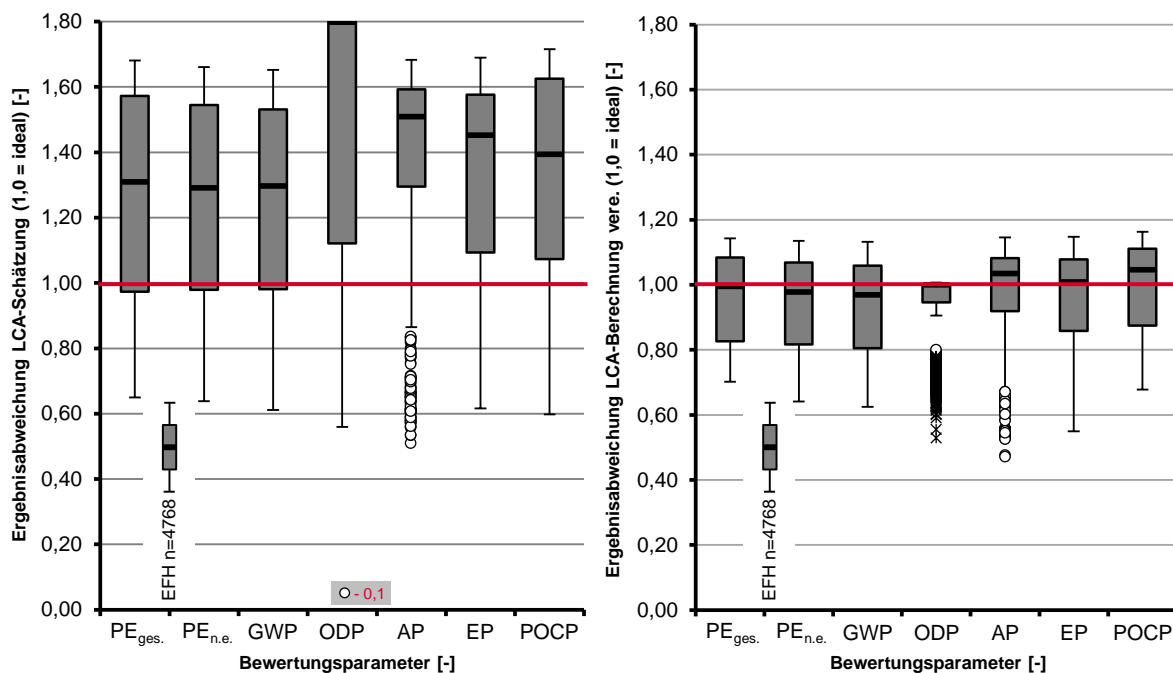


Abbildung 6.7: Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Heizungstechnik beim Einfamilienhaus

¹¹²Das Vorgehen wurde anhand der Sanitärtechnik (Kapitel 6.3 auf Seite 126) dargestellt, deshalb findet bei der Heizungs- (Kapitel 6.4) und Lüftungstechnik (Kapitel 6.5 auf Seite 135) die Ergebnisdarstellung in gebündelter Form statt.

6.4.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Die LCA-Faktoren der Heizungstechnik sind für den Praxiseinsatz in *Tabelle 6.2* ausgegeben. Diese basieren auf einer Heizungsanlage für einen KfW 40-Standard; andere Standards sind ähnlich.

Tabelle 6.2: LCA-Faktoren der Heizungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus

Phasen: A + B + C + D	Bewertungsparameter	LCA-Faktor	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,8 ^A	--	--
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,7 ^A	--	--
^A Basis: Wärmeerzeuger + Trinkwarmwasserspeicher + ggf. Solar- + PV-Modul				
LCA-Berechnung (vereinfacht)				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, AP, EP, POCP	1,2 ^{B,C,D}	ODP	1,0 ^{B,C,D}
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, AP, EP, POCP	1,2 ^{B,C,D}	ODP	1,0 ^{B,C,D}
^B Basis: Wie A + Heizungsübergabe (Fußbodenheizungsrohr oder Heizkörper)				
^C Basis: Zusätzlich zu B bei Sole-Wasser-Wärmepumpe: Erdsonde bzw. Erdkollektor (Rohr)				
^D Basis: Zusätzlich zu B bei Pelletkessel: Lagerraum aus Holz (Konstruktionsvollholz, OSB)				

6.4.3 Gewichtsbestimmung der Heizungs-Hauptkomponenten

In *Abbildung 6.8 auf der nächsten Seite* sind die Gewichtsangaben der Heizungs-Hauptkomponenten zu finden. Die Rohrleitungen sind keine Hauptkomponenten, wurden jedoch zwecks Vollständigkeit ebenso aufgeführt. Anzumerken sei, dass bei Gas-Brennwertgeräten das Gewicht ausschlaggebend ist, nicht ob diese stehend oder hängend montiert werden (Unterscheidungsmerkmal in der ÖKOBAUDAT [76]); z.B. existiert ein 15 kW-Gerät wandhängend mit 50 kg und ein bodenstehendes mit 45 kg. Ferner wurde beim Warmwasserspeicher kein genereller Zusammenhang zwischen Gewicht und Anzahl der Wärmetauscher erkannt. Die Flachheizkörperdaten beziehen sich auf eine Heizkörperlänge von 0,4 m bis 2,0 m. Auf eine Darstellung der Gewichte der PV-Module wurde verzichtet, da die Daten in der ÖKOBAUDAT [76] auf einem Typenmix basieren und pro m² ohne Referenzgewicht angegeben sind. Bei der Erdsonde existiert ein ähnlicher Datensatz (ÖKOBAUDAT [76]). Beim Erdkollektor kann, je nach Boden, von einer Soleleitungslänge von 35 m/kW_{Heizlast} bis 120 m/kW_{Heizlast} (oft PE DN 15 mit ca. 75 m/kW_{Heizlast}) ausgegangen werden. Existiert beim Pelletkessel ein Lagerraum aus Holz, sollten das Konstruktionsvollholz und die OSB-Platten in die LCA-Berechnung mit einfließen.

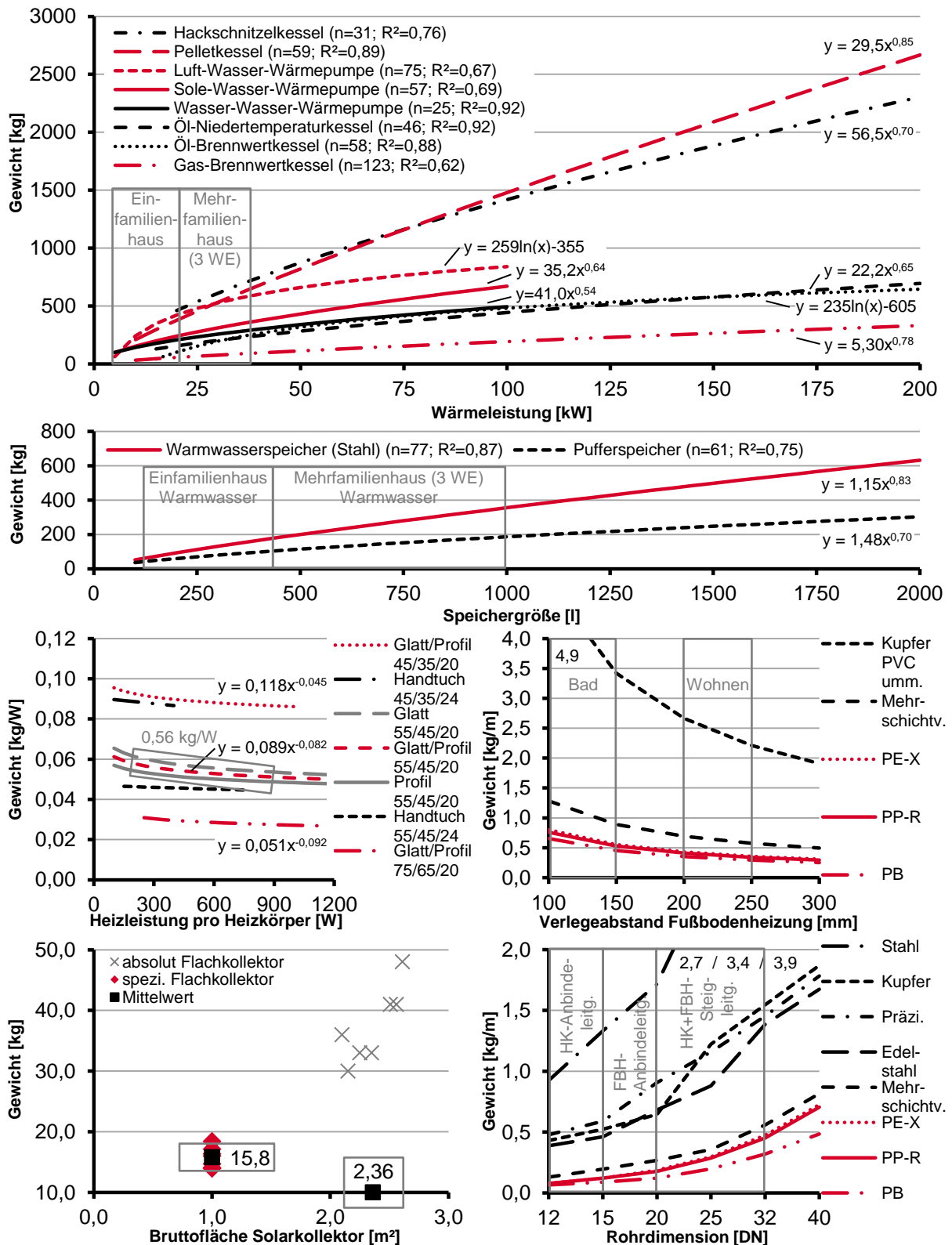


Abbildung 6.8: Gewicht der Heizungs-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte]

(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Wärmeerzeuger, Speicher, Solar-Module: Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, Rohrleitung: [203] (inkl. Formstücke + 10 %, nicht bei Fußbodenheizung, jedoch 0,88 m/m² Anbindeleitung), Flachheizkörper: [204] (Daten) und Berechnungen, grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)

6.5 Lüftungstechnik

6.5.1 Life cycle assessment-Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Die Lüftungstechnik wurde ebenfalls, ausgehend vom detaillierten Rechenverfahren vereinfacht. Als Hauptkomponenten für die LCA-Schätzung wurde das Wohnraumlüftungsgerät bestimmt. Dies basiert auf der Annahme, dass in der Vorplanung die Größe des Lüftungsgerätes abschätzbar ist. Bei der vereinfachten LCA-Berechnung sind die Hauptkomponenten das Wohnraumlüftungsgerät, der (Rohr-)Schalldämpfer und das Lüftungsrohr vom Anschluss des Luftverteilers bis zum Aus- bzw. Einlass (Anbindeleitung). *Abbildung 6.9* zeigt, dass die Abweichung – sichtbar durch kleinere „Boxen“ und Whisker – bei der LCA-Schätzung (links) gegenüber der vereinfachten LCA-Berechnung (rechts) abnimmt. Des Weiteren ist auch der konservativere Ansatz – Werte über 1,0 (links) bzw. Werte um 1,0 (rechts) – erkennbar. Dadurch, dass das Lüftungsgerät einen relativ kleinen Anteil an der Lüftungstechnik einnimmt (ca. 17% (EFH) bzw. ca. 26% (MFH) im Median), ist bei der LCA-Schätzung die Streuung erhöht; jedoch ist die Genauigkeit noch ausreichend.

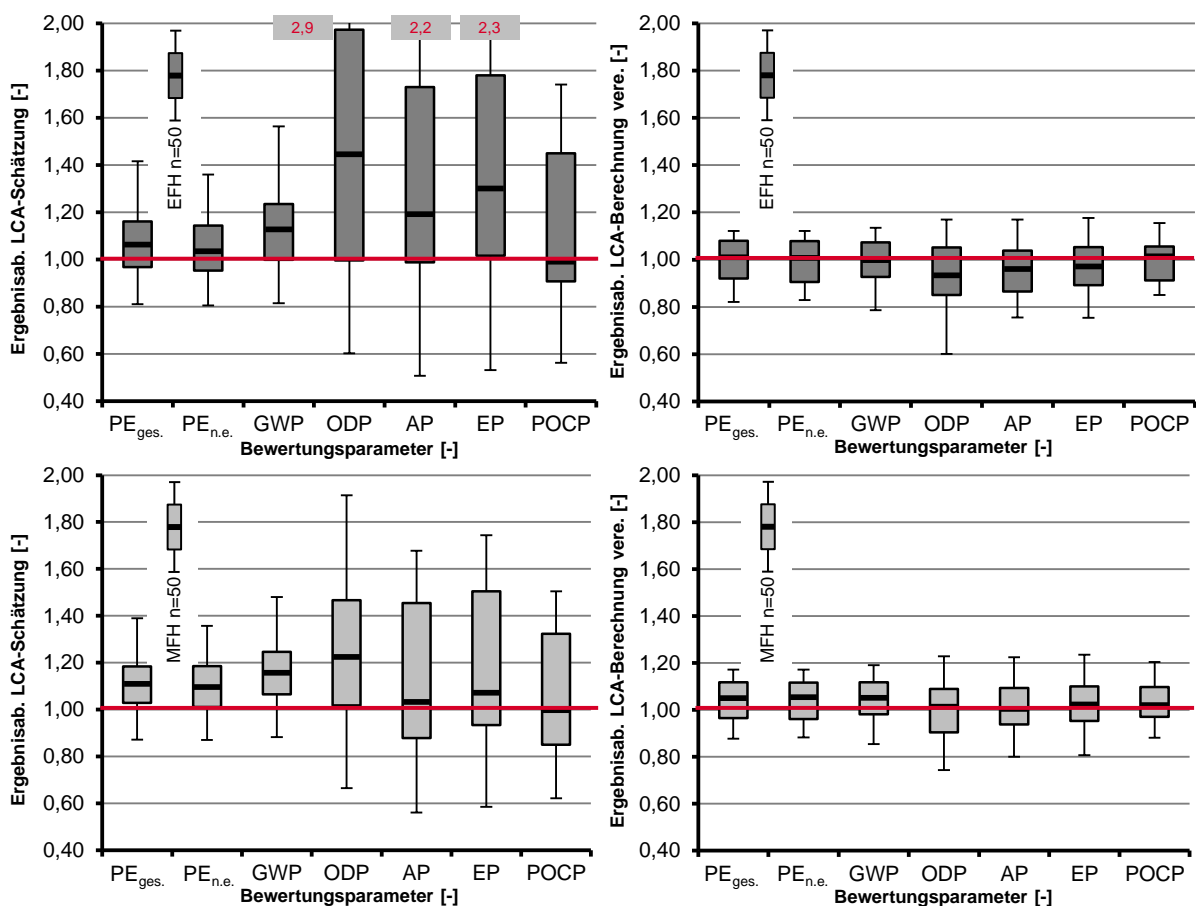


Abbildung 6.9: Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Lüftungstechnik beim Einfamilien- (oben) sowie Mehrfamilienhaus (unten)

6.5.2 Life cycle assessment-Faktoren für die -Schätzung und -Berechnung (vereinfacht)

Die unterschiedlichen Faktoren für die LCA-Schätzung und vereinfachte LCA-Berechnung werden in *Tabelle 6.3* dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass weniger LCA-Faktoren notwendig sind, um die Lüftungstechnik zu beschreiben. Ebenso ist erkennbar, dass durch die Berücksichtigung der Anschlussrohrleitung (Länge: Luftverteiler zum bzw. vom Auslass) und des Schalldämpfers bei der vereinfachten LCA-Berechnung, der LCA-Faktor auffällig sinkt; dies ist auf den hohen Anteil der Lüftungs-Hauptkomponenten an den potenziellen Umweltauswirkungen zurückzuführen (IQR beim EFH: 65 % bis 83 % bzw. beim MFH: 60 % bis 74 % je Bewertungsparameter¹¹³). Zur Erinnerung: Bei einem Wert von 1,0 würden die Hauptkomponenten vollständig das System repräsentieren.¹¹⁴

Tabelle 6.3: LCA-Faktoren der Lüftungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus

Phasen: A + B + C + D	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung		
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	6,8 ^A
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	4,2 ^A
^A Basis: Wohnraumlüftungsgerät (EFH: 1x, MFH: je Wohnung 1x)		
LCA-Berechnung (vereinfacht)		
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,3 ^B
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,5 ^B
^B Basis: Wie A + (Rohr-)Schalldämpfer + Anbindeleitung (PE flexibel, PP flexibel, PE, PP, Verzinkt) [Anbindeleitung = vom Luftverteiler zum Auslass (DN 63, DN 75, DN 90)]		

6.5.3 Gewichtsbestimmung der Lüftungs-Hauptkomponenten

Die Hauptkomponenten der Lüftungstechnik und deren Gewicht sind in *Abbildung 6.10 auf der nächsten Seite* dargestellt. Da derzeit in der ÖKOBAUDAT [76] kein Wohnraumlüftungsgerät vorhanden ist wurden die Materialien, nach Auskünften von verschiedenen Herstellerfirmen, abgeschätzt und bilanziert. Die Anhaltswerte beziehen sich auf zentrale Wohnraumlüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung mit Einzelrohrverlegung je Wohnung bzw. Einfamilienhaus.

¹¹³Siehe hierzu auch *Abbildung 5.22 auf Seite 102*.

¹¹⁴Auf eine detaillierte Untersuchung der LCA-Faktoren der Elektrotechnik wird verzichtet, da nur eine Elektrovariante je Gebäude betrachtet wurde. Im Kapitel *5.3.5 auf Seite 103* wurde aufgezeigt, dass die dreiadrigen Kabel für Beleuchtung und Steckdosen ca. 2/3 der potenziellen Umweltauswirkungen der Elektrotechnik ausmachen; folglich würde sich der LCA-Faktor um 1,5 bewegen. Anzumerken sei, dass in zukünftigen Arbeiten der Zuschlagsfaktor wie auch die Gewichtsbestimmung der Hauptkomponenten detailliert untersucht werden sollte.

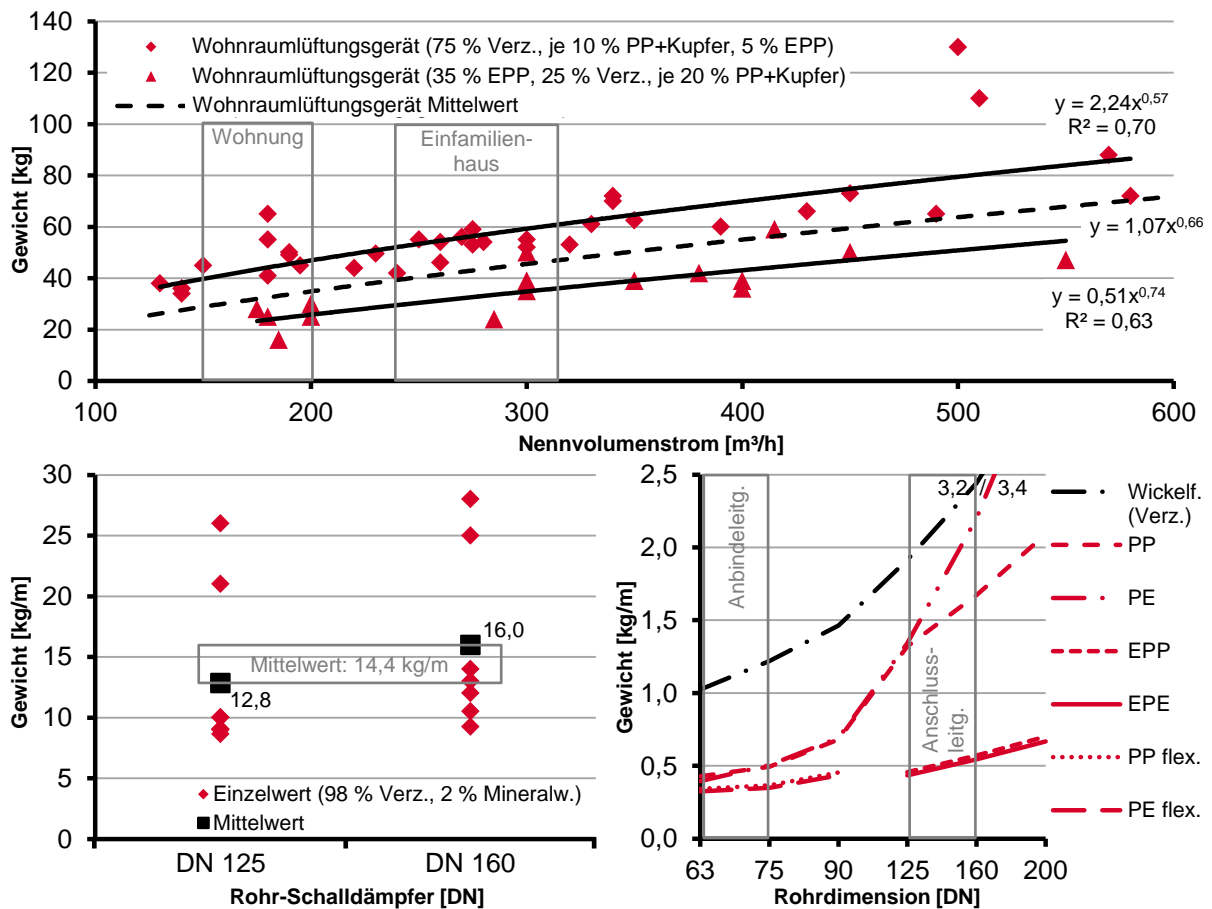


Abbildung 6.10: Gewicht der Lüftungs-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Wohnraumlüftungsgerät, Schalldämpfer, Rohrleitung (inkl. Formstücke +10 %, flexibel +5 %): Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)

6.6 Kurzzusammenfassung

- 6.1 Ökologische Betrachtung von Gebäuden:

⇒ Die LCA-Ermittlung (u.a. mit LCA-Schätzung, vereinfachter u. detaillierter LCA-Berechnung) stellt eine Erweiterung der ökologischen Begrifflichkeiten dar; hiermit ist eine ganzheitliche Beschreibung über alle HOAI-Leistungsphasen möglich.

- 6.2 Gebäudetechnik:

⇒ Die Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten ökologischen Berechnung durch eine LCA-Schätzung und vereinfachte LCA-Berechnung beruht auf zehn Schritten; durch das gewählte Vorgehen beinhaltet die LCA-Schätzung größere Toleranzen sowie Unsicherheiten und stellt als Anreiz die Ergebnisse konservativer dar als die vereinfachte LCA-Berechnung.

- **6.3 Sanitärtechnik:**

⇒ Detaillierte Erläuterung der Vorgehensweise bzw. der zehn Schritte einschließlich Berechnung der LCA-Faktoren zuzüglich der Bereitstellung von Gewichtsangaben für die Hauptkomponenten; LCA-Schätzung (Hauptkomponenten): Sanitärkeramik, Wannen; vereinfachte LCA-Berechnung (Hauptkomponenten): zusätzlich Wasserrohrleitung, ggf. SML-Abwasserrohrleitung.

- **6.4 Heizungstechnik:**

⇒ Komprimierte Darstellung der Ergebnisabweichung und Ermittlung der LCA-Faktoren inklusive Abbildungen für die Gewichtsermittlung der Hauptkomponenten; LCA-Schätzung (Hauptkomponenten): Wärmeerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher, ggf. Solar-Modul bzw. PV-Modul; vereinfachte LCA-Berechnung (Hauptkomponenten): zusätzlich Wärmeübergabe (Heizkörper oder Fußbodenheizungsrohr), ggf. Wärmequelle bei Sole-Wasser-Wärmepumpe bzw. Schrägböden und deren Tragkonstruktion aus Holz im Lagerraum beim Pelletheizkessel.

- **6.5 Lüftungstechnik:**

⇒ Zusammengefasste Wiedergabe der Abweichung und der LCA-Faktoren einschließlich der Darstellung der Hauptkomponentengewichte; LCA-Schätzung (Hauptkomponenten): Wohnraumlüftungsgerät; vereinfachte LCA-Berechnung (Hauptkomponenten): zusätzlich (Rohr-)Schalldämpfer, Abbindeleitung.

► **Eine LCA-Ermittlung der Gebäudetechnik ist mittels LCA-Schätzung bzw. vereinfachter LCA-Berechnung – basierend auf der vorgestellten Vorgehensweise – möglich; eine angemessene Genauigkeit und ein wesentlich geringerer Aufwand als beim detaillierten Berechnungsverfahren sind gegeben.**

KAPITEL 7

Resümee

7.1 Bedeutung für die Baubranche – derzeit und zukünftig

Das derzeit meist angewandte Kriterium welche Baukomponenten und -materialien von der ökologischen Betrachtung ausgeschlossen werden bzw. das Abschneidekriterium von 1 % der Masse am Gesamtsystem Gebäude ist bei der Gebäudetechnik nicht geeignet. Es wird in den Zertifizierungssystemen propagiert, dass sofern der Einfluss bei der Masse oder anderen Bewertungsparametern $> 1\%$ ist, diese Materialien Berücksichtigung finden sollen; des Weiteren, dass maximal 5 % der Materialmasse bzw. der potenziellen Umweltauswirkungen vernachlässigt werden darf. Wie ist es jedoch möglich, all diese Kriterien zu erfüllen ohne vorher alles genau zu berechnen? Die Masse kann praxisnah abgeschätzt werden, jedoch sind bei der Abschätzung der umweltbezogenen Auswirkungen selbst LCA-Experten überfordert. Deshalb findet eine Einschätzung meist nur anhand der Masse statt und die Gebäudetechnik wird demnach (oftmals) vernachlässigt. In dieser Arbeit wurde die Gebäudetechnik detailliert betrachtet und der teilweise große Einfluss auf die potenziellen Umweltauswirkungen des Bauwerks aufgezeigt. Aus diesem Grund muss die Gebäudetechnik bei ökologischen Betrachtungen Berücksichtigung finden.

Die Arbeit hat gezeigt, dass eine große Bandbreite hinsichtlich der umweltbezogenen Auswirkungen existiert. Deshalb ist es wichtig, die eingesetzten Ressourcen kritisch zu hinterfragen. Dies kann bereits jetzt in der Baupraxis bei den eingesetzten Mengen (z.B. Kann durch sinnvolle Leitungsführung Rohrleitung eingespart werden?) und Massen (z.B. Existiert ein Waschbecken mit geringerem Gewicht?) beginnen; geht über die exakte Berechnung der Baukomponenten und keine Abschätzung mittels Erfahrungswerten weiter (z.B. Ist eine Heizkörperdimension kleiner nach Norm möglich?); und endet zukünftig bei der ökologischen Betrachtung aller Baukomponenten (z.B. Welche Wand ist aus ökologischer Sicht für diese Anwendung die geeignetste?). Dies bedeutet für die Baupraxis, dass es derzeit und künftig unabdingbar ist, den Einfluss der Baumaterialien bzw. die Eingebundene Energie / Emissionen ökologisch zu berücksichtigen – und das nicht nur auf freiwilliger Basis.

Bei der Gebäudetechnik sollten alle Gewerke ökologisch berücksichtigt werden; alle außer die Schwachstromtechnik und Gebäudeautomation. Die Argumentation, dass die Sanitär- und Elektrotechnik „sowieso“ vorhanden sind, unabhängig vom Gebäudetyp, und deshalb nicht betrachtet werden müssen, führt indirekt zur Unterschlagung des Optimierungspotenzials dieser Sparten.

Die Veränderung des Strom-Mixes zu mehr erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende, hat Einfluss auf die Baubranche. Zum einen werden die Eingebundene Energie bzw. Emissionen (EE) von Baustoffen sinken; zum anderen werden Wärmepumpensysteme ökologisch bevorzugt und Direkt-Stromheizsysteme eine ernstzunehmende Alternative. Beide wirken sich negativ auf die Netzstabilität aus, deshalb werden Speichersysteme an Bedeutung gewinnen. All diese Faktoren werden den derzeitigen Wärmemix und ebenso die Berechnungsmethoden verändern.

Der enorme Einfluss des Bauwerks auf die ökologische Gesamtbilanz wurde dargestellt: dieser wird zukünftig weiter ansteigen. Dies beruht zum einen auf der Tatsache, dass die Energiegewinnung durch gebäudeintegrierte Systeme zunehmen wird; zum anderen werden energieeffizientere Geräte und LED-Beleuchtung den elektrischen Verbrauch reduzieren. Durch beides sinken die potenziellen Umweltauswirkungen im Betrieb, und folglich nimmt die Wichtigkeit des Bauwerks bzw. der EE im Lebenszyklus zu. Angesichts der zunehmenden Energieproduktion und -nutzung direkt am Gebäude wird die Bedeutung der Gebäudetechnik weiter steigen. Infolgedessen muss die Baukonstruktion und v.a. die Gebäudetechnik bei der ökologischen Betrachtung berücksichtigt werden.

Es hat sich gezeigt, dass nicht nur der Energieverbrauch im Betrieb entscheidend ist, sondern der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden muss. Dies sollte bei unterschiedlichen Gebäudekonzepten bzw. dem Niedrigstenergiestandard berücksichtigt werden. So wurde beispielsweise aufgezeigt, dass Aktivtechnik (u.a. Lüftungs-, PV-Anlage) eine erhöhte Ressourcenbeanspruchung in der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung verursacht, jedoch in der Betriebsphase die potenziellen Umweltbelastungen durch die Energieeinsparung bzw. -produktion reduziert und ggf. sogar kompensiert. Des Weiteren sollte bei der Gebäudetechnik zukünftig die Betriebsoptimierung inklusive Energieproduktion fokussiert werden, ohne jedoch deren Baukomponenten zu vernachlässigen. Die Baumaterialien müssen künftig bei der Baukonstruktion ökologisch betrachtet werden. Bei beiden sollten regenerative Energiesysteme wie auch Baumaterialien bevorzugt werden.

Durch die zunehmende Urbanisierung wird sich die derzeitige Systemgrenze Einzelgebäude auf ganze Quartiere bzw. Siedlungen und auf weitere Sektoren (z.B. Mobilität) erweitern. Dies führt automatisch zu einer komplexeren Betrachtung, birgt jedoch enorme Synergieeffekte. Herausfordernd ist hierbei die exakte Betrachtung der Betriebsphase inklusive „Energieverschiebung“ und die detaillierte Analyse des Bauwerks „Energiesystem“ einschließlich Infrastruktur. Dies bedeutet, dass derzeitige Energiekonzepte sich wandeln zu „Ressourcen- und Umweltkonzepten“ bzw. „Lebenszykluskonzepten“, die das Gebäude bzw. Quartier ganzheitlich betrachten.

Ein „grober Daumenwert“ für die Baupraxis bezüglich der ökologischen Ermittlung der Gebäudetechnik kann mit dem Faktor 2 (Heizungstechnik) bzw. 5 (Sanitär- und Lüftungstechnik) angeführt werden, d.h. die ökologischen Auswirkungen der Hauptkomponenten (Sanitärtechnik: Keramik, Wannen; Heizungstechnik: Wärmeerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher, ggf. Solar- / PV-Modul; Lüftungstechnik: Lüftungsgerät) einschließlich des multiplizierten LCA-Faktors ergibt die sehr überschlägig ermittelten potenziellen Umweltauswirkungen dieser Gewerke. Diese weitere Vereinfachung führt allerdings zu einer wesentlich größeren Streubreite sowie ökologisch ungünstigeren Ergebnissen und sollte deshalb nur zur überschlägigen Abschätzung angewandt werden.

Ein eindeutig „bestes“ oder „schlechtestes“ System – egal ob Baukonstruktion oder Gebäudetechnik – konnte nicht identifiziert werden; folglich ist die endgültige Auswahl einerseits von den Berechnungsgrundlagen und andererseits von den gesetzten (Bewertungs-)Schwerpunkten abhängig. Allerdings ist hierbei die transparente, faire und neutrale Beurteilung sowie Beratung aller Baubeteiligten, v.a. im Hinblick auf die speziellen Bedürfnisse des Nutzers äußerst wichtig. Im Idealfall sollten in die Entscheidungen neben ökologischen, auch ökonomische und sozio-kulturelle Kriterien mit einfließen.

7.2 Diskussion

Ein allgemeiner Diskussionspunkt beim LCA ist die Systemgrenze. Wie im Kapitel 4.1 auf Seite 39 beschrieben, wurde die Gebäudeaußenkante gewählt. Hierdurch wird die Infrastruktur der Sanitär- und Elektrotechnik vernachlässigt. Dies hat v.a. Auswirkungen auf die Bilanzierung der PV-Anlage, da hier die potenziellen Umweltauswirkungen – da innerhalb der Systemgrenze – berücksichtigt werden. Im Extremfall, z.B. bei einem autarken Gebäude, wird die Infrastruktur entlastet, allerdings werden durch die Technik entstehende Belastungen dem Gebäude zugerechnet. Diese Ungenauigkeit wird als annehmbar erachtet, da dies derzeit das übliche Bilanzierungsverfahren darstellt.

Aufgrund der Tatsache, dass es derzeit an allgemein anerkannten Vorgaben bzw. *best practices* hinsichtlich der ökologischen Betrachtung von Gebäuden mangelt, mussten Annahmen getroffen werden. Dies betrifft u.a. die Flächenermittlung, Dichte und Wärmeleitfähigkeit, funktionelle Einheit (Betrachtungszeitraum und Bezugsfläche), Instandhaltungszyklen sowie Entsorgungswege einschließlich des Recyclingpotenzials. Dementsprechend unterscheiden sich die Rahmenbedingungen von anderen Untersuchungen und ein konkreter Vergleich mit deren Ergebnisse ist schwer möglich. Allerdings kann dies derzeit als generelle Schwachstelle des LCA erachtet werden.

Es wurde versucht, die einschlägigen LCA-Normen einzuhalten. Allerdings wurden zum Beispiel nicht alle Bewertungsparameter betrachtet oder die Gutschrift (Phase D) in die Gesamtberechnung integriert. Diese Einschränkungen werden aufgrund der übersichtlichen Darstellung und ganzheitlichen Betrachtungsweise als akzeptabel erachtet. Des Weiteren fehlt für eine einheitliche Berechnung ein Leitfaden bzw. Musterberechnungen; deshalb wurden alle Daten möglichst transparent dokumentiert (Kapitel 4 auf Seite 39 und Anhang B auf Seite 179).

Ein weiterer Kritikpunkt ist die Datenqualität. Zum einen konnten einige Variationen aufgrund fehlender Daten nicht vollzogen werden (z.B. emaillierte Wannen, verschiedene PV-Module) oder es mussten Materialien vernachlässigt werden (z.B. Glykol für die Solaranlage) oder nicht durchschnittliche bzw. ähnliche Baustoffdatensätze verwendet werden (z.B. Mauerziegel nicht generisch, Beton C25/30 mit generischem Datensatz C30/37); zum anderen sind in der ÖKOBAUDAT [76] nicht alle Datensätze nachvollziehbar beschrieben; hierdurch mussten Annahmen getroffen werden (z.B. Wärmepumpen-Datensatz) – prinzipiell sollte die „grobe“ Sachbilanz aller Datensätze veröffentlicht werden. Derzeit erfahren Baustoffe ein Downcycling und weniger ein Recycling, z.B. mineralische Baustoffe als Füllmaterial. Zudem sind bei einigen Materialien die Entsorgungswege noch in der Pilotphase (z.B. Steine mit Wärmedämmfüllung, PV-Module); demnach sollte grundsätzlich die Entsorgung einschließlich

Gutschrift kritisch betrachtet, aber im Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft mit einbezogen werden. Die Berechnungsgrundlagen sind im Kapitel 4 auf Seite 39 ausführlich dargestellt; somit sind die Einschränkungen nachvollziehbar und können bei zukünftig besserer Datenlage eliminiert werden.

Beim Bauwerk wurden die überwiegend verwendeten Systeme und Materialien betrachtet. Die Baukonstruktion und Gebäudetechnik ist sehr vielfältig, sodass eine allumfassende Bearbeitung nicht gegeben ist. Deshalb können zukünftig derzeitige Nischenprodukte oder neuartige Technologien bzw. Materialien bilanziert werden, wie beispielsweise Gas-Wärmepumpen, Luftheizsysteme, Röhrenkollektoren oder Brennstoffzellen. Gleiches gilt für die Baukonstruktion, hier können beispielhaft Hanfdämmung, Vollholzbauweise oder *phase change material (PCM)* ökologisch betrachtet werden. Ferner sind bei der Gebäudetechnik unterschiedliche Systeme oder Rohrverlegearten, z.B. Speicher-Durchflussprinzip bzw. Frischwassermodule oder Ringleitung (Sanitärtechnik) bzw. T-Stück-Installation (Lüftungstechnik), nicht betrachtet worden. Trotz all dieser Vernachlässigungen haben die Untersuchungen erstmalig gezeigt, dass es wichtig ist, die Gebäudetechnik detailliert zu untersuchen; diese kann einen Einfluss auf die potenziellen Umweltauswirkungen eines Gebäudes haben.

Die hier verwendeten Wohngebäude bilden den deutschen Durchschnitt ab. Hierdurch kann es in Form der Abmessung und Geometrie zu Abweichungen kommen. Ebenso bei den Ausstattungsvarianten der Sanitär- und Elektrotechnik oder den Leitungslängen. Deshalb sei hier anzumerken, dass die in dieser Arbeit bilanzierten Daten Durchschnitts- und keine Extremwerte abbilden. Trotzdem ist die Vorgehensweise auf andere Gebäude – ebenso Nicht-Wohngebäude – übertragbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass trotz aller Annahmen und Vernachlässigungen die ökologische Analyse einen eigenen wissenschaftlichen Beitrag zur genaueren und vereinfachten ökologischen Beurteilung, v.a. der Gebäudetechnik von Niedrigstenergiegebäuden leistet. Auf den Erkenntnissen und der Vorgehensweise dieser Dissertation kann aufgebaut werden.

7.3 Kurzzusammenfassung

- 7.1 Bedeutung für die Baubranche – derzeit und zukünftig:
 - ⇒ Die Baubranche kann (jetzt und zukünftig) mit der ökologischen Betrachtung von Gebäuden einschließlich der Gebäudetechnik ihren Teil zur „Ressourcenwende“ und – viel wichtiger – zum Schutz der Umwelt beitragen.
- 7.2 Diskussion:
 - ⇒ Die ökologische Analyse leistet trotz aller Einschränkungen, v.a. für die Gebäudetechnik erstmalig einen wissenschaftlichen Beitrag, diese vereinfacht zu ermitteln.

► **Die ökologische und lebenszyklusorientierte Betrachtung von Gebäuden wird zukünftig ein wichtiger Planungsbestandteil werden.**

KAPITEL 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden über den kompletten Lebenszyklus; hierbei wurde die Gebäudehülle und besonders die Gebäudetechnik betrachtet. Die Hauptidee ist, dass die derzeit aufwendige und meist vernachlässigte Betrachtung der umweltbezogenen Qualität der Gebäudetechnik einen wesentlichen Einfluss auf das Bauwerk (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) eines Gebäudes im Lebenszyklus haben kann; jedoch ist es durch eine Parametrisierung weniger Leitpositionen möglich, die ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnikkomponenten hinreichend genau zu ermitteln.

Die Ressourcenbeanspruchung und die hieraus folgenden Einflüsse auf die Umwelt sind gegenwärtig zu hoch. Hierbei binden und verbrauchen Gebäude erhebliche Ressourcen (z.B. Primärenergie ($PE_{ges.}$)) und verursachen dadurch enorme potenzielle Umweltauswirkungen (z.B. Treibhauspotenzial (GWP)). Durch die Reduzierung des Energiebedarfs im Gebäudebetrieb steigt die Bedeutung der übrigen Lebenszyklusphasen, die derzeit meist vernachlässigt werden. \Rightarrow vgl. Kapitel 1

Die Analyse der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden ist möglich, jedoch derzeit vor allem für die Gebäudetechnik zu aufwendig. Das *life cycle assessment* (LCA = Ökobilanz) ist inzwischen eine genormte Berechnungsmethode für die Beurteilung der ökologischen Eigenschaften von verschiedenen Wirtschaftsgütern. Mittels eines LCA werden die Inanspruchnahme von Ressourcen und die hieraus resultierenden potenziellen Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus – von Herstellung über Nutzung (Betrieb und Instandhaltung) bis hin zur Entsorgung einschließlich Recyclingpotenzial – mittels verschiedener energetischer und umweltbezogener Parameter bewertet. \Rightarrow vgl. Kapitel 2

Die Metaanalyse über Niedrigstenergiewohngebäude hat eine Tendenz zu mehr Eingebundener Energie (= Lebenszyklus-Energie - Betriebsbedingter Energie) bei abfallendem Gesamtprimärenergieinhalt und Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus gezeigt. Überdies verschiebt sich das Verhältnis von Betriebsbedingter Energie (BE) zu Eingebundener Energie (EE) von ca. 5:1 (Standardgebäude) zu ca. 1:1, d.h. bei den Niedrigstenergiegebäuden ($PE_{ges.LZ} < 150 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) sind der Betrieb und das Bauwerk über den Lebenszyklus in etwa gleichbedeutend. Eine weitere Erkenntnis

der Fallstudienanalyse ist, dass aufgrund fehlender klarer Richtlinien der neutrale Vergleich erschwert und somit ein Erkenntnisgewinn hinsichtlich ökologischerer Gebäude gehemmt wird. Ferner wird die Gebäudetechnik nur zu 14 % (Übergabe) bzw. 43 % (Erzeugung) berücksichtigt. ⇒ vgl. Kapitel 3

Im Rahmen der Arbeit wurde jeweils ein reales Ein- und Mehrfamilienhaus bei sechs Baustandards mittels der LCA-Methode (50 Jahre, ÖKOBAUDAT 2016-I) über die Herstellungs-, Nutzungs- (Instandhaltung und Energieverbrauch im Betrieb) sowie Entsorgungsphase inklusive Recyclingpotenzial analysiert – Phasen: A1-A3, B2-B4, C3-C4, D. Hierbei wurde die Baukonstruktion (z.B. Außenwand gegen Außenluft mit 288 Varianten) und die Gebäudetechnik (z.B. Heizungstechnik mit 4768 Varianten) variiert. Das Standardgebäude, welches die üblichen Baumaterialien und das gebräuchlichste Anlagensystem in Deutschland widerspiegelt, diente bei der Analyse als Vergleich. ⇒ vgl. Kapitel 4

Die Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden zeigt, dass künftig eine Betrachtung des Gebäudelebenszyklus einschließlich der Gebäudetechnik notwendig ist. Uningeschränkt über alle Bewertungsparameter kann keine Bauweise und Beheizungsart bevorzugt werden; allerdings ist die Holzrahmenbauweise tendenziell ökologischer als die Massivbauweise und Technikvarianten mit Aktivtechnik (z.B. Lüftungs- und vor allem PV-Anlage) sind vorteilhafter. Des Weiteren sind kleinteilige Bauteile, weder bei der Gebäudetechnik noch bei der Baukonstruktion generell vernachlässigbar, beispielsweise bei den energetisch und statisch irrelevanten Baukomponenten (z.B. Farbe) liegt der Anteil bei der Außenwand je nach Bewertungsparameter und Variante zwischen 2 % und 45 %. Prinzipiell weist die Energieerzeugung mit Wärmeverteilung und -übergabe, d.h. Heizungstechnik vor allem mit PV-Anlage die größten umweltbezogenen Auswirkungen innerhalb der Gebäudetechnik auf (20 % bis 80 % ohne bzw. 75 % bis 90 % mit PV). Es folgen die Sanitärtechnik (5 % bis 60 %) sowie die Lüftungs- und Elektrotechnik (je 2 % bis 25 %). Diese wie ggf. die Fördertechnik (10 % bis 60 %) sind beim LCA zu berücksichtigen; die Schwachstromtechnik und Gebäudeautomation von Wohngebäuden können übergangen werden – je nach Bewertungsparameter zwischen 0 % und 4 % (an der Gebäudetechnik). Ebenso wurde aufgezeigt, dass der derzeitige 10 %-ige Zuschlag beim vereinfachten Verfahren bei den deutschen Zertifizierungssystemen für die Gebäudetechnik viel zu gering sein kann. Pauschal bewegt sich der Gebäudetechnikanteil um ca. 10 % bis 25 %, wobei bis zu 48 % (ohne Ozonabbaupotenzial (ODP)) am Bauwerk möglich sind. Lebenszyklusorientiert betrachtet, d.h. über Herstellung, Nutzung (Betrieb und Instandhaltung) sowie Entsorgung einschließlich Recyclinggutschrift ist bei der Gebäudetechnik der Energieverbrauch und ggf. die -produktion im Betrieb wichtiger als die eingesetzten Materialien bzw. die Eingebundene Energie / Emissionen – außer beim ODP. Ferner sind das Bauwerk (Baukonstruktion sowie Gebäudetechnik) und der Haushaltsstrom im Lebenszyklus im Hinblick auf die ökologischen Eigenschaften bedeutsam, je nach Rahmenbedingung ist ein Anteil zwischen 40 % und 90 % möglich; somit müssen künftig Niedrigstenergiewohngebäude ganzheitlich betrachtet werden. ⇒ vgl. Kapitel 5

Die Bestimmung der potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik ist mittels der LCA-Schätzung bzw. vereinfachten LCA-Berechnung bei ausreichender Ergebnisgenauigkeit und bedeutender Aufwandsreduktion möglich. Die zehn maßgeblichen Schritte zu einer fundierten LCA-Schätzung bzw. vereinfachten LCA-Berechnung wurden generell und ausführlich anhand eines Beispiels beschrieben. Durch die gewählte Vorgehensweise soll ein Anreiz geschaffen werden, durch

akzeptablen Mehraufwand bei der vereinfachten LCA-Berechnung genauere Ergebnisse gegenüber der LCA-Schätzung zu erhalten; infolgedessen sind die LCA-Schätzungsergebnisse konservativer als die des vereinfachten Verfahrens. Ferner wurden verschiedene LCA-Faktoren (Sanitär-, Heizungs-, Lüftungstechnik) mit und ohne Gutschrift (Phase D nach DIN EN 15978 [71]) für das Ein- und Mehrfamilienhaus gebildet und die Ergebnisabweichung zum detaillierten Berechnungsverfahren aufgezeigt sowie Gewichtsangaben der Hauptkomponenten bereitgestellt; folglich können die umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik praxisnah ermittelt werden. ⇒ vgl. Kapitel 6

Die Baubranche kann und muss einen Beitrag zu ökologischeren Gebäuden und somit zur Ressourcen- und Umweltschonung leisten. Dies kann jetzt mit einer Planung, welche die Ressourceneinsparung fokussiert, beginnen (z.B. keine überdimensionierten Anlagen) und mit der Berechnung bzw. Optimierung der umweltbezogenen Qualität der Baukomponenten weitergeführt werden. ⇒ vgl. Kapitel 7

Beantwortung der Forschungsfragen

- *Welche Baukonstruktionsbauteile verursachen den größten Energieverbrauch bzw. die meisten Emissionen im Wohngebäudelebenszyklus bei verschiedenen Niedrigstenergiestandards?*

⇒ Die Decken und Außenwände gegen Außenluft verursachen über alle Baustandards die größten umweltbezogenen Auswirkungen, z.B. KfW 40-Einfamilienhaus: 11 % bis 78 % (ohne ODP); generell sind alle Bauteile der Baukonstruktion zu beachten, außer die Türen (max. 2 % (ohne ODP)). Mit größer werdendem Gebäudetyp nimmt die Wichtigkeit der Außenwand ab, ebenso mit fallendem Energiestandard (z.B. GWP: KfW 40-Einfamilienhaus max. 39 % bzw. KfW 70-Einfamilienhaus max. 36 %) – umgekehrt bei der Decke.

- *Welche Baukomponenten der Gebäudetechnik sind bei der Betrachtung der ökologischen Eigenschaften die Leitpositionen bzw. Hauptverursacher des Ressourcenverbrauchs und der damit einhergehenden potenziellen Umweltauswirkungen?*

⇒ Hauptverursacher der Gebäudetechnik [Anteil der Hauptkomponenten am Gewerk]:

- * Sanitärtechnik: Sanitärkeramik, Wannen und Wasserrohrleitungen [25 % bis 60 %];
- * Heizungstechnik: Wärmeerzeuger einschließlich Solar- bzw. PV-Modul, Trinkwarmwasserspeicher und Wärmeübergabe (Heizkörper oder Fußbodenheizungsrohr) [60 % bis 95 %];
- * Lüftungstechnik: Wohnraumlüftungsgerät, (Rohr-)Schalldämpfer und Anbindeluftleitung [60 % bis 85 %];
- * Elektrotechnik: dreiadrige Kabel für Beleuchtung und Steckdosen [60 % bis 70 %].

- *Wie hoch ist der Einfluss der Gebäudetechnik auf die ökologischen Eigenschaften des Bauwerks in Niedrigstenergiebauweise?*

⇒ Am Bauwerk kann die gesamte Gebäudetechnik je nach bilanzierter Variante und Bewertungsparameter einen bedeutenden Anteil haben; beispielsweise beim KfW 40-Ein-

familienhaus zwischen 2 % und 26 % (ohne Solar- / PV-Anlage) bzw. 48 % (mit Solar- und / oder PV-Anlage) – beim Ozonabbaupotenzial (ODP) sogar bis 100 %. Bei noch höherem energetischen Gebäudestandard sowie beim Mehrfamilienhaus sind die Prozentwerte etwas geringer, z.B. um ca. 3 % bis 5 % beim Mehrfamilienhaus; folglich immer noch nennenswert und nicht zu vernachlässigen bzw. zu groß um dieses Optimierungspotenzial der umweltbezogenen Auswirkungen – wie derzeit üblich – außer Acht zu lassen.

- *Wie stellt sich die Verteilung zwischen dem Bauwerk eines Wohngebäudes und dem Gebäudebetrieb bei unterschiedlichen energetischen Bauniveaus dar?*

⇒ Die Verteilung zwischen Bauwerk und Betrieb sowie das Optimum bezüglich der potenziellen Umweltauswirkungen sind in erster Linie abhängig vom Berechnungsverfahren des Betriebs und vom betrachteten Bewertungsparameter. Durch diese Gegebenheit ergibt sich eine große Bandbreite, beispielsweise kann das Bauwerk (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) bzw. die EE im KfW 40-Standard zwischen 13 % und 84 % im Lebenszyklus eines Einfamilienhauses ausmachen; bzw. das Optimum bewegt sich um den KfW 40-Standard bis hin zu einem Gebäude mit praktisch minimal möglichen U-Werten.

Zusammenfassend stellt diese Dissertation Ergebnisse der Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden und eine Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten Berechnung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik zur Verfügung. Folglich kann die Hypothese – *Betrachtung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik durch die Parametrisierung von wenigen Leitpositionen vereinfachen* – bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen für die Wissenschaft auf, dass mittels der gezeigten Vorgehensweise ein Lösungsansatz für die Vereinfachung des LCA vorhanden ist; des Weiteren für die politischen Entscheidungsträger, dass Gebäude über den energetischen Gebäudestandard hinaus auch ganzheitliche Zielsetzungen im Hinblick auf die ökologische Qualität erfüllen sollten; und zuletzt für die Planung, dass erste Richtwerte für die Ermittlung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik vorliegen.

Die zentralen Ergebnisse und Erkenntnisse der Dissertation sind:

- ▶ **Gebäudetechnik muss bei der Betrachtung der ökologischen Eigenschaften berücksichtigt werden.**
- ▶ **Aktivtechnik (z.B. Lüftungstechnik, vor allem PV-Anlage) kann, trotz höherem Materialaufwand, im Gebäudelebenszyklus ökologisch sinnvoll sein.**
- ▶ **Das Bauwerk (Baukonstruktion und Gebäudetechnik) sowie der Haushaltsstrom haben durch ihren enormen Einfluss Optimierungspotenzial.**
- ▶ **Niedrigstenergiewohngebäude müssen zukünftig über den kompletten Lebenszyklus bilanziert werden.**
- ▶ **Das entwickelte Verfahren mit LCA-Schätzung und vereinfachter LCA-Berechnung hilft die umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik – hinreichend genau – zu ermitteln.**

8.2 Ausblick

Die Arbeit hat gezeigt, dass die Berücksichtigung aller Bewertungsparameter überfordernd wirken kann, besonders für Personen, die nicht alltäglich mit dem LCA konfrontiert sind. Infolgedessen sollten die Ergebnisse der ökologischen Eigenschaften in einer allgemeinverständlichen Form dargestellt werden, um das Verständnis und somit die Akzeptanz durch die gesamte Baubranche zu erlangen. Die derzeitige Beurteilung mittels vieler einzelner Bewertungsparameter erschwert die Praxisanwendung der LCA-Methode und erlaubt zudem keine eindeutige Optimierung. Ein oder maximal zwei wissenschaftlich begründete „Einzelbewertungsparameter“ (*single score indicator*) würden dies erheblich vereinfachen. Denkbar wäre eine gewichtete Mittelwertbildung aus den politischen Zielen zum Klima- und Umweltschutz gepaart mit den potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäude, im Vergleich zu den gesamten Belastungen an der Umwelt sowie der Robustheit der Berechnungsmethodik der einzelnen Bewertungsparameter.

Vor allem die Metaanalyse im Kapitel 3 hat offengelegt, dass es bei der Bilanzierung der ökologischen Eigenschaften an festen und wissenschaftlich fundierten Vorgaben fehlt. Künftig sollte untersucht werden, wie Rahmenbedingungen für die Analyse der umweltbezogenen Qualität aussehen könnten und welche Auswirkungen diese auf die potenziellen Umweltauswirkungen von Gebäuden haben. Hierzu zählt ebenso die Untersuchung des bisher unzureichend analysierten Transports, der Errichtung bzw. des Bauprozesses sowie der Entsorgung einschließlich Rückbau und Gutschriften. Wichtig ist jedoch, dass sich die LCA-Experten bald auf klare und eindeutige Richtlinien einigen und diese sukzessive anpassen; denn nur mit festen Vorgaben ist ein neutraler Vergleich sowie der äußerst wichtige Erkenntnisgewinn für einen Wissenszuwachs möglich.

Ein weiteres Untersuchungsgebiet wäre die Frage nach den potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik in Quartieren oder größeren Liegenschaften bei zentraler bzw. dezentraler Versorgung bei verschiedenen Technologien bzw. Konzepten und unterschiedlichen energetischen Baustandards. Dies zählt ebenso für alle Arten von Gebäuden (z.B. Schulen, Labore) und für Sanierungsfälle – außer für die hier analysierten Niedrigstenergiewohngebäude im Neubaustadium. Gleichmaßen wären die Vor- und Nachteile hinsichtlich der umweltbezogenen Auswirkungen bei einer „Sektorenkopplung“ (Mobilität, Wärme und Strom) im Gebäude und im Quartier interessant.

Weitere Forschungsarbeiten könnten sich mit einer einfach durchführbaren dynamischen LCA-Betrachtung auseinandersetzen, um somit realitätsnäher die potenziellen Umweltauswirkungen zu berechnen – vergleichbar mit der statischen und dynamischen Lebenszykluskostenberechnung. Derzeit wird das LCA – so auch in dieser Arbeit – statisch berechnet, d.h. der zukünftige Austausch einer Baukomponente (z.B. Energieerzeuger) erfolgt immer unter den gleichen Bedingungen (z.B. gleicher Wirkungsgrad).

Die ganzheitliche und lebenszyklusorientierte Betrachtung ist für Gebäude zukünftig unabdingbar. Angesichts dieser Tatsache sollte die praktische Umsetzbarkeit in die aktuelle Gesetzgebung (EnEV [20] und HOAI [21]) wissenschaftlich untersucht und deren Einführung begleitet werden. Hierfür würde sich unter anderem die Entwicklung eines leicht verständlichen Optimierungstools auszahlen.

Prinzipiell sollte weiter an Vereinfachungsstrategien zur Beurteilung der ökologischen Eigenschaften von Gebäuden geforscht werden – egal ob an ökonomischen oder / und ökologischen Vereinfachungen der Baukonstruktion oder Gebäudetechnik. Eine Vorgehensweise zur Vereinfachung der Ermittlung der ökologischen Eigenschaften der Gebäudetechnik wurde vorgeschlagen (Kapitel 6).

Eine weiterführende Bearbeitung mit den LCA-Faktoren wäre erstrebenswert; es wurde aufgezeigt, dass die LCA-Faktoren den Bilanzierungsaufwand hinsichtlich der ökologischen Eigenschaften für die Sanitär-, Heizungs- und Lüftungstechnik erheblich reduzieren können (Kapitel 6). Hierbei wäre zum einen, die Evaluation der vorgestellten Vorgehensweise und die Validierung der ermittelten LCA-Faktoren für die Gebäudetechnik notwendig; zum anderen, die Übertragung der Vorgehensweise auf die Baukonstruktion sinnvoll. Dies alles ist denkbar mit zusätzlichen Technologien bzw. Materialien sowie Gewerken (z.B. Elektrotechnik). Generell ist eine Anwendung auf Nicht-Wohngebäude ebenso nachahmenswert. Eine Datenbankeerweiterung vor allem für die Gebäudetechnik wäre wünschenswert und für alle Betrachtungsfälle eine softwareseitige Umsetzung ideal.

Weiterer Forschungsbedarf ist notwendig:

- ▶ **Einen oder maximal zwei wissenschaftlich fundierte „Einzelbewertungsparameter“ (*single score indicator*) entwickeln.**
- ▶ **Rahmenbedingungen für die Analyse der ökologischen Eigenschaften von Gebäuden vereinheitlichen.**
- ▶ **Eine in der Handhabung einfache dynamische Berechnungsmethode der umweltbezogenen Qualität erforschen.**
- ▶ **Lebenszyklusorientierte und ganzheitliche Betrachtung von Gebäuden vereinfachen.**
- ▶ **LCA-Faktoren der Gebäudetechnik validieren und ergänzen sowie das vorgestellte Verfahren auf die Baukonstruktion übertragen.**

Unter Berücksichtigung dieser Weiterentwicklungen kann und wird die lebenszyklusbasierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Gebäuden einen wirksamen Beitrag für einen verantwortungsvollen Umgang mit dem Planet Erde leisten.

8.3 Kernaussage Doktorarbeit

Niedrigstenergiewohngebäude und dessen ökologische Eigenschaften müssen künftig lebenszyklusbasiert betrachtet werden, hierbei müssen die Ressourcenbeanspruchung und die potenziellen Umweltauswirkungen der Gebäudetechnik unbedingt berücksichtigt werden; dabei hilft das vorgeschlagene Verfahren die umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik – bei angemessener Genauigkeit – zu ermitteln.

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat
ADP	<i>Abiotic Depletion Potential</i> = Abiotischer Ressourcenverbrauch (Stoffe)
Alu	Aluminium
AP	<i>Acidification Potential</i> = Versauerungspotenzial
Äq.	Äquivalent
BE	Betriebsbedingte Energie oder Betriebsbedingte Emissionen
BGF	Brutto-Geschossfläche
BKI	Baukostenindex
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BNK	Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau
BSH	Brettschichtholz
C₂H₄	Ethen
C_mH_n	Kohlenwasserstoffe
CFC11	Trichlorfluormethan
CH₄	Methan
CO₂	Kohlendioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nenndurchmesser
e.	Erneuerbar
EE	Eingebundene Energie oder Eingebundene Emissionen
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm

EnEV	Energieeinsparverordnung
EP	<i>Eutrophication Potential</i> = Eutrophierungspotenzial
EPD	<i>Environment Product Declaration</i> = Umweltproduktdeklaration
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer
EPE	Expandiertes Polyethylen
EPP	Expandiertes Polypropylen
EPS	Expandierter Polystyrolschaum („Styropor“)
EU	Europäische Union
FBH	Fußbodenheizung
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FCKW11	Trichlorfluormethan
Gas	Gas-Brennwertgerät
ges.	Gesamt
GFK	Glasfaserverstärker Kunststoff
GWP	<i>Global Warming Potential</i> = Treibhauspotenzial
H₂SO₄	Schwefelsäure
HK	Heizkörper
HNO₃	Salpetersäure
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HT	Heißwasserbeständige (Abwasserleitung)
HWF	Holzweichfaser
Hzg	Heizung
IQR	<i>Interquartile range</i> = Interquartilsabstand
ISO	<i>International Standard Organization</i>
k.A.	Keine Angaben
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KG	Kostengruppe
KVH	Konstruktionsvollholz
LCA	<i>Life cycle assessment</i> = Ökobilanz bzw. Lebenszyklusanalyse

LEGEP	Lebenszyklus-Gebäude-Planung (Programm)
LPh	Leistungsphase
L-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
LZ	Lebenszyklus
LZA	Lebenszyklusanalyse
LZE	Lebenszyklus-Energie oder Lebenszyklus-Emissionen
MFH	Mehrfamilienhaus
Min.U.	Minimal (praktisch realisierbarer) U-Wert
MW	Mineralwolle
n	Datenanzahl / Fallanzahl
n.e.	Nicht erneuerbar
n.v.	Nicht vorhanden
N₂O	Distickstoffoxid / Lachgas
NaWoh	Nachhaltigkeit im Wohnungsbau
NH₃	Ammoniak
NH₄⁺	Ammonium
NO₃⁻	Nitrate
NO_x	Stickoxide
NRF	Netto-Raumfläche
ODP	<i>Ozone Layer Depletion Potential</i> = Ozonabbaupotenzial
OSB	<i>Oriented strand board</i> = Grobspanplatte
PA	Polyamide
PB	Polybuten
PE-...	Polyethylen-...
PE	Primärenergieinhalt
PE-HD	Polyethylen <i>high density</i> = hohe Dichte
PeI	Pelletheizkessel
PE-X	Vernetztes Polyethylen
PO₄⁻³	Phosphat
POCP	<i>Photochemical Ozone Creation Potential</i> = Sommersmogpotenzial

PP	Polypropylen
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
PVC-C	Chloriertes Polyvinylchlorid
p-Wert	Signifikanzwert
R²	Bestimmtheitsmaß
R11	Trichlorfluormethan
RLT	Raumluftechnische Anlage bzw. Lüftungstechnik
S / Solar	Solaranlage
Sb	Antimon
SIA	Schweizer Ingenieure und Architektenverein
SML	Muffenlose gusseiserne Abflussrohre
SO₂	Schwefeldioxid
Stb.	Stahlbeton
S-WP	Sole-Wasser-Wärmepumpe
TGA	Technische Gebäudeausrüstung bzw. Gebäudetechnik
TW	Trinkwasser
TWW	Trinkwarmwasser
TWW-Sp.	Trinkwarmwasserspeicher
UV	Ultraviolette (Strahlung)
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Verz.	Verzinkt
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WLG	Wärmeleitgruppe
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WSchV	Wärmeschutzverordnung
XPS	Extrudierter Polystyrolschaum („Styrodur“)

Literaturverzeichnis

- [1] J. B. Mayer, *Der Torf in seiner Wichtigkeit für Deutschland: Dessen Vorkommen, Abbau, Fortpflanzung und Aufbereitung*. Coblenz: Rudolph Friedrich Hergt, 1841 (siehe S. 1).
- [2] WWF International, *Living Planet Report 2012: Biodiversität Biokapazität und neue Wege*. Gland: WWF Intern, 2012, ISBN: 978-2-940443-47-5 (siehe S. 1, 2).
- [3] T. Oka und T. Sawachi, „IEA ECBCS, Annex 57 - Evaluation of embodied energy and carbon dioxide emissions for building construction“, in *SB13 Graz*, A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, S. 295–302, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. 2).
- [4] United Nations, Hrsg., *COP21: Adoption of the Paris agreement*, 12.12.2015, Paris, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (siehe S. 2).
- [5] Europäische Union, *Richtlinie 2012/27/EU des europäischen Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz: 2012/27/EU*, vom 25.10.2012 (siehe S. 2).
- [6] Deutsche Bundesregierung, Hrsg., *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, 28.09.2010, Berlin, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (siehe S. 2).
- [7] A. Cuchi, J. Arcas-Abella, M. Casals-Tres und G. Fombella, „Building a common home: A Global Vision report“, in *WSB 14 Barcelona*, Green Building Council España (GBCe), Hrsg. Madrid: GBCe, 2014, S. 1–32, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 2).
- [8] *DIN EN 15643-2: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Mai 2011 (siehe S. 2, 20, 23, 39, 209).
- [9] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark und M. Zeumer, *Energie-Atlas: Nachhaltige Architektur*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2007, ISBN: 978-3-7643-8385-5 (siehe S. 2).
- [10] Europäische Union, *Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden: 2010/31/EU*, vom 19.05.2010 (siehe S. 2, 3, 8, 209).
- [11] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Statistisches Jahrbuch: Deutschland und Internationales*, 2014, Wiesbaden, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2014.html> (siehe S. 2, 55, 57).

- [12] J. Freimann und M. Walther, „Von der Effizienz zur Konsistenz?“, in *Industrial ecology management*, M. v. Hauff, R. Ilsemann und G. Müller-Christ, Hrsg. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012, S. 187–204, ISBN: 978-3-8349-6638-4 (siehe S. 2).
- [13] M. Günther, *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, ISBN: 978-3-658-06753-3 (siehe S. 2).
- [14] J. Hubert, „Ökologische Modernisierung und Umweltinnovation“, in *Handbuch Umweltsoziologie*, M. Groß, Hrsg. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, 2011, S. 279–303, ISBN: 978-3-531-17429-7 (siehe S. 3).
- [15] A. Anker, *Naturbauweisen: Ein Ratgeber für Siedler und Baulustige*. Berlin: Deutsche Landbuchhandlung, 1919 (siehe S. 3).
- [16] E. G. Friedrich und G. Müller, *Die Bauwirtschaft im Kleinwohnungsbau: Kritische Betrachtung der neuzeitlichen Bauweisen und Mitteilung von Erfahrungen mit Baustoffen*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1922 (siehe S. 3).
- [17] M. Weißenberger, W. Jensch und W. Lang, „The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany“, *Energy and Buildings*, Bd. 76, Nr. 2014, S. 551–557, 2014. DOI: [10.1016/j.enbuild.2014.03.028](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.028) (siehe S. 3, 8, 9, 24, 25).
- [18] *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, November 2009 (siehe S. 3, 9–11, 20, 21, 23, 33, 39, 48, 207–210).
- [19] *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Oktober 2006 (siehe S. 3, 10, 11, 20, 23, 33, 39, 46).
- [20] Deutsche Bundesregierung, *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV): EnEV 2014*, vom 18.11.2013 (siehe S. 3, 44, 45, 53, 61, 63–65, 113, 115, 119, 147, 179, 180).
- [21] Deutsche Bundesregierung, *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI: HOAI 2013*, vom 10.07.2013 (siehe S. 3, 123, 147).
- [22] DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), *Homepage DGNB-Gebäudezertifizierungssystem*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.dgnb-system.de/de/> (siehe S. 4, 24, 40, 43, 45, 108).
- [23] BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen), *Homepage BNB-Gebäudezertifizierungssystem*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/> (siehe S. 4, 24).
- [24] NaWoh (Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau), *Homepage NaWoh-Gebäudezertifizierungssystem*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.nawoh.de/> (siehe S. 4, 37, 40, 43, 45, 108).
- [25] BNK (Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau), *Homepage BNK-Gebäudezertifizierungssystem*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.bau-irn.de/> (siehe S. 4, 37).
- [26] DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), Hrsg., *Steckbrief Gebäudezertifizierung: Neubau Kleine Wohngebäude 07/2012 (Kriterium NKW12-01)*, 21.01.2013, ab-

- gerufen am 02.08.2016. Adresse: http://www.dgnb-system.de/de/nutzungsprofile/alle-nutzungsprofile/neubau_kleine_wohngebaeude.php (siehe S. 4, 40, 43, 45).
- [27] NaWoh (Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau), Hrsg., *Steckbrief Gebäudezertifizierung: Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau Mehrfamilienhäuser - Neubau V 3.0 (Kriterium 3.1.1)*, April 2013, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.nawoh.de/downloads/kriteriensteckbriefe> (siehe S. 4, 37, 40, 43, 45).
- [28] M. Hegger, N. Fisch, N. Jenner, S. Gehrman, F. Hassemer, J. Hartwig, C. Mück, B. Mahler, T. Nusser, S. Idler, A. Wiege und K. Erlenkämper, *Aktiv-Stadthaus: Entwicklungsgrundlage für städtische Mehrfamilienhäuser in Plus-Energie-Bauweise nach EU 2020 und zur Vorbereitung eines Demonstrativ-Bauvorhabens in Frankfurt am Main*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014, ISBN: 978-3-8167-9164-5 (siehe S. 4).
- [29] A. Braune, „Ökobilanz-Benchmarks für Immobilien: Methode zur Entwicklung zukunftsorientierter Kennwerte für eine lebenszyklusbasierte Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Immobilien“, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015 (siehe S. 4, 23, 24, 33).
- [30] F. A. Brockhaus, Hrsg., *Meilensteine der Menschheit: Hundert Entdeckungen, Erfindungen und Wendepunkte der Geschichte*. Leipzig und Mannheim: Brockhaus, 2003, ISBN: 3-7653-0462-X (siehe S. 7).
- [31] H. König, N. Kohler, J. Kreißig und T. Lützkendorf, *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2009, ISBN: 978-3-920034-30-0 (siehe S. 7, 21).
- [32] H. Rogall, *Ökologische Ökonomie: Eine Einführung*. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, ISBN: 978-3-531-16058-0 (siehe S. 7, 8).
- [33] F. Luks, *Nachhaltigkeit: Wissen 3000*. Hamburg: Europäische Verlagsanstalt, 2002, ISBN: 3-434-46113-2 (siehe S. 7).
- [34] W. Jensch, „Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung unter Berücksichtigung von energietechnischen, ökonomischen und ökologischen Parametern“, Diss., Technische Universität München, München, 1988 (siehe S. 7).
- [35] A. H. Goldreich, *Die Kohlenversorgung Europas*. Berlin und Wien: Urban & Schwarzenberg, 1918 (siehe S. 7).
- [36] G. Koepper, *Deutsche Kohle und andere Brennstoffe*. Leipzig: August Lutzeyer, 1942 (siehe S. 7).
- [37] N. Bogusch und T. Duzia, *Basiswissen Bauphysik: Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2012, ISBN: 978-3-8167-8613-9 (siehe S. 8).
- [38] Deutsche Bundesregierung, *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV): WSchV 1977*, vom 11.08.1977 (siehe S. 8).
- [39] W. Klöpffer und B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012, ISBN: 978-3527-32043-1 (siehe S. 8–12, 15–21, 207).
- [40] R. Hunt und W. Franklin, „LCA - How it Came About: Personal Reflections on the Origin and Development of LCA in the USA“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 1, Nr. 1, S. 4–7, 1996 (siehe S. 8).

- [41] BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), Hrsg., *Untersuchung zur Novellierung der EU-Gebäudeenergieeffizienzrichtlinie (EFBD): Identifikation und Analyse von Hemmnissen beim Neubau von hocheffizienten (Niedrigstenergie-)Gebäuden und Entwicklung eines Konzepts zur Marktdurchdringung bis 2020* (BMVBS-Online-Publikation Nr. 16/2012), 2012, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: http://www.bbsr.bund.de/cln_032/nn_629248/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2012/ON162012.html (siehe S. 8).
- [42] W. Sobek, „Nachhaltiges Bauen - Grundlagen und Perspektiven“, in *Nachhaltiges Bauen*, Deutsches Institut für Normung, Hrsg. Berlin: Beuth, 2011, S. 1–26, ISBN: 978-3-410-20547-0 (siehe S. 9).
- [43] T. Lützkendorf, „The use of life-cycle analysis for planning and assessment of construction works: Topics and trends“, in *IALCCE 2012 Vienna*, A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg. Leiden: CRC Press, 2013, S. 1639–1643, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. 10).
- [44] B. Rossi, A.-F. Marique, M. Glaumann und S. Reiter, „Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool“, *Building and Environment*, Bd. 51, Nr. 2012, S. 395–401, 2012. DOI: [10.1016/j.buildenv.2011.11.017](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017) (siehe S. 10, 33).
- [45] M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy und C. H. Culp, „Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 8, S. 1238–1247, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2010.02.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016) (siehe S. 10, 14).
- [46] N. Yokoo, „Embodied energy and CO2 emission associated with building construction by using I/O based data and process based data in Japan“, in *SB13 Graz*, A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, S. 311–316, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. 10, 33).
- [47] M. Optis und P. Wild, „Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 15, Nr. 7, S. 644–651, 2010. DOI: [10.1007/s11367-010-0203-4](https://doi.org/10.1007/s11367-010-0203-4) (siehe S. 10, 24, 32, 36).
- [48] K. Siraki, „Bewertung von Wohngebäuden unter Lebenszyklusaspekten“, Diss., Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2007 (siehe S. 10, 24, 26, 43).
- [49] N. C. Onat, M. Kucukvar und O. Tatari, „Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach“, *Building and Environment*, Bd. 72, Nr. 02, S. 53–62, 2014. DOI: [10.1016/j.buildenv.2013.10.009](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.009) (siehe S. 10, 24).
- [50] *VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden*, Berlin: Beuth, Verein Deutscher Ingenieure, Januar 2012 (siehe S. 10, 12, 13, 23, 208–210).
- [51] I. Blom, L. Itard und A. Meijer, „LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings“, *Building and Environment*, Bd. 45, Nr. 11, S. 2362–2372, 2010. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.04.012](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.012) (siehe S. 10, 23).
- [52] B. Ströbele, „Grenzen des Carbon Footprint für die Bewertung des ökologischen Bauens“, *Bauphysik*, Bd. 35, Nr. 5, S. 338–345, 2013. DOI: [10.1002/bapi.201310076](https://doi.org/10.1002/bapi.201310076) (siehe S. 10, 24).
- [53] Y. H. Dong und T. S. Ng, „Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe - a study of commercial buildings in Hong Kong“, *The International Journal of Life Cycle*

- Assessment*, Bd. 19, Nr. 7, S. 1409–1423, 2014. DOI: [10.1007/s11367-014-0743-0](https://doi.org/10.1007/s11367-014-0743-0) (siehe S. 10).
- [54] *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Juli 2014 (siehe S. 11, 12, 15–20, 23, 47, 207, 208, 210).
- [55] P. Eyerer und H. W. Reinhardt, *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*. Basel: Birkhäuser, 2000, ISBN: 3-7643-6207-3 (siehe S. 11, 15–19, 21).
- [56] Deutsche Bundesregierung, *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energie im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG): EEWärmeG 2009*, vom 07.08.2008 (siehe S. 12, 61).
- [57] *SIA 2032: Graue Energie von Gebäuden*, Zürich: SIA Zurich, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010 (siehe S. 12, 13, 23, 36, 43, 208).
- [58] M. Teller und D. Püschel, „Graue Energie“, in *Nachhaltiges Wirtschaften für KMU*, A. Grothe, Hrsg. München: Oekom, 2012, S. 151–169, ISBN: 978-3-86581-281-0 (siehe S. 13).
- [59] A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg., *IALCCE 2012 Vienna: Life-cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems*. Leiden: CRC Press, 2013, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. 14).
- [60] W. Lang, Hrsg., *PLEA 2013 Munich: Sustainable architecture for a renewable future*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2013, ISBN: 978-3-8167-9053-2 (siehe S. 14).
- [61] G. Hauser, T. Lützkendorf und N. Eßig, Hrsg., *SB13 Munich: Implementing Sustainability - Barriers and Chances*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2013, ISBN: 978-3-8167-8982-6 (siehe S. 14).
- [62] A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg., *SB13 Graz: Sustainable buildings - Construction products & technologies*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. 14).
- [63] J. L. Scartezzini und B. Smith, Hrsg., *CISBAT 2013 Lausanne: Cleantech for smart cities & buildings - from nano to urban scale*. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013, ISBN: 978-2-8399-1280-8 (siehe S. 14).
- [64] Green Building Council España (GBCe), Hrsg., *WSB 14 Barcelona: Are we moving as quickly as we should? It is up to us!* Madrid: GBCe, 2014, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 14).
- [65] H. Furuta, D. M. Frangopol und M. Akiyama, Hrsg., *IALCCE 2014 Tokyo: Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*. London: CRC Press, 2015, ISBN: 978-1-138-00120-6 (siehe S. 14).
- [66] ZEBAU, Hrsg., *SBE16 Hamburg: Strategies, Stakeholders, Success factors*. Hamburg: Druckerei in St. Pauli, 2016, ISBN: 978-3-00-052213-0. DOI: [10.5445/IR/1000051699](https://doi.org/10.5445/IR/1000051699) (siehe S. 14).
- [67] T. Ramesh, R. Prakash und K. K. Skukla, „Life cycle energy analysis of buildings: An overview“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 10, S. 1592–1600, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2010.05.007](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007) (siehe S. 14, 22, 35, 36).

- [68] I. Sartori und A. G. Hestnes, „Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article“, *Energy and Buildings*, Bd. 39, Nr. 3, S. 249–257, 2007. DOI: [10.1016/j.enbuild.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001) (siehe S. 14, 23, 24, 30, 32, 35, 36).
- [69] A. Stephan, R. H. Crawford und K. de Myttenaere, „Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 55, Nr. 2012, S. 592–600, 2012. DOI: [10.1016/j.enbuild.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.008) (siehe S. 14, 24).
- [70] J. Monahan und J. C. Powell, „An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework“, *Energy and Buildings*, Bd. 43, Nr. 2011, S. 179–188, 2011. DOI: [10.1016/j.enbuild.2010.09.005](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.005) (siehe S. 14).
- [71] *DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Oktober 2012 (siehe S. 14, 20, 23, 31–34, 39, 43–45, 47–50, 100, 109, 130, 145, 203–205, 207–210).
- [72] B. Weller, M. S. Fahrion und S. Jakubetz, *Denkmal und Energie*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, ISBN: 978-3-8348-1619-1 (siehe S. 15–19, 24).
- [73] C. Piehl, „Entwicklung eines Algorithmus zur Analyse und Optimierung von Gebäudeerstellungs- und Bauteilökobilanzen“, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012 (siehe S. 16, 19, 24).
- [74] A. Passer, „Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“, Diss., Technische Universität Graz, Graz, 2010 (siehe S. 16–19, 25–27, 33, 40).
- [75] M. Rebetz, „2013: How is climate changing and what are the impacts of this change?“, in *CISBAT 2013 Lausanne*, J. L. Scartezzini und B. Smith, Hrsg. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013, S. 2–3, ISBN: 978-2-8399-1280-8 (siehe S. 16).
- [76] BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung), *Homepage ÖKOBAU-DAT*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.oekobaudat.de/> (siehe S. 20, 24, 40, 45, 46, 48, 51–53, 68, 70, 71, 79, 100, 104, 125, 130, 133, 136, 141).
- [77] S. Horn, „Ökobilanzen im Chemieunterricht: Darstellung eines experimentellen und computerunterstützten Zuganges“, Diss., Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 2002 (siehe S. 20).
- [78] J. Reap, F. Roman, S. Duncan und B. Bras, „A survey of unresolved problems in life cycle assessment“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 13, Nr. 5, S. 374–388, 2008. DOI: [10.1007/s11367-008-0009-9](https://doi.org/10.1007/s11367-008-0009-9) (siehe S. 21).
- [79] B. Wittstock, S. Albrecht, C. M. Colodel und J. P. Lindner, „Gebäude aus Lebenszyklusperspektive - Ökobilanzen im Bauwesen“, *Bauphysik*, Bd. 31, Nr. 1, S. 3–11, 2009. DOI: [10.1002/bapi.200910003](https://doi.org/10.1002/bapi.200910003) (siehe S. 22).
- [80] L. Jacquemin, P.-Y. Pontalier und C. Sablayrolles, „Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 17, Nr. 8, S. 1028–1041, 2012. DOI: [10.1007/s11367-012-0432-9](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0432-9) (siehe S. 22).
- [81] S. Qian und A. H. Hamdany, „Life cycle assessment of green buildings: A literature review“, in *IALCCE 2014 Tokyo*, H. Furuta, D. M. Frangopol und M. Akiyama, Hrsg. London: CRC Press, 2015, S. 1725–1732, ISBN: 978-1-138-00120-6 (siehe S. 22, 23).

- [82] M. Goedkoop, „20 years of LCA development, have we understood the user needs?“, in *EcoBalance 2014 Tsukuba*, The Institute of Life Cycle Assessment, Hrsg. Tsukuba: The Institute of Life Cycle Assessment, 2014, S. 147, ISBN: 978-4-9907995-0-2 (siehe S. 22).
- [83] K. Reckmann, „Life cycle assessment of pork especially emphasising feed and pig production“, Diss., Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 2013 (siehe S. 22).
- [84] K. Wötzel, „Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik“, Diss., Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 2007 (siehe S. 22).
- [85] S. Berenz, „Ökonomisch-ökologische Bewertung des energetischen Biomasse-Einsatzes anhand eines ökobilanziellen Modells“, Diss., Technische Universität München, München, 2013 (siehe S. 22).
- [86] C. Remy, „Life cycle assessment of conventional and source-separation systems for urban wastewater management“, Diss., Technische Universität Berlin, Berlin, 2010 (siehe S. 22).
- [87] O. Prituzhalova, „Analyse des Lebenszyklus einer Verpackung anhand der Ökobilanzen: Vergleichende Untersuchung eines Getränkekartons in der Bundesrepublik Deutschland und in der Russischen Föderation“, Diss., Universität Lüneburg, Lüneburg, 2006 (siehe S. 22).
- [88] B. Wittstock, „Methode zur Analyse und Beurteilung des Einflusses von Bauprodukteigenschaften auf die Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Zertifizierung von Gebäuden“, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013 (siehe S. 23).
- [89] I. Z. Bribián, A. V. Capilla und A. A. Usón, „Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential“, *Building and Environment*, Bd. 46, Nr. 5, S. 1133–1140, 2011. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.12.002](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002) (siehe S. 23, 24).
- [90] D. Kellenberger, „Reducing embodied energy: A future challenge for planners and manufacturers“, in *CISBAT 2013 Lausanne*, J. L. Scartezzini und B. Smith, Hrsg. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013, S. 85–90, ISBN: 978-2-8399-1280-8 (siehe S. 23).
- [91] C. D. Frenette, C. Bulle, R. Beauregard, A. Salenikovich und D. Derome, „Using life cycle assessment to derive an environmental index for light-frame wood wall assemblies“, *Building and Environment*, Bd. 45, Nr. 10, S. 2111–2122, 2010. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.03.009](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.009) (siehe S. 23).
- [92] E. Hasler, C. Huber, H. C. Leindecker, T. Schrag, E. Stocker und C. Wartha, „Bewertung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen unter Lebenszyklusaspekten mit einer Fallstudie Bürogebäude“, *Bauphysik*, Bd. 35, Nr. 4, S. 250–256, 2013. DOI: [10.1002/bapi.201310072](https://doi.org/10.1002/bapi.201310072) (siehe S. 23).
- [93] M. Barecka, I. Zbicinski und D. Heim, „Life Cycle Assessment of zero- emission façade construction“, in *WSB 14 Barcelona*, Green Building Council España (GBCe), Hrsg. Madrid: GBCe, 2014, P097:1–7, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 23).
- [94] Y.-H. Yen, „Comparative life cycle assessment of multi-storey timber buildings“, Diss., Technische Universität Dresden, Dresden, 2014 (siehe S. 23).

- [95] L. G. F. Tellnes, T. K. Kristjansdottir, S. Eide und M. Kron, „Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber elements in a six story housing – comparison to a steel and concrete solution“, in *WSB 14 Barcelona*, Green Building Council España (GBCe), Hrsg. Madrid: GBCe, 2014, S102:1–8, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 23).
- [96] A. Hollberg, C. Heidenreich, J. Ruth, R. Hartung und S. Herzog, „Using evolutionary optimization for low-impact solid constructions“, in *WSB 14 Barcelona*, Green Building Council España (GBCe), Hrsg. Madrid: GBCe, 2014, P114:1–7, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 23).
- [97] L. Yang, R. Zmeureanu und H. Rivard, „Comparison of environmental impacts of two residential heating systems“, *Building and Environment*, Bd. 43, Nr. 6, S. 1072–1081, 2008. DOI: [10.1016/j.buildenv.2007.02.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.007) (siehe S. 23).
- [98] M. Hegger, C. Fafflok, J. Hegger und I. Passig, *Aktivhaus - das Grundlagenwerk: Vom Passivhaus zum Energieplushaus*. München: Callwey, 2013, ISBN: 978-3-7667-1902-7 (siehe S. 23).
- [99] G. Verbeeck, „Optimisation of extremely low energy residential buildings“, Diss., Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2007 (siehe S. 23).
- [100] B. Berggren, M. Hall und M. Wall, „LCE analysis of buildings – Taking the step towards Net Zero Energy Buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 62, Nr. 2013, S. 381–391, 2013. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.02.063](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.063) (siehe S. 23, 32, 33, 35).
- [101] A. Takano, S. Winter, M. Hughes und L. Linkosalmi, „Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment“, *Building and Environment*, Bd. 79, Nr. 2014, S. 20–30, 2014. DOI: [10.1016/j.buildenv.2014.04.025](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.025) (siehe S. 24, 33).
- [102] B. Wittstock, J. Gantner, K. Lenz, T. Saunders, J. Anderson, C. Carter, Z. Gyetvai, J. KreiBig, A. Braune und andere, *EeBGuide Guidance Document Part B: Buildings: Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative (Contract 285490)*, 2012, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: http://www.eebguide.eu/eeblog/wp-content/uploads/2012/10/EeBGuide-B-FINAL-PR_2012-10-29.pdf (siehe S. 24).
- [103] LEGEP, *Homepage LEGEP-Software*, abgerufen am 12.11.2013. Adresse: www.legep.de (siehe S. 24, 51, 116, 209).
- [104] SBS Building Sustainability, *Homepage SBS-onlinetool-Software*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.sbs-onlinetool.com/> (siehe S. 24).
- [105] eLCA, *Homepage eLCA-Software*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.bauteileditor.de/> (siehe S. 24).
- [106] oekobilanz-bau, *Homepage Ökobilanz-Bau-Software*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.oekobilanz-bau.de/> (siehe S. 24).
- [107] A. Haapio und P. Viitaniemi, „A critical review of building environmental assessment tools“, *Environmental Impact Assessment Review*, Bd. 28, Nr. 7, S. 469–482, 2008. DOI: [10.1016/j.eiar.2008.01.002](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2008.01.002) (siehe S. 24).
- [108] I. Z. Bribián, A. A. Usón und S. Scarpellini, „Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification“, *Building and*

- Environment*, Bd. 44, Nr. 12, S. 2510–2520, 2009. DOI: [10.1016/j.buildenv.2009.05.001](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 37, 177, 178).
- [109] A. Hollberg und J. Ruth, „LCA in architectural design—a parametric approach“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 21, Nr. 7, S. 943–960, 2016. DOI: [10.1007/s11367-016-1065-1](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1065-1) (siehe S. 24).
- [110] O. Ortiz, F. Castells und G. Sonnemann, „Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA“, *Construction and Building Materials*, Bd. 23, Nr. 1, S. 28–39, 2009. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012) (siehe S. 24).
- [111] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez und A. Castell, „Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 29, Nr. 2014, S. 394–416, 2014. DOI: [10.1016/j.rser.2013.08.037](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037) (siehe S. 24, 32, 33).
- [112] H. König und M. L. d. Cristofaro, „The role of renewable materials in the building sector and in the life cycle assessment of buildings“, in *SB13 Munich*, G. Hauser, T. Lützkendorf und N. Eßig, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2013, S. 1110–1117, ISBN: 978-3-8167-8982-6 (siehe S. 24).
- [113] L. Messari-Becker, K. Bollinger und M. Grohmann, „Life-cycle assessment as a planning tool for sustainable buildings“, in *IALCCE 2012 Vienna*, A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg. Leiden: CRC Press, 2013, S. 1558–1562, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. 24).
- [114] F. Asdrubali, C. Baldassarri und V. Fthenakis, „Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 64, Nr. 2013, S. 73–89, 2013. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.04.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018) (siehe S. 24).
- [115] G. A. Blengini, „Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy“, *Building and Environment*, Bd. 44, Nr. 2, S. 319–330, 2009. DOI: [10.1016/j.buildenv.2008.03.007](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.007) (siehe S. 24).
- [116] R. M. Cuéllar-Franca und A. Azapagic, „Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses“, *Building and Environment*, Bd. 54, Nr. 2012, S. 86–99, 2012. DOI: [10.1016/j.buildenv.2012.02.005](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.005) (siehe S. 24).
- [117] F. Nemry, A. Uihlein, C. M. Colodel, C. Wetzler, A. Braune, B. Wittstock, I. Hasan, J. Kreißig, N. Gallon, S. Niemeier und Y. Frech, „Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 7, S. 976–984, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2010.01.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.009) (siehe S. 24).
- [118] O. Ortiz, C. Bonnet, J. C. Bruno und F. Castells, „Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain“, *Building and Environment*, Bd. 44, Nr. 3, S. 584–594, 2009. DOI: [10.1016/j.buildenv.2008.05.004](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.004) (siehe S. 24).
- [119] V. P. Shah, D. C. Debella und R. J. Ries, „Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States“, *Energy and Buildings*, Bd. 40, Nr. 4, S. 503–513, 2008. DOI: [10.1016/j.enbuild.2007.04.004](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.004) (siehe S. 24).
- [120] A. Passer, H. Kreiner und P. Maydl, „Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential

- buildings“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 17, Nr. 9, S. 1116–1130, 2012. DOI: [10.1007/s11367-012-0435-6](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0435-6) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [121] V. Motuziene, „Environmental performance of energy efficient residential building - a case study of Lithuania“, in *SB13 Graz*, A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, S. 360–367, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [122] A. Hafner und S. Winter, „Ecological and economic impact of various materials and constructions for buildings over the whole life-cycle“, in *IALCCE 2012 Vienna*, A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg. Leiden: CRC Press, 2013, S. 1522–1529, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [123] L. Gustavsson und A. Joelsson, „Life cycle primary energy analysis of residential buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 2, S. 210–220, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2009.08.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.017) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [124] A. Dadoo, L. Gustavsson und R. Sathre, „Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective“, *Energy and Buildings*, Bd. 43, Nr. 7, S. 1589–1597, 2011. DOI: [10.1016/j.enbuild.2011.03.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.002) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [177](#), [178](#)).
- [125] O. Dahlstrøm, K. Sørnes, S. T. Eriksen und E. G. Hertwich, „Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional- or passive house standard“, *Energy and Buildings*, Bd. 54, Nr. 2012, S. 470–479, 2012. DOI: [10.1016/j.enbuild.2012.07.029](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.029) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [126] M. Mosteiro-Romero, U. Krogmann, H. Wallbaum, Y. Ostermeyer, J. S. Senick und C. J. Andrews, „Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts“, *Energy and Buildings*, Bd. 68, Nr. 2014, S. 620–631, 2014. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.09.046](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.046) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).
- [127] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo und M. Mistretta, „Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study“, *Energy and Buildings*, Bd. 72, Nr. 2014, S. 371–381, 2014. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.12.046](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.046) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [177](#), [178](#)).
- [128] L. Gustavsson, A. Joelsson und R. Sathre, „Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 2, S. 230–242, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2009.08.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.018) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [38](#), [177](#), [178](#)).
- [129] M. Paleari, M. Lavagna und A. Campioli, „Life Cycle Assessment and Zero Energy Residential Buildings“, in *PLEA 2013 Munich*, W. Lang, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2013, S. 314–319, ISBN: 978-3-8167-9053-2 (siehe S. [24](#), [25](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [43](#), [177](#), [178](#)).
- [130] S. Citherlet und T. Defaux, „Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span“, *Building and Environment*, Bd. 42, Nr. 2, S. 591–598, 2007. DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.09.025](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.025) (siehe S. [24](#), [29](#), [32](#), [34](#), [35](#), [37](#), [177](#), [178](#)).

- [131] G. A. Blengini und T. D. Carlo, „The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings“, *Energy and Buildings*, Bd. 42, Nr. 6, S. 869–880, 2010. DOI: [10.1016/j.enbuild.2009.12.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009) (siehe S. 24, 26, 29, 32, 34, 35, 37, 43, 177, 178).
- [132] C. Thormark, „A low energy building in a life cycle - its embodied energy, energy need for operation and recycling potential“, *Building and Environment*, Bd. 37, Nr. 2002, S. 429–435, 2002. DOI: [10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 177, 178).
- [133] G. Verbeeck und H. Hens, „Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis“, *Building and Environment*, Bd. 45, Nr. 4, S. 964–967, 2010. DOI: [10.1016/j.buildenv.2009.10.003](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.003) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 177, 178).
- [134] S. Thiers und B. Peuportier, „Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings“, *Building and Environment*, Bd. 51, Nr. 2012, S. 276–284, 2012. DOI: [10.1016/j.buildenv.2011.11.018](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.018) (siehe S. 24, 26, 27, 29, 32, 34, 35, 37, 177, 178).
- [135] H. Monteiro und F. Freire, „Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods“, *Energy and Buildings*, Bd. 47, Nr. 2012, S. 572–583, 2012. DOI: [10.1016/j.enbuild.2011.12.032](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.032) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 37, 177, 178).
- [136] S. Proietti, P. Sdringola, U. Desideri, F. Zepparelli, F. Masciarelli und F. Castellani, „Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone“, *Energy and Buildings*, Bd. 64, Nr. 2013, S. 463–472, 2013. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.05.013](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.013) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 37, 177, 178).
- [137] O. Ortiz-Rodríguez, F. Castells und G. Sonnemann, „Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development“, *Science of The Total Environment*, Bd. 408, Nr. 12, S. 2435–2443, 2010. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.02.021](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021) (siehe S. 24, 29, 32–35, 177, 178).
- [138] A. H. Wiberg, L. Georges, T. H. Dokka, M. Haase, B. Time, A. G. Lien, S. Mellegård und M. Maltha, „A net zero emission concept analysis of a single-family house“, *Energy and Buildings*, Bd. 74, Nr. 2014, S. 101–110, 2014. DOI: [10.1016/j.enbuild.2014.01.037](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.037) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 177, 178).
- [139] A. Lewandowska, A. Noskowiak und G. Pajchrowski, „Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings’ use with a special focus on energy-related aspects“, *Energy and Buildings*, Bd. 67, Nr. 2013, S. 635–646, 2013. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.002) (siehe S. 24, 29, 32, 34, 35, 177, 178).
- [140] M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy und C. H. Culp, „Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 16, Nr. 6, S. 3730–3743, 2012. DOI: [10.1016/j.rser.2012.03.021](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021) (siehe S. 24).
- [141] G. Hauser, N. Eßig, P. Mittermeier, M. Heinrich und S. Eberl, *Entwicklung eines Nachhaltigkeitsbewertungssystems für den Neubau von kleinen Wohngebäuden: Endbericht*, Stiftung für Forschungen im Wohnungs- und Siedlungswesen, Hrsg., 15.12.2013, Kassel, Berlin (siehe S. 24).
- [142] D. Penalzoza, P.-E. Eriksson und J. Noren, „Challenges for the use of life cycle assessment as a decision-making tool in building design: The Wälluden case study“, in *LCM 2013 Gothenburg*,

- A.-M. Tillman und E. Rex, Hrsg. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013, S. 351–354, ISBN: 978-91-980973-5-1 (siehe S. 24).
- [143] V. Stockinger, „Energie+-Siedlungen und -Quartiere: Definition, Planung, Betrieb, Nutzung, Bilanzierung und Bewertung“, Diss., Technische Universität Dresden / Hochschule München, Dresden, 2015 (siehe S. 24, 44).
- [144] Elsevier B.V., *Homepage ScienceDirect - Advanced search (Auswertung vom 04.01.2016)*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/> (siehe S. 25).
- [145] V. John, „Derivation of reliable simplification strategies for the comparative LCA of individual and "typical" newly built Swiss apartment buildings“, Diss., ETH Zurich, Zürich, 2012 (siehe S. 24, 26, 27).
- [146] D. Schuler, „Nachhaltige Gebäudesanierung durch lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl“, Diss., Technische Universität Graz, Graz, 2013 (siehe S. 24).
- [147] V. Ritter, „Optimizing the combination of active and passive building components in refurbishment projects to allow for net-zero emission architecture“, Diss., ETH Zurich, Zürich, 2012 (siehe S. 24).
- [148] A. A. Famuyibo, A. Duffy und P. Strachan, „Achieving a holistic view of the life cycle performance of existing dwellings“, *Building and Environment*, Bd. 70, Nr. 2013, S. 90–101, 2013. DOI: [10.1016/j.buildenv.2013.08.016](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.016) (siehe S. 24).
- [149] J. Anderson, „Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment“, Diss., Technische Universität München, München, 2014 (siehe S. 24).
- [150] J. F. Beney, S. Attia und M. Andersen, „Application of the Cradle to Cradle paradigm to a housing unit in Switzerland: Findings from a prototype design“, in *PLEA 2013 Munich*, W. Lang, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2013, S. 1152–1157, ISBN: 978-3-8167-9053-2 (siehe S. 24).
- [151] J. D. Silvestre, J. de Brito und M. D. Pinheiro, „From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle (3E-C2C)“, *Energy and Buildings*, Bd. 64, Nr. 2013, S. 199–208, 2013. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.05.001](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.001) (siehe S. 24).
- [152] M. Weißenberger, W. Jensch und W. Lang, „A review of the life cycle assessment of nearly zero-energy residential buildings“, in *EcoBalance 2014 Tsukuba*, The Institute of Life Cycle Assessment, Hrsg. Tsukuba: The Institute of Life Cycle Assessment, 2014, S. 228, ISBN: 978-4-9907995-0-2 (siehe S. 25, 29, 33).
- [153] A. Stoffregen, J. Kreißig und H. König, *Ökologische Bewertung der Haustechnik: Projekt-Nr. 10.08.17.7-07.30*, 2010, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt//20088034377> (siehe S. 26).
- [154] S. Pohl, *Analyse der Rechenverfahren für die Ökobilanzierung im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB): Gegenüberstellung von detailliertem und vereinfachtem Rechenverfahren*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014, ISBN: 978-3-8167-9284-0 (siehe S. 26).

- [155] A. Renner, „Energie- und Ökoeffizienz von Wohngebäuden: Entwicklung eines Verfahrens zur lebenszyklusorientierten Bewertung der Umweltwirkungen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase“, Diss., Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2008 (siehe S. 26).
- [156] H. König, *Entwicklung von Grundlagen und Datensätzen für Orientierungs-, Grenz- und Zielwerte für die ökologische Bewertung von Gebäuden*, Juli 2011, Gröbenzell, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/66827445x.pdf> (siehe S. 26).
- [157] J. U. López, „Umweltökonomische Bewertung von solar unterstützten Energieversorgungssystemen in hochwärmegedämmten Einfamilienhäusern“, Diss., Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2013 (siehe S. 26).
- [158] A. Bühl, *SPSS 22: Einführung in die moderne Datenanalyse*. Hallbergmoos: Pearson, 2014, ISBN: 978-3-86894-249-1 (siehe S. 29, 30, 73, 208).
- [159] L. Fahrmeier, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz, *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Berlin und Heidelberg, New York: Springer, 2007, ISBN: 978-3-540-21232-4 (siehe S. 29, 30, 73).
- [160] M. Weißenberger, W. Jensch und W. Lang, „Life cycle energy factor / life cycle emission factor to assess buildings holistically“, in *Innovations for Energy Systems, Mobility, Buildings and Materials*, T. Hamacher, Hrsg. München, 2015, S. 83. DOI: [10.14459/2015md1253500](https://doi.org/10.14459/2015md1253500) (siehe S. 31).
- [161] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi, V. Shree und Varun, „Life cycle assessment of buildings: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 15, Nr. 1, S. 871–875, 2011. DOI: [10.1016/j.rser.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008) (siehe S. 32).
- [162] J. Bastos, S. A. Batterman und F. Freire, „Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon“, *Energy and Buildings*, Bd. 69, Nr. 2014, S. 344–353, 2014. DOI: [10.1016/j.enbuild.2013.11.010](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.010) (siehe S. 33).
- [163] J. Gantner und S. Lasvaux, „Challenges of LCA in a European context - Findings from the research projects OPEN HOUSE and EeBGuide“, in *SB13 Graz*, A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, S. 475–483, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. 33).
- [164] B. Wittstock, M. Fischer, J. Böttge, J. Gantner, E. Ockel und A. Braune, „Trends in Building & Construction Life Cycle Assessment“, in *SB13 Graz*, A. Passer, K. Höfler und P. Maydl, Hrsg. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2013, S. 1013–1020, ISBN: 978-3-85125-301-6 (siehe S. 33).
- [165] M. Hall, „Von Minergie-A zu Nullenergiegebäuden“, *Bauphysik*, Bd. 34, Nr. 5, S. 197–203, 2012. DOI: [10.1002/bapi.201200024](https://doi.org/10.1002/bapi.201200024) (siehe S. 36).
- [166] *DIN 277-1: Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen - Teil 1: Hochbau*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Januar 2016 (siehe S. 37, 39).
- [167] BNK (Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau), Hrsg., *Steckbrief Gebäudezertifizierung: Neubau Ein- bis Fünffamilienhäuser BNK_V1.0 (Kriterium 3.1.1)*, 2015, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.nachhaltigesbauen.de/nachhaltige-wohngebaeude.html> (siehe S. 37).
- [168] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bauen und Wohnen: Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff, Lange Reihen ab*

- 1980, 2015, Wiesbaden, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BautaetigkeitWohnungsbau/BaugenehmigungenBaustoffPDF_5311107.pdf?__blob=publicationFile (siehe S. 39, 59, 66).
- [169] N. Diefenbach und T. Loga, *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011*, Institut Wohnen und Umwelt, Hrsg., 25.08.2011, Darmstadt, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flaechen_Gebaeudetypologie_Aug_2011.pdf (siehe S. 39).
- [170] *DIN 276-1: Kosten im Bauwesen - Teil 1: Hochbau*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Dezember 2008 (siehe S. 40–44, 92, 95, 101, 103, 104, 108, 123, 181, 190).
- [171] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, Hrsg., *Entsorgung von Bauabfällen in Bayern 2012: Q24003 201251*, September 2014, München, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: https://www.statistik.bayern.de/veroeffentlichungen/advanced_search_result.php?keywords=q2400c&x=33&y=9 (siehe S. 40).
- [172] H. König, T. Lützkendorf und M. L. Cristofaro, „Sensitivity of life-cycle analysis results to the required service life of buildings“, in *IALCCE 2012 Vienna*, A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg. Leiden: CRC Press, 2013, S. 1546–1549, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. 40).
- [173] M. Paleari, M. Lavagna und A. Campioli, „Life-cycle assessment and construction costs of a low energy residential building“, in *IALCCE 2012 Vienna*, A. Strauss, D. M. Frangopol und K. Bergmeister, Hrsg. Leiden: CRC Press, 2013, S. 1650–1656, ISBN: 978-0-415-62126-7 (siehe S. 40, 43).
- [174] Z. Stránská und K. Struhala, „Impact of building’s lifespan on the life cycle assessment“, in *IALCCE 2014 Tokyo*, H. Furuta, D. M. Frangopol und M. Akiyama, Hrsg. London: CRC Press, 2015, S. 1910–1916, ISBN: 978-1-138-00120-6 (siehe S. 40, 43).
- [175] P. Schneider und J. Schinabeck, „Mutual impact of design decisions and environmental considerations: Life cycle analysis of an Alpine Hut“, in *WSB 14 Barcelona*, Green Building Council España (GBCe), Hrsg. Madrid: GBCe, 2014, P024:1–7, ISBN: 978-84-697-1815-5 (siehe S. 43).
- [176] BBSR (Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung), *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) (03.11.2011)*, BMVBS-Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg., 2011, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html> (siehe S. 43).
- [177] *VDI 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung*, Berlin: Beuth, Verein Deutscher Ingenieure, September 2012 (siehe S. 44).
- [178] *DIN 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Juni 2003 (siehe S. 44, 115–119, 128, 129, 202).
- [179] *DIN 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, August 2003 (siehe S. 44, 115–119, 202).

- [180] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Hrsg., *Stromverbrauch im Haushalt: Energie-Info*, Januar 2016, Berlin, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/4556D78DC7757097C1257F3B004F8A1A/\\$file/20%20Stromverbrauch%20im%20Haushalt%20Januar%202016.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/4556D78DC7757097C1257F3B004F8A1A/$file/20%20Stromverbrauch%20im%20Haushalt%20Januar%202016.pdf) (siehe S. 44).
- [181] Taglieber Holzbau GmbH, *Homepage Taglieber Holzbau GmbH*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.taglieber-holzbau.de/> (siehe S. 50, 55, 56, 179, 181).
- [182] Bau-Fritz GmbH & Co. KG, *Homepage Bau-Fritz GmbH & Co. KG*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.baufritz.com/de> (siehe S. 50, 57, 58, 179, 181).
- [183] Statistisches Bundesamt, *Homepage Statistisches Bundesamt*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.destatis.de/DE/Startseite.html> (siehe S. 55, 59, 60).
- [184] C. Sprengard, S. Treml und A. H. Holm, *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe: Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014, ISBN: 978-3-8167-9255-0 (siehe S. 59, 67).
- [185] GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie), Hrsg., *Baumarktstatistik 2003-2012 (unveröffentlicht - Anfrage beim GDI vom 25.02.2015); Anmerkung: GDI wurde zum 01.10.2015 aufgelöst*, 2015, Berlin (siehe S. 60, 67).
- [186] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, *Marktanalyse nachwachsende Rohstoffe*. Rostock: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014, ISBN: 978-3-942147-18-7 (siehe S. 60, 67).
- [187] N. Diefenbach, B. Stein, T. Loga, M. Rodenfels, J. Gabriel und M. Fette, *Monitoring der KfW-Programme "Energieeffizient Sanieren" und "Energieeffizient Bauen" 2013*, 05.12.2014, Darmstadt und Bremen, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/News/News-Details_250560.html (siehe S. 60–62, 64, 65, 208).
- [188] *VDI 6000-1: Ausstattung von und mit Sanitarräumen (Wohnungen)*, Berlin: Beuth, Verein Deutscher Ingenieure, Februar 2008 (siehe S. 60).
- [189] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Hrsg., *Zensus 2011: Zensus Kompakt*, 2014, Stuttgart, abgerufen am 03.08.2016. Adresse: https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Aufsaeetze_Archiv/2015_01_Zensus_Kompakt_endgueltig.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (siehe S. 60).
- [190] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980*, 2015, Wiesbaden, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BautaetigkeitWohnungsbau/BaugenehmigungenHeizenergie.html> (siehe S. 60, 61).
- [191] Statistisches Bundesamt, Hrsg., *Wirtschaftsrechnungen: Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Wohnverhältnisse privater Haushalte*, 2013, Wiesbaden, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/EVS_HausGrundbesitzWohnverhaeltnisHaushalte.html (siehe S. 60).
- [192] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg., *Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz: Die Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes in Deutsch-*

- land, November 2015, Berlin, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-erfahrungsbericht-erneuerbare-energien-waermegesetz,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (siehe S. 61, 70).
- [193] HEA (Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung), *Homepage HEA Ausstattungswerte RAL-RG 678*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.hea.de/projekte/ral-rg-678> (siehe S. 62).
- [194] *DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Februar 2013 (siehe S. 66).
- [195] *DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Mai 2010 (siehe S. 66).
- [196] P. Schubert, „Grundlagen“, in *Mauerwerksbau-Praxis nach Eurocode*, P. Schubert, K. J. Schneider und T. Schoch, Hrsg. Berlin, Wien und Zürich: Beuth, 2014, S. 17–57, ISBN: 978-3-410-22739-7 (siehe S. 66).
- [197] *DIN EN 338: Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Juli 2016 (siehe S. 66).
- [198] K. Schild und W. M. Willems, *Wärmeschutz: Grundlagen - Berechnung - Bewertung*. Wiesbaden: Springer, 2013, ISBN: 978-3-658-02571-7 (siehe S. 67).
- [199] A. Drewer, H. Paschko, K. Paschko und M. Patschke, *Wärmedämmstoffe: Kompass zur Auswahl und Anwendung*. Köln: Rudolf Müller, 2013, ISBN: 978-3-481-03094-0 (siehe S. 67).
- [200] *DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1-11*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Dezember 2011 (siehe S. 115–119, 202).
- [201] *DIN 18960: Nutzungskosten im Hochbau*, Berlin: Beuth, Deutsches Institut für Normung, Februar 2008 (siehe S. 123).
- [202] BKI Baukosteninformationszentrum, *BKI Objektdaten: Technische Gebäudeausrüstung (G3): Kosten abgerechneter Bauwerke*. Stuttgart: Rudolf Müller, 2012, ISBN: 978-3-481-02958-6 (siehe S. 131).
- [203] C. Ihle, R. Bader und M. Golla, *Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung: Anlagentechnik SHK*. Köln: Bildungsvaterlag EINS, 2011, ISBN: 978-3-441-92162-2 (siehe S. 131, 134, 198).
- [204] H. Recknagel, E. Sprenger und K. J. Albers, Hrsg., *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München: Deutscher Industrieverlag, 2015, ISBN: 978-3-8356-7136-2 (siehe S. 134).
- [205] Minergie, *Homepage Minergie-Standard*, abgerufen am 02.08.2016. Adresse: <http://www.minergie.ch/> (siehe S. 209).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ökologischer Fußabdruck (Bedürfnisse) und Biokapazität (Angebot) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [2:140+141+144])	1
1.2	Ressourcen- und Energiebedarf bei unterschiedlichen Gebäudestandards	4
2.1	Prognose von 1918 über den Zuwachs des Verbrauchs von 1909 bis 1919 (Datenquelle: [35:9])	7
2.2	Überblick über die geschichtliche Entwicklung (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [17:554])	8
2.3	LCA-Methode angewandt bei Gebäuden (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [17:553])	9
2.4	Primärenergieverbrauch repräsentiert durch den Primärenergieinhalt (PE) – erneuerbar und nicht erneuerbar	12
2.5	„Cradle to Grave-Betrachtung“ („Wiege bis zur Bahre-Betrachtung“) repräsentiert durch die Eingebundene Energie bzw. Emissionen	13
2.6	Definition der <u>E</u> ingebundenen <u>E</u> nergie bzw. <u>E</u> missionen (EE) und <u>B</u> etriebsbedingten <u>E</u> nergie bzw. <u>E</u> missionen (BE) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Module bzw. Phasen DIN EN 15978 [71])	14
2.7	Treibhauseffekt, repräsentiert durch das Treibhauspotenzial (GWP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:338])	15
2.8	Ozonschichtabbau, repräsentiert durch das Ozonabbaupotenzial (ODP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:339])	16
2.9	Versauerung, repräsentiert durch das Versauerungspotenzial (AP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:340])	17
2.10	Überdüngung, repräsentiert durch das Eutrophierungs- bzw. Überdüngungspotenzial (EP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:341])	18
2.11	Bodennahe Ozonbildung, repräsentiert durch das Sommersmogpotenzial (POCP) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [72:342])	19
2.12	Ressourcenverbrauch (Bildung nicht durch Lebewesen bewirkt), repräsentiert durch den abiotischen Ressourcenverbrauch (ADP)	20
2.13	LCA als Bewertungsmethodik für die Ökologie, als eine Säule der Nachhaltigkeit	21
2.14	LCA-Anwendungsgebiete	22
2.15	Entwicklung der Veröffentlichungen bezüglich Gebäude und LCA (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [144] mit Suchbegriffen: „Life cycle assessment“, „LCA“, „Building“ in der Kategorie „Abstract, Title, Keywords“; [17:552] aktualisiert)	25

2.16	Forschungslücken bei bisherigen Veröffentlichungen und Dissertationen	27
3.1	Zusammenstellung der Betrachtungszeiträume (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – <i>Tabelle A.1 auf Seite 178</i>) .	32
3.2	Betrachtung der Gebäudetechnik (Herstellungsphase) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – <i>Tabelle A.1 auf Seite 178</i>) .	34
3.3	Primärenergie für Herstellung, Nutzung (Instandhaltung und Betrieb) sowie Entsorgung inkl. Faktor f_{LZE} (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – <i>Tabelle A.1 auf Seite 178</i>) .	35
3.4	Zusammenhang: Treibhauspotenzial und Primärenergieinhalt (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[123], [125], [126], [129]–[131], [134]–[136] – siehe <i>Tabelle A.1 auf Seite 178</i>)	37
4.1	LCA-Untersuchungsrahmen und LCA-Systemgrenzen	41
4.2	Sachbilanzdaten verknüpft mit der Datenbank (ÖKOBAUDAT) durch die Software (LEGEP / Excel) ergibt die Wirkungsabschätzung	51
4.3	Außenansicht des Einfamilienhauses (Süd-Westseite) (Datenquelle: [181])	55
4.4	Grundriss Erdgeschoss (links) und Schnitt (rechts) des Einfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [181])	56
4.5	Außenansicht des Mehrfamilienhauses (Süd-Ostseite) (Datenquelle: [182])	57
4.6	Grundriss Erdgeschoss (oben) und Schnitt (unten) des Mehrfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [182])	58
4.7	Baustoffaufteilung bei deutschen Wohngebäudeneubauten (Basisjahr 2013 und 2014) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [168:8+9])	59
4.8	Dämmstoffaufteilung für den deutschen Gesamtmarkt Dämmstoffe (Basisjahr 2011) [MW: Mineralwolle, EPS: Expandierter Polystyrolschaum, PUR: Polyurethan-Hartschaum, XPS: Extrudierter Polystyrolschaum, HWF: Holzweichfaser] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [185], [186:706])	60
4.9	Heizenergieaufteilung bei deutschen Wohngebäudeneubauten (Basisjahr 2013 und 2014) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [190:47+48])	61
4.10	Bandbreite der Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe für Wohngebäude mit Angabe zur Verwendungshäufigkeit (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [168:8+9], [194:14–17], [195:15+19], [196:24], [197:7+9])	66
4.11	Bandbreite der Dichte und Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe für Wohngebäude mit Angabe zur Verwendungshäufigkeit (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [185], [186:706], [184:23–54], [198:45–59], [199:176+178+250])	67
5.1	Erklärung der Box-Plot-Darstellung	73

5.2	Aufbau und Überblick über die ökologische Analyse	75
5.3	Abhängigkeit des U-Werts bei der Außenwand gegen Außenluft beim Treibhaus- (GWP) (links) bzw. Versauerungspotenzials (AP) (rechts) (Massivbauweise: WDVS, Monolithisch, Leichtbauweise: Holzrahmenbauweise) (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.4</i> <i>auf Seite 77</i>)	76
5.4	Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparamete- tern (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.5 auf Seite 79</i> und <i>Abbildung 5.6 auf Seite 80</i>)	77
5.5	Außenwand gegen Außenluft (WDVS 24 cm und 36,5 cm tragende Schicht) sortiert nach Tragwerk am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern	79
5.6	Außenwand gegen Außenluft (WDVS 24 cm und 36,5 cm tragende Schicht) sortiert nach Dämmstoffen am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern	80
5.7	Vergleich 24 cm oder 36,5 cm tragende Schicht bei WDVS (Außenwand gegen Au- ßenluft) am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern	80
5.8	Anteil von Verbindungsmitteln (Mörtel bzw. Stahl oder Schrauben) bei Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern	82
5.9	Anteil von „sonstigen“ Baukomponenten (statisch und wärmetechnisch irrelevant (z.B. Farbe), ohne Verbindungsmittel) bei Außenwand gegen Außenluft am Beispiel $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei allen Bewertungsparametern	83
5.10	Anteile der Baukomponenten der Baukonstruktion am Beispiel des KfW 40- Einfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern	86
5.11	Anteile der Baukomponenten der Baukonstruktion am Beispiel des KfW 40- Mehrfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern	87
5.12	Größenordnungen der Gebäudetechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus beim Treibhaus- (GWP) (links) bzw. Versauerungspotenzial (AP) (rechts) (Roter Rahmen: Siehe jeweilige Unterkapitel 5.3.2 auf Seite 92 bis 5.3.5 auf Seite 103) [Heizungstechnik: Diverse Energieerzeuger ohne und mit Solaranlage; Heizungstechnik o./m. PV: Diverse Energieerzeuger ohne und mit Solaranlage sowie ohne und mit PV-Anlage]	89
5.13	Anteil der Hauptkomponenten (Acryl-Wannen, Sanitärkeramik, Wasserrohrleitungen) an der Sanitärtechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungs- parametern (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.14 auf Seite 93</i>)	92
5.14	Kumulierte Häufigkeit der einzelnen Baukomponenten der Sanitärtechnik für das Einfamilien- (links) und Mehrfamilienhaus (rechts) an einem Beispiel (Wasserleitung Edelstahl und Abwasserleitung Polypropylen) beim Treibhauspotenzial (GWP)	93
5.15	Wasser- bzw. Heizungsrohrleitung (normiert auf Mehrschichtverbundrohr) bei allen Bewertungsparametern	94
5.16	Anteil der Hauptkomponenten (Wärmeerzeuger, Trinkwarmwasserspeicher, Wärme- übergabe (Heizkörper oder Fußbodenheizungsrohr) und ggf. Solar- / PV-Module) an der Heizungstechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungs- parametern (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.17 auf Seite 96</i>)	96

5.17 Haupt- und NebenkompONENTEN der Heizungstechnik für das Einfamilienhaus an den Beispielen Gas-Brennwertgerät und Solaranlage (Standardheizungsanlage) (oben) sowie Luft-Wasser-Wärmepumpe (unten) jeweils mit Fußbodenheizung beim Treibhauspotenzial (GWP)	96
5.18 Heizungstechnik mit und ohne Solar- bzw. PV-Anlage für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus beim Treibhauspotenzial (GWP) (Roter Rahmen und Standardheizung: Siehe <i>Abbildung 5.19 auf Seite 98</i>) [o./m. = ohne oder mit; S-TWW = trinkwarmwasserunterstützende Solaranlage; S-Hzg = heizungsunterstützende Solaranlage; S = Solaranlage; PV = PV-Anlage]	97
5.19 Heizungstechnik sortiert nach Erzeugerart für das Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus beim Treibhauspotenzial (GWP) (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.20 auf Seite 100</i>) [Gas = Gas-Brennwertgerät; L-WP = Luft-Wasser-Wärmepumpe; S-WP(S) = Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde; S-WP(K) = Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdkollektor; Pellet = Pelletkessel; FBH = Fußbodenheizung; HK = Heizkörper]	98
5.20 Anteil der Heizungserzeugung, -verteilung und -übergabe für das Einfamilien- (links) und Mehrfamilienhaus (rechts) am Beispiel der Standardmaterialien für Gas-Brennwertgerät und Solaranlage (Standardsystem) (oben) und der Luft-Wasser-Wärmepumpe (unten) jeweils mit Fußbodenheizung beim Treibhauspotenzial (GWP)	100
5.21 Anteil der Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung und Gutschrift der Heizungstechnik (ohne / mit Solar- und ohne / mit PV-Anlage) für das Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern	101
5.22 Anteil der Hauptkomponenten (Lüftungsgerät, Schalldämpfer, Lüftungsanbindeleitung) an der Lüftungstechnik für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Roter Rahmen: Siehe <i>Abbildung 5.23 auf Seite 103.</i>)	102
5.23 Einzelbestandteile der Lüftungstechnik für das Einfamilienhaus an einem Beispiel (Lüftungsleitung: EPE- und flexibles PE-Rohr) bei allen Bewertungsparametern	103
5.24 Anteile des Aufzugs an der Gebäudetechnik für das Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern	105
5.25 Anteile der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik (u.a. Heizungstechnik ohne Solar- bzw. PV-Anlage (links) sowie mit / ohne Solar- und mit / ohne PV-Anlage (rechts)) für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Treibhaus- (GWP) bzw. Versauerungspotenzial (AP)	106
5.26 Anteile des Medians der Gebäudetechnik für das KfW 40-Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern	107
5.27 Anteil der Gebäudetechnik am Einfamilienhaus bei Beispielen mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Varianten bei allen Bewertungsparametern	110
5.28 Anteile des Bauwerks, Betriebs und Gebäudelebenszyklus bei unterschiedlichen Energiekonzepten (minimale bzw. maximale Heizungs- und Lüftungstechnik je Bewertungsparameter) am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses mit der Standard-Baukonstruktion bei allen Bewertungsparametern	112

5.29	Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Betriebs bei unterschiedlichen Energiekonzepten für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Primärenergieinhalt gesamt ($PE_{ges.}$), Treibhaus- (GWP) und Versauerungspotenzial (AP) (Fortsetzung siehe <i>Abbildung C.3 auf Seite 201</i>)	114
5.30	Heizung-, Trinkwarmwasser-, Hilfsenergieanteile (Betrieb) bei unterschiedlichen Berechnungsverfahren sowie Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Haushaltsstroms (Betrieb) am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses bei allen Bewertungsparametern (außer ODP)	116
5.31	Anteile am Lebenszyklus des Einfamilienhauses (Betrieb mit Wärmemix nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (links) bzw. DIN V 18599 [200] (rechts)) über verschiedene Baustandards beim Primärenergieinhalt gesamt ($PE_{ges.}$), Treibhaus- (GWP) und Versauerungspotenzial (AP) (Fortsetzung siehe <i>Abbildung C.4 auf Seite 202</i>)	118
5.32	Ergebniszusammenfassung der ökologischen Analyse am Beispiel des KfW 40-Einfamilienhauses	120
6.1	LCA-Ermittlung und die Kosten- und Nutzungskostenermittlung	123
6.2	Vorgehensweise zur Vereinfachung der detaillierten LCA-Berechnung der Gebäudetechnik mittels LCA-Schätzung und vereinfachter LCA-Berechnung	124
6.3	Anteil der Sanitärkeramik (WC, Waschbecken) und Acryl-Wannen beim Einfamilienhaus an der Sanitärtechnik bei allen Bewertungsparametern	126
6.4	Anteil der Sanitärkeramik, Acryl-Wannen sowie Kunststoff- (links) bzw. Metall- und Mehrschichtverbundwasserrohrleitungen (rechts) beim Einfamilienhaus an der Sanitärtechnik bei allen Bewertungsparametern	128
6.5	Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Sanitärtechnik beim Einfamilienhaus	129
6.6	Gewicht der Sanitär-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Waschbecken, Wannen, Sanitärobjekte: Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, Rohrleitung: [203] (inkl. Formstücke +10%), grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)	131
6.7	Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Heizungstechnik beim Einfamilienhaus	132
6.8	Gewicht der Heizungs-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Wärmeerzeuger, Speicher, Solar-Module: Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, Rohrleitung: [203] (inkl. Formstücke +10%, nicht bei Fußbodenheizung, jedoch 0,88 m/m ² Anbindeleitung), Flachheizkörper: [204] (Daten) und Berechnungen, grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)	134
6.9	Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Lüftungstechnik beim Einfamilien- (oben) sowie Mehrfamilienhaus (unten)	135

6.10	Gewicht der Lüftungs-Hauptkomponenten [grauer Rahmen: Anhaltswerte] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Wohnraumlüftungsgerät, Schalldämpfer, Rohrleitung (inkl. Formstücke +10 %, flexibel +5 %): Eigene Recherche bei verschiedenen Marktteilnehmern, grauer Rahmen: Autoreneinschätzung)	137
A.1	Nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Nutzungsphase und dem kompletten Lebenszyklus bei der Primärenergie (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – siehe <i>Tabelle A.1 auf Seite 178</i>)	177
C.1	Anteile der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik (u.a. Heizungstechnik mit / ohne Solar- und mit / ohne PV-Anlage) für das KfW 40-Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Ergänzung von <i>Abbildung 5.25 auf Seite 106 (rechts)</i>)	200
C.2	Anteile des Medians der Gebäudetechnik für das KfW 40-Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern	200
C.3	Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Betriebs bei unterschiedlichen Energiekonzepten für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Primärenergieinhalt nicht erneuerbar ($PE_{n.e.}$), Ozonabbau- (ODP), Eutrophierungs- (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) (Fortsetzung von <i>Abbildung 5.29 auf Seite 114</i> inkl. Legende)	201
C.4	Anteile am Lebenszyklus des Einfamilienhauses (Betrieb mit Wärmemix nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (links) bzw. DIN V 18599 [200] (rechts)) über verschiedene Baustandards beim Primärenergieinhalt nicht erneuerbar ($PE_{n.e.}$), Ozonabbau- (ODP), Eutrophierungs- (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) (Fortsetzung von <i>Abbildung 5.31 auf Seite 118</i> inkl. Legende)	202
D.1	Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Sanitärtechnik beim Mehrfamilienhaus	203
D.2	Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Heizungstechnik beim Mehrfamilienhaus	204

Tabellenverzeichnis

2.1 Beschreibung der derzeit üblichen Wirkungskategorien bzw. Bewertungsparameter (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [39:222], [54:34+35], [55:28])	11
4.1 Zusammenfassung der wichtigsten Kriterien der Rahmenbedingungen	54
4.2 Übersicht über die Eckdaten des Einfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Pläne von [181])	56
4.3 Übersicht über die Eckdaten des Mehrfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Pläne von [182])	57
4.4 Übersicht über die Baukonstruktion und Gebäudetechnik des Standardgebäudes . . .	63
4.5 Übersicht über die verwendeten U-Werte der energetischen Gebäudestandards (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Basis: [20:Anl.1 Tab.1], KfW: [187:63] und Be- rechnung, Passiv und Min. U.: Annahmen und Berechnung)	65
4.6 Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Hauptbaustoffs sowie die zugehörigen Mörtel- bzw. Metallanteile (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autorenerfahrung)	66
4.7 Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Wandaufbauten (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autorenerfahrung)	67
4.8 Übersicht über die ausgewählten Gebäudetechnikvarianten	69
5.1 Übersicht über das Minimum und Maximum in Abhängigkeit von der Bauweise bei Decke und Innenwand bei allen Bewertungsparametern	84
5.2 Übersicht über den theoretisch minimalen und maximalen Anteil der Gebäudetechnik untereinander für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparame- tern (außer ODP) – mit PV-Anlage / ohne PV-Anlage	90
5.3 Anteile der Baukomponenten der Elektrotechnik für das Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern	104
5.4 Theoretische Minimal- und Maximalanteile der Gebäudetechnik beim Einfamilien- und Mehrfamilienhaus bei verschiedenen energetischen Gebäudestandards bei allen Bewertungsparametern	108
6.1 LCA-Faktoren der Sanitärtechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA- Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus	130
6.2 LCA-Faktoren der Heizungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA- Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus	133

6.3 LCA-Faktoren der Lüftungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus	136
A.1 Datengrundlage der Metaanalyse (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139])	178
B.1 Sachbilanz der Gebäudekonstruktion inkl. Flächenermittlung des Ein- und Mehrfamilienhauses (KG 300 nach DIN 276-1 [170]) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt) auf Grundlage der Angaben von [181], [182])	181
B.2 Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Decken- bzw. Bodenaufbauten (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autorenerfahrung)	189
B.3 Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Decken- bzw. Boden- und Dachaufbauten (Untersparren- und Zwischensparrendämmung) (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autorenerfahrung)	189
B.4 Sachbilanz der Gebäudetechnik des Ein- und Mehrfamilienhauses (KG 400 nach DIN 276-1 [170]) [Spezifisches Gewicht bezieht sich auf das Einfamilienhaus] (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen / Recherchen (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt) auf Grundlage der (Bau-)Pläne)	190
B.5 Sachbilanz der Rohrleitungen einschließlich Formstücke (Rohrlänge siehe <i>Tabelle B.4 auf Seite 190</i>) der Gebäudetechnik des Ein- und Mehrfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen / Recherchen u.a. Sanitär- und Heizungsrohrleitung: [203] (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt))	198
D.1 LCA-Faktoren der Sanitärtechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]	204
D.2 LCA-Faktoren der Heizungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]	205
D.3 LCA-Faktoren der Lüftungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]	205

Anhang

A Weitere Ergebnisse und Datengrundlage der Metaanalyse

In *Tabelle A.1 auf der nächsten Seite* sind die Daten zur Metaanalyse (Kapitel 3 auf Seite 29) aufgelistet. Die grau eingefärbten Daten wurden, aufgrund Dopplung, für Abbildungen und Auswertungen nicht verwendet. Des Weiteren sind die ausgegrauten unterstrichenen Werte Extremwerte (3-mal Interquartilsabstand - siehe Kapitel 5.1.1 auf Seite 73) und wurden ebenfalls nicht beachtet. Normalausreißer (1,5-mal Interquartilsabstand - siehe Kapitel 5.1.1 auf Seite 73) wurden betrachtet, da die Fallstudien teilweise uneinheitliche Rahmenbedingungen aufweisen. Ferner zeigt *Abbildung A.1* den annähernd linearen Zusammenhang der Primärenergie zwischen dem Betrieb, einem Teil in der Nutzungsphase neben der Instandhaltung, und dem kompletten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung, Entsorgung) der untersuchten Gebäude (Kapitel 3.2.3 auf Seite 35).

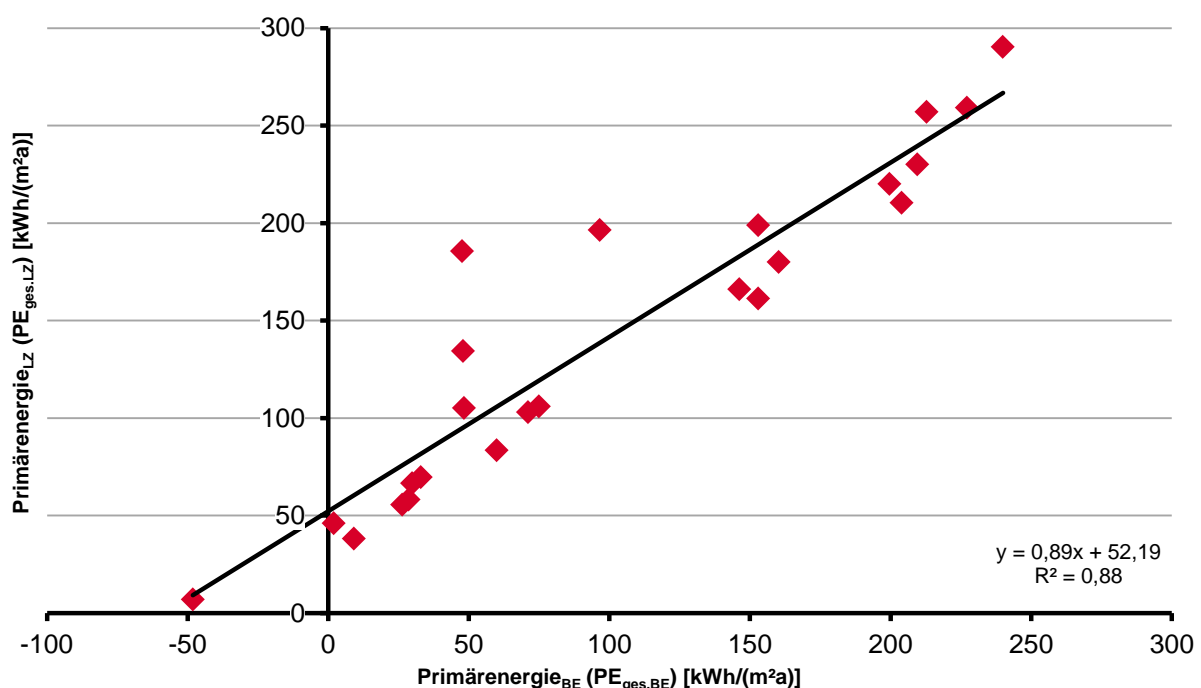


Abbildung A.1: Nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Nutzungsphase und dem kompletten Lebenszyklus bei der Primärenergie
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139] – siehe *Tabelle A.1 auf der nächsten Seite*)

Tabelle A.1: Datengrundlage der Metaanalyse (Eigene Darstellung mit Datenquelle: [108], [120]–[139])

	Passer u.a. 2012 (PH)	Motuziene 2013 (PH)	Hafner u.a. 2013	Gustavsson u.a. 2010 (PH)	Gustavsson u.a. 2010 (PH)	Dodoo u.a. 2011	Dahlström u.a. 2012 (PH)	Mosteiro-Romero u.a. 2014 (PH)	Cellura u.a. 2014	Gustavsson u.a. 2010 (PH)	Gustavsson u.a. 2010 (PH)	Gustavsson u.a. 2010 (PH)	Paleari u.a. 2013	Citherlet u.a. 2007	Blengini u.a. 2010	Bribian u.a. 2009	Thormark 2002	Verbeeck u.a. 2010	Verbeeck u.a. 2010	Verbeeck u.a. 2010	Citherlet u.a. 2007	Thiers u.a. 2012 (PH)	Monteiro u.a. 2012	Proietti u.a. 2013	Ortiz-Rodriguez u.a. 2010	Wiberg u.a. 2014 (PH)	Lewandowska u.a. 2013 (PH)	
Betrachtungszeitraum	50	100	80	50	50	50	50	65	70	50	50	50	100	o	70	50	50	30	30	30	o	80	50	70	50	60	100	
Funktionelle Einheit	m ²	m ²	Geb.	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²	Geb.	m ² a	m ² a	m ² a	m ²	m ³	m ³	m ³	m ² a	m ² a	m ³	m ² a	m ² a	m ² a	Geb.	
A: Herstellung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
A1-A3: Gebäudetechnik Erzeugung	+	o	o	o	o	o	o	+	+	o	o	o	+	o	+	o	-	o	o	o	o	+	-	+	o	+	+	
A1-A3: Gebäudetechnik Verteilung	+	o	o	o	o	o	o	+	o	o	o	o	-	o	+	o	-	o	o	o	o	o	-	+	o	+	+	
A1-A3: Gebäudetechnik Übergabe	+	o	o	o	o	o	o	+	o	o	o	o	-	o	+	o	-	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	
B: Nutzung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
B2-B4: Instandhaltung	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	
B6: Heizung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
B6: Warmwasser	+	+	o	+	+	+	+	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	o	o	o	+	+	-	+	+	+	+	
B6: Lüftung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	o	+	+	o	+	o	o	o	+	+	o	+	+	+	+	
B6: Kühlung	+	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	+	+	n.v.	n.v.	n.v.	+	n.v.	n.v.	+	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	+	+	+	+	n.v.	+	
B6: Elektrische Energie	+	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	o	o	o	+	+	-	+	+	+	+	
C+D: Entsorgung & Recycling	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	
Herstellung (EE) [kWh/(m ² a)]	44	29	22	20	20	14	38	96	85	20	20	20	72	19	71	32	34	37	37	30	17	43	25	89	n.v.	-	n.v.	
Nutzung / Betrieb (BE) [kWh/(m ² a)]	240	227	213	210	200	204	153	97	48	160	146	153	48	75	48	71	60	33	30	29	26	2	9	-48	n.v.	-	n.v.	
Nutzung / Instandh. (EE) [kWh/(m ² a)]	+	+	16	-	-	-	+	+	<u>72</u>	-	-	-	11	10	+	+	5	+			10	+	4	+	n.v.	-	n.v.	
Entsorgung (EE) [kWh/(m ² a)]	6	3	0	-	-	-8	8	3	-19	-	-	-11	3	3	-14	-	-16	-	-	-	3	1	-	-34	n.v.	-	n.v.	
PE-Lebenszyklus [kWh/(m ² a)]	290	259	250	230	220	210	199	196	186	180	166	161	134	106	105	103	83	70	67	58	56	46	38	7	n.v.	-	n.v.	
f _{LZE} = BE/EE [-]	4,8	7,1	5,7	10,3	9,8	<u>31,9</u>	3,3	1,0	<u>0,3</u>	8,1	7,4	18,4	0,6	2,4	0,9	2,2	2,6	0,9	0,8	1,0	0,9	0,0	0,3	-0,9				
GWP-Lebenszyklus [kg CO ₂ -Äq./m ² a]	51	31	45	21	20	-	24	21	-	16	15	-1	38	11	23	25	-	-	-	-	10	12	9	6	49	3	-	

B Sachbilanzdaten

Tabelle B.1 auf Seite 181 und *Tabelle B.4 auf Seite 190* zeigen die Sachbilanzdaten und sind somit die Berechnungsgrundlage (Kapitel 4 auf Seite 39), wobei *Tabelle B.5 auf Seite 198* die Sachbilanz hinsichtlich Rohrleitungen ergänzt. Die Flächen- und Mengenangaben beruhen auf den im Kapitel 4.2 auf Seite 55 beschriebenen Gebäuden. Die Darstellung der Sachbilanz soll die Nachvollziehbarkeit erhöhen und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Studien erleichtern. Bei der Sachbilanz der Baukonstruktion konnte auf Datenmaterial der Firma Taglieber [181] (Einfamilienhaus) und Firma Bau-Fritz [182] (Mehrfamilienhaus) zurückgegriffen werden. Die Sachbilanz der Gebäudetechnik wurde anhand der realen Grundrisse erstellt. Folglich gründen die Sachbilanzdaten auf tatsächlich benötigte Mengen und realistischen Berechnungen sowie Annahmen. Alle Konstruktionsbauteile werden hinsichtlich Material variiert, außer die Außenfenster und -türen (Kunststoff), Innentüren (Holz), Bauteile gegen Erdreich (Stahlbeton und XPS) sowie sonstige Bauteile (z.B. Treppe). Zusätzliche Anmerkungen sind jeweils in den Tabellen vermerkt.

Tabelle B.1 auf Seite 181 beinhaltet keine kleinteiligen Bauteile, die vom Regelaufbau abweichen. Beispiele der unberücksichtigten Bauteile sind die Fensterbretter, Rollläden, Jalousien, Türstürze beim Massivbau, Anputzleisten, Eckschutzprofile, Silikon- und Acrylfugen. Beispielsweise existiert eine Abweichung vom Regelaufbau beim Anstrich sowie Putz bzw. Gipskartonplatten bei der Fensterlaibung oder beim Spritzwasserschutz des Wärmedämmverbundsystems. Die Vereinfachungen werden mit minimaler Ergebnisrelevanz eingeschätzt; zudem sind diese unabhängig vom Untersuchungsziel.

Des Weiteren werden keine nutzerabhängigen Materialien in die Sachbilanz aufgenommen. Beispiele sind hierfür Tapeten oder verschiedene Wand- und Bodenbeläge (hier nur Fliesen bei allen Böden und Farbanstrich bei allen Wänden). Die Tatsache, dass somit die Wandfliesen in den Bädern und andere Bodenbeläge nicht bilanziert werden, wird als geringfügige Ergebnisabweichung erachtet.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden nach Abschätzungen Vereinfachungen getroffen. Bei den Variationen des Gebäudestandards wird von gleichbleibenden Flächen ausgegangen. In der Realität ergeben sich durch die verschiedenen energetischen Standards und Materialien unterschiedliche Bauteilmaße und hierdurch geringfügig veränderte Gebäudemaße. Des Weiteren wird angenommen, dass bei allen Dämmstärken das gleiche Gewicht von Dübel und mineralischem Kleber herrscht. Der Metallanteil bei den Holzbauteilen wird nicht verändert. Zudem erfolgt keine Abminderung der Innenflächen zu den Außenflächen; real ist die Innenfläche aufgrund der Wandanschlüsse etwas kleiner als die Außenfläche. Angesichts der Tatsache, dass die Grunddaten auf hohem energetischem Standard (ca. KfW 40 / Passivhaus) basieren, wird der Fehler als gering eingeschätzt.

Bei der Flächenermittlung werden die Bemaßungsregeln der EnEV 2014 [20] eingehalten, d.h. beispielsweise werden bei Außenbauteilen die Außenmaße und bei Innenbauteilen die Bauteilmitte angenommen. Hierdurch werden zum Beispiel die Außenecken doppelt gemessen oder die Innenfläche mit der Geschosshöhe verrechnet; folglich sind die Berechnungsflächen größer als die realen Flächen. Würden beispielsweise alle Außenwandflächen einmalig erfasst, wäre der Außenwandflächenanteil um ca. 2% bis 4% geringer; das spiegelt sich proportional wider im Ergebnis. Bei den

Decken bzw. Fußböden wurde die BGF berücksichtigt. Die gewählte Vorgehensweise hat zum einen den Vorteil, dass automatisch ein Sicherheitsfaktor integriert ist; zum anderen im Hinblick auf eine integrative Planung müssen die Flächen nur einmal bestimmt werden.

Beim Vergleich der Gebäudehülle bzw. Baukonstruktion wurde auf eine gleiche energetische Qualität geachtet, d.h. gleicher U-Wert; hierdurch sind die Dämmstärken exakt berechnet und besitzen keine Standardverkaufsmaße (z.B. 8,8 cm statt 8 cm Mineralwolle); ebenso wurde von gleichartigen Eigenschaften hinsichtlich Brand- und Schallschutz sowie Standsicherheit ausgegangen. Eine detaillierte Analyse und v.a. für praktische Überprüfung fand nicht statt. Gleichwohl kann aufgrund der Begebenheiten des Kleinwohnungsbaus von einer gleichen funktionellen Einheit ausgegangen werden. Bei der U-Wert- und folglich der Massenermittlung wurde die Dämmstärke variiert; hierdurch tritt bei der Leichtbauweise eine Veränderung des Tragwerkes ein (dickere Zwischendämmung erfordert ein stärkeres Konstruktionsvollholz).

Die Referenzausführung der EnEV [20:Anl.1 Tab.1] ändert sich zur Standardausführung wie folgt:

- Zeile 1: Bauteil-U-Wert (unverändert) bzw. U-Werte der jeweiligen Variante
- Zeile 2: Wärmebrückenzuschlag (unverändert)
- Zeile 3: Luftdichtheit (unverändert)
- Zeile 4: Sonnenschutzvorrichtung (unverändert)
- Zeile 5: Heizungsanlage
 - Wärmeerzeugung durch Brennwertkessel (verbessert), Erdgas
 - Auslegungstemperatur 35/28 °C
 - Wärmeübergabe mit Flächenheizung mit Zweipunktregler und Schaltdifferenz 1 K
- Zeile 6: Anlage zur Warmwasserbereitung (u.a. mit Solaranlage) (unverändert)
- Zeile 7: Kühlung (unverändert)
- Zeile 8: Lüftung
 - zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (80%)

Tabelle B.2 auf Seite 189 und *Tabelle B.3 auf Seite 189* geben einen Überblick über die gewählten Dichten und Wärmeleitfähigkeiten für die Decken- und Dachaufbauten. Das Holz-Steildächer wird mit diversen Dämmmaterialien betrachtet. Die Annahmen bzw. Auswahl der Wärmeleitfähigkeit und Dichte basieren auf Gesprächen mit Experten von Marktteilnehmern und Fachverbänden sowie auf Autorenerfahrung. Ferner sind die übrigen Daten im Kapitel [4.4.2 auf Seite 64](#) dargestellt. Hierbei sei anzumerken, dass bei der Leichtbauvariante, erstens, für die Dämmung der Installationsebene auch Zelluloseplatten (nicht dargestellt in *Tabelle 4.7 auf Seite 67*) zum Einsatz kommen (Eigenschaft: *Tabelle B.3 auf Seite 189*) und zweites, Holzweichfaserplatten als Putzträger verwendet werden (195 kg/m³ mit 0,047 W/(mK) bzw. 190 kg/m³ mit 0,045 W/(mK)).

Tabelle B.1: Sachbilanz der Gebäudekonstruktion inkl. Flächenermittlung des Ein- und Mehrfamilienhauses (KG 300 nach DIN 276-1 [170])
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt) auf Grundlage der Angaben von [181], [182])

Name	EFH	MFH	Schichtbezeichnung	Material	Schicht U-Wert	Anteil	Insth.	Dicke	Dichte	Wärmeleitf.	spez. Gewicht	Anmerkungen
[-]	[m²]	[m²]	[-]	[-]	[-]	[%]	[a]	[cm]	[kg/m³]	[W/(mK)]	[kg/m²]	[-]
KG 310 Baugrube												
KG 320 Gründung												
Bodenplatte												
Horiz. 89 173												
<i>Massiv</i>												
			<i>Oben / Innen</i>									
			Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen
			Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung
			Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-
			Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)
			Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-
			Trittschalldämmung	Mineralwolle	3	100%	(>)50	3,5	80	0,035	2,80	immer 3,5cm
			Fußboden-Dämmung	Mineralwolle	4	100%	(>)50	<8	80	0,035	var.	variiert (<8cm)
			Bitumenbahn	Bitumen	-	-	(>)50	0,4	1050	0,17	4,20	Dampfsperre
			Stahlbeton	C25/30	5	100%	>50	25	2350	1,65	576	WU-Beton
			Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	39,0	2% Amierung
			Folie	PE-Folie	-	-	>50	0,4	980	0,50	3,92	-
			Perimeter-Dämmung	XPS	6	100%	>50	var.	35	0,04	var.	(nur XPS), MFH:5cm
			Magerbeton	C8/10	7	100%	>50	5,0	2350	1,65	118	Sauberkeitsschicht
			<i>Unten / Außen (Erdreich)</i>									
<i>Leicht</i>												
keine Alternative												
KG 330 Außenwände												
Außenwände gegen Erdreich												
Nord	15	46										
Ost	30	23										
Süd	21	65										
West	27	43										
Σ	92	177										
bezogen auf Bruttofläche												
<i>Massiv</i>												
			<i>Innen</i>									
			Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
			Kalkzementputz	Kalkzementputz	1	100%	(>)50	1,5	1800	1,00	27,0	Kellerb. (Normalputz)
			Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	Normalputz
			Stahlbeton	C25/30	2	100%	>50	25	2350	1,65	576	WU-Beton
			Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	39,0	2% Amierung
			Dickbeschichtung	Bitumenemulsion	-	-	(>)50	-	1100	0,23	5,00	Dampfsperre
			Kleber f. Dämmung	Bitumen Kaltkleber	-	-	(>)50	-	1100	0,23	3,00	Datens. Bitumenb.
			Perimeter-Dämmung	XPS	3	100%	(>)50	var.	35	0,036	var.	(nur XPS), MFH:12cm
			<i>Außen (Erdreich)</i>									
<i>Leicht</i>												
keine Alternative												
Außenwände gegen Außenluft												
Nord	55	32										
Ost	58	62										
Süd	36	146										
West	58	50										
Σ	208	290										
bezogen auf Bruttofläche (mit Dämmung: WDVS)												
<i>Massiv</i>												
			<i>Innen</i>									
			Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
			Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
			Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
			Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	var.	Tab.	Tab.	var.	24cm (Standard) / 36cm
			Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)
			Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	var.	2% Amierung (b. Stb.)
			Klebem. f. Dämmung	Dünnbettmauerm.	-	-	40	-	1600	1,00	4,50	mineral. (m. Dübel)

	Befestigung	PA-Schlagdübel	-	-	40	-	-	-	0,12	6 Stk./m ² je 20g/Stk.	
	WDVS-Dämmung	versch. Dämm.	3	100%	40	var.	Tab.	Tab.	var.	variiert	
	Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	30	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m ² b. 1,1m ² /m ²	
	Kalkzementputz	Kalkzementputz	4	100%	30	0,7	1800	1,00	12,6	5+2mm (Normalp.)	
	Außenanstrich	Dispersions-Silikatf.	-	-	20	-	1500	k.A.	0,54	0,36l/m ² , zweimalig	
	<i>Außen (Außenluft)</i>										
<i>Massiv</i>	<i>Innen</i>										
	(o. Dämmung: monolithisch)										
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m ² , zweimalig	
	Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-	
	Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	>20	Tab.	<0,20	var.	variiert (Steine)	
	Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)	
	Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	30	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m ² b. 1,1m ² /m ²	
	Kalkzementputz	Kalkzementputz	3	100%	30	1,5	1800	1,00	27,0	13+2mm (Normalp.)	
	Außenanstrich	Dispersions-Silikatf.	-	-	20	-	1500	k.A.	0,54	0,36l/m ² , zweimalig	
		<i>Außen (Außenluft)</i>									
<i>Leicht</i>	<i>Innen</i>										
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m ² , zweimalig	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	1	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Dämmst. (Installationse.)	versch. Dämm.	2	90,4%	(>)50	<14	Tab.	Tab.	var.	0,89m ² /m ² ; Zell.-Platt.	
	Lattung (Installationse.)	KVH 6/var. (<16)	2	9,6%	(>)50	<14	Tab.	0,13	var.	2,63lfm/m ² (<14cm)	
	Metallteile (Installationse.)	Verz. Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,22	Schrauben etc.	
	OSB-Platte	OSB	3	100%	(>)50	1,5	650	0,13	9,75	m. Klebeb. = Dampfb.	
	Klebeband (Dampfb.)	PE	-	-	(>)50	-	-	k.A.	0,04	1,58lfm/m ² f. OSB	
	Luftschicht	Ruhende Luft (aufw.	4A	90,4%	(>)50	<12	-	-	0,00	n. DIN EN ISO 6946	
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	4B	90,4%	(>)50	var.	Tab.	Tab.	var.	0,70m ² /m ² (>12u.<40cm)	
	Holz (Tragwerk + Zusatz)	KVH 6/var.(>12<28)	4a	9,6%	>50	var.	Tab.	0,13	var.	4,44lfm/m ² (>12u.<28cm)	
	Holz (Tragwerk + Zusatz)	BSH 6/var.(>28<40)	4b	9,6%	>50	var.	Tab.	0,13	var.	4,44lfm/m ² (>28u.<40cm)	
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,65	Schrauben, Winkel etc.	
	Putzträger	Holzweichfaserp.	5	100%	40	>6	Tab.	Tab.	var.	immer Holzweichfaserp.	
	Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	30	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m ² bei 1,1m ² /m ²	
	Kalkzementputz	Kalkzementputz	6	100%	30	0,7	1800	1,00	12,6	5+2mm (Normalp.)	
	Außenanstrich	Dispersions-Silikatf.	-	-	20	-	1500	k.A.	0,54	0,36l/m ² , zweimalig	
		<i>Außen (Außenluft)</i>									

Außenwände / Gebäudetreppenhäuser

Zwischenwände (Massiv)

Nord	0	111
Ost	0	31
Süd	0	0
West	0	35
Σ	0	177

Treppenhäuser teilweise (MFH)

Massiv

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m ² , zweimalig
Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Stahlbeton	C25/30	2	100%	>50	20	2350	1,65	461	nur Beton
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung
Klebem. f. Dämmung	Dünnbettmauerm.	-	-	>50	-	1600	1,00	4,50	mineral. (m. Dübel)
Befestigung	PA-Schlagdübel	-	-	>50	-	-	-	0,12	6 Stk./m ² je 20g/Stk.
WDVS-Dämmung	Mineralwolle	3	100%	>50	5,0	70	0,035	3,50	nur Mineralwolle

Außen (Nachbargebäude)

Zwischenwände (Massiv o. Leicht)

Nord	0	66
Ost	0	0
Süd	0	0
West	0	0
Σ	0	66

bezogen auf Bruttofläche

Massiv

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m ² , zweimalig
Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	24	Tab.	Tab.	var.	24cm (Standard)
Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	37,4	2% Amierung (b. Stb.)

B Sachbilanzdaten



	Kleber. f. Dämmung	Dünnettmauerm.	-	-	>50	-	1600	1,00	4,50	mineral. (m. Dübel)
	Befestigung	PA-Schlagdübel	-	-	>50	-	-	-	0,12	6 Stk./m ² je 20g/Stk.
	WDVS-Dämmung	Mineralwolle	3	100%	>50	5,0	70	0,035	3,50	nur Mineralwolle
	<i>Außen (Nachbargebäude)</i>									
<i>Leicht</i>	<i>Innen</i>									
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m ² , zweimalig
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	1	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	2	90,4%	(>)50	12	Tab.	Tab.	var.	0,89m ² /m ² ; Zell.-Platt.
	Holz (Tragwerk + Zusatz)	KVH 6/12	2	9,6%	>50	12	Tab.	0,13	var.	4,44lfm/m ² inkl. Zusatzh.
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,65	Schrauben, Winkel etc.
	OSB-Platte	OSB	3	100%	>50	1,5	650	0,13	9,75	-
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	4	100%	>50	1,5	900	0,25	13,5	1. Schicht GKF
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	>50	-	900	0,25	0,35	-
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	5	100%	>50	1,5	900	0,25	13,5	2. Schicht GKF
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	>50	-	900	0,25	0,35	-
	Metallteile	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,17	Schrauben etc.
	Zwischendämmung	Mineralwolle	6	100%	>50	5,0	70	0,035	3,50	nur Mineralwolle
	<i>Außen (Nachbargebäude)</i>									

KG 334 Außentüren und -fenster

Außentüren

Nord	4,5	0
Ost	2,8	2,6
Süd	0	0
West	0	0
Σ	7,3	2,6

	Türrahmen / -blatt	Kunststoff (PVC-U)	1	k.A.	30	-	1390	0,17	7,90	2,15m ² /m ² Blend-/Flügelr.
	Verglasung / Sichtfenster	Zweifachverg.	1a	k.A.	30	-	2500	1,00	8,93	g=70%;>1,40W/m ² K/28%
	Verglasung / Sichtfenster	Dreifachverg.	1b	k.A.	30	-	2500	1,00	11,9	g=60%;<1,40W/m ² K/28%
	Dämmungskern	XPS	1	k.A.	30	-	35	0,036	0,84	< 1,40W/m ² K
	Türschwelle	Alu	-	-	30	-	2800	160	0,81	-
	Befestigung	Verzinkter Stahl	-	-	30	-	7800	50	0,07	-
	Türschloss / Mechanik	Verzinkter Stahl	-	-	30	-	7800	50	0,14	0,29kg/Stk.
	Beschläge	Edelstahl	-	-	30	-	7900	24	1,06	3,17kg/Stk.
	Dichtung	EPDM	-	-	30	-	1150	0,25	0,11	-

Außenfenster

Nord	0	3,4
Ost	16	23
Süd	18	87
West	22	19
Σ	55	132

	Fensterrahmen /-flügel	Kunststoff (PVC-U)	1	k.A.	30	-	1390	0,17	20,0	6,75m ² /m ² Blend-/Flügelr.
	Stahlrohrverstärkung	Stahl	-	-	30	-	7800	50	16,5	Rahmen inkl. Mechanik
	Verglasung	Zweifachverg.	1a	k.A.	30	-	2500	1,00	16,2	g=70%;>1,00W/m ² K/63%
	Verglasung	Dreifachverg.	1b	k.A.	30	-	2500	1,00	23,9	g=60%;<1,00W/m ² K/63%
	Befestigung	Verzinkter Stahl	-	-	30	-	7800	50	0,07	-
	Beschläge	Edelstahl	-	-	30	-	7900	24	0,15	-
	Dichtung	EPDM	-	-	30	-	1150	0,25	0,60	-

KG 340 Innenwände

Innenwände gegen unterschiedliche Temperatur (unbeheizt)

Σ	0	0
---	---	---

nicht vorhanden

Innenwände gegen gleiche Temperatur

17,5cm (Massiv) Wandstärke

Nord	35	31
Ost	16	0
Süd	0	0
West	13	41
Σ	64	72

im Keller

Massiv

Innen

	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m ² , zweimalig
	Kalkzementputz	Kalkzementputz	1	100%	(>)50	1,5	1800	1,00	27,0	Kellerb. (Normalp.)
	Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	Normalputz (b. Stb.)
	Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	17,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (Steine/Beton)

bezogen auf Bruttofläche

Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	var.	2% Amierung (b. Stb.)
Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	Normalputz (b. Stb.)
Kalkzementputz	Kalkzementputz	3	100%	(>)50	1,5	1800	1,00	27,0	Kellerb. (Normalp.)
Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig

Innen

20cm (Stahlbeton) Wandstärke

im Keller, Treppenhaus teilweise (MFH)

Nord	0	0
Ost	0	0
Süd	0	22
West	0	4,2
Σ	0	26

bezogen auf Bruttofläche
(Stahlbeton)

Massiv

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
Kalkzementputz	Kalkzementputz	1	100%	(>)50	1,5	1800	1,00	27,0	Kellerb. (Normalp.)
Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	Normalputz (bei Beton)
Stahlbeton	C25/30	2	100%	>50	20	2350	1,65	461	-
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung
Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	Normalputz (bei Beton)
Kalkzementputz	Kalkzementputz	3	100%	(>)50	1,5	1800	1,00	27,0	Kellerb. (Normalp.)
Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig

Innen

20cm (Stahlbeton) Wandstärke

Treppenhaus teilweise (MFH)

Nord	0	0
Ost	0	0
Süd	0	91
West	0	21
Σ	0	112

bezogen auf Bruttofläche
(Stahlbeton)

Massiv

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Stahlbeton	C25/30	2	100%	>50	20	2350	1,65	461	-
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Gipsputz	Gipsputz	3	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig

Innen

11,5cm (Massiv) bzw. 12cm (Leicht) Wandstärke

Nord	47	81
Ost	53	31
Süd	50	45
West	23	145
Σ	173	302

bezogen auf Bruttofläche

Massiv

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	11,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (Steine/Stb.)
Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	var.	2% Amierung (b. Stb.)
Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)
Gipsputz	Gipsputz	3	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-
Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig

Innen

Leicht

Innen

Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30/m², zweimalig
Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	1	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF
Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-
Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	2a	90,4%	(>)50	8,0	Tab.	Tab.	var.	0,89m³/m²; Zell.-Platt.
Luftschicht	Ruhende Luft (aufw.)	2b	90,4%	(>)50	4,0	-	-	0,00	n. DIN EN ISO 6946
Holz (Tragwerk + Zusatz)	KVH 6/12	2	9,6%	>50	12	Tab.	0,13	var.	4,90lfm/m² inkl. Zusatzh.
Metallteile (gesamt)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,44	Schrauben, Winkel etc.

	OSB-Platte	OSB	3	100%	(>)50	1,5	650	0,13	9,75	-	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	4	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Innen</i>										
17,5cm (Massiv) bzw. 16cm (Leicht) Wandstärke											
Nord	19	0									
Ost	0	0									
Süd	0	0									
West	0	0									
Σ	19	0									
			bezogen auf Bruttofläche								
<i>Massiv</i>	<i>Innen</i>										
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	Gipsputz	Gipsputz	1	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-	
	Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)	
	Tragwerk	versch. Tragwerk	2	100%	>50	17,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (Steine/Stb.)	
	Mörtel	Mörtel	-	-	>50	-	Tab.	Tab.	var.	1-5% (je nach Stein)	
	Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	var.	2% Amierung (b. Stb.)	
	Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)	
	Gipsputz	Gipsputz	3	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Innen</i>										
<i>Leicht</i>	<i>Innen</i>										
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	1	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	2a	90,4%	(>)50	8,0	Tab.	Tab.	var.	0,89m²/m²; Zell.-Platt.	
	Luftschicht	Ruhende Luft (aufw.	2b	90,4%	(>)50	8,0	-	-	0,00	nach DIN EN ISO 6946	
	Holz (Tragwerk + Zusatz)	KVH 6/16	2	9,6%	>50	16	Tab.	0,13	var.	4,90lfm/m² inkl. Zusatzh.	
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,46	Schrauben, Winkel etc.	
	OSB-Platte	OSB	3	100%	(>)50	1,5	650	0,13	9,75	GKF	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	4	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	-	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Innen</i>										

KG 344 Innentüren und -fenster

Innentüren

Nord	17	20
Ost	8,6	6,3
Süd	4,1	5,5
West	4,7	26
Σ	35	57

			bezogen auf Bruttofläche								
	Türblatt	Röhrenspanplatte	1	100%	(>)50	2,9	600	0,13	16,5	inkl. Funier	
	Zarge	Holz	-	-	(>)50	-	350	0,13	10,6	39% Zargenanteil	
	Befestigung / Türbänder	Verzinkter Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,39	0,83kg/Stk.	
	Türschloss / Mechanik	Verzinkter Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,14	0,29kg/Stk.	
	Beschläge	Edelstahl	-	-	(>)50	-	7900	24	0,25	0,52kg/Stk.	

KG 350 Decken

Decken / Boden gegen Erdreich

Horiz.	4,5	0
--------	-----	---

Massiv

Leicht

bezogen auf Bruttofläche
wie Bodenplatte (hier EG)
nicht vorhanden

Decken gegen Außenluft

Decken (Massiv oder Leicht) - hier gegen Garage

Horiz.	12	0
--------	----	---

Massiv

			bezogen auf Bruttofläche								
	<i>Oben / Innen (Warm)</i>										
	Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen	
	Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung	
	Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-	
	Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)	
	Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-	
	Trittschaldämmung	versch. Dämm.	3	100%	(>)50	3,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (3,5cm)	

Leicht	Fußboden-Dämmung	versch. Dämm.	4	100%	(>)50	5,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (5,5cm)	
	Stahlbeton	C25/30	5	100%	>50	20	2350	1,65	461	o. C20/25	
	Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung	
	Decken-Dämmung	versch. Dämm.	6	100%	40	var.	Tab.	Tab.	var.	variiert (>=0cm)	
	Klebem. f. Dämmung	Dünnbettmauerm.	-	-	40	-	1600	1,00	4,50	mineral. (m. Dübel)	
	Befestigung	PA-Schlagdübel	-	-	40	-	-	-	0,12	6Stk./m² je 20g/Stk.	
	Kalkzementputz	Kalkzementputz	7	100%	30	0,7	1800	1,00	12,6	(Normalputz)	
	Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	30	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m² bei 1,1m²/m²	
	Außenanstrich	Dispersions-Silikatf.	-	-	20	-	1500	k.A.	0,54	0,36l/m², zweimalig	
	<i>Unten / Außen (Kalt)</i>										
	<i>Oben / Innen (Warm)</i>										
	Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen	
	Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung	
	Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-	
	Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)	
	Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-	
	Trittschalldämmung	versch. Dämmstoffe	3	100%	(>)50	3,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (bei 3,5cm)	
	Fußboden-Dämmung	versch. Dämmstoffe	4	100%	(>)50	<5,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (<5,5cm)	
	OSB-Platte	OSB	5	100%	(>)50	2,7	650	0,13	17,6	m. Klebeb. = Dampfb.	
	Klebeband (Dampfb.)	PE	-	-	(>)50	-	-	k.A.	0,034	1,50l/m/m² f. OSB	
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	6a	82,5%	(>)50	<24	Tab.	Tab.	var.	variiert: 0,71m²/m²	
	Luftschicht	Ruhende Luft (hori.)	6b	82,5%	(>)50	<24	-	-	0,00	n. DIN EN ISO 6946	
	Holz (Tragwerk)	KVH 12/24	6	17,5%	>50	24	Tab.	0,13	var.	3,04l/m/m²	
	Holz (Tragwerk Zusatz)	BSH 16x36	-	-	>50	-	Tab.	0,13	var.	0,11l/m/m²	
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,18	Schrauben etc.	
	Metallteile (Putzträger)	Verz. Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,12	Schrauben etc.	
	Putzträger	Holzweichfaserp.	7	100%	40	>6	200	0,047	var.	HWF konst. (nur 12m²)	
Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	30	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m² bei 1,1m²/m²		
Kalkzementputz	Kalkzementputz	8	100%	30	0,7	1800	1,00	12,6	5+2mm (Normalp.)		
Außenanstrich	Dispersions-Silikatf.	-	-	20	-	1500	k.A.	0,54	0,36l/m², zweimalig		
<i>Unten / Außen (Kalt)</i>											

Decken gegen unterschiedliche Temperatur (unbeheizt)

Decken (Massiv)

Horiz. 0 173

bezogen auf Bruttofläche

Massiv	<i>Oben / Innen (Warm)</i>									
Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen	
Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung	
Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-	
Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)	
Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-	
Trittschalldämmung	versch. Dämm.	3	100%	(>)50	3,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (3,5cm)	
Fußboden-Dämmung	versch. Dämm.	4	100%	(>)50	<5,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (<5,5cm)	
Stahlbeton	C25/30	5	100%	>50	20	2350	1,65	461	o. C20/25	
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung	
Decken-Dämmung	versch. Dämm.	6	100%	(>)50	var.	Tab.	Tab.	var.	variiert (>=0cm)	
Klebem. f. Dämmung	Dünnbettmauerm.	-	-	(>)50	-	1600	1,00	4,50	mineral. (m. Dübel)	
Befestigung	PA-Schlagdübel	-	-	(>)50	-	-	-	0,12	6Stk./m² je 20g/Stk.	
Haftvermittler	mineral. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1800	1,00	5,20	bei 0cm Decken-Däm.	
Kalkzementputz	Kalkzementputz	7	100%	(>)50	0,7	1800	1,00	12,6	Kellerb. (Normalp.)	
Amierungsgewebe	Glasfasergewebe	-	-	(>)50	-	150	0,18	0,17	0,15kg/m² bei 1,1m²/m²	
Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
<i>Unten / Innen (Kalt)</i>										

Decken gegen gleiche Temperatur

Decken (Massiv)

Horiz. 90 0

DIN 1264-4: 1,25(m² K)/W

Decken (Massiv oder Leicht)

Horiz. 94 469

DIN 1264-4: 1,25(m² K)/W

Massiv	<i>Oben / Innen</i>									
Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen	
Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung	
Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-	
Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)	
Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-	

	Trittschalldämmung	versch. Dämm.	3	100%	(>)50	3,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (3,5cm)	
	Fußboden-Dämmung	versch. Dämm.	4	100%	(>)50	5,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (5,5cm)	
	Stahlbeton	C25/30	5	100%	>50	20	2350	1,65	461	o. C20/25	
	Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	31,2	2% Amierung	
	Haftvermittler	organ. Haftbrücke	-	-	(>)50	-	1200	k.A.	0,30	Dispersionsb. (b. Stb.)	
	Innenputz	Gipsputz	6	100%	(>)50	1,5	1400	0,70	21,0	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Unten / Innen</i>										
Leicht	<i>Oben / Innen</i>										
	Belag	Fliesen	1	100%	(>)50	1,0	2300	1,00	23,0	Annahme Fliesen	
	Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	3,20	8mm Zahnung	
	Estrich	Zementestrich	2	100%	(>)50	6,5	2000	1,40	130	-	
	Randdämmstreifen	PE-Schaum	-	-	(>)50	0,8	70	0,05	0,06	1,1m/m² (10x0,8cm)	
	Folie	PE-Folie	-	-	(>)50	0,2	980	0,50	1,96	-	
	Trittschalldämmung	versch. Dämm.	3	100%	(>)50	3,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (bei 3,5cm)	
	Fußboden-Dämmung	versch. Dämm.	4	100%	(>)50	5,5	Tab.	Tab.	var.	variiert (bei 5,5cm)	
	OSB-Platte	OSB	5	100%	(>)50	2,7	650	0,13	17,6	mit Klebeb. = Dampfb.	
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	6a	82,5%	(>)50	12	Tab.	Tab.	var.	variiert: 0,71m²/m²	
	Luftschicht	Ruhende Luft (hori.)	6b	82,5%	(>)50	12	-	-	0,00	n. DIN EN ISO 6946	
	Holz (Tragwerk)	KVH 12/24	6	17,5%	>50	24	Tab.	0,13	var.	3,04lfm/m²	
	Holz (Tragwerk Zusatz)	BSH 16x36	-	-	>50	-	Tab.	0,13	var.	0,11lfm/m²	
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,18	Schrauben etc.	
	Rieselschutzpapier	Kraftpapier	-	-	(>)50	0,15	-	k.A.	0,13	-	
	OSB-Platte	OSB	7*	100%	(>)50	1,5	650	0,13	9,75	nur bei Zellulose	
	Lattung (Unterkonst.)	KVH 2,7/6	8	9,6%	(>)50	2,7	Tab.	0,13	var.	2,10lfm/m²	
	Metallteile (Unterkonst.)	Verz. Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,12	Schrauben etc.	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	9	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Unten / Innen</i>										

KG 360 Dächer

ohne Dachfenster (KG 362)

Steildächer

Horiz. 108 193

bezogen auf EnEV-Fläche

Horiz. 108 290

inkl. Überstände + Balkon etc.

10° 30°

Massiv

keine Betrachtung

Leicht

Oben / Außen (Außenluft)

	Dachziegel	Ton	-	-	(>)50	-	2000	1,00	43,5	8,2Stk./m² b. 5,3kg/Stk.	
	Firstziegel	Ton	-	-	(>)50	-	2000	1,00	1,42	2,5Stk./m b. 5,0kg/Stk.	
	Spenglerarbeiten	Titanzink	-	-	40	-	7800	50	1,49	Rinne, Traufe etc.	
	Lattung	KVH 3/5	-	-	(>)50	3,0	Tab.	0,13	var.	3,39lfm/m²	
	Konterlattung	KVH 4/8	-	-	(>)50	4,0	Tab.	0,13	var.	1,48lfm/m²	
	Metallteile (Dachhaut)	Verz. Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,13	Schrauben, Klammern etc.	
	Unterdeckplatte	Holzweichfaserp.	5 / 6	100%	(>)50	>3,5	200	0,047	var.	o. 200kg/m³ WL050	
	Tragwerk-Dämmung	versch. Dämm.	4 / 5	90,0%	(>)50	var.	Tab.	Tab.	var.	0,88m²/m² (>12u.<40cm)	
	Holz (Tragwerk)	BSH 8/var.(>28<40)4b / 5b	10,0%	>50	var.	Tab.	0,13	var.	1,46lfm/m² >28u.<40cm		
	Holz (Tragwerk)	KVH 8/var.(>12<28)4a / 5a	10,0%	>50	var.	Tab.	0,13	var.	1,46lfm/m² >12u.<28cm		
	Holz (Tragwerk Zusatz)	BSH 14/(>12<40)	-	-	>50	14	Tab.	0,13	var.	0,38lfm/m² f. Pfetten etc.	
	Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	0,33	Schrauben etc.	
	OSB-Platte	OSB	3 / 4	100%	(>)50	1,5	650	0,13	9,75	mit Klebeb. = Dampfb.	
	Klebeband (Dampfb.)	PE	-	-	(>)50	-	-	k.A.	0,05	2,10lfm/m² f. OSB-Platte	
	Dämmst. (Installationse.)	Variiert (<14)	3	100%	(>)50	<14	Tab.	Tab.	var.	1,0m²/m²: EPS, PUR, XPS	
	Luftschicht	Ruhende Luft (aufw.)	2a	90,4%	(>)50	2,7	-	-	0,00	nach DIN EN ISO 6946	
	Lattung (Installationse.)	KVH 6/2,7	2b	9,6%	(>)50	2,7	Tab.	0,13	var.	2,10lfm/m²	
	Dämmst. (Installationse.)	Variiert (<14)	2A	90,4%	(>)50	<14	Tab.	Tab.	var.	0,89m²/m²: MW, HWF, Zel	
	Lattung (Installationse.)	KVH 6/var. (<14)	2B	9,6%	(>)50	<14	Tab.	0,13	var.	2,10lfm/m² <14cm	
	Metallteile (Installationse.)	Verz. Stahl	-	-	(>)50	-	7800	50	0,16	Schrauben, Winkel etc.	
	Gipskartonfeuerschutzp.	Gipskarton	1	100%	(>)50	1,5	900	0,25	13,5	GKF	
	Spachtelmaterial	Gips	-	-	(>)50	-	900	0,25	0,35	-	
	Innenanstrich	Dispersionsfarbe	-	-	15	-	1500	k.A.	0,46	0,30l/m², zweimalig	
	<i>Unten / Innen</i>										

KG 370 Baukonstruktive Einbauten

vernachlässigt

KG 390 Sonstiges

Gebäudetypabhängige und gebäudestandardunabhängig Bauteile

Balkone & Terrasse (nur MFH) KG 350

 Terrasse 31,26m²

MFH: Da zur BGF (überdacht)

bezogen auf Bruttofläche

Belag	Lärche	-	-	30	2,5	661	0,13	16,2	0,025m ³ /m ² , Inst. Holz-B.
Metallteile (Belag)	Edelstahl	-	-	30	-	7900	30	0,11	Inst. wie Holz-Brüstung
Unterkonstruktion	Alu	-	-	30	-	2800	160	2,20	Inst. wie Holz-Brüstung
Stelzlager	PA	-	-	30	-	980	0,50	1,30	Inst. wie Holz-Brüstung
Abdichtung	EPDM	-	-	45	-	1150	0,25	2,75	Inst. wie Holz-Tragwerk
Gefälledämmung	EPS	-	-	45	6,0	0,04	30	1,80	1,5% bei 6cm im Mittel
<i>Balkone 129,30m²</i>									
Belag	Lärche	-	-	30	2,5	661	0,13	16,2	0,025m ³ /m ² , Inst. Holz-B.
Metallteile (Belag)	Edelstahl	-	-	30	-	7900	30	0,11	Inst. wie Holz-Brüstung
Unterkonstruktion	Alu	-	-	30	-	2800	160	2,20	Inst. wie Holz-Brüstung
Stelzlager	PA	-	-	30	-	980	0,50	1,30	Inst. wie Holz-Brüstung
Abdichtung	EPDM	-	-	45	-	1150	0,25	2,75	Inst. wie Holz-Tragwerk
Gefälledämmung	EPS	-	-	45	6,0	0,04	30	1,80	1,5% bei 6cm im Mittel
Holz (Tragwerk)	KVH 12/24	-	-	45	12	350	0,13	27,4	0,0782m ³ /m ²
Holz (Tragwerk Zusatz)	KVH 18/18	-	-	45	18	350	0,13	5,50	0,0157m ³ /m ²
Metallteile (Tragwerk)	Verz. Stahl	-	-	45	-	7800	50	0,11	Schrauben, Knappv. etc.
Fundament	C20/25	-	-	>50	50	2400	2,50	11,1	0,60m ³ f. 6x Stützen
<i>Balkongeländer / Schiebeelemente 111,05m²</i>									
Brüstungskonstruktion	Verz. Stahl	-	-	45	-	7800	50	2,07	230kg; Inst. Holz-Trag.
Holz inkl. Handlauf	Lärche	-	-	30	-	661	0,13	13,9	2,33m ³
<i>Stahlträger (nur EFH) KG 350</i>									
Stahlträger / -stützen	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	1290	EFH: W. Fensterfront
<i>Treppe (nur EFH) KG 350</i>									
Stahlbetontreppe	C25/30	-	-	>50	-	2350	1,65	2820	1,2m ³ f. 1 Geschoss
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	56,4	2-3% Amierung
Belag	Fliesen	-	-	(>)50	1,0	2300	1,00	167	Ann. Fliesen f. 1 Ge.
Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	23,2	8mm Zahnung f. 1 Ge.
Ausgleichsschicht	Zementestrich	-	-	(>)50	2,0	2000	1,40	180	für 1 Geschoss
Handlauf	z.B. Stahl, Holz	-	-	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	nutzerabhängig
Holztreppe	Buche	-	-	>50	-	740	0,13	962	1,3m ³ f. 1 Geschoss
Holzschutzanstrich	Parkettlack, transp.	-	-	8	-	1050	k.A.	3,70	0,50kg/m ²
Metallteile (Treppe)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	1,50	Schrauben, Winkel etc.
Handlauf	z.B. Stahl, Holz	-	-	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	nutzerabhängig
<i>Treppe (nur MFH) KG 350</i>									
Stahlbetontreppe	C25/30	-	-	>50	-	2350	1,65	12925	5,50m ³ f. 4 Geschosse
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	368	2-3% Amierung
Belag	Fliesen	-	-	(>)50	1,0	2300	1,00	750	Ann. Fliesen f. 4 Ge.
Belagsgrundlage	Fliesenkleber	-	-	(>)50	0,8	1600	1,00	104	8mm Zahnung f. 4 Ge.
Ausgleichsschicht	Zementestrich	-	-	(>)50	2,0	2000	1,40	754	für 4 Geschosse
Handlauf	z.B. Stahl, Holz	-	-	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	nutzerabhängig
Holztreppe	Eiche	-	-	>50	-	720	0,13	274	0,38m ³ f. Galleriet.
Holzschutzanstrich	Parkettlack, transp.	-	-	8	-	1050	k.A.	3,46	0,50kg/m ²
Metallteile (Treppe)	Verz. Stahl	-	-	>50	-	7800	50	1,50	Schrauben, Winkel etc.
Handlauf	z.B. Stahl, Holz	-	-	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	nutzerabhängig
<i>Lichtschächte (nur EFH) KG 330</i>									
Lichtschächte	GFK	-	-	(>)50	-	1450	0,30	80,0	5x GFK-Lichtsch.
Gitterrost	Verz. Stahl	-	-	25	-	7800	50	26,0	5x Gitterrost
<i>Lichtschächte (nur MFH) KG 330</i>									
Lichtschächte	C25/30	-	-	>50	0,08	2350	1,65	3730	4x Beton-Lichtsch.
Bewehrungsstahl	Baustahl	-	-	>50	-	7800	50	253	2% Amierung
Gitterrost	Verz. Stahl	-	-	25	-	7800	50	34,0	4x Gitterrost

Tabelle B.2: Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Decken- bzw. Bodenaufbauten
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autoren-erfahrung)

Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]	Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]
Decke (belastet, Trittschalldämmung)			Decke (unbelastet, verputzte Deckenunters.)		
MW = Standard	80	0,035	MW = Standard	80	0,035
MW (Steinwolle)	80	0,035	MW (Steinwolle)	80	0,035
MW (Glaswolle)	60	0,032	MW (Glaswolle)	x	x
EPS (weiß)	19	0,040	EPS (weiß)	19	0,040
EPS (grau)	17	0,035	EPS (grau)	17	0,035
PUR	30	0,023	PUR	30	0,023
PUR	33	0,025	PUR	33	0,025
XPS	30	0,034	XPS	30	0,034
XPS	32	0,034	XPS	32	0,034
HWF (Platten)	220	0,049	HWF (Platten)	195	0,047
HWF (Platten)	175	0,045	HWF (Platten)	190	0,045
Zellulose	-	-	Zellulose	-	-
Zellulose	-	-	Zellulose	-	-

- = keine genormte Anwendung; x = unkonventionell

Tabelle B.3: Übersicht über die ausgewählte Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes für die Decken- bzw. Boden- und Dachaufbauten (Untersparren- und Zwischensparrendämmung)
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Marktteilnehmer und Fachverbände sowie Autoren-erfahrung)

Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]	Dämmstoff [-]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitf. [W/(mK)]
Steildach (Untersparren)			Steildach / Decke (Zwischensparren)		
MW = Standard	40	0,035 ^z	MW = Standard	40	0,035
MW (Steinwolle)	40	0,035 ^z	MW (Steinwolle)	40	0,035
MW (Glaswolle)	30	0,032 ^z	MW (Glaswolle)	20	0,035
EPS (weiß)	20	0,035 ^v	EPS (weiß)	x	x
EPS (grau)	17	0,035 ^v	EPS (grau)	x	x
PUR	30	0,023 ^v	PUR	x	x
PUR	33	0,025 ^v	PUR	x	x
XPS	30	0,034 ^v	XPS	-	-
XPS	32	0,034 ^v	XPS	-	-
HWF (Platten)	200	0,047 ^z	HWF (Platten)	55	0,039
HWF (Platten)	240	0,050 ^z	HWF (Platten)	110	0,040
Zellulose (Platten)	70	0,042 ^z	Zellulose (lose)	50	0,040
Zellulose (Platten)	80	0,040 ^z	Zellulose (lose)	53	0,040

^v = vollflächig; ^z = zwischen Unterkonstruktion

- = keine genormte Anwendung; x = unkonventionell

Tabelle B.4: Sachbilanz der Gebäudetechnik des Ein- und Mehrfamilienhauses (KG 400 nach DIN 276-1 [170]) [Spezifisches Gewicht bezieht sich auf das Einfamilienhaus]
(Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen / Recherchen (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt) auf Grundlage der (Bau-)Pläne)

Name / Bezeichnung	Beschreibung / Material	Insth.	Menge (EFH)	Menge (MFH)	Einh.	Min.- spez. Gew.	Ø- spez. Gew.	Max.- spez. Gew.	Ø- Gew. (EFH)	Ø- Gew. (MFH)	Anmerkungen
[-]	[-]	[a]	[je Einh.]	[je Einh.]	[-]	[kg/Einh.]	[kg/Einh.]	[kg/Einh.]	[kg]	[kg]	[-]
KG 410 Sanitär (Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen)											
ABWASSER											
Keine Hebeanlagen, Keine Grundleitungen											
Abwasserleitung DN 50	PP-Rohr (HT-Rohr)	30	18,9	37,7	m	0,29	0,32	0,36	6,02	12,0	inkl. Formstücke
Abwasserleitung DN 70	PP-Rohr (HT-Rohr)	30	18,2	13,9	m	0,45	0,50	0,56	9,00	6,86	inkl. Formstücke
Abwasserleitung DN 100	PP-Rohr (HT-Rohr)	30	24,1	19,9	m	0,94	1,03	1,18	25,0	20,6	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 50-100	Verz. / EPDM / PA	30	61,2	71,5	m	0,09	0,11	0,13	6,67	7,79	69% Verz., 28% EPDM, 3% PA
Dämmung DN 50-100	PE-Schaum 4mm	30	55,1	64,4	m	0,04	0,05	0,05	2,59	3,02	90% Unterputz, o. Klebeband
Lüftungsziegel	PVC	30	4	2	Stk.	0,99	1,20	1,80	4,78	2,39	inkl. Anschlussschlauch
Chrom-Siphon DN 50	Messing	30	3	6	Stk.	0,30	0,52	1,28	1,56	3,12	Chromschicht vernachlässigt
PE-Siphon DN 50	PE	30	7	9	Stk.	0,14	0,34	0,55	2,38	3,06	Ausgußb., TWW, Wanne etc.
SANITÄROBJEKTE											
Spiegel, Duschabtrennung, Küchensp. vern.											
WC (wandhängend)	Keramik	30	3	3	Stk.	10,1	22,4	31,5	67,2	67,2	o. WC-Schallsch., ohne Silikon
Montageelem. WC m. Spülk.	Verzinkt / PE	30	3	3	Stk.	8,89	12,9	16,0	38,8	38,8	78% Verz., 22% PVC, o. Bef.
WC-Betätigungsplatte	PVC	30	3	3	Stk.	0,10	0,53	0,83	1,59	1,59	-
WC-Sitz	Duroplast	30	3	3	Stk.	2,15	2,83	3,50	8,49	8,49	-
WC-Papierrollenhalter	Edelstahlblech	30	3	3	Stk.	0,23	0,31	0,46	0,93	0,93	-
WC-Bürstenhalter	Messing / Glas	30	3	3	Stk.	0,75	0,84	0,88	2,52	2,52	40% Me., 60% Glas:Chrom vern.
Bidet	Keramik	30	0	0	Stk.	15,6	20,0	27,3	0	0	ohne Silikon
Montageelement Bidet	Verzinkt	30	0	0	Stk.	9,00	10,8	13,4	0	0	ohne Befestigung
Urinal	Keramik	30	0	0	Stk.	9,00	15,9	24,3	0	0	ohne Silikon
Montageelement Urinal	Verzinkt	30	0	0	Stk.	9,10	12,0	14,0	0	0	ohne Befestigung
Urinal-Betätigungsplatte	PVC	30	0	0	Stk.	0,10	0,53	0,83	0	0	-
Waschtisch 60cm	Keramik	30	2	3	Stk.	10,7	17,0	21,7	33,9	50,9	o. Bef., Größe n. VDI 6000
Handwaschbecken 45cm	Keramik	30	1	3	Stk.	6,53	10,4	13,3	10,4	31,1	o. Bef., Größe n. VDI 6000
Montageelem. Waschtisch	Verzinkt	30	3	6	Stk.	9,00	10,6	12,5	31,7	63,5	ohne Befestigung
Handtuchhalter	Edelstahlblech	30	3	6	Stk.	0,40	0,44	0,50	1,32	2,64	-
Eckventile	Rotguss	15	11	21	Stk.	0,14	0,14	0,15	1,54	2,94	inkl. Doppelsp. für Küche, WC
Armaturen	Rotguss	10	4	9	Stk.	1,13	2,04	3,60	8,16	18,4	Waschtisch, Küche etc.
Ausgußbecken	Stahl emailiert	30	2	1	Stk.	3,00	3,47	3,91	6,94	3,47	Kein Email -> Datens. wie HK
Duschwanne 80x80cm	Acryl	30	1	3	Stk.	8,17	10,8	14,7	10,8	32,3	Größe n. VDI 6000
Badewanne 170x75cm	Acryl	30	2	3	Stk.	21,4	28,2	47,3	56,3	84,5	Größe n. VDI 6000
Wannenfüße mit Schiene	Verzinkt / PVC	30	3	6	Stk.	2,22	2,88	3,40	8,64	17,3	90% Verzinkt, 10% PVC
Brauseganitur	Messing / PVC	30	3	6	Stk.	0,74	1,13	1,34	3,39	6,78	20% Me., 80% PVC:Chrom vern.
Armaturen (Dusche etc.)	Rotguss	10	5	7	Stk.	1,56	2,44	3,99	12,2	17,1	Dusche, Ausgußbecken etc.
WASSER											
Keine Zirk. nach MFH-Wohnungszähler											
Wasserleitung DN 12	Edelstahl	30	87,2	136	m	0,35	0,39	0,44	33,7	52,4	inkl. Formstücke
Wasserleitung DN 15	Edelstahl	30	49,2	47,6	m	0,42	0,46	0,53	22,7	22,0	inkl. Formstücke
Wasserleitung DN 20	Edelstahl	30	23,6	13,7	m	0,62	0,68	0,78	16,1	9,33	inkl. Formstücke
Wasserleitung DN 25	Edelstahl	30	0	21,3	m	0,80	0,88	1,00	0	18,7	inkl. Formstücke
Wasserleitung DN 32	Edelstahl	30	0	0,60	m	1,26	1,38	1,59	0	0,83	inkl. Formstücke
Wasserleitung DN 40	Edelstahl	30	0	0	m	1,52	1,67	1,90	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	30	160	218	m	0,05	0,06	0,07	9,45	12,9	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	30	0	0,60	m	0,06	0,07	0,09	0	0,04	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Wasserleitung DN 25	PE-HD	40	0,50	0	m	0,26	0,27	0,28	0,14	0	Hausanschlussltg. (k. Variation)
Wasserleitung DN 32	PE-HD	40	0	0,50	m	0,41	0,43	0,45	0	0,22	Hausanschlussltg. (k. Variation)
Wasserleitung DN 25	Edelstahl	40	0,85	0	m	0,80	0,88	1,00	0,75	0	Hausanschlussltg. (k. Variation)
Wasserleitung DN 32	Edelstahl	40	0	1,18	m	1,26	1,39	1,58	0	1,64	Hausanschlussltg. (k. Variation)
Dämmung DN 12-20	PE-Schaum	30	80,0	98,5	m	0,08	0,09	0,10	7,28	8,96	o. Klebeb., Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	30	80,0	98,5	m	0,27	0,32	0,37	25,6	31,5	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Steinwolle / Alu	30	0	21,9	m	0,85	1,00	1,15	0	21,9	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Wasserzähler DN 25/32	Messing / PP	6	1	1	Stk.	1,56	2,57	3,80	2,57	2,57	Eingangsz., 90% Me., 10% PP

Wasserzähler DN 15	Messing / PP	5	1	13 Stk.	0,38	0,48	0,54	0,48	6,24	inkl. Garten, 70% Me., 30% PP
Hausstation DN 25/32	Rotguss / PP	15	1	1 Stk.	2,20	3,53	6,30	3,53	3,53	Filter etc., 75% Rotg., 25% PP
Sicherheitsventil DN 15/20	Rotguss	15	1	1 Stk.	0,10	0,22	0,30	0,22	0,22	Ansprechdruck 8bar
KFE-Hahn DN 15	Rotguss	15	2	2 Stk.	0,12	0,16	0,21	0,32	0,32	Entleerung
Rückflussverh. DN 20/25	Rotguss	15	1	1 Stk.	0,16	0,26	0,42	0,26	0,26	Trinkwarmwasserspeicher
Nachfülleinrichtung DN 15	Rotguss	15	1	1 Stk.	0,50	0,93	1,40	0,93	0,93	Heizungswassernachfüllung
Absperrarmatur DN 15/20	Rotguss	15	5	7 Stk.	0,37	0,51	0,71	2,55	3,57	inkl. Entleer. TW, TWW, TWZ
Absperrarmatur DN 25/32	Rotguss	15	2	6 Stk.	0,80	1,08	1,37	2,16	6,48	inkl. Entleer. TW, TWW, TWZ
Absperrarmatur DN 40	Rotguss	15	0	0 Stk.	1,50	1,68	2,03	0	0	inkl. Entleer. TW, TWW, TWZ
Wasserhahn DN 15/20	Rotguss	15	2	4 Stk.	0,20	0,27	0,34	0,54	1,08	WM, Garten (nicht frostsicher)
Thermometer DN 15	Stahl / Rotguss	30	1	1 Stk.	0,09	0,13	0,17	0,13	0,13	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
Zirkulationspumpe DN 15	Nassläuferpumpe	10	1	1 Stk.	1,20	1,66	2,20	1,66	1,66	Datensatz wie Umwälzpumpe
Rückflussverh. DN 15	Rotguss	15	1	1 Stk.	0,13	0,21	0,34	0,21	0,21	für Zirkulationspumpe

KG 420 Heizung (Wärmeversorgungsanlagen)

WÄRMEERZEUGUNG GAS-BRENNWERTGERÄT

Kessel: TWW-Bereitung + Min.-Liefergröße

Wärmeerzeuger	Gas-Brennwertg.	18	14	25 kW	1,07	2,97	9,70	41,5	65,3	modul., inkl. Reg., Sicherheitsg.
Balgengaszähler	Verz. / EPDM / PA	8	1	1 Stk.	1,70	2,84	4,70	2,84	2,84	85% Verz., 5% EPDM, 10% PA
Gasarmatur DN 15/20	Messing	20	1	1 Stk.	0,37	0,51	0,71	0,51	0,51	spez. Gewicht = Wasserarmatur
Gasarmatur DN 25/32	Messing	20	1	1 Stk.	0,80	1,08	1,37	1,08	1,08	spez. Gewicht = Wasserarmatur
Gasleitung DN 15	Kupfer	35	3,40	0 m	0,53	0,53	0,60	1,80	0	inkl. Formstk., keine Materialvar.
Gasleitung DN 20	Kupfer	35	0	7,30 m	0,65	0,65	0,74	0	0	inkl. Formstk., keine Materialvar.
Gasleitung DN 25	PE-HD	40	0,50	0 m	0,26	0,27	0,28	0,14	0	Hausanschluss (k. Materialvar.)
Gasleitung DN 32	PE-HD	40	0	0,50 m	0,41	0,43	0,45	0	0,22	Hausanschluss (k. Materialvar.)
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	3,40	7,30 m	0,05	0,06	0,07	0,20	0,43	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Abgasrohr LAS DN 80/100	PP / Stahl	18	0,80	0,40 m	2,13	2,40	2,67	1,92	0,96	inkl. Formstk., 31% PP, 69% St.
Abgassch. LAS DN 80/100	PP / Stahl	40	7,80	12,7 m	2,13	2,40	2,67	18,7	30,5	in Einkofferung, 31% PP, 69% St.

WÄRMEERZEUGUNG LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPE

Kessel: TWW-Bereitung + Min.-Liefergröße

Wärmeerzeuger	Luft-Wasser-WP	18	8,5	22 kW	11,1	23,5	77,4	200	447	inkl. Reg., Wärmet. im Splitgerät
Kessel-Sicherheitsgruppe	Messing	18	1	1 Stk.	1,10	1,48	1,80	1,48	1,48	Sicherheitsv., Manom., Entlüfter
Überstromventil	Messing	20	1	1 Stk.	0,45	1,05	1,50	1,05	1,05	-
Sicherungsautomat (3-polig)	PVC / Stahl	30	1	1 Stk.	0,24	0,31	0,41	0,31	0,31	66% PVC, 33% Stahl
Kabel 5-a.: NYM-J 5x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	4,70	11,1 m	0,27	0,30	0,37	1,42	3,33	Wärmepumpenleitung
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	4,05	9,95 m	0,03	0,07	0,16	0,30	0,73	Aufputz im Keller (ohne Bef.)

WÄRMEERZEUGUNG SOLE-WASSER-WÄRMEPUMPE (Erdsonde)

Kessel: TWW-Bereitung + Min.-Liefergröße

Wärmeerzeuger	Sole-Wasser-WP	20	8,5	22 kW	11,1	16,3	24,3	139	255	inkl. Reg., Wärmemengenzähler
Kessel-Sicherheitsgruppe	Messing	20	1	1 Stk.	1,10	1,48	1,80	1,48	1,48	Sicherheitsv., Manom., Entlüfter
Überstromventil	Messing	20	1	1 Stk.	0,45	1,05	1,50	1,05	1,05	-
Wärmequelle (Heizleistung)	Erdsonde	50	8,5	22 kW	33,5	33,5	33,5	285	737	Datens. WP-Rohr m. Absp., Vert.
Sicherungsautomat (3-polig)	PVC / Stahl	30	1	1 Stk.	0,24	0,31	0,41	0,31	0,31	66% PVC, 33% Stahl, inkl. FI
Kabel 5-a.: NYM-J 5x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	4,70	11,1 m	0,27	0,30	0,37	1,42	3,33	Wärmepumpenleitung
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	4,05	9,95 m	0,03	0,07	0,16	0,30	0,73	Aufputz im Keller (ohne Bef.)

WÄRMEERZEUGUNG SOLE-WASSER-WÄRMEPUMPE (Erdkollektor)

Kessel: TWW-Bereitung + Min.-Liefergröße

Wärmeerzeuger	Sole-Wasser-WP	20	8,5	22 kW	11,1	16,3	24,3	139	255	inkl. Reg., Wärmemengenzähler
Kessel-Sicherheitsgruppe	Messing	20	1	1 Stk.	1,10	1,48	1,80	1,48	1,48	Sicherheitsv., Manom., Entlüfter
Überstromventil	Messing	20	1	1 Stk.	0,45	1,05	1,50	1,05	1,05	-
Wärmequelle (Heizleistung)	Erdkollektor	50	8,5	22 kW	-	209	-	0	0	Datens. ÖKOBAUDAT fraglich
Sand für Soleleit./Erdkoll.	Sand	50	8,5	22 kW	6825	7313	7800	62156	160875	25m ² /kW, 15cm Sand 1950kg/m ³
Soleleitung DN 15	PE	50	638	1650 m	0,10	0,11	0,12	70,1	182	ohne Glykol, 75m/kW_Heizl.
Soleleitung DN 32	PE	50	10,0	0 m	0,43	0,45	0,47	4,52	0	ohne Glykol, Pumpe, MAG
Soleleitung DN 40	PE	50	0	10,0 m	0,66	0,69	0,73	0	6,93	ohne Glykol, Pumpe, MAG
Schachtring D=1,5m	Beton / Amierung	50	1	1 Stk.	1345	1494	1644	1494	1494	H=1m, Stb. mit 2% Amierung
Sole-Vert. DN 32/40	Messing	50	1	1 Stk.	5,87	8,02	10,5	8,02	8,02	inkl. Absp., Entl. (wie FBH-Vert.)
Sicherungsautomat (3-polig)	PVC / Stahl	30	1	1 Stk.	0,24	0,31	0,41	0,31	0,31	66% PVC, 33% Stahl, inkl. FI
Kabel 5-a.: NYM-J 5x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	4,70	11,1 m	0,27	0,30	0,37	1,42	3,33	Wärmepumpenleitung
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	4,05	9,95 m	0,03	0,07	0,16	0,30	0,73	Aufputz im Keller (ohne Bef.)

WÄRMEERZEUGUNG PELLETKESSEL

Kessel: TWW-Bereitung + Min.-Liefergröße

Wärmeerzeuger	Pelletkessel	15	12	25 kW	10,4	20,3	36,4	244	455	inkl. Regelung
Kessel-Sicherheitsgruppe	Messing	15	1	1 Stk.	1,10	1,48	1,80	1,48	1,48	Sicherheitsv., Manom., Entlüfter
Mischer DN 20/25/32	Messing	20	2	2 Stk.	0,60	0,79	1,00	1,58	1,58	Hzg, RL-Anheb., Stellant. vern.
Pelletlager	KVH	50	7	11 m ³	9,13	12,4	17,4	87,1	137	spez. Gewicht, Angabe f. 6-12m ³
Befestigungsmaterial	Verzinkt	50	7	11 m ³	0,13	0,14	0,15	0,98	1,54	spez. Gewicht circa

Pelletlager OSB	OSB	20	7	11 m ³	17,1	23,0	24,5	161	253	Schrägb., Schalungsp. vern.
Pelletlager-Prallplatte	PE	20	1	1 Stk.	1,32	1,47	1,62	1,47	1,47	1 mm dick bei 1,5m ²
Einblas- u. Absaugstutzen	Verzinkt	20	1	1 Stk.	9,90	11,0	12,1	11,0	11,0	-
Fördereinrichtung Pellet	Saugturbine	15	1	1 Stk.	6,30	7,00	7,70	7,00	7,00	Datensatz wie Umwälzpumpe
Förderein. Schlauch DN 51	PVC	15	19,8	19,4 m	0,68	0,76	0,84	15,1	14,8	keine Materialvariation
Rohrschelle m. Bef. DN 51	Verz. / EPDM / PA	15	16,8	16,4 m	0,08	0,09	0,10	1,53	1,49	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Abgasrohr	Edelstahl	15	1,20	1,60 m	1,84	1,94	2,10	2,32	3,10	inkl. Formstücke
Abgasschornstein	Gemauert einzügig	50	9,50	14,4 m	71,0	81,3	90,0	772	1170	inkl. Formstücke und Mörtel
Schornsteintüre	Edelstahl	50	2	2 Stk.	1,10	1,47	1,90	2,93	2,93	Putzstücke

ZENTRALE WARMWASSERBEREITUNG KONVENTIONELL

Warmwsp. (Gas m. Solar)	Stahl email. / Däm.	20	300	750 l	0,17	0,44	0,87	131	152	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.
Warmwassersp. (WP)	Stahl email. / Däm.	20	300	750 l	0,17	0,44	0,87	131	152	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.
Warmwsp. (Pel., Gas o. S.)	Stahl email. / Däm.	20	150	400 l	0,19	0,49	0,98	73,6	98,1	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.

ZENTRALE WARMWASSERBEREITUNG TWW-SOLARANLAGE

Warmwassersp. Solar klein	Stahl email. / Däm.	20	200	600 l	0,18	0,47	0,93	93,4	130	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.
Warmwassersp. Solar groß	Stahl email. / Däm.	20	400	1000 l	0,16	0,42	0,83	166	186	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.

ZENTRALE WARMWASSERBEREITUNG HZG-SOLARANLAGE

Warmwasserspeicher	Stahl email. / Däm.	20	200	500 l	0,18	0,47	0,93	93,4	115	inkl. Däm.; Datens. Puffer-St.
--------------------	---------------------	----	-----	-------	------	------	------	------	-----	--------------------------------

WÄRMEERZEUGUNG UND -VERTEILUNG TWW-SOLARANLAGE NACH EnEV

Solaranlagenmodul	Flachkollektor	20	8,28	14,6 m ²	14,0	15,8	18,4	131	231	Wasser-Glykol-Gemisch vernachlässigt Datensatz Solar., n. EnEV-Ref.
Solaranlagenbefestigung	Alu / Edelstahl	20	8,28	14,6 m ²	1,40	2,84	4,24	23,5	41,5	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edelst.
Edelstahlwellrohr DN 15/20	Edelstahl	35	2,60	4,80 m	0,09	0,16	0,20	0,41	0,75	inkl. Formstk., Kollektoransch.
Dachdurchführungsziegel	PVC	20	2	4 Stk.	0,38	0,59	0,80	1,18	2,36	geeignet für Solar oder PV
Solarleitung DN 12	Kupfer	35	0	0 m	0,39	0,43	0,49	0	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 15	Kupfer	35	33,3	5,30 m	0,48	0,52	0,59	17,4	2,77	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 20	Kupfer	35	0	68,5 m	0,59	0,65	0,73	0	44,2	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 25	Kupfer	35	0	0 m	1,11	1,22	1,39	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	33,3	73,8 m	0,05	0,06	0,07	1,97	4,36	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrschelle m. Bef. DN 25	Verz. / EPDM / PA	35	0	0 m	0,06	0,07	0,09	0	0	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	EPDM-Schaum	35	16,7	36,9 m	0,15	0,17	0,19	2,83	6,27	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	35	16,7	36,9 m	0,27	0,32	0,37	5,33	11,8	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25	Steinwolle / Alu	35	0	0 m	0,48	0,56	0,64	0	0	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß (Solara.)	Stahl lack. / EPDM	15	35	50 l	0,16	0,19	0,25	6,78	9,69	90% Stahl lack., 10% EPDM

WÄRMEERZEUGUNG UND -VERTEILUNG TWW-SOLARANLAGE KLEIN

Solaranlagenmodul	Flachkollektor	20	4,72	11,8 m ²	14,0	15,8	18,4	74,5	186	Wasser-Glykol-Gemisch vernachlässigt Datensatz Solaranlage
Solaranlagenbefestigung	Alu / Edelstahl	20	4,72	11,8 m ²	1,40	2,84	4,24	13,4	33,5	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edelst.
Edelstahlwellrohr DN 15/20	Edelstahl	35	2,20	2,80 m	0,09	0,16	0,20	0,34	0,44	inkl. Formstk., Kollektoranschluss
Dachdurchführungsziegel	PVC	15	2	2 Stk.	0,38	0,59	0,80	1,18	1,18	geeignet für Solar oder PV
Solarleitung DN 12	Kupfer	35	33,3	0 m	0,39	0,43	0,49	14,3	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 15	Kupfer	35	0	57,8 m	0,48	0,52	0,59	0	30,2	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 20	Kupfer	35	0	0 m	0,59	0,65	0,73	0	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 25	Kupfer	35	0	0 m	1,11	1,22	1,39	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	33,3	57,8 m	0,05	0,06	0,07	1,97	3,42	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrschelle m. Bef. DN 25	Verz. / EPDM / PA	35	0	0 m	0,06	0,07	0,09	0	0	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	EPDM-Schaum	35	16,7	28,9 m	0,15	0,17	0,19	2,83	4,91	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	35	16,7	28,9 m	0,27	0,32	0,37	5,33	9,25	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25	Steinwolle / Alu	35	0	0 m	0,48	0,56	0,64	0	0	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß (Solara.)	Stahl lack. / EPDM	15	18	35 l	0,16	0,20	0,26	3,55	6,90	90% Stahl lack., 10% EPDM

WÄRMEERZEUGUNG UND -VERTEILUNG TWW-SOLARANLAGE GROß

Solaranlagenmodul	Flachkollektor	20	7,08	16,5 m ²	14,0	15,8	18,4	112	261	Wasser-Glykol-Gemisch vernachlässigt Datensatz Solaranlage
Solaranlagenbefestigung	Alu / Edelstahl	20	7,08	16,5 m ²	1,40	2,84	4,24	20,1	46,8	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edelst.
Edelstahlwellrohr DN 15/20	Edelstahl	35	2,40	5,00 m	0,09	0,16	0,20	0,38	0,78	inkl. Formstk., Kollektoranschluss
Dachdurchführungsziegel	PVC	15	2	4 Stk.	0,38	0,59	0,80	1,18	2,36	geeignet für Solar oder PV
Solarleitung DN 12	Kupfer	35	33,3	5,30 m	0,39	0,43	0,49	14,3	2,28	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 15	Kupfer	35	0	67,3 m	0,48	0,52	0,59	0	35,1	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 20	Kupfer	35	0	0 m	0,59	0,65	0,73	0	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 25	Kupfer	35	0	0 m	1,11	1,22	1,39	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	33,3	72,6 m	0,05	0,06	0,07	1,97	4,29	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrschelle m. Bef. DN 25	Verz. / EPDM / PA	35	0	0 m	0,06	0,07	0,09	0	0	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	EPDM-Schaum	35	16,7	36,3 m	0,15	0,17	0,19	2,83	6,17	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr

B Sachbilanzdaten

Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	35	16,7	36,3 m	0,27	0,32	0,37	5,33	11,6	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25	Steinwolle / Alu	35	0	0 m	0,48	0,56	0,64	0	0	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß (Solar.)	Stahl lack. / EPDM	15	25	50 l	0,16	0,20	0,26	4,90	9,79	90% Stahl lack., 10% EPDM

WÄRMEERZEUGUNG UND -VERTEILUNG HZG-SOLARANLAGE KLEIN

Solaranlagenmodul	Flachkollektor	20	14,2	33,0 m ²	14,0	15,8	18,4	224	522	Datensatz Solaranlage
Solaranlagenbefestigung	Alu / Edelstahl	20	14,2	33,0 m ²	1,40	2,84	4,24	40,1	93,7	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edelst.
Edelstahlwellrohr DN 15/20	Edelstahl	35	4,80	6,40 m	0,09	0,16	0,20	0,75	1,00	inkl. Formstücke, Kollektoransch.
Dachdurchführungsziegel	PVC	15	4	4 Stk.	0,38	0,59	0,80	2,36	2,36	geeignet für Solar oder PV
Solarleitung DN 12	Kupfer	35	0	0 m	0,39	0,43	0,49	0	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 15	Kupfer	35	4,80	0 m	0,48	0,52	0,59	2,51	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 20	Kupfer	35	35,2	5,30 m	0,59	0,65	0,73	22,7	3,42	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 25	Kupfer	35	0	68,9 m	1,11	1,22	1,39	0	84,2	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	40,0	74,2 m	0,05	0,06	0,07	2,36	4,39	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrschelle m. Bef. DN 25	Verz. / EPDM / PA	35	0	68,9 m	0,06	0,07	0,09	0	5,15	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	EPDM-Schaum	35	20,0	2,65 m	0,15	0,17	0,19	3,40	0,45	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	35	20,0	2,65 m	0,27	0,32	0,37	6,40	0,85	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25	Steinwolle / Alu	35	0	68,9 m	0,48	0,56	0,64	0	38,6	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß (Solar.)	Stahl lack. / EPDM	15	50	100 l	0,15	0,19	0,25	9,54	19,1	90% Stahl lack., 10% EPDM
Umschaltventil DN 20/25/32	Messing	20	1	1 Stk.	0,60	0,79	1,00	0,79	0,79	TWW-Bypass; Stellantrieb vern.

Wasser-Glykol-Gemisch vernachlässigt

WÄRMEERZEUGUNG UND -VERTEILUNG HZG-SOLARANLAGE GROß

Solaranlagenmodul	Flachkollektor	20	18,9	37,8 m ²	14,0	15,8	18,4	298	596	Datensatz Solaranlage
Solaranlagenbefestigung	Alu / Edelstahl	20	18,9	37,8 m ²	1,40	2,84	4,24	53,5	107	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edelst.
Edelstahlwellrohr DN 15/20	Edelstahl	35	5,20	6,80 m	0,09	0,16	0,20	0,81	1,06	inkl. Formstk., Kollektoransch.
Dachdurchführungsziegel	PVC	20	4	4 Stk.	0,38	0,59	0,80	2,36	2,36	geeignet für Solar oder PV
Solarleitung DN 12	Kupfer	35	0	0 m	0,39	0,43	0,49	0	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 15	Kupfer	35	4,80	0 m	0,48	0,52	0,59	2,51	0	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 20	Kupfer	35	35,2	5,30 m	0,59	0,65	0,73	22,7	3,42	inkl. Formstücke
Solarleitung DN 25	Kupfer	35	0	66,8 m	1,11	1,22	1,39	0	81,6	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	40,0	72,1 m	0,05	0,06	0,07	2,36	4,26	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrschelle m. Bef. DN 25	Verz. / EPDM / PA	35	0	66,8 m	0,06	0,07	0,09	0	4,99	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	EPDM-Schaum	35	20,0	2,65 m	0,15	0,17	0,19	3,40	0,45	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 12-20	Steinwolle / Alu	35	20,0	2,65 m	0,27	0,32	0,37	6,40	0,85	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25	Steinwolle / Alu	35	0	66,8 m	0,48	0,56	0,64	0	37,4	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß (Solar.)	Stahl lack. / EPDM	15	80	140 l	0,15	0,18	0,24	14,8	25,9	90% Stahl lack., 10% EPDM
Umschaltventil DN 20/25/32	Messing	20	1	1 Stk.	0,60	0,79	1,00	0,79	0,79	TWW-Bypass; Stellantrieb vern.

Wasser-Glykol-Gemisch vernachlässigt

WÄRMEVERTEILUNG TWW- ODER HZG-SOLARANLAGE

Solar-Sicherheitsgruppe	Messing	20	1	1 Stk.	0,16	0,20	0,26	0,20	0,20	Sicherheitsv., Manom., Entlüfter
Kappenventil DN 20/25	Messing	20	1	1 Stk.	0,30	0,49	0,70	0,49	0,49	zum MAG (Ausdehnungsgefäß)
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	1	1 Stk.	2,25	3,78	7,00	3,78	3,78	Solar-Kreis
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	1	1 Stk.	0,24	0,27	0,29	0,27	0,27	-
Durchflusm. DN 25/32	Messing	20	1	1 Stk.	0,74	0,75	0,76	0,75	0,75	Schauglas vernachlässigt
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	2	2 Stk.	0,09	0,13	0,17	0,27	0,27	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	2	2 Stk.	0,12	0,16	0,21	0,31	0,31	Entleerung
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	3	3 Stk.	0,20	0,54	1,20	1,62	1,62	-

WÄRMEVERTEILUNG GAS-BRENNWERTGERÄT MIT FUßBODENHEIZUNG

HeizungsVERTEILtg. DN 20	Kupfer	35	23,6	1,74 m	0,59	0,65	0,73	15,2	1,12	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 25	Kupfer	35	9,60	4,30 m	1,11	1,22	1,39	11,7	5,25	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 32	Kupfer	35	0	22,5 m	1,41	1,55	1,76	0	34,8	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 40	Kupfer	35	0	0 m	1,70	1,87	2,13	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	23,6	1,74 m	0,05	0,06	0,07	1,39	0,10	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	9,60	26,8 m	0,06	0,07	0,09	0,72	2,00	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	Mineralwolle / Alu	35	23,6	1,74 m	0,27	0,32	0,37	7,54	0,56	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	9,60	26,8 m	0,85	1,00	1,15	9,60	26,8	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß	Stahl lack. / EPDM	15	18	35 l	0,16	0,20	0,26	3,55	6,90	90% Stahl lack., 10% EPDM
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	0	0 Stk.	2,25	3,78	7,00	0	0	im Brennwertg. mit Umschalv.
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	0	0 Stk.	0,24	0,27	0,29	0	0	-
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	2	2 Stk.	0,09	0,13	0,17	0,27	0,27	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	4	4 Stk.	0,12	0,16	0,21	0,62	0,62	Entleerung
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	4	0 Stk.	0,16	0,26	0,50	1,05	0	Geräteanschluss
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	0	4 Stk.	0,20	0,54	1,20	0	2,17	Geräteanschluss
Absperrarmatur DN 40	Messing	20	0	0 Stk.	0,83	0,88	0,92	0	0	-

WÄRMEVERTEILUNG WÄRMEPUMPE MIT FUßBODENHEIZUNG

HeizungsVERTEILtg. DN 20	Kupfer	35	23,6	1,74	m	0,59	0,65	0,73	15,2	1,12	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 25	Kupfer	35	10,5	4,30	m	1,11	1,22	1,39	12,8	5,25	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 32	Kupfer	35	0	29,6	m	1,41	1,55	1,76	0	46,0	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 40	Kupfer	35	0	0	m	1,70	1,87	2,13	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	23,6	1,74	m	0,05	0,06	0,07	1,39	0,10	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	10,5	33,9	m	0,06	0,07	0,09	0,78	2,53	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	Mineralwolle / Alu	35	23,6	1,74	m	0,27	0,32	0,37	7,54	0,56	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	10,5	33,9	m	0,85	1,00	1,15	10,5	33,9	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß	Stahl lack. / EPDM	15	35	80	l	0,16	0,19	0,25	6,78	15,5	90% Stahl lack., 10% EPDM
Pufferspeicher b. Konv.	Stahl / Dämmung	40	200	500	l	0,20	0,30	0,55	60,4	115	Tech.-Speicher, inkl. Däm.
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	2	2	Stk.	2,25	3,78	7,00	7,57	7,57	Heiz-Kreis, TWW-Kreis
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	2	2	Stk.	0,24	0,27	0,29	0,53	0,53	-
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	3	3	Stk.	0,09	0,13	0,17	0,40	0,40	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	4	4	Stk.	0,12	0,16	0,21	0,62	0,62	Entleerung
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	0	0	Stk.	0,16	0,26	0,50	0	0	-
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	8	8	Stk.	0,20	0,54	1,20	4,33	4,33	Pumpen, Tech.-Speicher
Absperrarmatur DN 40	Messing	20	0	0	Stk.	0,83	0,88	0,92	0	0	-

WÄRMEVERTEILUNG PELLETT ODER ZUSÄTZLICH HZG-SOLARANLAGE (ALLE KESSEL) MIT FUßBODENHEIZUNG

HeizungsVERTEILtg. DN 20	Kupfer	35	22,4	1,74	m	0,59	0,65	0,73	14,4	1,12	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 25	Kupfer	35	12,8	12,9	m	1,11	1,22	1,39	15,7	15,7	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 32	Kupfer	35	0	37,6	m	1,41	1,55	1,76	0	58,4	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 40	Kupfer	35	0	0	m	1,70	1,87	2,13	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	22,4	1,7	m	0,05	0,06	0,07	1,32	0,10	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	12,8	50,5	m	0,06	0,07	0,09	0,96	3,77	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	Mineralwolle / Alu	35	22,4	1,7	m	0,27	0,32	0,37	7,15	0,56	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	12,8	50,5	m	0,85	1,00	1,15	12,8	50,5	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Ausdehnungsg. b. Konv.	Stahl lack. / EPDM	15	50	140	l	0,15	0,19	0,25	9,54	26,7	90% Stahl lack., 10% EPDM
Pufferspeicher b. Konv.	Stahl / Dämmung	40	750	1500	l	0,13	0,20	0,37	152	247	inkl. Dämmung
Ausdehg. b. HZG-Solar klein	Stahl lack. / EPDM	15	80	200	l	0,15	0,18	0,24	14,8	37,0	90% Stahl lack., 10% EPDM
Puffersp. b. HZG-Solar klein	Stahl / Dämmung	40	1000	2000	l	0,12	0,19	0,34	186	303	inkl. Dämmung
Ausdehg. b. HZG-Solar groß	Stahl lack. / EPDM	15	100	250	l	0,14	0,18	0,24	18,1	45,2	90% Stahl lack., 10% EPDM
Puffersp. b. HZG-Solar groß	Stahl / Dämmung	40	1500	3000	l	0,11	0,16	0,30	247	495	inkl. Dämmung, MFH:2x1500l
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	3	3	Stk.	2,25	3,78	7,00	11,4	11,4	Heiz-, TWW-, Puffer-Kreis
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	3	3	Stk.	0,24	0,27	0,29	0,80	0,80	-
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	4	4	Stk.	0,09	0,13	0,17	0,54	0,54	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	4	4	Stk.	0,12	0,16	0,21	0,62	0,62	Entleerung
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	0	0	Stk.	0,16	0,26	0,50	0	0	-
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	9	9	Stk.	0,20	0,54	1,20	4,87	4,87	-
Absperrarmatur DN 40	Messing	20	0	0	Stk.	0,83	0,88	0,92	0	0	-

WÄRMEVERTEILUNG FUßBODENHEIZUNG

FBH: Tackersystem (ohne Noppenplatten)

HeizungsSTEIGtg. DN 15	Kupfer	35	0	6,06	m	0,39	0,52	0,49	0	3,17	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 20	Kupfer	35	7,62	5,86	m	0,48	0,65	0,59	4,92	3,78	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 25	Kupfer	35	0	5,98	m	0,59	1,22	0,73	0	7,31	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 32	Kupfer	35	0	1,80	m	1,11	1,55	1,39	0	2,78	inkl. Formstücke
HZGANBINDEItg. DN 15	Kupfer	35	6,56	12,1	m	0,39	0,52	0,49	3,43	6,31	inkl. Formstücke
HZGANBINDEItg. DN 20	Kupfer	35	0	12,4	m	0,48	0,65	0,59	0	8,02	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	14,2	36,4	m	0,05	0,06	0,07	0,84	2,15	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	0	8	m	0,06	0,07	0,09	0	0,58	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	PE-Schaum	35	14,2	36,4	m	0,08	0,09	0,10	1,29	3,31	o. Klebeband, Instandh. wie Rohr
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	0	8	m	0,85	1,00	1,15	0	7,78	o. Klebeb., 96% SW, 4% Alu
Kappenventil DN 20/25	Messing	20	1	1	Stk.	0,30	0,49	0,70	0,49	0,49	zum MAG (Ausdehnungsgefäß)
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	6	13	Stk.	0,16	0,26	0,50	1,57	3,40	inkl. Fußbodenverteiler
Wärmemengenz. DN 15/20	Messing / PP	5	0	4	Stk.	0,74	0,88	1,00	0	3,51	Nur MFH, 70% Me., 30% PP
FBH-Vert.(VL+RL) DN 15/20	Messing	50	3	5	Stk.	3,91	5,35	7,00	16,0	26,7	inkl. Entleerung, Durchflussmz.
UP-Einbauschrank	Verzinkt	50	3	5	Stk.	9,00	13,2	19,2	39,7	66,2	ohne Pulverbeschichtung

WÄRMEÜBERGABE FUßBODENHEIZUNG

Klemmringversch. DN 12	Messing / EPDM	50	34	72	Stk.	0,12	0,14	0,16	4,66	9,86	2 je Heizk.:90% Me., 10% EPDM
FBH-R. DN 12: 0,10m/0,20m	Mehrschichtverb.	50	965	2449	m	0,11	0,12	0,12	114	289	Basis, KfW 70+55, sauerstoffd.
FBH-Halter: 0,10m/0,20m	PA	50	3226	10949	Stk.	0,00	0,00	0,00	5,94	20,1	20Stk./m² a 18g/Stk. (Durchsch.)
FBH-R. DN 12: 0,15m/0,25m	Mehrschichtverb.	50	772	1974	m	0,11	0,12	0,12	91,1	233	KfW 40, Passiv, Min, sauerstd.
FBH-Halter: 0,15m/0,25m	PA	50	2420	8212	Stk.	0,00	0,00	0,00	4,45	15,1	15Stk./m² a 18g/Stk. (Durchsch.)
Kabel 3-a.: NYM-J 3x1,5mm²	PVC / Kupfer	30	149	160	m	0,14	0,17	0,23	24,9	26,7	FBH-Anschl., Stellant. vern.

WÄRMEVERTEILUNG GAS-BRENNWERTGERÄT MIT HEIZKÖRPER

HeizungsVERTEILtg. DN 20	Kupfer	35	10,8	1,74 m	0,59	0,65	0,73	6,99	1,12	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 25	Kupfer	35	0	26,8 m	1,11	1,22	1,39	0	32,7	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 32	Kupfer	35	0	0 m	1,41	1,55	1,76	0	0	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 40	Kupfer	35	0	0 m	1,70	1,87	2,13	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	10,8	1,74 m	0,05	0,06	0,07	0,64	0,10	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	0	26,8 m	0,06	0,07	0,09	0	2,00	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	Mineralwolle / Alu	35	10,8	1,74 m	0,27	0,32	0,37	3,46	0,56	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	0	26,8 m	0,85	1,00	1,15	0	26,8	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Ausdehnungsgefäß	Stahl lack. / EPDM	15	18	35 l	0,16	0,20	0,26	3,55	6,90	Entleerung
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	0	0 Stk.	2,25	3,78	7,00	0	0	Heiz-, TWW-Kreis (im Gerät)
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	0	0 Stk.	0,24	0,27	0,29	0	0	-
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	2	2 Stk.	0,09	0,13	0,17	0,27	0,27	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	5	5 Stk.	0,12	0,16	0,21	0,78	0,78	Entleerung
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	4	0 Stk.	0,16	0,26	0,50	1,05	0	Geräteanschluss
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	0	4 Stk.	0,20	0,54	1,20	0	2,17	Geräteanschluss
Absperrarmatur DN 40	Messing	20	0	0 Stk.	0,83	0,88	0,92	0	0	-

WÄRMEVERTEILUNG PELLETKESSEL ODER ZUSÄTZLICH HZG-SOLARANLAGE (ALLE KESSEL) MIT HEIZKÖRPER

HeizungsVERTEILtg. DN 20	Kupfer	35	12,8	1,74 m	0,59	0,65	0,73	8,29	1,12	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 25	Kupfer	35	0	50,5 m	1,11	1,22	1,39	0	61,7	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 32	Kupfer	35	0	0 m	1,41	1,55	1,76	0	0	inkl. Formstücke
HeizungsVERTEILtg. DN 40	Kupfer	35	0	0 m	1,70	1,87	2,13	0	0	inkl. Formstücke
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	12,8	1,74 m	0,05	0,06	0,07	0,76	0,10	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	0	50,5 m	0,06	0,07	0,09	0	3,77	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	Mineralwolle / Alu	35	12,8	1,74 m	0,27	0,32	0,37	4,11	0,56	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	0	50,5 m	0,85	1,00	1,15	0	50,5	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Ausdehnungsg. b. Konv.	Stahl lack. / EPDM	15	50	140 l	0,15	0,19	0,25	9,54	26,7	90% Stahl lack., 10% EPDM
Pufferspeicher b. Konv.	Stahl / Dämmung	40	750	1500 l	0,13	0,20	0,37	152	247	inkl. Dämmung
Ausdehg. b. HZG-Solar klein	Stahl lack. / EPDM	15	80	200 l	0,15	0,18	0,24	14,8	37,0	90% Stahl lack., 10% EPDM
Puffersp. b. HZG-Solar klein	Stahl / Dämmung	40	1000	2000 l	0,12	0,19	0,34	186	303	inkl. Dämmung
Ausdehg. b. HZG-Solar groß	Stahl lack. / EPDM	15	100	250 l	0,14	0,18	0,24	18,1	45,2	90% Stahl lack., 10% EPDM
Puffersp. b. HZG-Solar groß	Stahl / Dämmung	40	1500	3000 l	0,11	0,16	0,30	247	495	inkl. Dämmung, MFH:2x1500l
Umwälzpumpe DN 25/32	Nassläuferpumpe	10	3	3 Stk.	2,25	3,78	7,00	11,4	11,4	Heiz-, TWW-, Puffer-Kreis
Schwerkraftb. DN 25/32	Messing	10	3	3 Stk.	0,24	0,27	0,29	0,80	0,80	-
Thermometer DN 15	Stahl / Messing	35	4	4 Stk.	0,09	0,13	0,17	0,54	0,54	40% Stahl, 60% Me., m. Tauchh.
KFE-Hahn DN 15	Messing	20	7	7 Stk.	0,12	0,16	0,21	1,09	1,09	Entleerung
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	0	0 Stk.	0,16	0,26	0,50	0	0	-
Absperrarmatur DN 25/32	Messing	20	9	9 Stk.	0,20	0,54	1,20	4,87	4,87	Pumpen, Tech.-Speicher
Absperrarmatur DN 40	Messing	20	0	0 Stk.	0,83	0,88	0,92	0	0	-

WÄRMEVERTEILUNG HEIZKÖRPER

HeizungsSTEIGtg. DN 15	Kupfer	35	7,74	11,9 m	0,39	0,52	0,49	4,04	6,23	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 20	Kupfer	35	0	5,98 m	0,48	0,65	0,59	0	3,86	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 25	Kupfer	35	0	1,80 m	0,59	1,22	0,73	0	2,20	inkl. Formstücke
HeizungsSTEIGtg. DN 32	Kupfer	35	0	0 m	1,11	1,55	1,39	0	0	inkl. Formstücke
HZGANBINDEleit. DN 12	Kupfer	50	134	268 m	0,39	0,43	0,49	57,7	115	Unter Estrich, inkl. Formstk.
HZGANBINDEitg. DN 15	Kupfer	50	7,80	27,8 m	0,48	0,52	0,59	4,08	14,5	Unter Estrich, inkl. Formstk.
Rohrsch. m. Bef. DN 12-20	Verz. / EPDM / PA	35	7,74	17,9 m	0,05	0,06	0,07	0,46	1,06	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Lochband o. Bef. DN 12-20	Verzinkt	50	142	296 m	0,01	0,01	0,01	1,54	3,21	Unter Estrich, Befestigung vern.
Rohrsch. m. Bef. DN 25-40	Verz. / EPDM / PA	35	0	1,80 m	0,06	0,07	0,09	0	0,13	74% Verz., 20% EPDM, 6% PA
Dämmung DN 12-20	PE-Schaum	35	7,74	17,9 m	0,08	0,09	0,10	0,70	1,63	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 12-20	PE-Schaum	50	142	296 m	0,08	0,09	0,10	12,9	26,9	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Dämmung DN 25-40	Mineralwolle / Alu	35	0	1,80 m	0,85	1,00	1,15	0	1,80	o. Klebeband, 96% MW, 4% Alu
Kappenventil DN 20/25	Messing	20	1	1 Stk.	0,30	0,49	0,70	0,49	0,49	zum MAG
Absperrarmatur DN 15/20	Messing	20	0	12 Stk.	0,16	0,26	0,50	0	3,14	-
Wärmemengenz. DN 15/20	Messing / PP	5	0	4 Stk.	0,74	0,88	1,00	0	3,51	MFH:o. Kast., 70% Me., 30% PP

WÄRMEÜBERGABE HEIZKÖRPER

Thermostatkopf	PVC / Messing / Sta	15	14	24 Stk.	0,12	0,16	0,24	2,24	3,84	80% PVC, 10% Me., 10% Stahl
Hahnblock	Messing	30	14	24 Stk.	0,28	0,40	0,50	5,63	9,65	-
Handtuchheizkörper	Stahl lackiert	30	0,88	1,01 kW	46,3	46,4	48,7	40,7	46,9	2x bei 55/45/24°C, Bad
Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	5,65	16,2 kW	50,8	53,5	56,2	302	865	Basis bei 55/45/20°C
Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	4,72	13,7 kW	51,6	54,3	57,0	256	743	KfW 70 bei 55/45/20°C
Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	3,79	11,2 kW	52,5	55,3	58,0	209	621	KfW 55 bei 55/45/20°C
Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	2,85	8,78 kW	53,2	56,0	58,8	160	492	KfW 40 bei 55/45/20°C

Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	1,92	6,34 kW	55,3	58,2	61,1	112	368	Passiv bei 55/45/20°C
Heizkörper (Plattenheizk.)	Stahl lackiert	30	1,36	4,87 kW	56,6	59,6	62,6	81,0	290	Min. U bei 55/45/20°C

Photovoltaikanlage (hier unter KG 420, da Energieerzeugung, ursprünglich KG 440)

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI TWW-SOLARANLAGE NACH EnEV

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	31,4	95,7 m ²	1,00	1,00	1,00	31,4	95,7	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	31,4	95,7 m ²	2,23	2,27	2,32	71,2	217	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	90,7	184 m	0,06	0,06	0,07	5,58	11,3	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI KEINER SOLARANLAGE (MAXIMAL)

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	39,6	106 m ²	1,00	1,00	1,00	39,6	106	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	39,6	106 m ²	2,23	2,27	2,32	89,9	240	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	84,8	184 m	0,06	0,06	0,07	5,21	11,3	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI TWW-SOLARANLAGE KLEIN

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	36,3	97,4 m ²	1,00	1,00	1,00	36,3	97,4	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	36,3	97,4 m ²	2,23	2,27	2,32	82,4	221	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	87,1	189 m	0,06	0,06	0,07	5,35	11,6	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI TWW-SOLARANLAGE GROß

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	34,7	94,1 m ²	1,00	1,00	1,00	34,7	94,1	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	34,7	94,1 m ²	2,23	2,27	2,32	78,7	214	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	88,3	185 m	0,06	0,06	0,07	5,43	11,4	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI HZG-SOLARANLAGE KLEIN

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	28,1	82,5 m ²	1,00	1,00	1,00	28,1	82,5	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	28,1	82,5 m ²	2,23	2,27	2,32	63,7	187	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	91,9	184 m	0,06	0,06	0,07	5,65	11,3	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI HZG-SOLARANLAGE GROß

Photovoltaikmodul	PV-Modul (Ø)	20	23,1	79,2 m ²	1,00	1,00	1,00	23,1	79,2	kg=m ² , inkl. Anschl., 165Wp/m ²
Photovoltaikbefestigung	Alu / Edelstahl	20	23,1	79,2 m ²	2,23	2,27	2,32	52,5	180	inkl. Dachh.:90% Alu, 10% Edilst.
Kabel 1-a.: Solar 1x4mm ²	PVC / Kupfer	30	94,3	178 m	0,06	0,06	0,07	5,80	11,0	Gleichstromhauptleitung

PHOTOVOLTAIKANLAGE BEI KEINER ODER MIT SOLARANLAGE

Dachdurchführungsziegel	PVC	30	2	4 Stk.	0,38	0,59	0,80	1,18	2,36	geeignet für Solar oder PV
Leerrohr DN 16-32	PVC	30	4,00	4,00 m	0,04	0,10	0,34	0,42	0,42	-
Wechselr. 1,5-5kWp(o.Transf.)	Stahl / Kupfer / PVC	10	2	4 Stk.	9,20	17,3	22,0	34,5	69,0	je 40% Stahl, Kupfer, 20% PVC
Kabel 1-a.: NYM-J 1x16,0mm ²	PVC / Kupfer	30	6,95	5,15 m	0,23	0,24	0,26	1,67	1,24	Erdung, ohne Befestigung
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	5,05	3,86 m	0,03	0,07	0,16	0,37	0,28	Aufputz im Keller (ohne Bef.)
Kabel 3-a.: NYM-J 3x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	11,1	18,0 m	0,16	0,21	0,28	2,33	3,78	je Wechselrichter zum Zähler
Stromzähler	PVC / Verz. / Kupfer	16	1	1 Stk.	1,40	1,88	3,00	1,88	1,88	50% PVC, 25% Verz., 25% CU
Sicherungsauto. (1-polig)	PVC / Stahl	30	1	1 Stk.	0,09	0,11	0,14	0,11	0,11	66% PVC, 33% St., inkl. FI/RCD

KG 430 Lüftung (Lufttechnische Anlagen)

RLT-ERZEUGUNG LÜFTUNGSGERÄT SCHWER

Lüftungsg.-Blech 80% WRG	Verz./PP/ Kupf./EPF	20	240	150 m ³ /h	0,17	0,21	0,36	50,9	39,0	Filterwechsel & Pulverbeschichtung vern. 75% Verz.,10% PP/CU,5% EPP
Lüftungsg.-Blech 80% WRG	Verz./PP/ Kupf./EPF	20	0	150 m ³ /h	0	0	0	0	39,0	75% Verz.,10% PP/CU,5% EPP
Lüftungsg.-Blech 80% WRG	Verz./PP/ Kupf./EPF	20	0	180 m ³ /h	0	0	0	0	43,2	75% Verz.,10% PP/CU,5% EPP

RLT-ERZEUGUNG LÜFTUNGSGERÄT LEICHT

Lüftungsg.-EPP 80% WRG	EPP/Verz./ PP/ Kupf	20	240	150 m ³ /h	0,08	0,12	0,18	29,4	20,8	Filterwechsel & Pulverbeschichtung vern. 35% EPP,25% Verz.,20% PP/CU
Lüftungsg.-EPP 80% WRG	EPP/Verz./ PP/ Kupf	20	0	150 m ³ /h	0	0	0	0	20,8	35% EPP,25% Verz.,20% PP/CU
Lüftungsg.-EPP 80% WRG	EPP/Verz./ PP/ Kupf	20	0	180 m ³ /h	0	0	0	0	23,8	35% EPP,25% Verz.,20% PP/CU

RLT-VERTEILUNG

RLTANSCHLUSSItg. DN 125	EPE	30	0	24,1 m	0,40	0,44	0,49	0	10,5	Datens. PE, inkl. Formstk.
RLTANSCHLUSSItg. DN 160	EPE	30	19,7	12,0 m	0,49	0,54	0,62	10,7	6,55	Datens. PE, inkl. Formstk.
RLTANSCHLUSSItg. DN 200	EPE	30	0	0 m	0,61	0,67	0,76	0	0	Datens. PE, inkl. Formstk.
Rohrsch. m.Bef. DN 125-200	Verz. / EPDM / PA	30	19,7	36,1 m	0,14	0,16	0,19	3,19	5,86	68% Verz., 30% EPDM, 3% PA
Dämmung DN 125-200	EPDM-Schaum	30	0	0 m	0,56	0,63	0,69	0	0	falls nicht Diff.-dicht. (20mm)
Wetterschutzgitter	Verzinkt	30	2	6 Stk.	3,00	3,30	3,90	6,60	19,8	ohne Erdwärmetauscher
PE-Siphon DN 50	PE	30	1	3 Stk.	0,14	0,34	0,55	0,34	1,02	Kondensatablauf
Abwasserleitung DN 50	PP-Rohr (HT-Rohr)	30	1,40	1,80 m	0,29	0,32	0,36	0,45	0,57	inkl. Formstk., keine Materialvar.
Rohrschelle m. Bef. DN 50	Verz. / EPDM / PA	30	1,40	1,80 m	0,08	0,10	0,11	0,14	0,17	69% Verz., 28% EPDM, 3% PA
Rohrschalldämpfer DN 125	Verz. / Mineralwolle	20	0	3 m	8,63	12,8	26,0	0	38,4	98% Verz., 2% Mineralw. (50mm)

B Sachbilanzdaten



Rohrschalldämpfer DN 160	Verz. / Mineralwolle	20	2,0	1,5 m	9,30	16,0	28,0	32,0	24,0	98% Verz., 2% Mineralw. (50mm)
Luftverteiler DN 125-200	Verzinkt	30	2	6 Stk.	9,26	11,6	13,7	23,1	69,4	Luftmengendrossel vern.

RLT-VERTEILUNG UND -ÜBERGABE

Annahme: Falls Instandh. unmöglich: Inliner

RLTANBINDEItg. DN 63	PE	30	0	0 m	0,31	0,33	0,36	0	0	inkl. Formstücke
RLTANBINDEItg. DN 75	PE	30	272	213 m	0,33	0,35	0,38	95,1	74,7	inkl. Formstücke
RLTANBINDEItg. DN 90	PE	30	0	6,36 m	0,41	0,43	0,48	0	2,76	inkl. Formstücke
Lochband o. Bef. DN 63-90	Verzinkt	30	272	220 m	0,02	0,02	0,02	5,10	4,12	Bef. vern., (0,3m je 1,2m Rohrl.)
Zuluft- u. Abluftventil DN 125	PP	20	21	37 Stk.	0,15	0,19	0,24	3,93	6,93	Tellerv., dez. Abluftfilter vern.

KG 434 Kälte (Kälteanlagen)

Keine Kühlung vorhanden

KG 440 Starkstrom (Starkstromanlagen)

Ausstattungs Wert 2; Verlegeart B2 und C

Erdung / Potentialausgleich	Edelstahl	50	1	1 Stk.	0,62	0,69	0,76	0,69	0,69	Blech
Hausanschlusskasten	PVC / Verz.	50	1	1 Stk.	3,49	3,70	3,90	3,70	3,70	95% PVC, 5% Verz.
Zählerschrank m. Etagev.	Verz. / Stahl	30	1	1 Stk.	14,8	21,7	30,4	21,7	21,7	95% Verz., 5% Stahl, o. Pulverb.
Stromzähler	PVC / Verz. / Kupf.	16	1	5 Stk.	1,40	1,88	3,00	1,88	9,38	50% PVC, 25% Verz., 25% CU
Kleinverteiler / Etagevert.	PVC / Verz. / Stahl	30	2	4 Stk.	2,24	3,39	4,25	6,79	13,6	75% PVC, 20% Verz., 5% Stahl
Sicherungsauto. (1-polig)	PVC / Stahl	30	28	47 Stk.	0,09	0,11	0,14	2,97	4,99	66% PVC, 33% St., inkl. FI/RCD
Sicherungsauto. (3-polig)	PVC / Stahl	30	1	3 Stk.	0,27	0,32	0,41	0,32	0,96	66% PVC, 33% St., inkl. FI/RCD
Kabel 5-a.: NYY-J 5x16,0mm ²	PVC / Kupfer	30	2,30	5,50 m	1,25	1,27	1,30	2,91	6,97	Hauptzuleitung
Kabel 5-a.: NYM-J 5x4,0mm ²	PVC / Kupfer	30	14,5	31,4 m	0,41	0,46	0,55	6,62	14,3	Zwischenverteilung
Kabel 1-a.: NYM-J 1x16,0mm ²	PVC / Kupfer	30	4,00	12,0 m	0,23	0,24	0,26	0,96	2,88	Erdung, ohne Befestigung
Kabel 3-a.: NYM-J 3x1,5mm ²	PVC / Kupfer	30	330	796 m	0,14	0,17	0,23	54,9	133	Beleuchtung
Kabel 3-a.: NYM-J 3x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	407	584 m	0,16	0,21	0,28	85,5	123	Steckdosen etc.
Kabel 5-a.: NYM-J 5x2,5mm ²	PVC / Kupfer	30	12,6	40,4 m	0,27	0,30	0,37	3,80	12,2	Küche (Herd)
Leerrohr DN 16-32	PVC	50	77,9	278 m	0,04	0,10	0,34	8,16	29,1	Deckenverlegung (Lampen)
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	183	128 m	0,03	0,07	0,16	13,4	9,39	Aufputz im Keller (ohne Bef.)
Abzweig- / UP-Schalterdose	PVC	50	151	319 Stk.	0,05	0,06	0,07	9,32	19,7	Unterputz / Aufputz
Kippschalter u. Taster	PVC / Verz. / Kupf.	30	24	63 Stk.	0,06	0,08	0,09	1,90	4,98	spez. Gewicht: ÖKOBAUDAT
Steckdose (AP+UP)	PVC / Verz. / Kupf.	30	79	156 Stk.	0,06	0,08	0,09	6,08	12,0	spez. Gewicht: ÖKOBAUDAT
Blitzschutzanlage (Alu 8mm)	Aluminium	50	54,3	82,5 m	0,13	0,14	0,15	7,64	11,6	ohne Befestigung und Ringerder

KG 450 Schwachstrom (Fernmelde- und informationstechnische Anlagen)

Gegensprechanlage vern.

Kabel 1-a.: Koaxialkabel	PVC / Kupfer	30	71,7	119 m	0,05	0,05	0,05	3,46	5,77	TV, Datens. wie 1-adrig
Kabel 4-a.: J-Y(ST)Y 2x2x0,6	PVC / Kupfer	30	57,7	84,0 m	0,03	0,03	0,04	1,92	2,80	Tele.+Internet, Datens. 3-adrig
Kabel 8-a.: J-Y(ST)Y 4x2x0,6	PVC / Kupfer	30	10,5	40,8 m	0,06	0,06	0,06	0,59	2,30	Sprechanlage, Datens. 5-adrig
Stangenrohr DN 16-32	PVC	30	4	6 m	0,03	0,07	0,16	0,29	0,44	Aufputz im Keller (ohne Bef.)
Abzweig- / UP-Schalterdose	PVC	50	6	20 Stk.	0,05	0,06	0,07	0,37	1,23	Unterputz / Aufputz
TAE- u. Antennendose	PVC / Verz. / Kupf.	30	6	20 Stk.	0,06	0,08	0,09	0,46	1,54	Datensatz wie Steckdose

KG 460 Aufzug (Förderanlagen)

Aufzug / Fahrstuhl	Datens. ÖKOBAU.	25	0	1 Stk.	-	3268	-	0	3268	5 Stw., 1t, 15J. auf 25J. (Insth.)
--------------------	-----------------	----	---	--------	---	------	---	---	------	------------------------------------

KG 470 Nutzungsspezifische Anlagen

Wohngeb.: Untypisch (keine Bilanzierung)

KG 480 Gebäudeautomation

Keine Gebäudeautom. vorhanden

KG 490 Sonstiges

nicht vorhanden

Tabelle B.5: Sachbilanz der Rohrleitungen einschließlich Formstücke (Rohrlänge siehe Tabelle B.4 auf Seite 190) der Gebäudetechnik des Ein- und Mehrfamilienhauses (Eigene Darstellung mit Datenquelle: Eigene Berechnungen / Recherchen u.a. Sanitär- und Heizungsrohrleitung: [203] (hauptsächlich) und Annahmen (vereinzelt))

Name / DN	Beschreibung / Material	Insth.	Min.-spez. Gew.	Ø-spez. Gew.	Max.-spez. Gew.	Name / DN	Beschreibung / Material	Insth.	Min.-spez. Gew.	Ø-spez. Gew.	Max.-spez. Gew.
[-]	[-]	[a]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]	[-]	[-]	[a]	[kg/m]	[kg/m]	[kg/m]
Abwasserleitung											
DN 50	PP (HT-Rohr)	30	0,290	0,319	0,363	DN 50	ABS (HT-Rohr)	30	0,290	0,319	0,363
DN 70	PP (HT-Rohr)	30	0,450	0,495	0,563	DN 70	ABS (HT-Rohr)	30	0,450	0,495	0,563
DN 100	PP (HT-Rohr)	30	0,940	1,034	1,175	DN 100	ABS (HT-Rohr)	30	0,940	1,034	1,175
DN 50	PVC-C (HT-Rohr)	30	0,290	0,319	0,363	DN 50	PE-HD (HT-Rohr)	30	0,420	0,462	0,525
DN 70	PVC-C (HT-Rohr)	30	0,450	0,495	0,563	DN 70	PE-HD (HT-Rohr)	30	0,650	0,715	0,813
DN 100	PVC-C (HT-Rohr)	30	0,940	1,034	1,034	DN 100	PE-HD (HT-Rohr)	30	1,350	1,485	1,688
DN 50	SML-Rohr	30	4,300	4,515	4,945						
DN 70	SML-Rohr	30	6,100	6,405	7,015						
DN 100	SML-Rohr	30	8,400	8,820	9,660						
Wasserleitung											
DN 12	Edelstahl	30	0,351	0,386	0,439	DN 12	Kupfer	30	0,391	0,430	0,489
DN 15	Edelstahl	30	0,420	0,462	0,525	DN 15	Kupfer	30	0,475	0,523	0,594
DN 20	Edelstahl	30	0,620	0,682	0,775	DN 20	Kupfer	30	0,587	0,646	0,734
DN 25	Edelstahl	30	0,800	0,880	1,000	DN 25	Kupfer	30	1,111	1,222	1,389
DN 32	Edelstahl	30	1,258	1,384	1,585	DN 32	Kupfer	30	1,405	1,546	1,756
DN 40	Edelstahl	30	1,520	1,672	1,900	DN 40	Kupfer	30	1,699	1,869	2,124
DN 12	PB	30	0,060	0,066	0,075	DN 12	PE-X	30	0,070	0,077	0,088
DN 15	PB	30	0,080	0,088	0,100	DN 15	PE-X	30	0,110	0,121	0,138
DN 20	PB	30	0,110	0,121	0,138	DN 20	PE-X	30	0,170	0,187	0,213
DN 25	PB	30	0,180	0,198	0,225	DN 25	PE-X	30	0,270	0,297	0,338
DN 32	PB	30	0,290	0,319	0,363	DN 32	PE-X	30	0,430	0,473	0,538
DN 40	PB	30	0,440	0,484	0,550	DN 40	PE-X	30	0,660	0,726	0,825
DN 12	PP-R	30	0,070	0,077	0,088	DN 12	PVC-C	30	0,099	0,109	0,124
DN 15	PP-R	30	0,110	0,121	0,138	DN 15	PVC-C	30	0,151	0,166	0,189
DN 20	PP-R	30	0,160	0,176	0,200	DN 20	PVC-C	30	0,234	0,257	0,293
DN 25	PP-R	30	0,260	0,286	0,325	DN 25	PVC-C	30	0,379	0,417	0,474
DN 32	PP-R	30	0,410	0,451	0,513	DN 32	PVC-C	30	0,589	0,648	0,736
DN 40	PP-R	30	0,640	0,704	0,800	DN 40	PVC-C	30	0,896	0,986	1,120
DN 12	Mehrschichtverb.	30	0,118	0,130	0,148	DN 12	Verzinkt	30	0,840	0,924	1,050
DN 15	Mehrschichtverb.	30	0,178	0,196	0,223	DN 15	Verzinkt	30	1,210	1,331	1,513
DN 20	Mehrschichtverb.	30	0,244	0,268	0,305	DN 20	Verzinkt	30	1,560	1,716	1,950
DN 25	Mehrschichtverb.	30	0,324	0,356	0,405	DN 25	Verzinkt	30	2,410	2,651	3,013
DN 32	Mehrschichtverb.	30	0,508	0,559	0,635	DN 32	Verzinkt	30	3,100	3,410	3,875
DN 40	Mehrschichtverb.	30	0,742	0,816	0,928	DN 40	Verzinkt	30	3,56	3,92	4,45
Solarleitung											
DN 12 - DN 25 Kupfer wie Wasserleitungen mit 35 Jahre Instandhaltung											
DN 12 - DN 25 Edelstahl wie Wasserleitungen mit 40 Jahre Instandhaltung											
DN 12	Edelstahlwellrohr	40	0,123	0,129	0,148						
DN 15	Edelstahlwellrohr	40	0,172	0,180	0,206						
DN 20	Edelstahlwellrohr	40	0,319	0,335	0,383						
DN 25	Edelstahlwellrohr	40	0,396	0,416	0,475						

Heizungsleitung

DN 12 - DN 40 Kupfer wie Wasserleitungen mit 35 Jahre Instandhaltung
 DN 12 - DN 40 Edelstahl wie Wasserleitungen mit 40 Jahre Instandhaltung
 DN 12 - DN 40 PB wie Wasserleitungen mit 30 Jahre Instandhaltung
 DN 12 - DN 40 PE-X wie Wasserleitungen mit 30 Jahre Instandhaltung
 DN 12 - DN 40 PP-R wie Wasserleitungen mit 30 Jahre Instandhaltung
 DN 12 - DN 40 Mehrschichtverb. wie Wasserleitungen mit 30 Jahre Instandhaltung

DN 12	Stahl	40	0,840	0,924	1,050	DN 12	Präzisionsss. / C-Stahl	40	0,434	0,477	0,543
DN 15	Stahl	40	1,210	1,331	1,513	DN 15	Präzisionsss. / C-Stahl	40	0,536	0,590	0,670
DN 20	Stahl	40	1,560	1,716	1,950	DN 20	Präzisionsss. / C-Stahl	40	0,824	0,906	1,030
DN 25	Stahl	40	2,410	2,651	3,013	DN 25	Präzisionsss. / C-Stahl	40	1,052	1,157	1,315
DN 32	Stahl	40	3,100	3,410	3,875	DN 32	Präzisionsss. / C-Stahl	40	1,320	1,452	1,650
DN 40	Stahl	40	3,560	3,916	4,450	DN 40	Präzisionsss. / C-Stahl	40	1,620	1,782	2,025

Fußbodenheizungsleitung (ohne Formstücke, Ø-Anbindeleitung 0,88m/m²)

DN 12	Mehrschichtverb.	50	0,112	0,118	0,124
DN 12	Kupfer PVC umm.	50	0,446	0,446	0,431
DN 12	PB	50	0,060	0,060	0,063
DN 12	PE-X	50	0,070	0,070	0,074

Lüftungsleitung

DN 63	PE	30	0,310	0,326	0,357	DN 63	PP	30	0,310	0,326	0,357
DN 75	PE	30	0,333	0,350	0,383	DN 75	PP	30	0,333	0,350	0,383
DN 90	PE	30	0,413	0,434	0,475	DN 90	PP	30	0,413	0,434	0,475
DN 63	PE	30	0,360	0,396	0,450	DN 63	PP	30	0,390	0,429	0,488
DN 75	PE	30	0,460	0,506	0,575	DN 75	PP	30	0,450	0,495	0,563
DN 90	PE	30	0,630	0,693	0,788	DN 90	PP	30	0,620	0,682	0,775
DN 63	Verzinkt	30	0,932	1,025	1,165	DN 125	EPE	30	0,396	0,435	0,495
DN 75	Verzinkt	30	1,109	1,220	1,387	DN 160	EPE	30	0,495	0,544	0,618
DN 90	Verzinkt	30	1,331	1,464	1,664	DN 200	EPE	30	0,608	0,668	0,759
DN 125	EPP	30	0,396	0,435	0,495	DN 125	PE	30	1,220	1,342	1,525
DN 160	EPP	30	0,495	0,544	0,618	DN 160	PE	30	2,000	2,200	2,500
DN 200	EPP	30	0,608	0,668	0,759	DN 200	PE	30	3,050	3,355	3,813
DN 125	PP	30	1,220	1,342	1,525	DN 125	Verzinkt	30	1,740	1,914	2,175
DN 160	PP	30	2,000	2,200	2,500	DN 160	Verzinkt	30	2,220	2,442	2,775
DN 200	PP	30	3,050	3,355	3,813	DN 200	Verzinkt	30	2,900	3,190	3,625

C Weitere Ergebnisse der ökologischen Analyse von Niedrigstenergiewohngebäuden

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die für eine bessere Lesbarkeit im Kapitel [5 auf Seite 73](#) vernachlässigt wurden. [Abbildung C.1 auf der nächsten Seite](#) zeigt die umweltbezogenen Anteile der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik am Bauwerk Einfamilienhaus. [Abbildung C.2 auf der nächsten Seite](#) zeigt dieses Verhältnis am Median für das Mehrfamilienhaus auf. Die Fortsetzung der fehlenden Bewertungsparameter von [Abbildung 5.29 auf Seite 114](#) finden sich in [Abbildung C.3 auf Seite 201](#); ebenso von [Abbildung 5.31 auf Seite 118](#) in [Abbildung C.4 auf Seite 202](#).

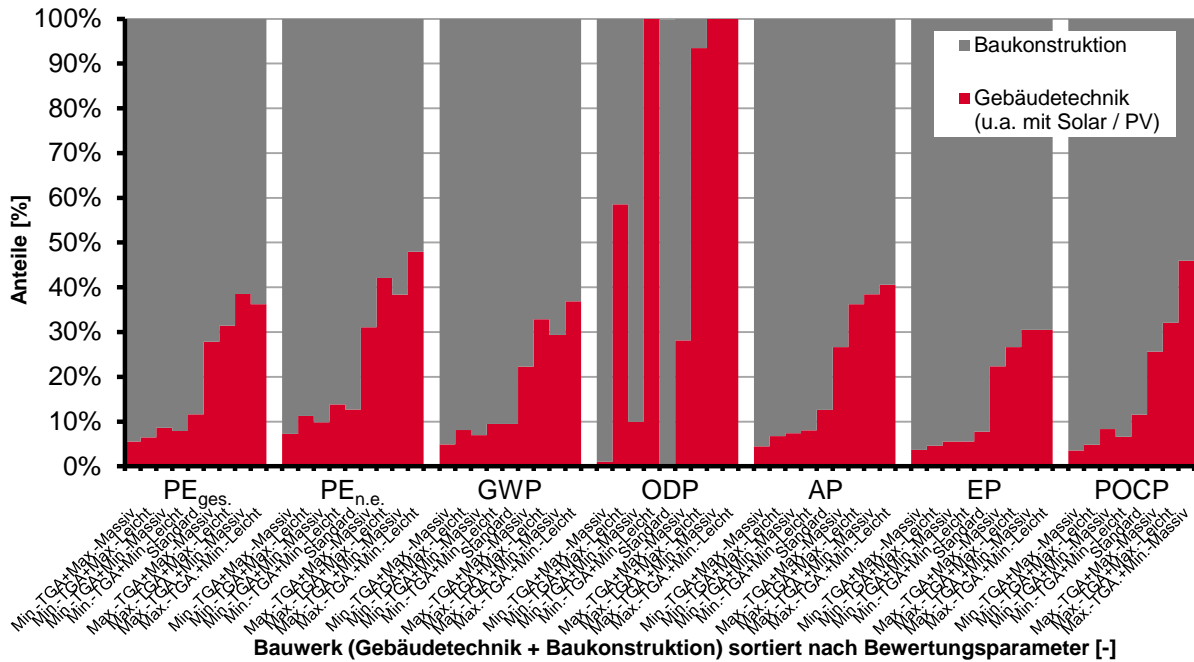


Abbildung C.1: Anteile der Baukonstruktion und der Gebäudetechnik (u.a. Heizungstechnik mit / ohne Solar- und mit / ohne PV-Anlage) für das KfW 40-Einfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern (Ergänzung von Abbildung 5.25 auf Seite 106 (rechts))

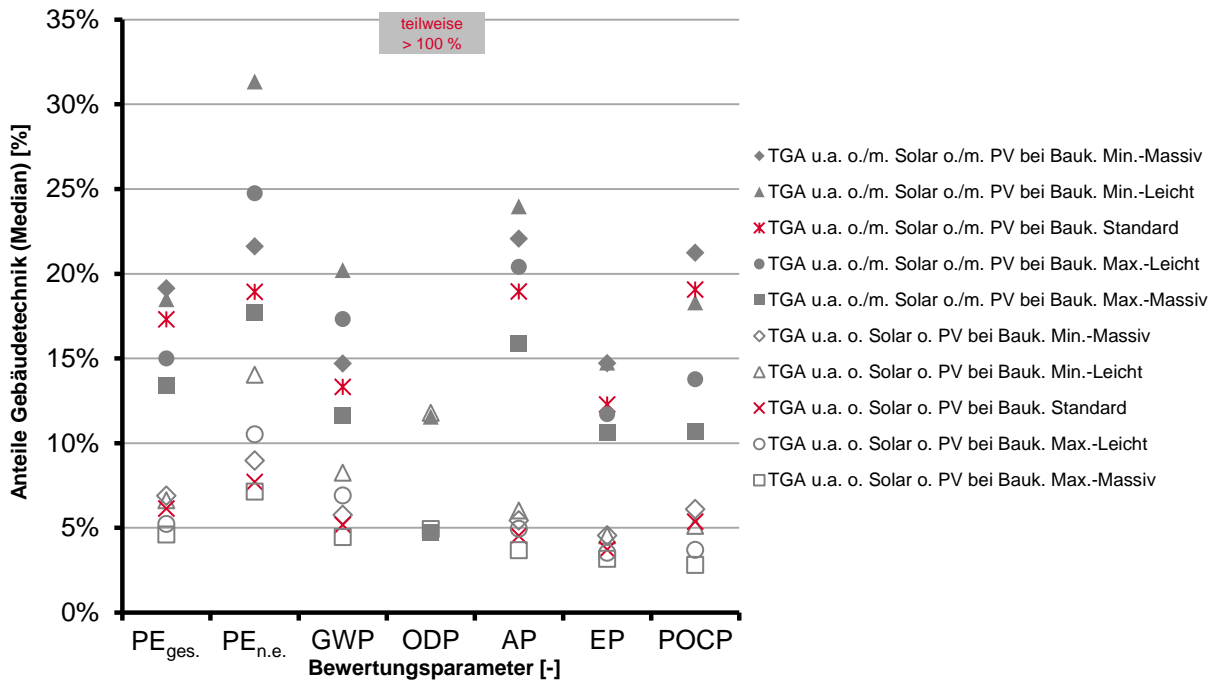


Abbildung C.2: Anteile des Medians der Gebäudetechnik für das KfW 40-Mehrfamilienhaus bei allen Bewertungsparametern

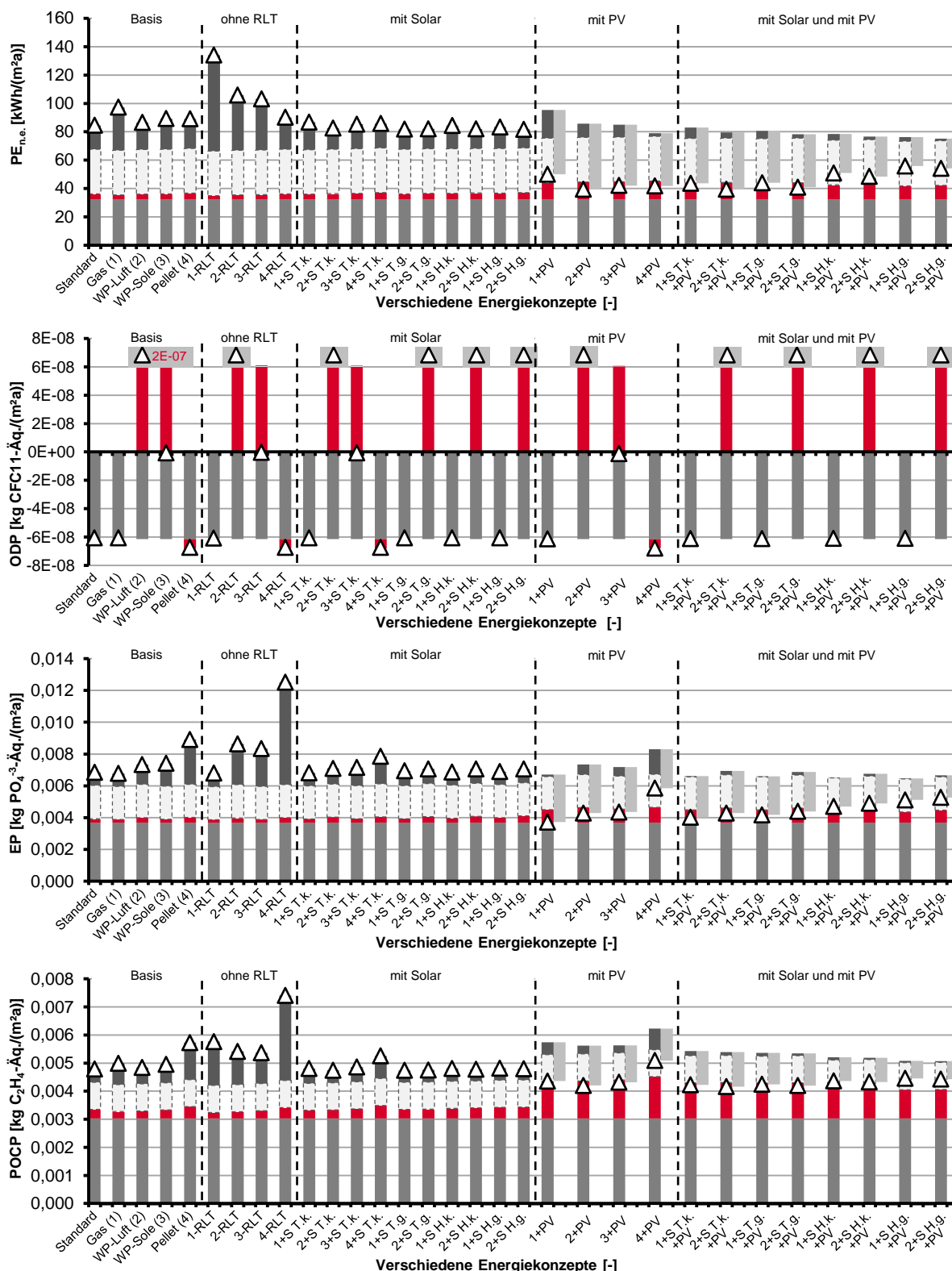


Abbildung C.3: Anteile des Bauwerks (Standardmaterialien) und des Betriebs bei unterschiedlichen Energiekonzepten für das KfW 40-Einfamilienhaus beim Primärenergieinhalt nicht erneuerbar ($PE_{n.e.}$), Ozonabbau- (ODP), Eutrophierungs- (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) (Fortsetzung von Abbildung 5.29 auf Seite 114 inkl. Legende)

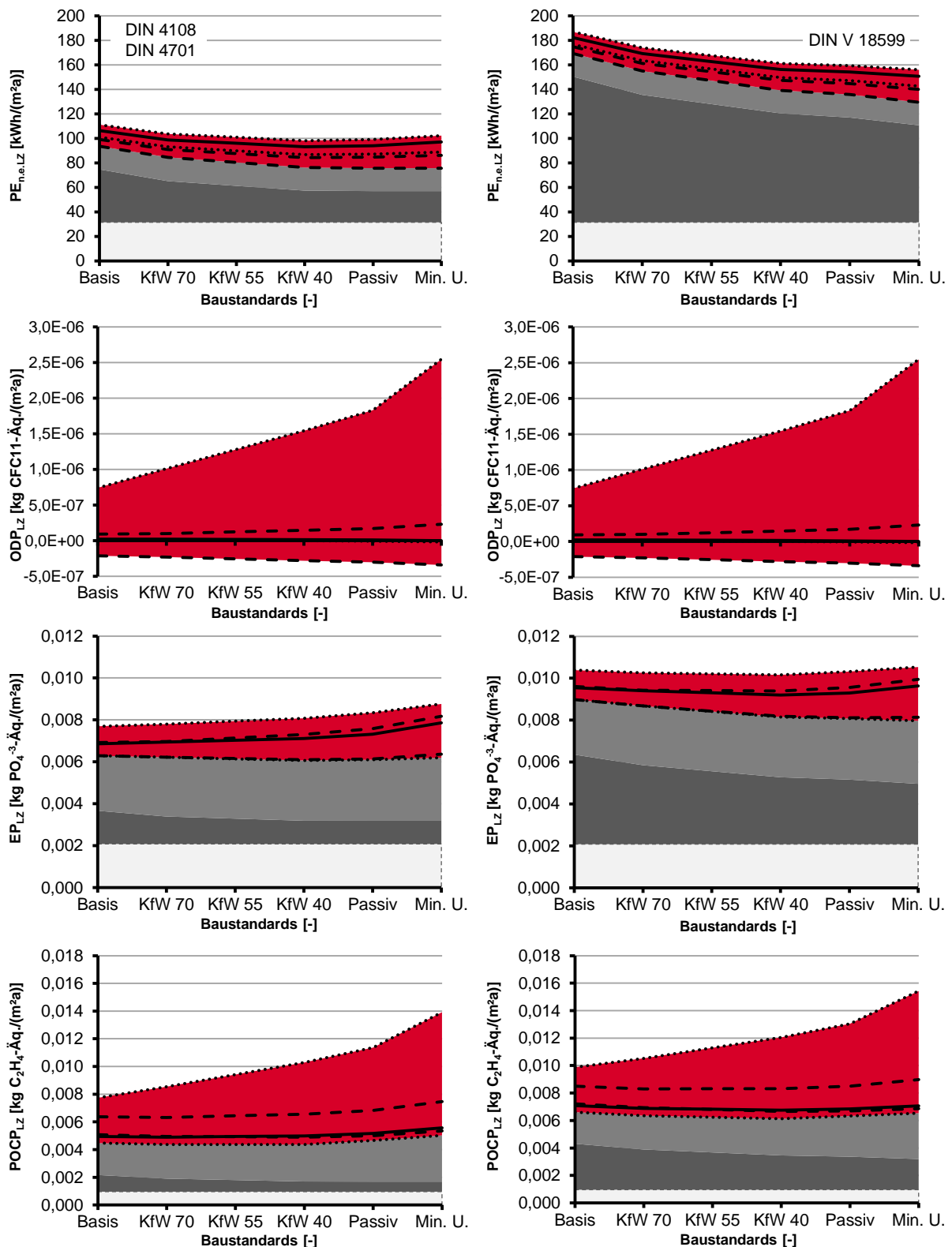


Abbildung C.4: Anteile am Lebenszyklus des Einfamilienhauses (Betrieb mit Wärmemix nach DIN 4108 [178] / DIN 4701 [179] (links) bzw. DIN V 18599 [200] (rechts)) über verschiedene Baustandards beim Primärenergieinhalt nicht erneuerbar ($PE_{n.e.}$), Ozonabbau- (ODP), Eutrophierungs- (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) (Fortsetzung von Abbildung 5.31 auf Seite 118 inkl. Legende)

D Weitere Ergebnisabweichungen und Faktoren der vereinfachten ökologischen Ermittlung der Gebäudetechnik

Die Darstellung der Ergebnisabweichungen und weiterer LCA-Faktoren dient als Ergänzung zu Kapitel 6 auf Seite 123. *Abbildung D.1* und *Abbildung D.2 auf der nächsten Seite* zeigen die Ergebnisabweichung der LCA-Schätzung bzw. vereinfachten LCA-Berechnung zum detaillierten Berechnungsverfahren für das Mehrfamilienhaus. Die LCA-Faktoren wurden nach dem beschriebenen Verfahren (Kapitel 6.2 auf Seite 124) für die Sanitär- (*Tabelle D.1 auf der nächsten Seite*), Heizungs- (*Tabelle D.2 auf Seite 205*) und Lüftungstechnik (*Tabelle D.3 auf Seite 205*) ohne Gutschrift ermittelt, d.h. ohne die Phase D nach DIN EN 15978 [71]; folglich können diese nur Anwendung finden sofern die Recyclinggutschrift bzw. Phase D vernachlässigt wird. Hier sei noch anzumerken, dass alle ermittelten LCA-Faktoren (mit und ohne Gutschrift) nicht das ADP repräsentieren, allerdings für den Primärenergieinhalt erneuerbar annähernd anwendbar sind. Auf eine Darstellung der Ergebnisabweichungen wird verzichtet, da diese bei allen LCA-Faktoren – sowohl beim Einfamilien- als auch beim Mehrfamilienhaus – in der Größenordnung der gezeigten Abweichungen (mit Gutschrift bzw. Phase D nach DIN EN 15978 [71]) liegen.

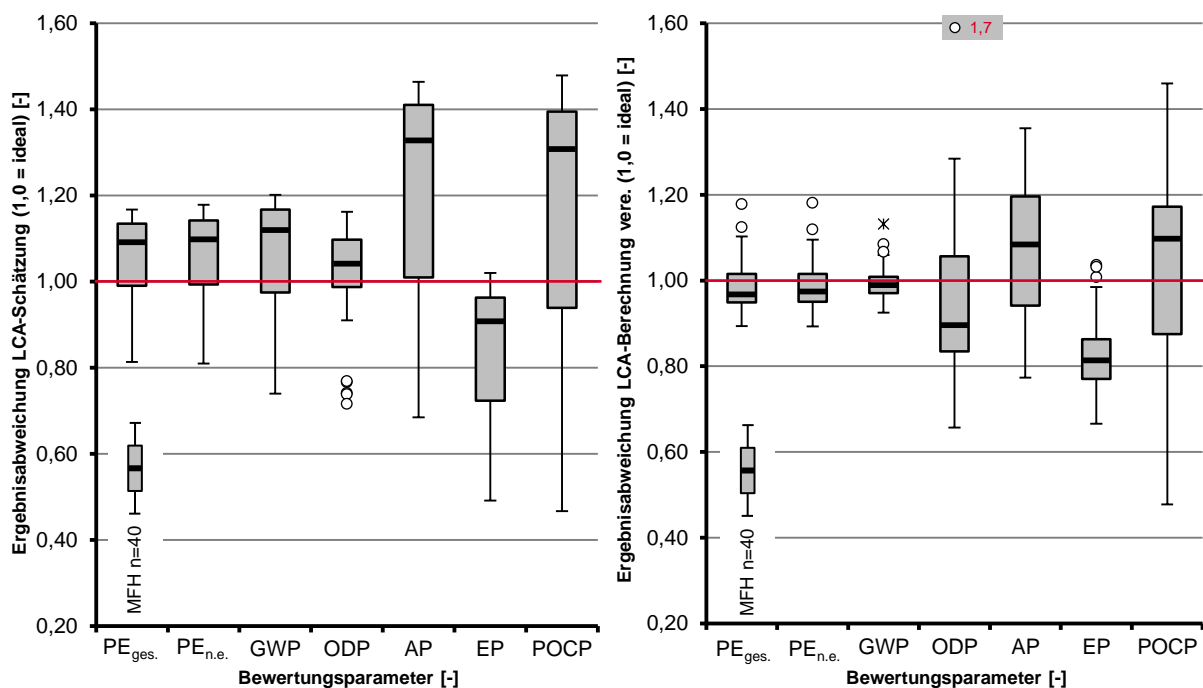


Abbildung D.1: Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Sanitärtechnik beim Mehrfamilienhaus

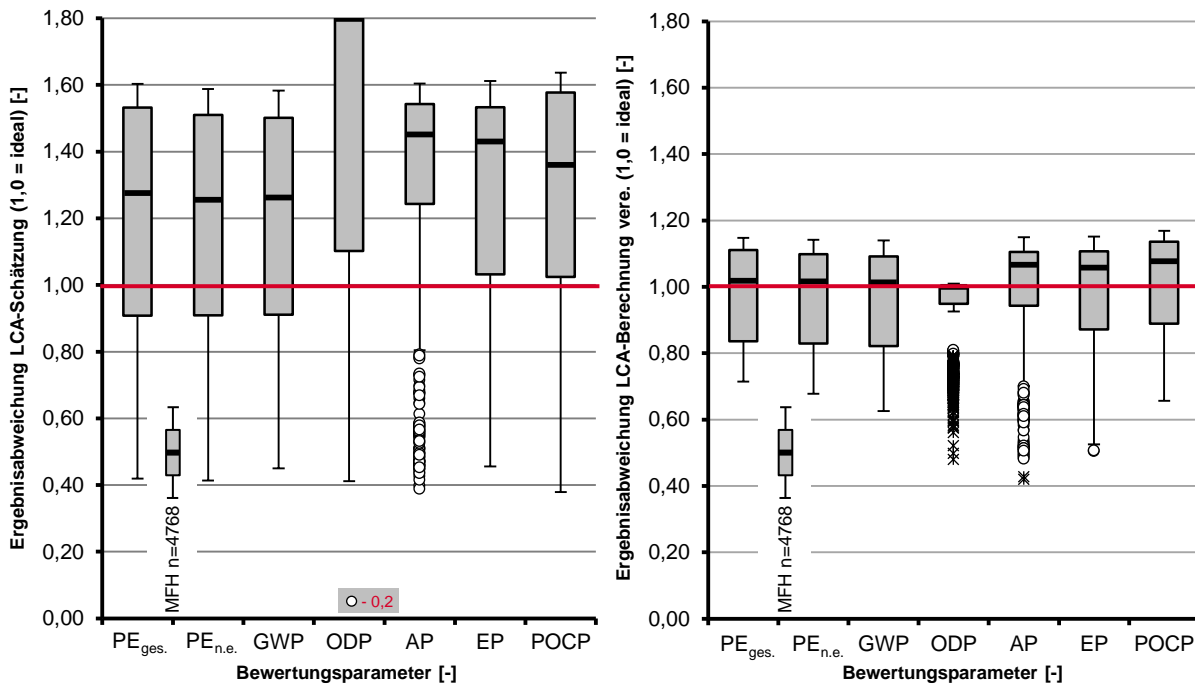


Abbildung D.2: Ergebnisabweichung für die LCA-Schätzung (links) und vereinfachte LCA-Berechnung (rechts) für die Heizungstechnik beim Mehrfamilienhaus

Tabelle D.1: LCA-Faktoren der Sanitärtechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]

Phasen: A + B + C	Bewertungsparameter	LCA-Faktor	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,8 ^A	ODP, AP, POCP	5,7 ^A
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,7 ^A	ODP, AP, POCP	5,7 ^A
^A Basis: Sanitärkeramik (WC, Waschbecken etc.) + Acryl-Wanne (Duschwanne, Badewanne)				
LCA-Berechnung (vereinfacht)				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,1 ^{B,D} 2,0 ^{C,D}	ODP, AP, POCP	3,8 ^{B,D} 2,9 ^{C,D}
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, EP	2,0 ^{B,D} 1,8 ^{C,D}	ODP, AP, POCP	3,9 ^{B,D} 2,7 ^{C,D}
^B Basis: Wie A + Kunststoff-Wasserrohrleitungen (PE-X, PP, PB, PVC)				
^C Basis: Wie A + Metall- (Edelstahl, Kupfer, Verzinkt) oder Mehrschichtverbund-Wasserrohrleitungen				
^D Zusätzlich zu B oder C bei Abflussrohr SML: x 1,4 (Faktor ^B oder ^C x 1,4)				

Tabelle D.2: LCA-Faktoren der Heizungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]

Phasen: A + B + C	Bewertungsparameter	LCA-Faktor	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,7 ^A	--	--
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,6 ^A	--	--
^A Basis: Wärmeerzeuger + Trinkwarmwasserspeicher + ggf. Solar- + PV-Modul				
LCA-Berechnung (vereinfacht)				
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, AP, EP, POCP	1,3 ^{B,C,D}	ODP	1,0 ^{B,C,D}
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, AP, EP, POCP	1,2 ^{B,C,D}	ODP	1,0 ^{B,C,D}
^B Basis: Wie A + Heizungsübergabe (Fußbodenheizungsrohr oder Heizkörper)				
^C Basis: Zusätzlich zu B bei Sole-Wasser-Wärmepumpe: Erdsonde bzw. Erdkollektor (Rohr)				
^D Basis: Zusätzlich zu B bei Pelletkessel: Lagerraum aus Holz (Konstruktionsvollholz, OSB)				

Tabelle D.3: LCA-Faktoren der Lüftungstechnik für die LCA-Schätzung und die vereinfachte LCA-Berechnung für das Einfamilien- und Mehrfamilienhaus – ohne Phase D nach DIN EN 15978 [71]

Phasen: A + B + C	Bewertungsparameter	LCA-Faktor
LCA-Schätzung		
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	6,9 ^A
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	4,4 ^A
^A Basis: Wohnraumlüftungsgerät (EFH: 1x, MFH: je Wohnung 1x)		
LCA-Berechnung (vereinfacht)		
Einfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,3 ^B
Mehrfamilienhaus	PE _{ges.} , PE _{n.e.} , GWP, ODP, AP, EP, POCP	1,5 ^B
^B Basis: Wie A + (Rohr-)Schalldämpfer + Anbindeleitung (PE flexibel, PP flexibel, PE, PP, Verzinkt) [Anbindeleitung = vom Luftverteiler zum Auslass (DN 63, DN 75, DN 90)]		

Glossar

Abiotischer Ressourcenverbrauch (Stoffe) (ADP) repräsentiert die Verknappung von abiotischen (nicht von Lebewesen gebildeten) Ressourcen [54:34] – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

Bauwerk ist neben dem Betrieb ein Bestandteil des Gebäudes und besteht aus der Baukonstruktion (u.a. Gebäudehülle) sowie der Gebäudetechnik; bilanziell beinhaltet das Bauwerk Eingebundene Energie bzw. Emissionen (Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung inkl. Recyclingpotenzial) – siehe Kapitel 5.4 auf Seite 105

Bestimmtheitsmaß oftmals als R^2 abgekürzt, ist ein Gütemaß für die Anpassung an das beschriebene Regressionsmodell, d.h. mit welcher Genauigkeit die Gleichung die Datenpunkte abbildet – siehe Kapitel 3 auf Seite 29 und Kapitel 6 auf Seite 123

Betrieb ist neben dem Bauwerk ein Bestandteil des Gebäudes und repräsentiert den Energieverbrauch im Betrieb, einen Teil der Nutzungsphase; bilanziell beinhaltet der Betrieb die Betriebsbedingte Energie bzw. Emissionen – siehe Kapitel 5.5 auf Seite 111

Betriebsbedingte Energie / Emissionen (BE) enthaltene (primärenergetische) Energie bzw. Emissionen in den Phasen B6 (hauptsächlich) und B7 nach DIN EN 15978 [71:21], d.h. Primärenergie bzw. Emissionen nur während des Betriebs (ohne Instandhaltung etc.) – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

Box-Plot ist eine Analysemethode, um mittels graphischer Darstellung die Lage und Streuung von Daten zu veranschaulichen – siehe Kapitel 5.1.1 auf Seite 73

Charakterisierungsfaktor „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird“ [18:12], z.B. 1 CH₄ (Methan) entspricht 25 CO₂-Äq. (Kohlendioxid-Äquivalenten) – siehe Kapitel 4.1.3 auf Seite 46

Eingebundene Energie / Emissionen (EE) enthaltene (primärenergetische) Energie bzw. Emissionen in den Phasen A1-A5, B1-B5, C1-C4 und D nach DIN EN 15978 [71:21], d.h. Primärenergie bzw. Emissionen während Herstellung, Nutzung (ohne Betrieb, mit Instandhaltung) und Entsorgung einschließlich Gutschrift (außer Betriebsbedingte Energie / Emissionen) – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

Endpoint-Indikator auch Safeguard Subjects oder Areas of Protection genannt [39:290], beschreibt schadensorientiert die Auswirkungen auf die Umwelt (zusammengefasste Midpoint-Indikatoren) – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

- EPD (Environment Product Declaration)** auch Umweltproduktdeklaration oder Typ III Umweltdeklaration genannt, „[...] die quantitative umweltbezogene Daten auf der Grundlage festgelegter Parameter bereitstellt [...]“ [54:11] – siehe Kapitel [2.3.2 auf Seite 23](#)
- Eutrophierungspotenzial (EP)** repräsentiert die Eutrophierung, d.h. Überdüngung [54:34] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)
- Funktionelle Einheit** auch funktionale Einheit genannt, „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ [18:10]; dient als Basis für alle Ergebnisse (Input- und Outputströme) – siehe Kapitel [3.2.1 auf Seite 32](#)
- Gebäudetechnik** auch Technische Gebäudeausrüstung (TGA) genannt, ist der Oberbegriff für die komplette Technik, u.a. Heizungs-, Lüftungs-, Sanitär-, Elektrotechnik, in einem Gebäude – siehe Kapitel [5.3 auf Seite 88](#)
- Graue Energie** „[...] kumulierten Aufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie zur Herstellung und Entsorgung eines Baustoffs“ [57:10] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)
- Heizwert** Wärmemenge die bei vollständiger Verbrennung eines Stoffes frei wird, wobei beim Heizwert die Kondensationswärme des Abgases nicht erfasst wird; beim Brennwert hingegen schon – siehe Kapitel [4.1.4 auf Seite 50](#)
- Instandhaltung** „Kombination aller technischen [...] Maßnahmen, die während der Nutzungsdauer eines Gebäudes oder zusammengesetzten Bauteils (Bauwerksteils) dazu dienen, den Zustand zu erhalten, in dem es die von ihm geforderten Funktionen erfüllen kann“ [71:10], d.h. un- sowie planmäßige Arbeiten zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung und Rückführung in den funktionsfähigen Zustand – siehe Kapitel [4.1.2 auf Seite 40](#)
- Interquartilsabstand** oftmals als IQR abgekürzt, repräsentiert mittels einer „Box“ in einem Box-Plot-Diagramm 50 % der mittleren Daten – siehe Kapitel [5.1.1 auf Seite 73](#)
- KfW-Standard** mit seinen Untergruppierungen, ist ein deutscher Baustandard. „In allen geförderten Fällen muss ein deutlich höheres Anforderungsniveau als die Energieeinsparverordnung [...] erreicht werden“ [187:5] – siehe Kapitel [4.4.1 auf Seite 64](#)
- Korrelationskoeffizient** dimensionslose Maßzahl bzw. Maß für die Abhängigkeit zweier variabler Größen voneinander [158:426] – siehe Kapitel [3.1 auf Seite 29](#)
- Kumulierter Energieaufwand** „[...] Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands [...], der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“ [50:6] (kumulierter Energieverbrauch und kumulierter nicht energetischer Aufwand ergeben den kumulierten Energieaufwand [50:7]) – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)
- Kumulierter Energieverbrauch** „[...] umfasst alle gehandelten, primärenergetisch [...] bewerteten Endenergien (EE) für Wärme, Kraft, Licht und sonstige Nutzelektrizitätserzeugung“ [50:7] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Kumulierter nicht energetischer Aufwand „[...] ist die Summe des primärenergetisch bewerteten Energieinhalts aller nicht energetisch eingesetzten Energieträger (NEV) und des stoffgebundenen Energieinhalts von Einsatzstoffen (SEI)“ [50:7] – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

LCA (life cycle assessment) „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ [18:7] – siehe Kapitel 1.2 auf Seite 3 und Kapitel 2.2.1 auf Seite 9

LCA-Berechnung vereinfacht dient als Grundlage für ökologische Entscheidungen in der Entwurfsplanung, d.h. eine „angenäherte“ Ermittlung der potenziellen Umweltauswirkungen – siehe Kapitel 6 auf Seite 123

LCA-Ermittlung Überbegriff für die ganzheitliche Beschreibung der ökologischen Betrachtung von Gebäuden über alle HOAI-Leistungsphasen – siehe Kapitel 6 auf Seite 123

LCA-Schätzung dient als Grundlage für ökologische Entscheidungen in der Vorplanung, d.h. eine „überschlägige“ Ermittlung der potenziellen Umweltauswirkungen – siehe Kapitel 6 auf Seite 123

Lebenszyklus „Alle aufeinander folgenden und miteinander verbundenen Phasen der Lebensdauer des betrachteten Gegenstands“ [8:13], d.h. bei Gebäuden: Herstellung (Phase A), Nutzung (Phase B – unterteilt in Betrieb und Instandhaltung etc.) sowie Entsorgung (Phase C) inklusive Recyclingpotenzial (Phase D) nach DIN EN 15978 [71:21]

Lebenszyklusanalyse auch LCA (*life cycle assessment*) genannt (siehe LCA) – siehe Kapitel 1.2 auf Seite 3

Lebenszyklusbetrachtung beinhaltet die ökonomische und ökologische Bewertung über den kompletten Lebenszyklus – siehe Kapitel 2.2.3 auf Seite 20

LEGEP (Lebenszyklus-Gebäude-Planung) ist eine Software bzw. ein Programm für die integrale Planung von nachhaltigen Gebäuden [103] – siehe Kapitel 4.1.4 auf Seite 50

Metaanalyse Zusammenfassung von verschiedenen Einzelstudien zu einer Übersichtsarbeit – siehe Kapitel 3 auf Seite 29

Midpoint-Indikator beschreibt problemorientiert die Auswirkungen auf eine Umweltkategorie – siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 10

Minergie mit seinen Untergruppierungen, ist ein schweizerischer Baustandard für Gebäude mit sehr geringem Energieverbrauch [205] – siehe Kapitel 3.2.3 auf Seite 35

Modernisierung „Veränderungen und Verbesserungen an einem bestehenden Gebäude mit dem Ziel, dieses in einen annehmbaren Zustand zu versetzen“ [71:11], z.B. Nutzungsänderung, Veränderung der Raumaufteilung – siehe Kapitel 4.1.2 auf Seite 40

Niedrigstenergiegebäude „Niedrigstenergiegebäude“ ein Gebäude, das eine sehr hohe [...] Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen [...] gedeckt werden“ [10:Art.2 Nr.2]; eine exakte Definition in Deutschland steht derzeit (Sept. 2016) aus. In dieser

Arbeit wird auf eine exakte Definition verzichtet, allerdings wird eine Bandbreite an möglichen Standards untersucht und hieraus ein Hinweis entwickelt. Bilanziell beinhaltet ein Gebäude das Bauwerk und den Betrieb – siehe Kapitel [4.4.1 auf Seite 64](#) und Kapitel [5.5 auf Seite 111](#)

Ökobilanz auch LCA (*life cycle assessment*) genannt (siehe LCA) – siehe Kapitel [1.2 auf Seite 3](#)

Ökologie Im Sinne der umweltbezogenen Qualität („*Qualität hinsichtlich der Umweltauswirkungen und Umweltaspekte*“ [71:9]) von Bauwerken; dementsprechend ist beispielsweise bei der „ökologischen Berechnung“ oder „ökologischen Betrachtung“ die Berechnung bzw. Betrachtung der ökologischen Eigenschaften gemeint – siehe Kapitel [1.1 auf Seite 1](#)

Ozonabbaupotenzial (ODP) repräsentiert die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht [54:34] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Primärenergie (PE) „*Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden*“ [50:5] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Sachbilanz „*Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst*“ [18:7], d.h. eine Energie- und Stoffbilanz – siehe Kapitel [4.1.1 auf Seite 39](#)

Signifikanzwert oftmals als p-Wert abgekürzt, gibt aus ob ein Ergebnis statistisch signifikant bzw. bedeutsam ist, hierfür zählt meist ein Wert $< 0,05$ als Kenngröße – siehe Kapitel [3 auf Seite 29](#)

Sommersmogpotenzial (POCP) repräsentiert die photochemische Ozonbildung, d.h. die Bildung von bodennahem Ozon (auch Sommersmog genannt) [54:34] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Treibhauspotenzial (GWP) repräsentiert die globale Erwärmung, ausgelöst durch den Treibhauseffekt [54:34] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Umweltauswirkung auch Umweltwirkung genannt, „*Veränderung der Umwelt, unabhängig davon, ob sie sich günstig oder schädlich auswirkt, die ganz oder teilweise von Umweltaspekten herrührt*“ [71:9] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Versauerungspotenzial (AP) repräsentiert die Versauerung von Boden und Wasser [54:34] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Wirkungsabschätzung „*Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient*“ [18:7], d.h. Herstellung eines Zusammenhangs zwischen den Sachbilanzdaten und Umweltauswirkungen – siehe Kapitel [4.1.1 auf Seite 39](#)

Wirkungsindikator auch Wirkungskategorie-Indikator genannt, „*quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie*“ [18:13], d.h. die Bezugsgröße der Wirkungskategorie – siehe Kapitel [4.1.3 auf Seite 46](#)

Wirkungskategorien „*Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können*“ [18:13] – siehe Kapitel [2.2.2 auf Seite 10](#)

Index

A

Abiotischer Ressourcenverbrauch	19, 207
Abschneidekriterium	107, 139
Annahmen	51, 64, 179
Anreizverfahren	128
Aufbau / Überblick (Analyse)	75
Auswertung	40, 73

B

Baukonstruktion	75
Baustoffe	
Dichte	66
Wärmeleitfähigkeit	66
Bauwerk	75, 207
Bestimmtheitsmaß	207
Betriebsbedingte Emissionen	14, 207
Betriebsbedingte Energie	14, 207
Bewertungsparameter	10, 46
Biokapazität	1
Box-Plot	73, 207
Ausreißer / Extremausreißer	73
Interquartilsabstand (IQR)	73, 208
Median	73
Whisker / Antennen	73

C

Charakterisierungsfaktor	47, 207
--------------------------	---------

D

Dämmstoffe	
Dichte	67
Wärmeleitfähigkeit	67
Datenbank	24, 51
Datengrundlage	50, 179

E

Effizienz	2
Einfamilienhaus	55
Eingebundene Emissionen	14, 207
Eingebundene Energie	14, 207
Niedrigenergiegebäude	36
Niedrigstenergiegebäude	36
Standardenergiegebäude	36
Embodied energy	14
Endpoint-Indikator	10, 207
Ergebnisabweichung (LCA-Faktoren)	
Heizungstechnik	132, 204
Lüftungstechnik	135
Sanitärtechnik	129, 203
Erzeugung (Gebäudetechnik)	68
Eutrophierungspotenzial	18, 208

F

Forschungsbedarf	148
Forschungsfragen	5, 145
Forschungslücke	27
Funktionale Einheit	208
Funktionelle Einheit	33, 208

G

Gebäude	75, 210
Gebäudetechnik	75, 208
Gebäudetechnikmaterialien	68
Gewichtsangaben	
Heizungstechnik	134
Lüftungstechnik	137
Sanitärtechnik	131
Graue Energie	12, 208

H		Fördertechnik (Aufzug)	104
Hauptkomponenten		Feststellung	123
Heizungstechnik	132	Gebäude	111, 120
Lüftungstechnik	135	Gebäudeautomation	104
Sanitärtechnik	126	Gebäudetechnik	88, 109, 120
Heizwert	208	Gebäudetechnikanteile	106
Hybrid-Analyse	10	Gebäudetechnik Größenverhältnisse ..	90
I		Geschichte	8
Input/Output-Analyse	10	Grenzen	21
Instandhaltung	43, 208	Haushaltsstrom	113
K		Heizungserzeugerarten	98
Kernaussage Doktorarbeit	148	Heizungsrohrleitungen	95
KfW-Standard	64, 208	Heizungstechnik	95
Konsistenz	2	Holzrahmenbauweise	78
Korrelationskoeffizient	29, 208	HWF	79
Korrelationskoeffizient (nach Pearson) ..	29	Innenwand	84
Kumulierter Energieaufwand	12, 208	Lüftungstechnik	101, 115
Kumulierter Energieverbrauch	12, 208	Lebenszyklusphasen	100
Kumulierter nicht energ. Aufwand	13, 208	Leichtbauweise	76, 85, 120
L		Massivbauweise	76, 85, 120
LCA	3, 209	Monolithisch	78
Aktivtechnik	108, 115	Optimum	117
Anschlag	123	Programme / Software	24, 51
Anwendungsgebiete	10, 22	PUR	79
Außenwand gegen Außenluft ..	74, 78, 86	Rahmen	123
Baukonstruktion	85, 120	Rohrleitungen	94
Bauweise	86	Sanitärtechnik	92
Bauwerk	105, 111, 120	Schätzung	124, 209
Beheizungsart	115	Schwachstellen	20
Berechnung	30, 46	Schwachstromtechnik	90, 104
Berechnung detailliert	123	Türe	85
Berechnung vereinfacht	124, 209	Tragwerk	79, 80
Betrachtungszeitraum	32	Verbindungsmitel	82
Betrieb	111	WDVS	78
Dämmstoffe	79	LCA-Faktoren	
Decke	84, 86	Heizungstechnik	133, 205
Elektrotechnik	103	Lüftungstechnik	136, 205
EPS	79	Sanitärtechnik	130, 204
Ermittlung	123, 209	Lebenszyklus	209
		Lebenszyklus-Emissionsfaktor	31
		Lebenszyklus-Energie	35

Lebenszyklus-Energiefaktor	31	Heizungstechnik	60
Lebenszyklusanalyse	3, 209	Lüftungstechnik	62
Lebenszyklusbetrachtung	21, 209	Sanitärtechnik	60
LEGEP	51, 209	Stand der Forschung	24
Leichtbauweise	64, 75	Stand der Technik	23
Life cycle assessment	3, 209	Stand der Wissenschaft	25
Literatur (Grundlagen)	21	Suffizienz	2
M		Systemgrenze (räumlich, zeitlich)	40
Massivbauweise	64, 75	T	
Mehrfamilienhaus	57	Treibhauspotenzial	15, 210
Midpoint-Indikator	10, 209	Niedrigstenergiegebäude	37
Modernisierung	209	U	
N		Übergabe (Gebäudetechnik)	71
Niedrigstenergiegebäude	209	Umweltauswirkung / Umweltwirkung	210
Nutzereinfluss	116	Umweltproduktdeklaration (EPD)	23, 208
O		Untersuchungsrahmen	39, 40
Ökobilanz	3, 210	V	
Ökologie	210	Varianten	
Ökologischer Fußabdruck	1	Baukonstruktion	64
Ozonabbaupotenzial	16, 210	Gebäudetechnik	68
P		Vereinfachung Vorgehensweise	
Primärenergie	12, 210	Detailliert	126
Prozessbasierte Analyse	10, 39	Generell	124
S		Versauerungspotenzial	17, 210
Sachbilanz	10, 39, 179, 210	Verteilung (Gebäudetechnik)	70
Selbstkritische Bewertung	141	W	
Signifikanzwert	210	Wirkungsabschätzung	10, 40, 210
Sommersmogpotenzial	19, 210	Wirkungsindikator	210
Standardgebäude	62	Wirkungskategorien	11, 210
Baukonstruktion	59	Z	
Baustoff	59	Ziel	5, 39
Dämmmaterial	59	Zusammenfassung	143, 148
Elektrotechnik	62	Ergebnisse	120
Energetische Standards	64	Kurzzusammenfassung (Kapitel) ..	6, 28,
Gebäudetechnik	60	38, 71, 121, 137, 142	
Heizenergieübergabe	61	Rahmenbedingungen	54
Heizenergieart	60	Zuschlag (10%)	108
Heizenergieerzeugung	61		

In dieser Doktorarbeit werden ökologische Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden, besonders der Gebäudetechnik über den Lebenszyklus analysiert; hieraus wird ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der umweltbezogenen Auswirkungen der Gebäudetechnik entwickelt. Das life cycle assessment (LCA = Ökobilanz) verdeutlicht zum einen die Notwendigkeit, die ökologischen Aspekte von Wohngebäuden im Niedrigstenergiestandard zu berücksichtigen; zum anderen die Relevanz, die Gebäudetechnik hierbei zu beachten.

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Hochschule München am kooperativen Graduiertenkolleg „Gebäudetechnik und Energieeffizienz“, eine Kooperation der Hochschule München und der Technischen Universität München.

Dissertation online abrufbar über mediaTUM:

<http://dx.doi.org/10.14459/2016md1325463>



Technische
Universität
München

