
Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

**Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und
Lebenszykluskosten**

Endbericht

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bayerisches Landesamt für
Umwelt



**Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie
und Technologie**

Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie



Autor: Dipl. Ing. Architekt Holger König Datum 03.12.2017

Ascona GbR, Eschenriederstr. 65, D- 82194 Gröbenzell

Tel. 08142-6518696/ Fax 08142-6518697/mail@ascona-koenig.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsliste	1-11
Zusammenfassung	1-15
1 Veranlassung und Projektablauf	1-29
1.1 Formale Voraussetzungen	1-29
1.2 Wissenschaftlich technischer Stand	1-29
2 Aufgabenstellung	2-31
3 Ausgangslage	3-32
3.1 Pläne	3-32
3.2 Grundrissgestaltung	3-35
3.3 Bauweise	3-36
3.4 Energetisches Niveau	3-36
3.5 Heiztechnologie	3-37
4 Projekteingabe	4-38
4.1 Eingabestruktur	4-38
4.1.1 Systemgrenze für betrachtetes Produktsystem	4-38
4.1.2 Anzahl der erfassten Bauteile	4-39
4.2 Gebäudemodellierung	4-40
4.2.1 Baukörper	4-40
4.2.2 Energetisches Niveau und U-Werte	4-43
4.2.3 Modellierung der Bauteile	4-48
4.2.4 Komponenten der Energieversorgungsanlage	4-50
4.2.5 Randbedingungen der Energiebedarfsberechnung	4-51
4.2.6 Anzahl der Gebäudevarianten	4-52
4.2.7 Zusammenfassende Baubeschreibung	4-53
4.2.8 Schema Konstruktionsaufbauten	4-54
4.3 Energiebedarf nach EnEV	4-60
4.3.1 Darstellung Endenergiebedarf	4-63
4.3.2 Information zum Holzpelletkessel	4-68
4.3.3 Diskussion Energiebedarf	4-68

5	Thermisch-dynamische Simulationsrechnung	5-69
5.1	Vorgehensweise	5-69
5.2	Heizwärmebedarf	5-72
5.2.1	Gebäude gemäß EnEV	5-72
5.2.2	30 kWh-Gebäude	5-74
5.2.3	15 kWh-Gebäude	5-75
5.2.4	Bestandsgebäude	5-76
5.2.5	Sollwert Heizung 22 °C statt 20 °C	5-77
5.2.6	Klimadaten: Testreferenzjahr 4 (Potsdam)	5-79
5.2.7	Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen	5-79
5.2.8	Diskussion der Ergebnisse	5-80
5.3	Sommerlicher thermischer Komfort	5-81
5.3.1	Gebäude gemäß EnEV-2016	5-82
5.3.2	30 kWh-Gebäude	5-85
5.3.3	15 kWh-Gebäude	5-87
5.3.4	Bestandsgebäude	5-88
5.3.5	Klimadaten: Testreferenzjahr 4 (Potsdam) und sommerlicher Wärmeschutz	5-89
5.3.6	Diskussion der Ergebnisse	5-89
5.3.7	Empfehlungen für einen guten sommerlichen thermischen Komfort	5-90
5.4	Vergleich mit anderen Studien	5-90
5.4.1	Studie „Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel“	5-90
5.4.2	Studie „Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden“	5-91
5.5	Umrechnung des Heizwärmebedarfs der Gebäude-simulation in Endenergiebedarf	5-92
5.5.1	Ergebnis der Berechnung	5-92
5.5.2	Diskussion der Ergebnisse	5-95
6	Lebenszyklusanalyse	6-97
6.1	Integrale Arbeitsweise	6-97
6.2	Ökobilanz (LCA)	6-98
6.2.1	Funktionelles Äquivalent	6-98
6.2.2	Ökobilanzdatenbank	6-100
6.2.3	Systemgrenze	6-104
6.2.4	Ergebnis Ökobilanz: Gebäude (Herstellung, Instandhaltung/Ersatz, Entsorgung)	6-111
6.2.5	Ergebnis Ökobilanz: Betrieblicher Energieeinsatz	6-133
6.2.6	Ergebnis Ökobilanz: Gebäude und betrieblicher Energieeinsatz	6-142
6.2.7	Diskussion und Zusammenfassung der Ökobilanzierung	6-170
6.3	Sensitivitäten der Ökobilanz	6-174

6.3.1	Unterschiedliche Betrachtungszeiträume	6-174
6.3.2	Gebäude mit Kellergeschoss	6-185
6.3.3	Gedämmte Dachkonstruktion	6-189
6.3.4	Verschiedene Dämmstoffe	6-191
6.3.5	Das Modul „D“ – Gebäudebewertung außerhalb der Systemgrenzen	6-197
6.3.6	Diskussion der Ergebnisse - Sensitivitäten	6-202
6.4	Weiterführende Aspekte	6-204
6.5	Lebenszykluskosten (LCC)	6-206
6.5.1	Szenarien bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten	6-206
6.5.2	Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC)	6-212
7	Qualitative Aspekte	7-228
7.1	Bauphysikalische Aspekte	7-228
7.1.1	Thermischer Komfort	7-228
7.1.2	Sorptionsfähigkeit	7-229
7.1.3	Akustik	7-230
7.1.4	Brandverhalten	7-231
7.2	Aspekte des Bauprozesses und der Dauerhaftigkeit	7-231
7.2.1	Verarbeitung vor Ort und Qualitätssicherung	7-231
7.2.2	Langlebigkeit - Schadenspotenzial	7-234
7.3	Aspekte des gesundheitlichen Komforts	7-234
7.3.1	Bauprodukte und Inhaltsstoffe	7-234
7.3.2	Prüfung der Innenraumlufthygiene	7-237
8	ANHANG	8-238
9	Literaturverzeichnis	9-243

Abbildungsverzeichnis

Abb. 0-1 Heizwärmebedarf ENEC-30kWh-15 kWh-Gebäude, Soll 20 °C	1-16
Abb. 0-2 Sommerlicher thermischer Komfort, für unterschiedliche Energieniveaus EnEV 2016 -, 30 kWh - und 15 kWh - Gebäude	1-17
Abb. 0-3 PENR; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet	1-18
Abb. 0-4 PET; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet	1-19
Abb. 0-5 PENR; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten	1-20
Abb. 0-6 PET; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten	1-20
Abb. 0-7 PENR; 15 kWh Energieniveau, alle Bauweisen, 4 Betriebsvarianten	1-21
Abb. 0-8 Treibhausgaspotenzial; Kalksandsteinbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten .	1-22

Abb. 0-9 GWP, Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten	1-24
Abb. 0-10 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m ² BGF für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016	1-27
Abb. 0-11 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m ² BGF für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016	1-28
Abb. 3-1 Ansicht Ost	3-32
Abb. 3-2 Ansicht West	3-33
Abb. 3-3 Ansicht Süd	3-33
Abb. 3-4 Ansicht Nord	3-34
Abb. 3-5 Erdgeschoss	3-34
Abb. 3-6 Obergeschoss	3-35
Abb. 4-1 Bottom up – Arbeitsweise	4-38
Abb. 4-2 Bodenplatte auf Dämmung, Holzfußboden auf Lagerholz, Wärmedämmung	4-55
Abb. 4-3 Massive Bodenplatte auf Dämmung, Nassestrich, Fußbodenheizung	4-55
Abb. 4-4 Außenwand monolithisch Ziegel oder Porenbeton, verputzt	4-56
Abb. 4-5 Außenwand Kalksandstein, WDVS	4-56
Abb. 4-6 Außenwand Holzrahmenbau/Hybridkonstruktion, WDVS	4-57
Abb. 4-7 Außenwand Massivholz, WDVS	4-57
Abb. 4-8 Ziegeldecke gedämmt zu unbeheiztem Dachraum	4-58
Abb. 4-9 Betondecke gedämmt zu unbeheiztem Dachraum	4-58
Abb. 4-10 Holzbalkendecke gedämmt zu unbeheiztem Dachraum	4-59
Abb. 4-11 Massivholzdecke gedämmt zu unbeheiztem Dachraum	4-59
Abb. 4-12 Übersicht Energiebedarf Niveau EnEV 2016 in kWh/(m ² a)	4-63
Abb. 4-13 Übersicht Energiebedarf 30 kWh-Gebäude in kWh/(m ² a)	4-64
Abb. 4-14 Übersicht Energiebedarf 15 kWh-Gebäude in kWh/(m ² a)	4-65
Abb. 4-15 Übersicht Endenergiebedarf Niveau EnEV-2016 - in kWh/a	4-66
Abb. 4-16 Übersicht Endenergiebedarf Niveau 30 kWh - in kWh/a	4-67
Abb. 4-17 Übersicht Endenergiebedarf Niveau 15 kWh in kWh/a	4-68
Abb. 5-1 Der thermisch-dynamischen Simulationsrechnung zugrunde gelegte Zonierung (EG)	5-70
Abb. 5-2 Der thermisch-dynamischen Simulationsrechnung zugrunde gelegte Zonierung (OG)	5-71
Abb. 5-3 Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV, Heizung PE günstig (Holzpellet, WP)	5-73
Abb. 5-4 Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV, Heizung Gbw	5-74
Abb. 5-5 Heizwärmebedarf 30 kWh-Gebäude	5-75
Abb. 5-6 Heizwärmebedarf 15 kWh-Gebäude	5-76
Abb. 5-7 Heizwärmebedarf ENEV-30kWh-15 kWh-Gebäude, Soll 20 °C	5-80
Abb. 5-8 Sommerlicher thermischer Komfort Gebäude gemäß EnEV, zoniert, Heizung PE-günstig (Holzpellet, Wärmepumpe)	5-82

Abb. 5-9 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß EnEV, flächengewichtet gemittelt, Heizung PE-günstig (Holzpellet, Wärmepumpe).....	5-83
Abb. 5-10 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß EnEV, Heizung Gbw, zoniert.....	5-84
Abb. 5-11 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude EnEV, Heizung Gbw, flächengewichtet ...	5-85
Abb. 5-12 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß 30 kWh, zoniert.....	5-86
Abb. 5-13 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß 30 kWh, flächengewichtet gemittelt. 5-86	
Abb. 5-14 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß 15 kWh, zoniert.....	5-87
Abb. 5-15 Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude 15 kWh, flächengewichtet gemittelt	5-88
Abb. 5-16 Übersicht HW- und EE-Bedarf Energieniveau EnEV 2016-Gebäude in kWh/(m²a)	5-93
Abb. 5-17 Übersicht HW- und EE-Bedarf Energieniveau 30 kWh-Gebäude in kWh/(m²a)	5-94
Abb. 5-18 Übersicht HW- und EE-Bedarf Energieniveau 15 kWh-Gebäude in kWh/(m²a)	5-95
Abb. 6-1 Vergleich Datensatz Beton generic, Transportbeton/average ,Beton C20/25, PENR in MJ/kg	6-101
Abb. 6-2 Vergleich Datensatz Beton generisch, Transportbeton/average, Beton C20/25, GWP in kg CO ₂ Äquiv.	6-102
Abb. 6-3 Zeitreihe Datensatz „Strommix“ in der ÖKOBAUDAT	6-102
Abb. 6-4 Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen nach EN 15978.	6-105
Abb. 6-5 PE erneuerbar; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet	6-112
Abb. 6-6 PE nicht erneuerbar; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet.....	6-113
Abb. 6-7 PE gesamt; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet	6-113
Abb. 6-8 PE gesamt; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Wärmepumpe	6-114
Abb. 6-9 PE gesamt; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Gas-Brennwertkessel.....	6-115
Abb. 6-10 GWP; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpelletkessel	6-116
Abb. 6-11 AP; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpelletkessel.....	6-117
Abb. 6-12 EP; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpelletkessel.....	6-117
Abb. 6-13 PER, differenziert nach PERM und PERE; 4 Gebäude-EnEV-Niveau, gesamter Betrachtungszeitraum	6-125
Abb. 6-14 PENR, differenziert nach PENRM und PENRE; 4 Gebäude-EnEV-Niveau, gesamter Betrachtungszeitraum	6-125
Abb. 6-15 PET, differenziert nach PENRT und PERM und PERE; 4 Gebäude-EnEV-Niveau, gesamter Betrachtungszeitraum	6-126
Abb. 6-16 PER, 6 Bauweisen, 4 Heizungen, EnEV 2016 Niveau.....	6-131
Abb. 6-17 PENR, 6 Bauweisen, 4 Heizungen, EnEV 2016 Niveau	6-131
Abb. 6-18 PET, 6 Bauweisen, 4 Heizungen, EnEV 2016 Niveau	6-132
Abb. 6-19 PET, 6 Bauweisen, 4 Heizungen, 30 kWh.....	6-132
Abb. 6-20 PET, 6 Bauweisen, 4 Heizungen, 15 kWh.....	6-133
Abb. 6-21 PER, Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten	6-135

Abb. 6-22 PENR; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten.....	6-136
Abb. 6-23 PET; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten.....	6-138
Abb. 6-24 PER, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen.....	6-147
Abb. 6-25 PER, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual.....	6-148
Abb. 6-26 PENR, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-149
Abb. 6-27 PENR, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-150
Abb. 6-28 PET, EnEV 2016 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-150
Abb. 6-29 PET, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-151
Abb. 6-30 GWP, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen.....	6-152
Abb. 6-31 AP, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-152
Abb. 6-32 EP, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-153
Abb. 6-33 POCP, EnEV 2016, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-154
Abb. 6-34 PER, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-155
Abb. 6-35 PER, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual.....	6-155
Abb. 6-36 PENR, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-156
Abb. 6-37 PENR, 30 kWh sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-157
Abb. 6-38 PET, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-157
Abb. 6-39 PET, 30 kWh sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-158
Abb. 6-40 GWP, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen.....	6-159
Abb. 6-41 AP, 30 kWh , sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-159
Abb. 6-42 EP, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-160
Abb. 6-43 POCP, 30 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-161
Abb. 6-44 PER, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen.....	6-162
Abb. 6-45 PER, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual.....	6-162
Abb. 6-46 PENR, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-163
Abb. 6-47 PENR, 15 kWh sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-164
Abb. 6-48 PET, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-164
Abb. 6-49 PET, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen, prozentual	6-165
Abb. 6-50 GWP, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen.....	6-166
Abb. 6-51 AP, 15 kWh , sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-166
Abb. 6-52 EP, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-167
Abb. 6-53 POCP, 15 kWh, sechs Bauweisen, vier Heizungen	6-168
Abb. 6-54 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, absolut	6-175
Abb. 6-55 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, prozentual	6-176
Abb. 6-56 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, absolut	6-176
Abb. 6-57 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, prozentual	6-177
Abb. 6-58 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, absolut	6-177
Abb. 6-59 PER, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, prozentual	6-178

Abb. 6-60 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, absolut.....	6-179
Abb. 6-61 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, prozentual.....	6-179
Abb. 6-62 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, absolut.....	6-180
Abb. 6-63 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, prozentual.....	6-180
Abb. 6-64 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, absolut.....	6-181
Abb. 6-65 PENR, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, prozentual.....	6-181
Abb. 6-66 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, absolut.....	6-182
Abb. 6-67 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre, prozentual.....	6-182
Abb. 6-68 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, absolut.....	6-183
Abb. 6-69 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 30 Jahre, prozentual.....	6-183
Abb. 6-70 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, absolut.....	6-184
Abb. 6-71 PET, EnEV 2016, 3 Bauweisen, Betrachtungszeitraum 80 Jahre, prozentual.....	6-184
Abb. 6-72 PET; 3 Gebäude, 30 kWh, 4 Heizungen, ohne und mit Keller	6-186
Abb. 6-73 PET; 3 Gebäude, 30 kWh, 4 Heizungen, ohne und mit Keller, prozentual	6-187
Abb. 6-74 GWP; 3 Gebäude, 30 kWh, 4 Heizungen, ohne und mit Keller	6-188
Abb. 6-75 PET; 3 Gebäude, 30 kWh, 4 Heizungen, ohne und mit gedämmtem Schrägdach	6-190
Abb. 6-76 GWP; 3 Gebäude, 30 kWh, 4 Heizungen, ohne und mit gedämmtem Schrägdach	6-191
Abb. 6-77 PER; Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten	6-193
Abb. 6-78 PENR; Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten	6-194
Abb. 6-79 PET; Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten	6-194
Abb. 6-80 GWP, Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten.....	6-195
Abb. 6-81 POCP, Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten	6-196
Abb. 6-82 PER; LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 3 Energieniveaus.....	6-198
Abb. 6-83 PENR; LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 3 Energieniveaus	6-199
Abb. 6-84 PET; LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 3 Energieniveaus	6-199
Abb. 6-85 GWP, LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 4 Heizungsvarianten, EnEV 2016	6-200
Abb. 6-86 AP, LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 4 Heizungsvarianten, EnEV 2016	6-201
Abb. 6-87 EP, LCA mit Modul D, sechs-Bauweisen, 4 Heizungsvarianten, EnEV 2016	6-201
Abb. 6-88 Flächenauswertung, 4 Beheizungsvarianten, in Ziegelbauweise, BGF, NRF, NF	6-213
Abb. 6-89 Herstellungskosten absolut für vier Beheizungsvarianten, in Ziegelbauweise, EnEV 2016, KG 300/KG 400	6-214
Abb. 6-90 Herstellungskosten €/m²BGF, vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016	6-214
Abb. 6-91 Endenergiebedarf in kWh/(m² beh. NRF*a) für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016	6-215
Abb. 6-92 Energiekosten brutto in €/a für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016	6-216
Abb. 6-93 Folgekosten brutto absolut in € über 50 a für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016, aufgeschlüsselt	6-217

Abb. 6-94 Folgekosten brutto in €/m ² BGF a) für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016, gesamt.....	6-218
Abb. 6-95 Barwert €/m ² für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016.....	6-219
Abb. 6-96 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m ² BGF für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016	6-220
Abb. 6-97 Herstellungskosten brutto für vier Bauweisen mit Holzpellettheizung, KG 300/KG 400, EnEV 2016.....	6-221
Abb. 6-98 Herstellungskosten brutto €/m ² BGF für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016	6-222
Abb. 6-99 Endenergiebedarf in kWh/(m ² NRF a) für vier Bauweisen mit Holzpellettheizung, EnEV 2016	6-223
Abb. 6-100 Energiekosten brutto in €/a für vier Bauweisen mit Holzpellettheizung, EnEV 2016	6-224
Abb. 6-101 Folgekosten brutto in € über 50 a für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016, aufgeschlüsselt.....	6-224
Abb. 6-102 Folgekosten brutto in €/m ² BGF a) für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016, Übersicht	6-225
Abb. 6-103 Barwert in €/m ² BGF für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016	6-226
Abb. 6-104 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m ² BGF für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016.....	6-227
Abb. 7-2 Ventilatoren für den Luftdichtheitstest [FOS11].....	7-233

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Kostengruppen innerhalb der Systemgrenze.....	4-39
Tabelle 4-2: Elemente zur Gebäudebeschreibung.....	4-40
Tabelle 4-3: Flächen- und Kubaturwerte der Gebäude Gruppe A	4-41
Tabelle 4-4: Flächen- und Kubaturwerte der Gebäude Gruppe B	4-42
Tabelle 4-5: A/V-Verhältnis und Fensterflächenanteile.....	4-43
Tabelle 4-6: Gewählte U-Werte der Varianten EnEV-Niveau	4-46
Tabelle 4-7: Gewählte U-Werte der Varianten 30 kWh Niveau	4-47
Tabelle 4-8: Gewählte U-Werte der Varianten 15 kWh Niveau	4-47
Tabelle 4-9: Gewählte U-Werte des Bestandsgebäudes.....	4-47
Tabelle 4-10: Auflistung Materialwahl Bauteile der Primärkonstruktion.....	4-48
Tabelle 4-11: Auflistung Materialwahl Bauteile des Ausbaus	4-49
Tabelle 4-12: Komponenten der Energieversorgungsanlage	4-51
Tabelle 4-13: Zusätzliche Randbedingungen der Berechnung des Energiebedarfs	4-52
Tabelle 4-14: Materialkonzepte und energetische Niveaus	4-53
Tabelle 4-15: Ergebnisse der Varianten EnEV-Niveau	4-61
Tabelle 4-16: Ergebnisse der Varianten 30 kWh Niveau	4-62

Tabelle 4-17: Ergebnisse der Varianten 15 kWh Niveau	4-62
Tabelle 4-18: Ergebnisse des Bestandsgebäudes.....	4-63
Tabelle 5-1: Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV, Heizung PE günstig (Holzpellet, Wärmepumpe)	5-73
Tabelle 5-2: Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV, Heizung Gbw	5-74
Tabelle 5-3: Heizwärmebedarf 30 kWh-Gebäude.....	5-75
Tabelle 5-4: Heizwärmebedarf 15 kWh-Gebäude.....	5-76
Tabelle 5-5: Heizwärmebedarf Bestandsgebäude in Ziegelbauweise	5-77
Tabelle 5-6: Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV, Heizung PE günstig (Holzpellet, Wärmepumpe), Soll 22 °C.....	5-77
Tabelle 5-7: Heizwärmebedarf 30 kWh-Gebäude, Soll 22 °C.....	5-78
Tabelle 5-8: Heizwärmebedarf 15 kWh-Gebäude, Soll 22 °C.....	5-78
Tabelle 5-9: Heizwärmebedarf Bestandsgebäude, Soll 22 °C.....	5-78
Tabelle 5-10: Heizwärmebedarf Gebäude EnEV / 30 kWh, Soll 20 °C, Referenzklima Potsdam	5-79
Tabelle 5-11: Sommerlicher thermischer Komfort Gebäude gemäß EnEV, Heizung PE günstig (Holzpellet, Wärmepumpe).....	5-82
Tabelle 5-12: Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß EnEV, Heizung Gbw	5-83
Tabelle 5-13: Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß 30 kWh	5-85
Tabelle 5-14: Sommerlicher thermischer Komfort, Gebäude gemäß 15 kWh	5-87
Tabelle 5-15: Sommerlicher thermischer Komfort, Bestandsgebäude	5-88
Tabelle 5-16: Heizwärmebedarf Gebäude gemäß EnEV und 30 kWh, Soll 20 °C	5-89
Tabelle 5-17: Umrechnung HWB-Simulation in Endenergie-EnEV 2016	5-92
Tabelle 5-18: Umrechnung HWB-Simulation in Endenergie-30 kWh-Gebäude	5-93
Tabelle 5-19: Umrechnung HWB-Simulation in Endenergie-15 kWh-Gebäude	5-94
Tabelle 6-1: Primärenergie für die Gebäude EnEV 2016, Heizung PE günstig, Holzpellet.....	6-119
Tabelle 6-2: Primärenergie für die Gebäude EnEV 2016, Heizung PE günstig, Wärmepumpe.....	6-120
Tabelle 6-3: Primärenergie für die Gebäude EnEV 2016, Heizung PE ungünstig, Gas- Brennwertheizung.....	6-120
Tabelle 6-4: Primärenergie für die Gebäude 30 kWh, Heizung Holzpellet	6-121
Tabelle 6-5: Primärenergie für die Gebäude 30 kWh, Heizung Wärmepumpe	6-122
Tabelle 6-6: Primärenergie für die Gebäude 30 kWh, Heizung Gas-Brennwert.....	6-123
Tabelle 6-7: Primärenergie für die Gebäude 15 kWh, Heizung Holzpellet	6-123
Tabelle 6-8: Vier Wirkungsindikatoren für die Gebäude EnEV 2016, Heizung Holzpellet.....	6-127
Tabelle 6-9: Vier Wirkungsindikatoren für die Gebäude 30 kWh, Heizung Holzpellet.....	6-127
Tabelle 6-10: Vier Wirkungsindikatoren für die Gebäude 15 kWh, Heizung Holzpellet.....	6-128
Tabelle 6-11: PER 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise.....	6-135
Tabelle 6-12: PENR 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-137
Tabelle 6-13: PET 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-138

Tabelle 6-14: GWP 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-139
Tabelle 6-15: AP 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-140
Tabelle 6-16: EP 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-140
Tabelle 6-17: POCP 4 Heizungen, 3 Energieniveaus, Porenbetonbauweise	6-141
Tabelle 6-18: PENR für Hybridbauweise, 4 Heizungen, 3 Energieniveaus	6-144
Tabelle 6-19: PET für Hybridbauweise, 4 Heizungen, 3 Energieniveaus	6-145
Tabelle 6-20: GWP für Hybridbauweise, 4 Heizungen, 3 Energieniveaus.....	6-146
Tabelle 6-21: Übersicht für Tabellen als PDF im Anhang	6-170
Tabelle 6-22: Energiebedarf für ausgebautes Dach, 3 Bauweisen, EnEV 2016	6-189
Tabelle 6-23: Verschiedene Dämmstoffausführungen.....	6-192
Tabelle 6-24: Rahmenbedingung der Lebenszykluskostenrechnung für DGNB, NaWoh, eigene Studie	6-212
Tabelle 7-1: Risikopotenziale bei Bauprodukten.....	7-236

Abkürzungsliste

Abkürzung	Langtext
15 kWh	15 kWh Heizwärmebedarf
20 grd	20 Grad Celsius Innenraumtemperatur
22 grd	22 Grad Celsius Innenraumtemperatur
30 kWh	30 kWh Heizwärmebedarf
a	Jahr
A	Außenwandfläche
Abb.	Abbildung
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
A _N	Beheizte Fläche nach EnEV
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
AW	Außenwand
Best	Bestandsgebäude
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGF	Bruttogrundfläche
BIRN	Bauinstitut Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit
BKN	Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BRI	Bruttorauminhalt
c	Spezifische Wärmekapazität
CE	Communauté Européenne
CEN	Centre Européenne pour la Normalisation
C ₂ H ₄	Chemische Bezeichnung für Ethen
CML	Centrum voor Milieukunde
CO ₂	Chemische Bezeichnung für Kohlendioxid
d	Tag
DA	Dach
DE	Decke
DepV	Deponieverordnung
DG	Dachgeschoss

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

DGNB	Deutsche Gesellschaft Nachhaltiges Bauen
Diff.	Differenz
DIN	Deutsches Institut für Normung
EE	Endenergie
EEWärmeG	Erneuerbare Energien-Wärmegegesetz
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
EnEV	Energieeinsparverordnung
EoL	Produktlebensende (engl. End of Life) (Modul C nach DIN EN 15978:2012)
EP	Überdüngungspotenzial (engl. Eutrophication Potential)
EPD	Umweltproduktdeklaration (engl. Environmental Product Declaration)
EPS	Expandierter Polystyrol-Hartschaum
Erh.	Erhöht
E+S	Energie und Stofffluss
Fbh	Fußbodenheizung
Fc	Sonnenverminderungsfaktor
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Gbw	Gas-Brennwertkessel
GK	Gipskarton
GR	Gründung
gÜ	gewichtete Überschreitungshäufigkeit
GWP	Treibhausgaspotenzial (engl. Global Warming Potential)
H	Holzpelletheizung
HF	Holzfaserplatten
Hr	Holzrahmenbaugebäude
H _T	Spezifischer Transmissionswärmeverlust
HWB	Heizwärmebedarf
Hy	Hybridgebäude
H ₂ O	Chemische Bezeichnung für Wasser
ISO	International Standard Organisation
IW	Innenwand
K	Kelvin
KGF	Konstruktionsgrundfläche
KG	Kostengruppe
Kh	Kelvinstunden

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

KRW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
Ks	Kalksandsteingebäude
kWh	Kilowattstunde
LCA	Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Costs)
LCI	Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory Analysis)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment)
LEGEp	Programm zur Lebenszyklusgebäudeplanung
LV	Leistungsverzeichnis
Mh	Massivholzgebäude
MJ	Megajoule
MW	Mineralwolle
MWSt	Mehrwertsteuer
N	Norden, nordorientierte Zone
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
NaWoh	Nachhaltiger Wohnungsbau, Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau
NW	Nordwestorientierte Zone
NP	Nutrification Potenzial (Überdüngungspotenzial)
NRF	Nettoraumfläche
O	Osten
Ö	Konstanttemperaturkessel Öl
ODP	Ozonabbaupotenzial (engl. Ozone Depletion Potential)
OG	Obergeschoss
Pb	Porenbetongebäude
PE	Primärenergie
PET	Gesamtprimärenergie
PER	Primärenergie erneuerbar
PERM	Primärenergie erneuerbar zur stofflichen Nutzung
PERE	Primärenergie erneuerbar als Energieträger
PERT	Gesamtprimärenergie erneuerbar
PENR	Primärenergie nicht erneuerbar
PENRM	Primärenergie nicht erneuerbar - zur stofflichen Nutzung
PENRE	Primärenergie nicht erneuerbar - als Energieträger
PENRT	Gesamtprimärenergie nicht erneuerbar

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

PO ₄	Chemische Bezeichnung für Phosphat ³⁻
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (Ozonbildungspotenzial)
PS	Polystyrol
Q _P	Primärenergiegrenzwert
SALB	Sortieranlagen für Baumischabfälle
S	Süden, südorientierte Zone
SO	Südostorientierte Zone
SW	Südwestorientierte Zone
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
SO ₂	Chemische Bezeichnung für Schwefeldioxid
StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
T	Nachhallzeit (s)
TH	Treppenhaus
THG	Treibhausgasemissionen
TRY	Testreferenzjahr (engl. Test reference year)
TVOC	Summe aller VOCs (flüchtige organische Verbindungen)
UBA	Umweltbundesamt
UV	Ultraviolettstrahlung
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient (W/(m ² K))
V	Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	flüchtige organische Verbindungen (engl. Volatile Organic Compounds)
vs.	versus
W	Westen
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WF	Wohnfläche
Wh	Wattstunden
WP	Wärmepumpe
WP LW	Wärmepumpe Luft-Wasser
WRG	Wärmerückgewinnung
WP WW	Wärmepumpe Wasser-Wasser
WW	Warmwasser
XPS	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum
Z	Ziegelgebäude

Das Glossar befindet sich im Anhang 1.

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Ökobilanz wurde ein zweigeschossiges Einfamilienhaus ohne Keller, mit einer Bruttogrundfläche von 185 bis 200 m², 150 m² Nettoraumfläche und ca. 135 m² Wohnfläche, in sechs unterschiedlichen Bauweisen, drei verschiedenen energetischen Niveaus und vier verschiedenen Heiztechniken modelliert und berechnet. Daraus ergaben sich 72 Varianten des Einfamilienhauses.

Modellierung

Für die sechs Bauweisen wurden marktübliche Bauprodukte für die Primärkonstruktion ausgewählt:

- Ziegelkonstruktionen in monolithischer Ausführung ohne und mit Dämmstofffüllung (Z)
- Kalksandsteinkonstruktion mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (Ks)
- Porenbetonkonstruktion in monolithischer und mehrschichtiger Ausführung (P)
- Hybridkonstruktion mit schwerer Bauweise im Gebäudekern und leichten Hüllflächen (Hy)
- Massivholzsysteem mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (Mh)
- Holzständerbauweise mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (Hr).

Das Gebäude wurde für die Erfüllung drei verschiedener energetischer Niveaus modelliert:

- Energieeinspar-Verordnung (EnEV) 2014 (Niveau ab 1.1.2016)
- 30 kWh-Haus
- 15 kWh-Haus (Passivhausniveau)

und wird mit folgenden Heizungsvarianten betrieben:

- Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie für Warmwasser (Gbw)
- Holzpelletkessel (H)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW)
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe (WW).

Arbeitsansatz

Thermisch-dynamische Simulationsrechnung

Die Berechnung nach EnEV erlaubt keine differenzierte Auswertung des Einflusses unterschiedlicher Bauweisen auf den Gebäudeenergiebedarf. Bei der Speicherfähigkeit des Gebäudes wird in der EnEV nur zwischen einer „schweren“ und einer „leichten“ Bauweise unterschieden. Daher wurde zur Untersuchung des Heizwärmebedarfs ein Acht-Zonen-Simulationsmodell für die Simulationssoftware TRNSYS17 erstellt. Untersucht wird der Einfluss auf Heizwärmebedarf und sommerlichen thermischen Komfort (Überwärmungsgradstunden in Kh/a) des Gebäudes in Abhängigkeit der Bauweise (Speichereffekte), dem Dämmstandard und der Heizsysteme.

Ökobilanz

Die Ökobilanz wurde nach den Regeln der DIN EN 15804 und DIN EN 15978 unter Berücksichtigung folgender Lebenszyklusphasen:

- Herstellung (A1-A3)
- Instandhaltung, Ersatz (B2,B4)
- End of Life (EoL) (C3-C4)
- Energiebedarf (B6)

durchgeführt. Der Betrachtungszeitraum betrug 50 Jahre.

Die 72 Gebäudemodelle wurden in der Software LEGEP berechnet und im Sinne der oben zitierten Fragestellungen umfangreich ausgewertet. Dazu wurden folgende Kernindikatoren in die Analyse der Berechnungsergebnisse eingezogen:

für die Inputseite

- Primärenergie erneuerbar PER in MJ (unterteilt in PERM und PERE)
- Primärenergie nicht erneuerbar PENR in MJ
- Gesamtprimärenergie PET in MJ (unterteilt in PERT und PENRT),

für die Outputseite:

- Treibhausgaspotenzial (GWP)
- Versauerungspotenzial (AP)
- Überdüngungspotenzial (EP)
- Sommersmogpotenzial (POCP).

Ergebnisse

Heizwärmebedarf und thermischer Komfort

Heizwärmebedarf

Es zeigt sich, dass Bauweisen mit geringerer wirksamer thermischer Masse zu leicht höheren Heizwärmebedarfen führen als thermisch massive Bauweisen. Die Spreizung beträgt je nach energetischem Standard zwischen 3,6 % und 6,3 %. Je besser der gewählte energetische Standard ausfällt, desto höher liegt jeweils der prozentuale Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem Heizwärmebedarf.

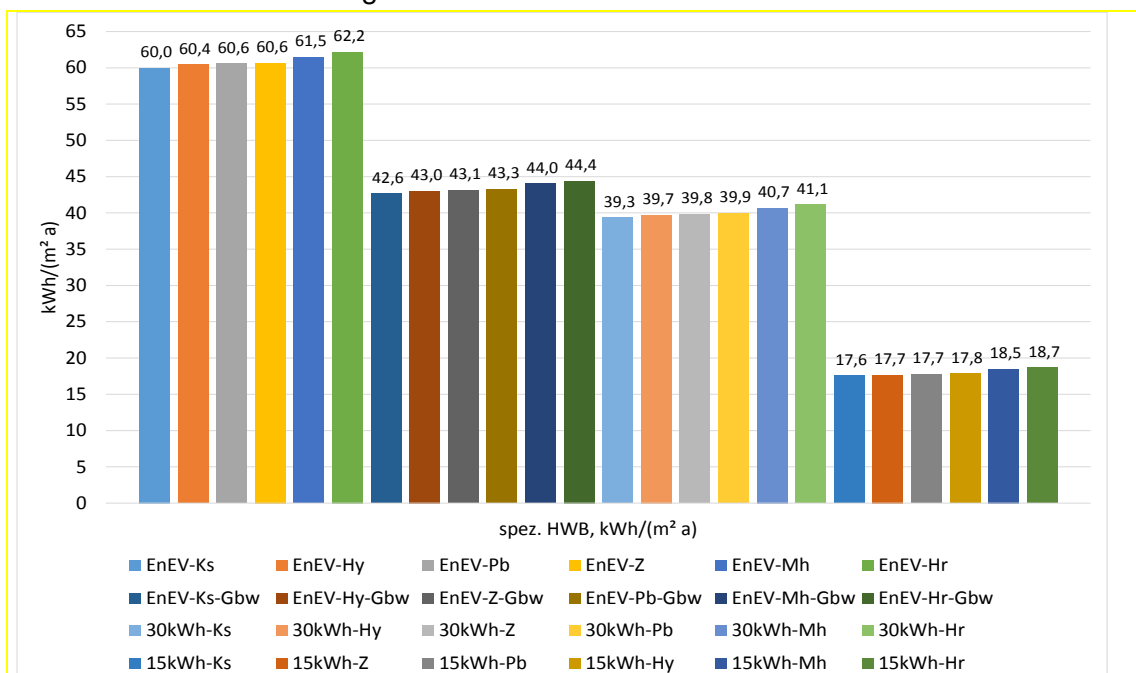


Abb. 0-1 Heizwärmebedarf ENEC-30kWh-15 kWh-Gebäude, Soll 20 °C

Die linke Gebäudegruppe entspricht dem Energieniveau EnEV-2016, nach rechts folgt die Gruppe EnEV-2016 mit Gas-Brennwertkessel, anschließend die Gebäudegruppe mit Energieniveau 30 kWh und rechts die Gebäudegruppe mit Energieniveau 15 kWh.

Thermischer Komfort

Der sich einstellende sommerliche thermische Komfort fällt bei Gebäuden mit höherer wirksamer thermischer Masse günstiger aus als bei thermisch leichter Bauweise. Somit ergeben sich durch eine höhere wirksame thermische Masse Vorteile beim Heizwärmebedarf und beim sommerlichen thermischen Komfort.

Darüber hinaus hat der Dämmstandard einen deutlichen Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz. Dieser reduziert die Überwärmungsstunden beim Wechsel von EnEV-Niveau zum 30 kWh-Niveau oder niedriger. Ein erhöhter Energiestandard wirkt sich also im Sommer wie im Winter positiv aus.

Die folgende Abbildung zeigt für sieben flächengewichtete Raumzonen zusammengefasst das Gesamtergebnis für drei Energieniveaus. Beim Energieniveau EnEV 2016 erreichen die Gebäude in schwerer Bauweise den 1200 Kh/a Grenzwert, die Massivholz und Holzrahmenbauweise überschreiten den Grenzwert. Beim 30 kWh und 15 kWh Niveau unterschreiten alle Gebäude den Grenzwert deutlich. Zu erkennen ist auch hier der positive Effekt massiver Gebäude auf den thermischen Komfort. Die Überwärmungsstunden sind bei den schweren Bauweisen 4-mal kleiner als bei leichten Bauweisen.

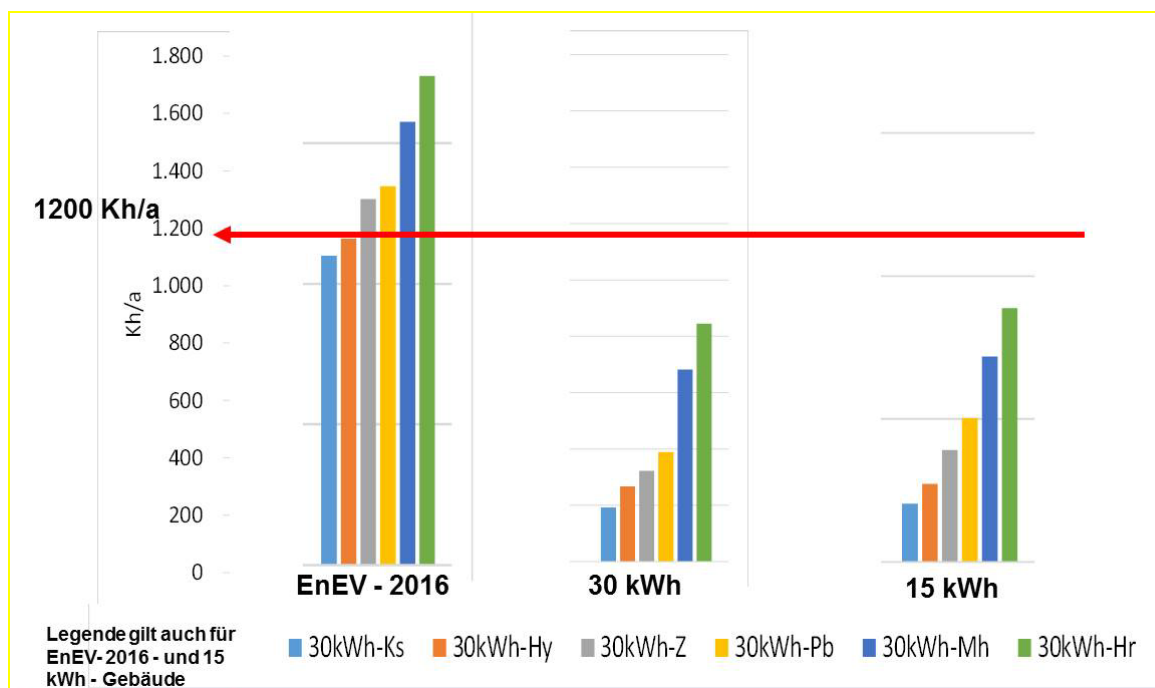


Abb. 0-2 Sommerlicher thermischer Komfort, für unterschiedliche Energieniveaus EnEV 2016 -, 30 kWh - und 15 kWh - Gebäude

Ökobilanz

Die Auswertung der Ökobilanz erfolgte in drei Stufen:

- Gebäude mit den Phasen Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung
- Betrieb des Gebäudes mit Heizung, Warmwasser und Hilfsaggregaten

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

- Gebäude und Betrieb zusammengefasst.

Gebäude

Der bauliche Aufwand, um einen geringeren Energiebedarf eines Gebäudes zu erreichen zeigt sich in der Ökobilanz für jede Bauweise durch die Zunahme des Primärenergieaufwands. Der Aufwand für die Verbesserung vom EnEV 2016 Niveau zum 30 kWh Niveau lag bei der Primärenergie nicht erneuerbar und Primärenergie gesamt bei maximal 15%. Der Aufwand für die Verbesserung vom 30 kWh Niveau zum 15 kWh Niveau lag bei der Primärenergie nicht erneuerbar unter 10 %.

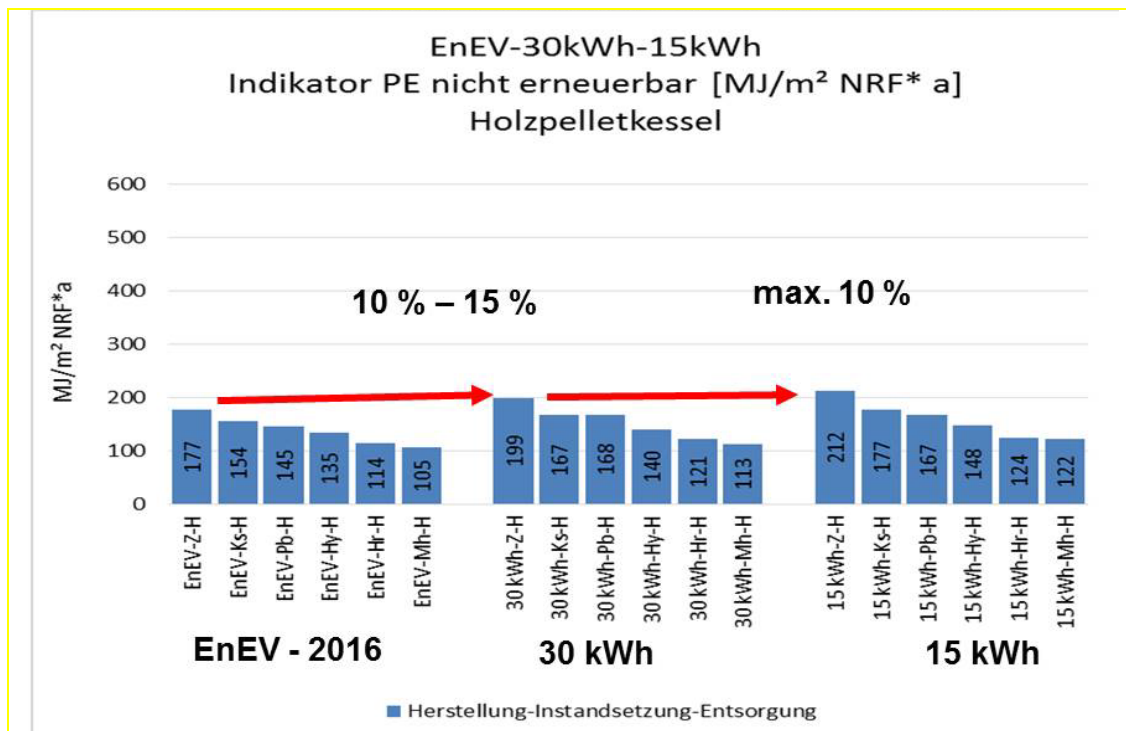


Abb. 0-3 PENR; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet

Für den Indikator Primärenergie gesamt (PET) lag der Mehraufwand vom EnEV 2016 Niveau zur 30 kWh Bauweise zwischen 4,7 % – 14,8 %. Vom 30 kWh Niveau zum 15 kWh Energieniveau beträgt der notwendige Aufwand eine Zunahme von -1 % – 7,8 %.

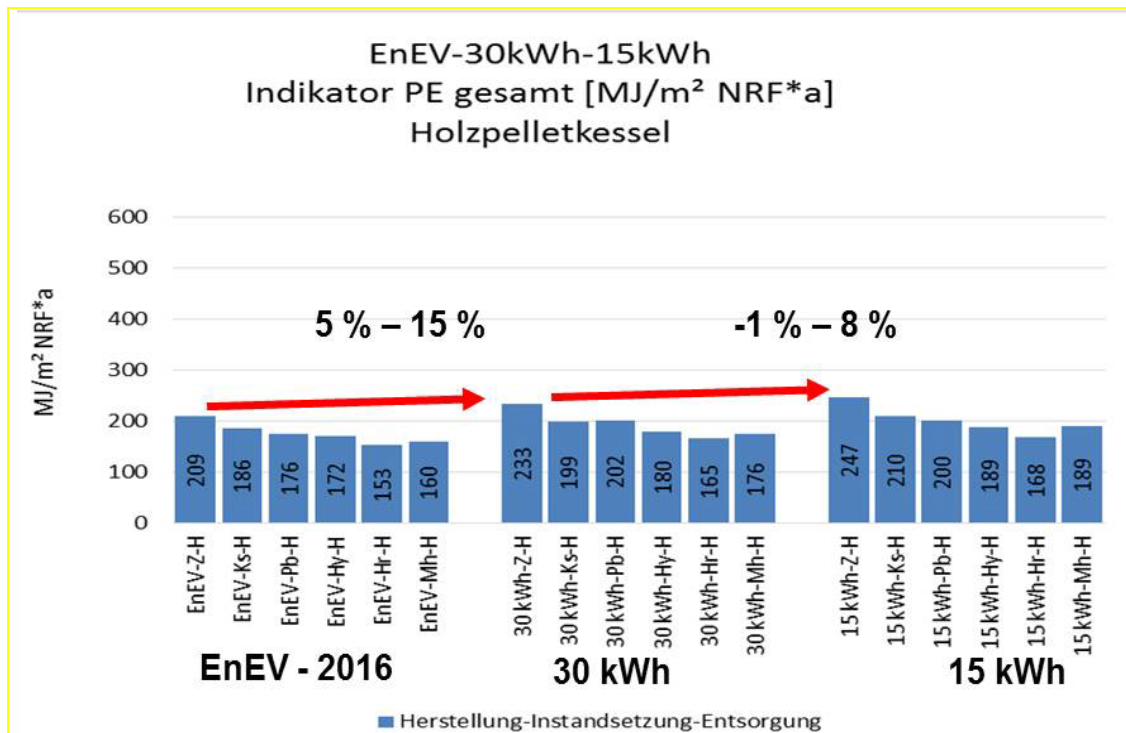


Abb. 0-4 PET; 6 Gebäude, 3 Energieniveaus, Beheizung Holzpellet

Bei den Wirkungsindikatoren differenziert sich die Rangfolge bei den einzelnen Bauweisen je nach Indikator. Die Indikatoren Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial und Überdüngungspotenzial zeigen eine Rangfolge, die bereits beim Indikator Primärenergie nicht erneuerbar und Primärenergie gesamt dokumentiert wurde. Die Gruppe der mineralischen Bauweise weist die höheren Werte auf, Hybrid-, Holzrahmen- und Massivholzbauweise die niedrigeren Werte. Beim Sommersmogpotenzial weist die Kalksandsteinbauweise die höchsten Werte auf, wobei als Verursacher das WDVS identifiziert werden kann.

Insgesamt zeigen sich damit eindeutige Unterschiede der verschiedenen Bauweisen bei allen drei Energieniveaus. Die Gebäude in Ziegel-, Kalksandstein- und Porenbetonbauweise weisen sowohl beim nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand (PENR) und dem gesamten Primärenergieaufwand (PET), als auch bei den meisten Wirkungsindikatoren höhere Werte auf als die Gebäude in Hybrid-, Massivholz – und Holzrahmenbauweise. Die Hybridbauweise zeigt kleinere Potenziale zur Umweltentlastung gegenüber den genannten Bauweisen auf. Diese Potenziale vergrößern sich, je mehr nachwachsende Rohstoffe im Gebäude zum Einsatz kommen.

Betrieb

Beim Indikator „Primärenergie nicht erneuerbar“ reduzieren sich die Werte für alle Varianten durch Reduktion des Energiebedarfs. Die stärkste Reduktion zeigt sich bei der fossilen Gas-Brennwertheizung. Beim 15 kWh Energieniveau liegt der höchste Wert bei der Wärmepumpe Wasser/Wasser (W/W), der niedrigste Wert bei der Holzpellettheizung (H). Die Reduktion liegt zwischen 30,9 % und 63,8 %. Die wesentliche Reduktion erfolgt vom 30 kWh Niveau zum 15 kWh Niveau.

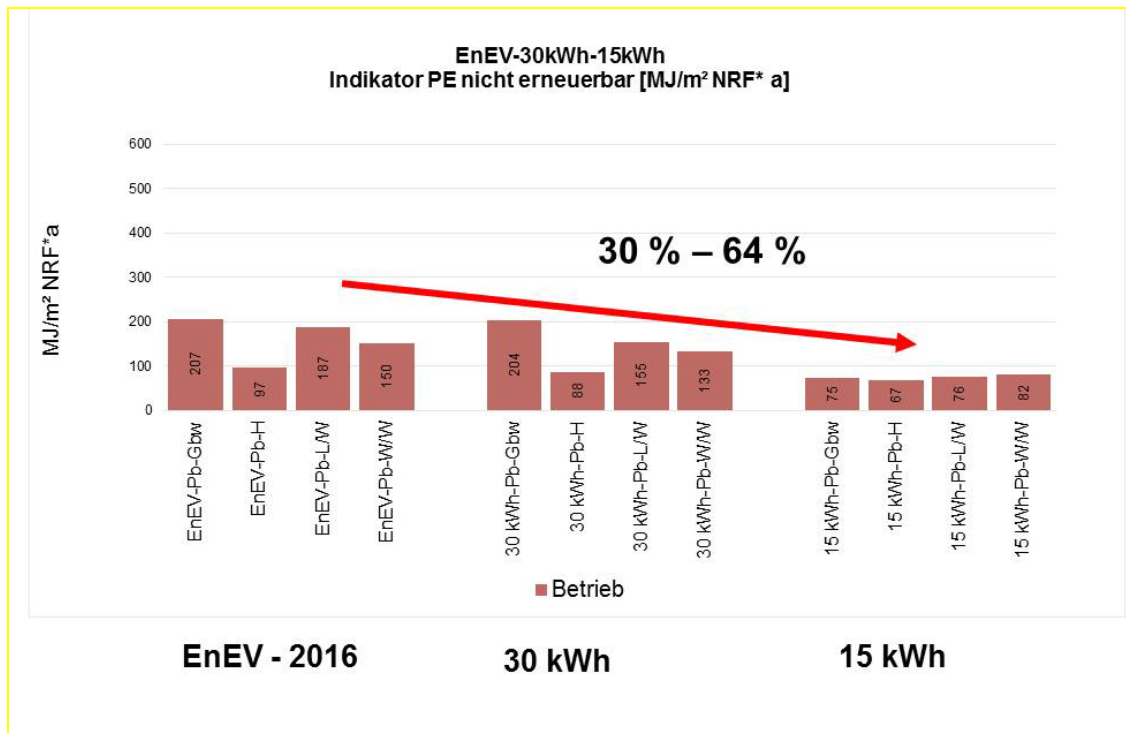


Abb. 0-5 PENR; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten

Beim Indikator „Primärenergie gesamt“ liegt der höchste Wert bei der Wärmepumpe Luft/Wasser (L/W), der niedrigste Wert bei der Gasbrennwertheizung (Gbw). Die Reduktion liegt zwischen 41,3 % und 57,7 %. Die wesentliche Reduktion erfolgt vom 30 kWh Niveau zum 15 kWh Niveau.

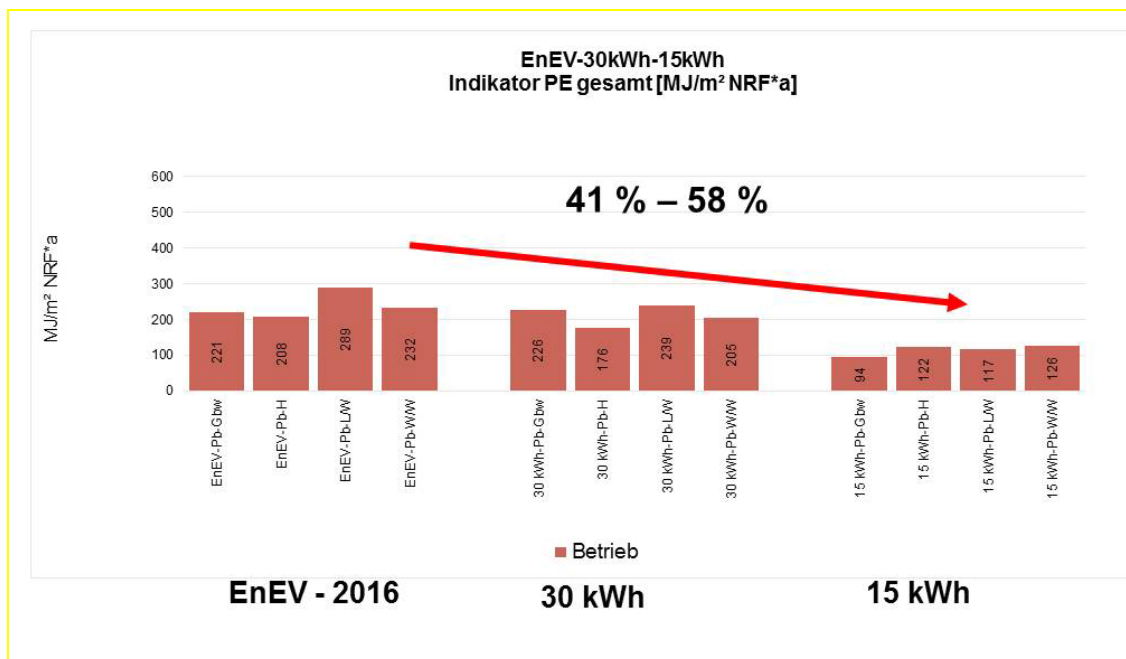


Abb. 0-6 PET; Porenbetonbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten

Bei sehr energieeffizienten Gebäuden wie dem 15 kWh Energieniveau hat die Wahl des Heizsystems und des Energieträgers kaum mehr Auswirkung auf die Primärenergiebilanz.

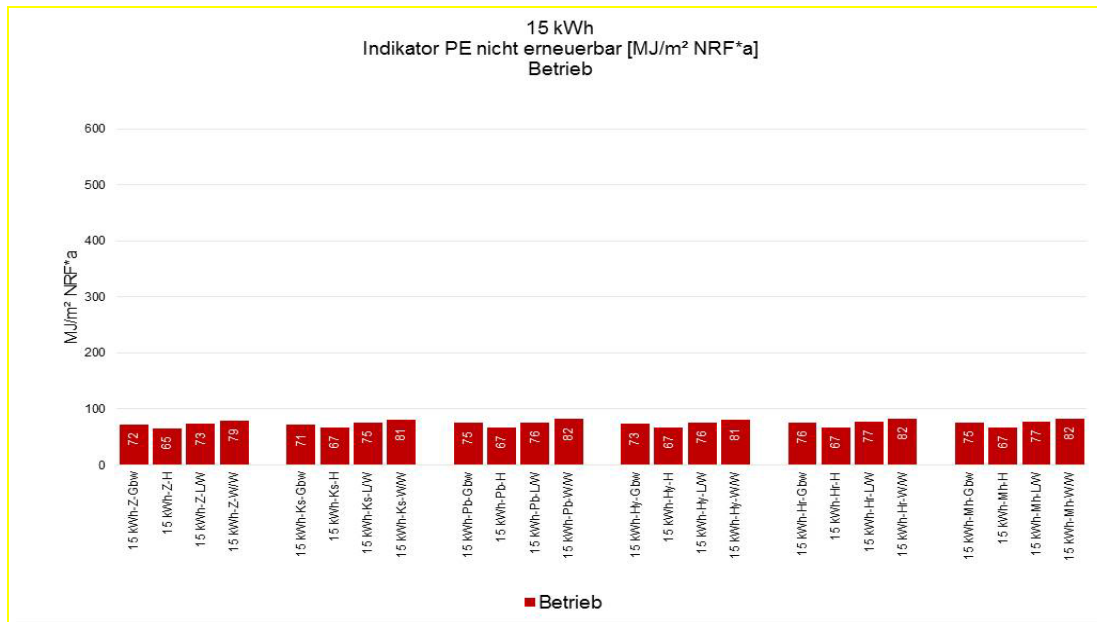


Abb. 0-7 PENR; 15 kWh Energieniveau, alle Bauweisen, 4 Betriebsvarianten

Bei der Ökobilanz für die Wärmepumpenheizungen ist zu bedenken, dass die Umweltbelastung aus dem Strommix im Jahresdurchschnitt abgeleitet wird und noch keine Aussage zum Anteil erneuerbarer Energien zum Zeitpunkt des Strombezugs (Winter) zulässt.

Feinstaub und CO-Emissionen wurden im Projekt nicht berücksichtigt. Es ist allerdings bekannt, dass Holzheizungen bei diesen Indikatoren meist schlechter als andere Heizungstypen abschneiden (siehe Studie „Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte“).

Gebäude und Betrieb

Es wird sowohl für den primärenergetischen Aufwand, als auch für das Treibhausgaspotenzial nachgewiesen, dass die Umweltbelastungen der baulichen Maßnahmen durch die dadurch erreichte Einsparung von Endenergie kompensiert werden kann. Darüber hinaus werden zusätzliche Umweltentlastungen durch die Energieeinsparung bereits bei einer Verbesserung vom EnEV 2016 Niveau zum 30 kWh Niveau erreicht. Wenn die energetische Verbesserung bis zum 15 kWh Niveau führt, sind Umweltentlastung je nach Indikator bis zu 35 % möglich. Bei der folgenden Abbildung wird aber auch erkennbar, dass die Einsparungspotenziale bei Gebäuden, die niedrige Emissionen bereits im EnEV 2016 Energieniveau aufweisen (Gebäude mit Holzpellettheizung), begrenzt sind. Die Einzelauswertungen sind im Gesamtbericht im Kapitel 6.2.6.2 einsehbar.

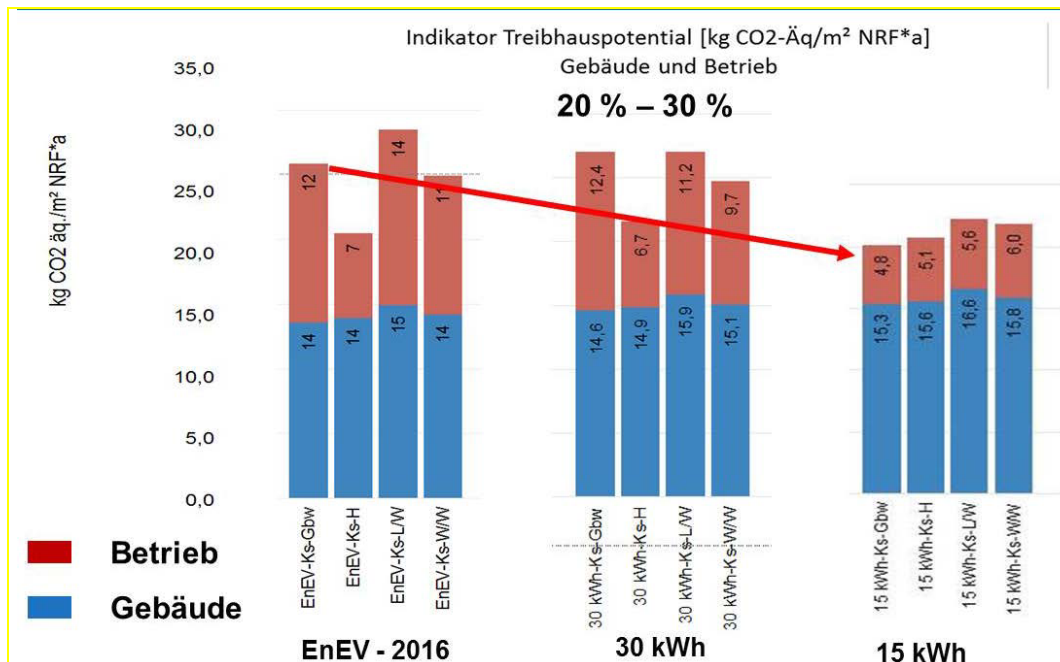


Abb. 0-8 Treibhausgaspotential; Kalksandsteinbauweise, 3 Energieniveaus, 4 Betriebsvarianten

Formal führen die Effizienzsteigerung von Gebäuden und die Verwendung erneuerbarer Energieträger gleichermaßen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und anderen Umweltwirkungen. Bei den Indikatoren Versauerungs-, Eutrophierungs- und Sommersmogpotential ergeben sich aufgrund der effizienteren Bauweise eine leichte Erhöhung, die nicht bei allen Indikatoren durch den geringeren Aufwand beim Betrieb überkompensiert werden kann. Allerdings ist zu bedenken, dass das Potenzial zur Steigerung insbesondere der Verwendung von biogenen Ressourcen zu Heizzwecken (Holzheizungen) sehr begrenzt ist. Die Schritte zur Reduktion der Umwelteinträge sollten weiterhin nach dem bewährten Muster vorgenommen werden:

- Reduktion des Energiebedarfs
- Deckung der Restenergie aus erneuerbaren Ressourcen.

Signifikante Ergebnisse

Vorteile Bauweisen

Aus der differenzierten Untersuchung der verschiedenen Umweltindikatoren wird deutlich, dass jede Lösung unter einzelnen Betrachtungsaspekten Vorteile aufweist.

Vorteile Massivbauweisen

- Im Optimalfall ist eine Einsparung von mehr als 10% des Heizwärmebedarfs gegenüber einer Leichtbauweise möglich.
- Der sommerliche Überhitzungsschutz ist bei niedrigem Energieniveau (30 kWh – 15 kWh) sehr gut: Es gibt deutlich weniger Überwärmungsstunden als bei leichten Bauweisen.
- Je größer die Gebäudemassen innerhalb der thermischen Hülle sind, umso größer sind die Speicherwirkung von Wärme und die Pufferwirkung auf die Raumtemperatur.

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

- Bei korrekter Ausführung kann sowohl gegen den Außenlärm, aber auch im Inneren des Gebäudes ohne besonderen Aufwand ein sehr gutes Schallschutzniveau erreicht werden.

Vorteile Holzbauweisen

- Die Holzbauweise weist im Vergleich zu anderen Bauweisen deutliche Vorteile beim Indikator Treibhausgaspotenzial (kg CO₂äquiv.) auf. Auch bei anderen Umweltindikatoren (Versauerungspotenzial, Überdüngungspotenzial, Sommersmogpotenzial) schneidet die Holzbauweise günstiger ab (siehe Kapitel 6.2.4.5).
- Die Holzbauweise zeigt ebenfalls Vorteile beim Primärenergieaufwand nicht erneuerbar (PENR) und Primärenergieaufwand gesamt (PET) (siehe Kapitel 6.2.4.1).

Vorteile Hybridbauweise

- Die Hybridbauweise verbindet die Vorteile der verschiedenen Bauweisen: guter Schallschutz, guter sommerlicher Überhitzungsschutz und verhältnismäßig geringe negative Umweltwirkungen.
- Die Hybridbauweise liegt bei der quantitativen Betrachtung der Indikatoren zwischen den schweren und leichten Bauweisen.
- Eine Hybridbauweise vermag in vielen Fällen die Nachteile des jeweiligen Bausystems zu vermeiden und mittelmäßigen Primärenergieaufwand bei der Herstellung mit hohem Komfort in der Nutzung zu verbinden.

Vorteile Heizungen

Vorteile Gas-Brennwertheizung mit solarer Warmwasserbereitung

- In dieser Kombination zeigt die Gas-Brennwertheizung bei sehr niedrigem Energiebedarf trotz des fossilen Energieträgers vorteilhafte Werte.

Vorteile Holzpellettheizung

- Die Holzpellettheizung zeigt bei den Indikatoren Primärenergie und Treibhausgaspotenzial bei höherem Energiebedarf (EnEV-2016) günstige Werte.

Vorteile Wärmepumpen

- Bei geringem Energiebedarf schneiden auch Wärmepumpen günstig ab bei allen Indikatoren.

Sensitivitäten

Entscheidend für die Gesamtbilanz eines Gebäudes ist nach dem einmaligen Aufwand von Ressourcen und Primärenergie bei der Herstellung und Errichtung die Nutzungsdauer der Primärkonstruktion und der Komponenten. Eine hohe Qualität der Ausführung, flexible Grundrisse und eine qualitativ hochwertige Planung führen zu einer möglichst langen Nutzungsdauer der Grundstruktur eines Gebäudes. Dies senkt den Primärenergiebedarf (graue Energie) des Gebäudes über die Lebensdauer, da sich die Energie zur Errichtung auf einen längeren Zeitraum verteilt.

Die Unterschiede im Primärenergieaufwand zwischen den Bautypen relativieren sich, wenn man weitere Bauteile mitrechnet, die allen Bauweisen gemeinsam sein können, z. B. ein Keller aus Beton.

Um unterschiedliche Umwelteinträge in Hinblick auf die Dämmstoffe zu untersuchen, wurden zwei Bauweisen ausgewählt (Kalksandsteinbauweise, Holzrahmenbauweise) und mit verschiedenen Dämmstoffen (Schaumglasschotter, XPS, Zellulosedämmstoff, Holzfaserplatten, EPS, Mineralwolle) ausgeführt. Die Ökobilanz zeigt bei der Gebäudebilanzierung, dass die Umwelteinträge eines Gebäudes durch die Auswahl der Dämmstoffe bei den meisten Indikatoren nur in geringem Maß beeinflusst werden können. Bei allen Indikatoren außer dem Überdüngungspotential liegen die nachwachsenden Rohstoffe etwas günstiger. Beim Sommersmogpotential ist die Variante mit nachwachsenden Rohstoffen um Faktor 2 bis 4 günstiger. Es ist zu beachten, dass auch Dämmstoffe aus nachwachsenden oder mineralischen Rohstoffen sehr energieintensiv in der Herstellung sein können, wie beispielsweise bestimmte Holzfaserplatten oder Schaumglasschotter.

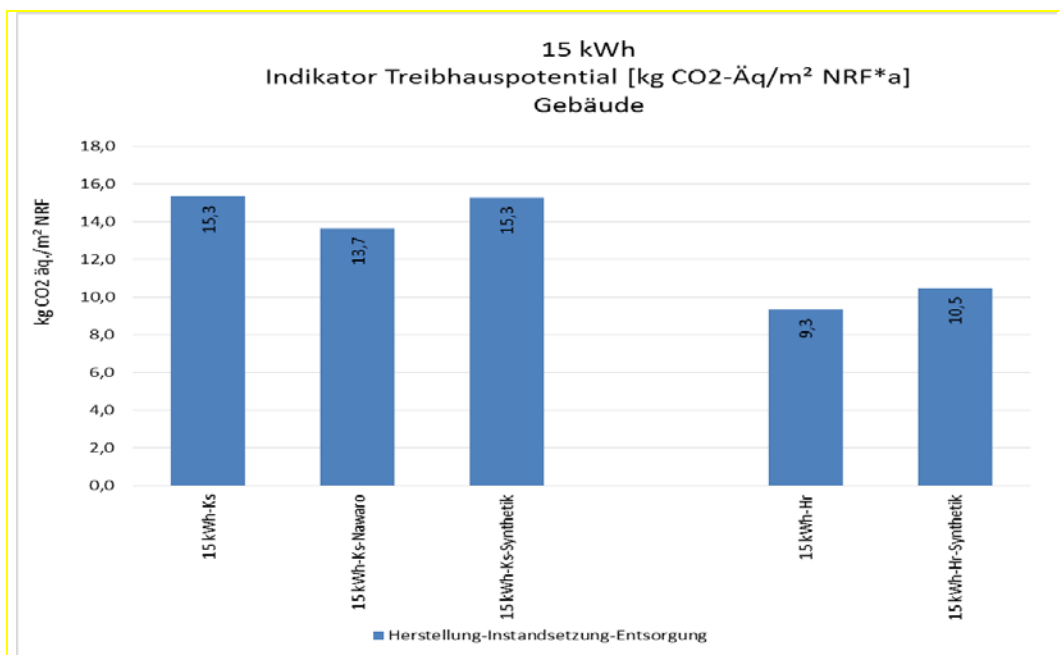


Abb. 0-9 GWP, Ks-Bauweise mit 3 Dämmstoffvarianten, Hr-Bauweise mit 2 Varianten

Weitere Auswertungen werden im Kapitel 6.3.4 aufgezeigt

Weiterführende Aspekte

Innerhalb der Bearbeitung des Forschungsprojektes sind folgende Aspekte als Einflussfaktoren auf das Gesamtergebnis identifiziert worden, konnten aber bezüglich der Quantifizierung ihrer Einflussgröße nicht weiter vertieft werden:

- WDVS gibt es seit deutlich mehr als 50 Jahren. Die Dauerhaftigkeit bzw. der Austauschzyklus wurde auf 40 Jahre festgesetzt. Bei fachgerechter Ausführung kann ein WDVS deutlich länger als 40 Jahre ohne Austausch genutzt werden. Die maximale Lebensdauer kann nur abgeschätzt werden. Sie hängt weniger vom Material ab, sondern v.a. von der Bauausführung. Rein technisch ist eine

Verdoppelung des Austauschzyklus denkbar. Jede Verlängerung der Haltbarkeit hat positive Auswirkungen auf die Primärenergiebilanz des Gebäudes. Die Größenordnung hängt vom Herstellungsaufwand für das Bauteil und die eingebaute Menge des Bauprodukts ab.

- Bei Variation der Ausführung sind gegenüber den in der Studie untersuchten Varianten noch deutlicher ausgeprägte Effekte möglich. Z. B. würde eine thermische Einbindung der Bodenplatte den Temperaturpuffer- und Wärmespeichereffekt aller Bauweisen verbessern.
- Die Nutzung solarer Energiegewinne kann durch eine geschickte Auswahl von Fenstergröße, -qualität und -ausrichtung optimiert werden. Für hocheffiziente Gebäude wird ein südseitiger Fensterflächenanteil von 40 % bis 60 % empfohlen. Der Heizwärmebedarf und damit der benötigte Endenergiebedarf werden dadurch gesenkt.
- Die Betrachtung der Umweltauswirkungen von Gebäudetypen muss immer auch das Umfeld des Hauses berücksichtigen. Die Feinstaubemissionen haben in Ballungsräumen viel höhere Bedeutung als in dünn besiedelten Gebieten. So kann die Beurteilung einer Holzheizung hinsichtlich der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen in Ballungsräumen anders ausfallen als in ländlichen Regionen.
- Bei der Entscheidung, ob ein Keller errichtet werden soll oder nicht, spielen – neben finanziellen Gründen – mehrere Aspekte eine Rolle. Ohne einen Keller benötigt das Gebäude zunächst einmal weniger Energie bei der Errichtung. Damit schneidet es vordergründig aus ökologischer Sicht günstig ab. Es steht aber auch weniger (Nutz-/Wohn-)Raum zur Verfügung. Bezogen auf die – mit Keller größere – Nutzfläche schneidet ein Gebäude mit Keller aus ökologischer Sicht besser ab als ohne Keller.

Empfehlungen

Die Ergebnisse des komplexen Untersuchungsansatzes zeigen, dass keine Bauweise nur Vorteile aufzeigen kann. Wichtig wäre es, dass die Bauprodukthersteller der verschiedenen Bauweisen und Technikvarianten auf die in dieser Studie aufgezeigten Defizite des Gesamtensembles „Gebäude“ aufmerksam werden. Es gilt die aufgezeigten Nachteile zum Vorteil des Verbrauchers und der Umwelt zu verbessern.

Die Massivbauindustrie sollte Strategien entwickeln, wie der Primärenergieaufwand für die Errichtung des Gebäudes Tragkonstruktion gesenkt werden kann. Dies könnte beispielsweise dadurch erreicht werden, indem ein höherer Anteil an Recyclingbaustoffen verwendet wird. Dies ist ein Gebiet, auf dem es Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt und sich insbesondere im Hinblick auf den Klimaschutz ein Verbesserungspotenzial bietet.

Die Holz- und Leichtbauindustrie sollte Strategien entwickeln, wie die thermische Stabilität erhöht werden kann. Dies könnte dadurch erreicht werden, indem im Gebäudekern mehr speicherfähiges Material eingebaut wird. Im Nichtwohnungsbau wurden zur Vermeidung von Kühllasten Bauprodukte für die Phasenverschiebung entwickelt, die auch im Wohnungsbau eingesetzt werden können.

Die Emissionen der Holzpelletkessel sind durch die Bemühungen der Hersteller bereits erheblich gesenkt worden. Hier sollten weitere Verbesserungen vor allem für den Betrieb in Ballungsräumen angestrebt werden.

Berechnung der Lebenszykluskosten

Die Untersuchung der Lebenszykluskosten wird für vier Beheizungsvarianten der Ziegelbauweise:

- Ziegelbauweise mit Gas-Brennwertkessel
- Ziegelbauweise mit Holzpelletkessel
- Ziegelbauweise mit Wärmepumpe Luft-Wasser
- Ziegelbauweise mit Wärmepumpe Wasser-Wasser

(siehe Kapitel 6.4.2.1) und vier unterschiedliche Bauweisen im EnEV 2016 Niveau mit Holzpellettheizung (siehe Kapitel 6.4.2.2):

- Ziegelbauweise mit Holzpellettheizung
- Kalksandsteinbauweise mit Holzpellettheizung
- Hybridbauweise mit Holzpellettheizung
- Holzrahmenbauweise mit Holzpellettheizung

durchgeführt.

Vier Beheizungsvarianten

Die Barwertberechnung aller Kosten im Lebenszyklus berücksichtigt die Preissteigerung bei den Baukosten mit 1 % jährlich und die Energiepreissteigerung mit 4 % jährlich. Abgezinst wird mit einem niedrigen Barwertzinssatz von 1 %.

Die günstigste Variante über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren mit einem Barwert von 2.350 €/m² ist die Gas-Brennwertvariante, gefolgt von der, der Holzpelletvariante, der Wärmepumpe Wasser-Wasser und der Wärmepumpe Luft-Wasser.

Die Instandsetzungskosten der Variante mit einem Gas-Brennwertkessel fallen niedriger aus, da die Heizung bei der Anschaffung günstiger ist, als die anderen Lösungen. Bei 20 Jahren Nutzungsdauer bedeutet dies ein zweimaliger Austausch der Anlage bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

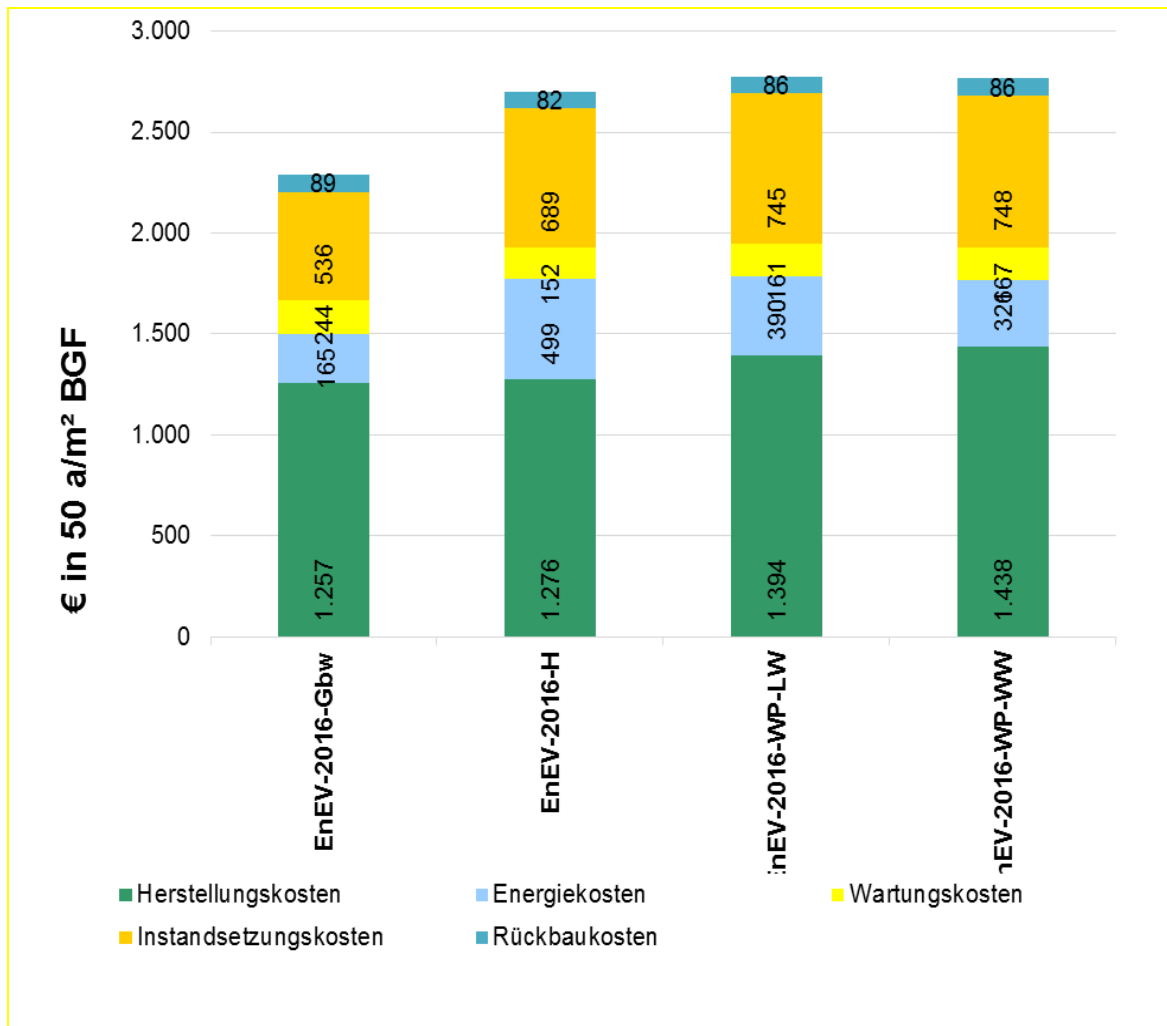


Abb. 0-10 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m² BGF für vier Beheizungsvarianten, Ziegelbauweise, EnEV 2016

Vier Bauweisen

Die günstigste Variante über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren mit einem Barwert von 2.701 €/m² ist die Ziegelbauweise, gefolgt von der Holzrahmenbauweise, der Hybridbauweise und der Kalksandsteinbauweise. Der Unterschied zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert beträgt 10 %. Die höheren Instandsetzungskosten bei der KS-Bauweise werden durch die Erneuerung des Wärmedämmverbundsystems nach 40 Jahren verursacht. Bei fachgerechter Ausführung und Instandhaltung kann ein WDVS deutlich länger als 40 Jahre ohne Austausch genutzt werden. Dann würde dieser Betrag niedriger ausfallen und die Bauweise erreicht dasselbe Niveau, wie die anderen drei Varianten.

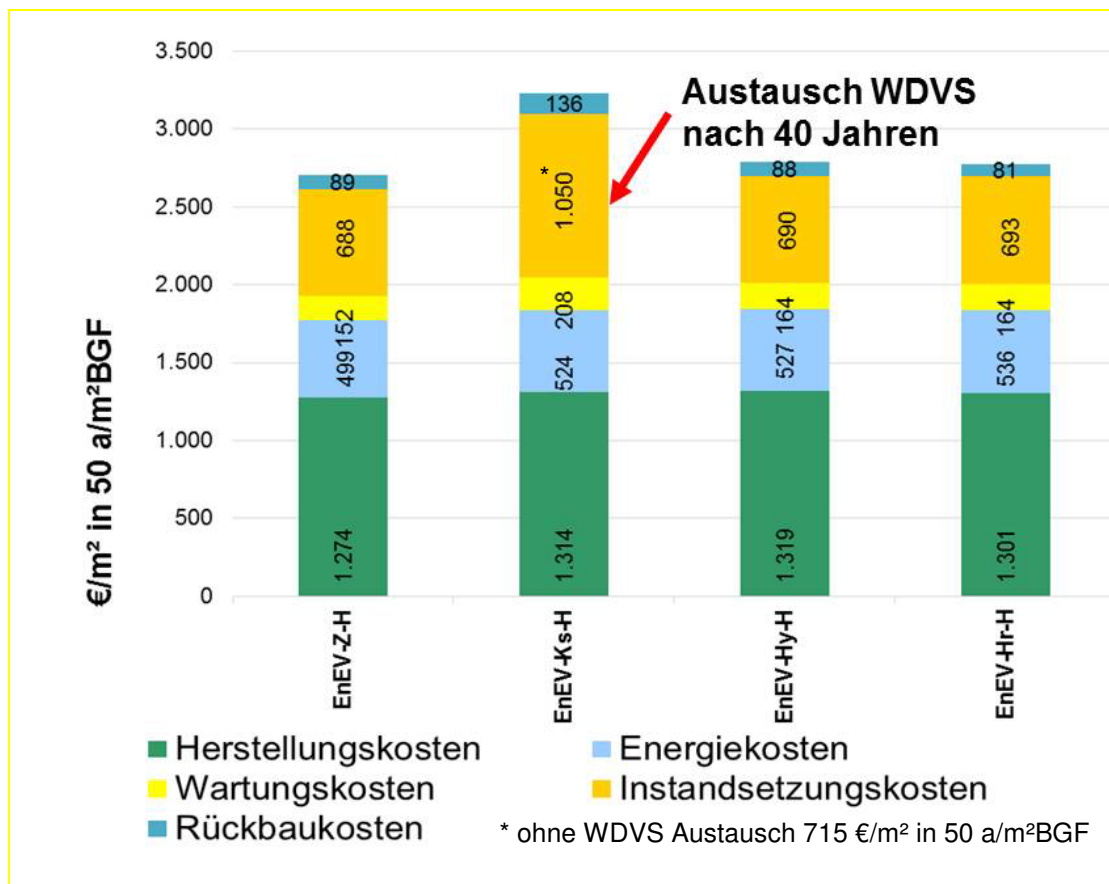


Abb. 0-11 Barwert brutto in 50 Jahren aufgeschlüsselt in €/m² BGF für vier Bauweisen, mit Holzpellettheizung, EnEV 2016

Fazit

Der Nachweis der Erfüllung der EnEV ist Genehmigungsvoraussetzung. Mit zunehmender Energieeffizienz werden die Berechnungen bezüglich unpräziser Eingaben empfindlicher. Deshalb ist die exakte Beschreibung der Bauteilaufbauten und der technischen Zusammenstellung von Heizungs- und Lüftungskomponenten eine Voraussetzung für belastbare Ergebnisse. Die thermischen Komfortaspekte des Gebäudes sollten in Zukunft durch präzisere Rechenverfahren im Rahmen der Erstellung des Energiebedarfsausweises nachgewiesen werden.

Voraussetzung für eine aussagekräftige Ökobilanz und Lebenszykluskostenberechnung bei kleineren Objekten ist eine sorgfältige Eingabe der Gebäudebestandteile inklusive der technischen Anlagen, eine präzise Beschreibung der Bauteilaufbauten und der eingesetzten Bauprodukte.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Lebenszyklusbetrachtung mit den Aspekten der Ökobilanz und der Lebenszykluskosten wichtige Informationen für Entscheidungsprozesse bei Gebäudekonzeption und -ausführung liefern kann. Da Gebäude langlebige Güter darstellen, bedeutet die Berücksichtigung der präsentierten Ergebnisse bei jetzt realisierten Bauvorhaben langfristige Wirkungen im lokalen und globalen Maßstab auf die Umwelteinträge.

Daraus lassen sich eindeutige Handlungsempfehlungen ableiten.

1 Veranlassung und Projektablauf

Im Rahmen des Projektes werden unterschiedliche Bauweisen hinsichtlich ihrer Gesamtumweltbelastung sowie ihrer Energiebilanz im Laufe des gesamten Lebenszyklus bewertet. Die dabei gewonnenen Informationen sollen zu einer Optimierung eines Wohngebäudes über dessen gesamten Lebenszyklus, zur Minimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs, zur Verringerung der Umweltbelastung und zur Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit beitragen.

1.1 Formale Voraussetzungen

Zur Erstellung einer Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden wurde seitens des Bayerischen Landesamtes für Umwelt am 25.08.2016 ein Auftrag an das Büro Ascona GbR in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro IP5 aus Karlsruhe erteilt. Die Ascona GbR hat im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte für die Gebäudebewertungssysteme wie BNB und DGNB die Grenz- und Zielwerte für die Lebenszykluskosten, engl. Life Cycle Costs (LCC) und die Ökobilanz, engl. Life Cycle Assessment (LCA) für Wohngebäude entwickelt. Das Büro ist auf die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse von Gebäuden spezialisiert. Der Auftrag wurde im Zeitraum September 2016 bis Juli 2017 bearbeitet.

1.2 Wissenschaftlich technischer Stand

In den vergangenen Jahren sind verschiedene Ökobilanzstudien erschienen, die Einfamilienhäuser mit verschiedenen Primärkonstruktionen vergleichen. Diese Studien wurden im Sinne des Projektzieles kritisch untersucht. Studien, die nur Bauteile untersuchen, wurden dabei nicht berücksichtigt. Diese Arbeit wurde im Zusammenhang des Forschungsprojektes „Treibhausgasemissionen im Holzbau“ [Haf17] unter Mitwirkung der Ascona GbR durchgeführt. Folgende Studien wurden berücksichtigt:

- Graubner, Knauff; TU Darmstadt (2008): *Ökobilanzstudie - Gegenüberstellung Massivhaus / Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40* [Grau08]
- Graubner, Pohl; TU Darmstadt (2013): *Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk* [Grau13]
- Kaufmann, König, Lubenau, Richter, Weber-Blaschke (2011): *Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft* [Kauf11]
- Sölkner, Oberhuber, Sprau, Preininger, Dolezal, Mötzl, Passer, Fischer (2014): *Innovative Gebäudekonzepte im ökologischen und ökonomischen Vergleich über den Lebenszyklus* [Soelk14]
- Pohl, Sebastian (2016): *Nachhaltigkeit von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau* [Pohl16]

Alle Studien berücksichtigen nicht die aktuellen Normen EN 15978:2012, EN 15804:2014, EN 16485:2014 und auch nicht die normenkonforme Datenbank ÖKOBAUDAT ab 2015 [Öko16], da sie vor der Bereitstellung der normenkonformen Datenbank ÖKOBAUDAT 2015 entstanden sind bzw. wegen der nicht angepassten Zertifizierungssysteme (NaWoh oder

BNK) diese Datenbank nicht einsetzen. Damit werden die LCA-Berechnungsergebnisse nicht nach den Phasen A-C und Phase D getrennt nachgewiesen und die Primärenergie erneuerbar (PER) und nicht erneuerbar (PENR), sowie die Primärenergie zur stofflichen (PERM/PENRM) und energetischen Nutzung (PERE/PENRE) nicht separat ausgewiesen (EN 15804). Aus diesen Gründen sind die Ergebnisse dieser Studien mit den hier durchgeführten Untersuchungen nicht vergleichbar.

Die Studien von Graubner (2008) und Pohl (2016) variieren die *Parameter Betrachtungszeitraum* und *Nutzungsdauer* der Bauteile. Bei Graubner wurden die Parameter so gewählt, dass die Materialien, die im Holzhaus eingebaut wurden, häufiger ausgetauscht werden (müssen) als die der Massivbauweise. Des Weiteren werden Materialien (Mineralwolledämmung zwischen der Holzkonstruktion und in der Holzbalkendecke und notwendige Verkleidungen wie Gipskartonplatten) ausgetauscht, die in der Realität nicht ausgetauscht werden. Als Begründung werden die Verweilzeiten von Materialien aus dem Dokument zur Dauerhaftigkeit [BBSR17] des BNB-Systems herangezogen. Bei Pohl wird die Ökobilanz in einer Variante auf einen Betrachtungszeitraum von 80 Jahren bezogen und festgelegt, dass die gesamte Primärkonstruktion des Holzgebäudes einmal ausgetauscht werden muss.

Die Studie von Sölkner et. al. (2014) bezieht sich auf die österreichischen Rahmenbedingungen beim Strommix. Sie setzt den Betrachtungszeitraum für die Lebenszykluskostenberechnung auf 50 Jahre und für die Ökobilanz auf 100 Jahre fest. Durch die langen Beheizungszeiten des Gebäudes wird der Anteil der Konstruktion auf das Gesamtergebnis verringert.

Die Vielfältigkeit der aktuellen Studien zum Thema „Ökobilanzen im Gebäudebereich“ des wissenschaftlichen Umfeldes und deren Ergebnisse zeigt die Notwendigkeit einheitlicher Standards für die Durchführung von Ökobilanzen. Detaillierte Ausführungen sind in dem Anhang 2 einsehbar. In der vorliegenden Studie werden die aktuellen Normen EN 15978:2012, EN 15804:2014, EN 16485:2014 und die überarbeitete, normkonforme Datenbank „ÖKOBAUDAT“ des BBSR, Stand 6-2016 [Öko16] verwendet.

.

2 Aufgabenstellung

Anhand eines Mustergebäudes (Kapitel 3.1) sollen Variationen für verschiedene Konstruktionen (Kapitel 3.2), verschiedene Energieniveaus (Kapitel 3.3), unterschiedliche technische Ausstattungen (Kapitel 3.4) und verschiedene Betrachtungszeiträume durchgespielt werden. Für alle Gebäudemodellierungen werden Ökobilanzen (Kapitel 6.2) und für den EnEV-Standard Lebenszykluskosten (Kapitel 6.3) berechnet und interpretiert.

Zusätzlich werden zu den Themenbereichen „Thermische Simulation“, „Ökobilanz“ und Lebenszykluskosten“ ausgewählte Rahmenbedingungen variiert, um die Einflussgrößen von Bauentscheidungen bestimmen zu können.

Für die umfassende Lebenszyklusanalyse ist es notwendig, das Gebäude mittels der Elementmethode zu erfassen. Auf Basis des damit beschriebenen Gebäudemodells und der Berechnung des Energiebedarfs, kann eine Ökobilanz und eine Lebenszykluskostenberechnung für einen bestimmten Betrachtungszeitraum durchgeführt werden. Dazu wird die Software und Datenbank „LEGE“ eingesetzt. Die integrale Arbeitsweise des Programms ermöglicht es, eine Überprüfung und Validierung der Berechnungsergebnisse durch einen Vergleich mit den unterschiedlich modellierten Varianten durchzuführen.

3 Ausgangslage

Das Beispielgebäude ist ein Neubau für ein zweigeschossiges Einfamilienhaus (EFH), das in der gewählten Dimension und Bauweise einer marktüblichen Lösung entspricht. Es ist ein zweigeschossiges Einfamilienhaus ohne Keller, mit einer Bruttogrundfläche von 185-200 m², 150 m² Nettoraumfläche und ca. 135 m² Wohnfläche. Das geneigte Dach ist nicht ausgebaut. Die Flächenberechnung orientiert sich an der DIN 277 in der Fassung von 1-2016.

Der zweigeschossige Grundriss ermöglicht eine Nutzung des Gebäudes als Einfamilienhaus oder die Aufteilung in zwei Einzelwohnungen. Auf einen Keller wird verzichtet, der Hausanschluss- und Wirtschaftsraum ist an der Nordseite des Gebäudes im Erdgeschoss (EG) untergebracht. Ein Kellergeschoss ist zur Unterbringung des Heizraums nicht mehr notwendig. Die dort gelegenen Räume sind für das Funktionieren des Gesamtensembles „Einfamilienwohnhaus“ nicht notwendig (Hobbyräume, Lagerräume, Saunaräume). Der Einfluss eines Kellers wird mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt. Die Positionierung des Gebäudes und die Fassadengestaltung der opaken und transluzenten Flächen werden in Hinblick auf eine passive Solarnutzung gewählt.

3.1 Pläne

Das Gebäude wird mit Plänen dokumentiert, die im Anhang 3A und 3B einsehbar sind.

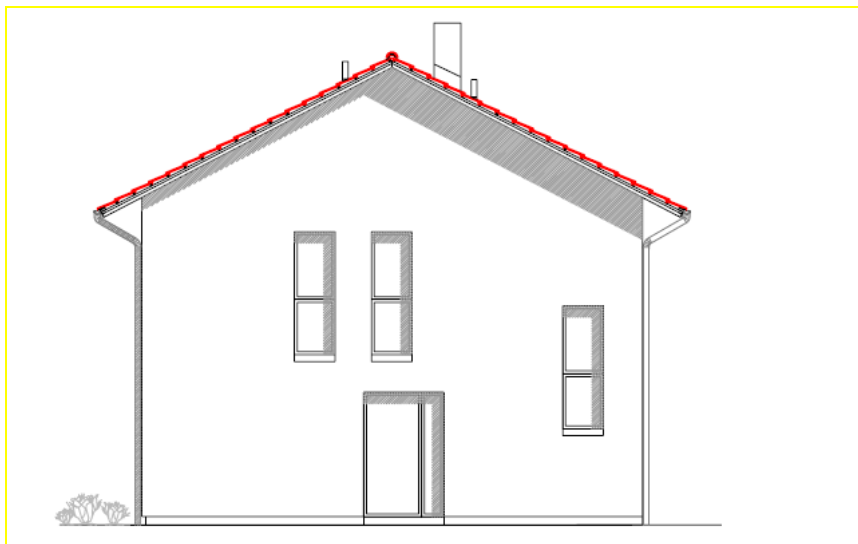


Abb. 3-1 Ansicht Ost

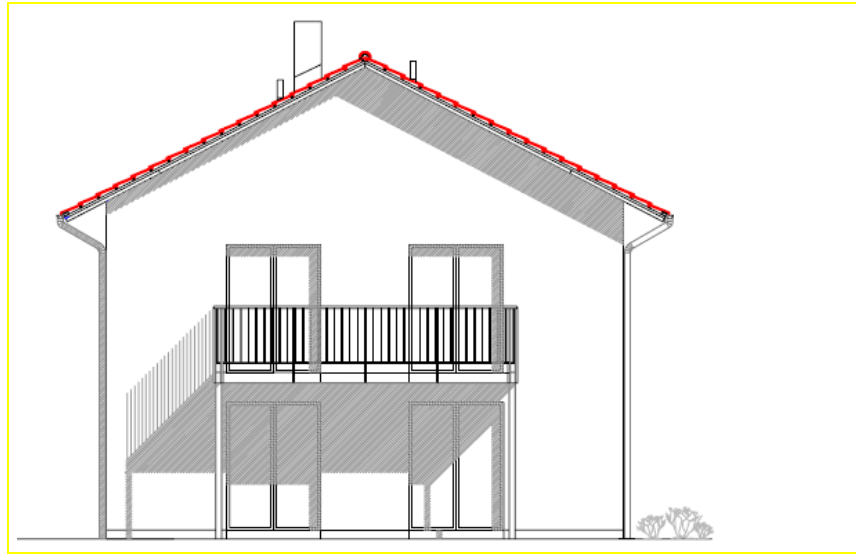


Abb. 3-2 Ansicht West

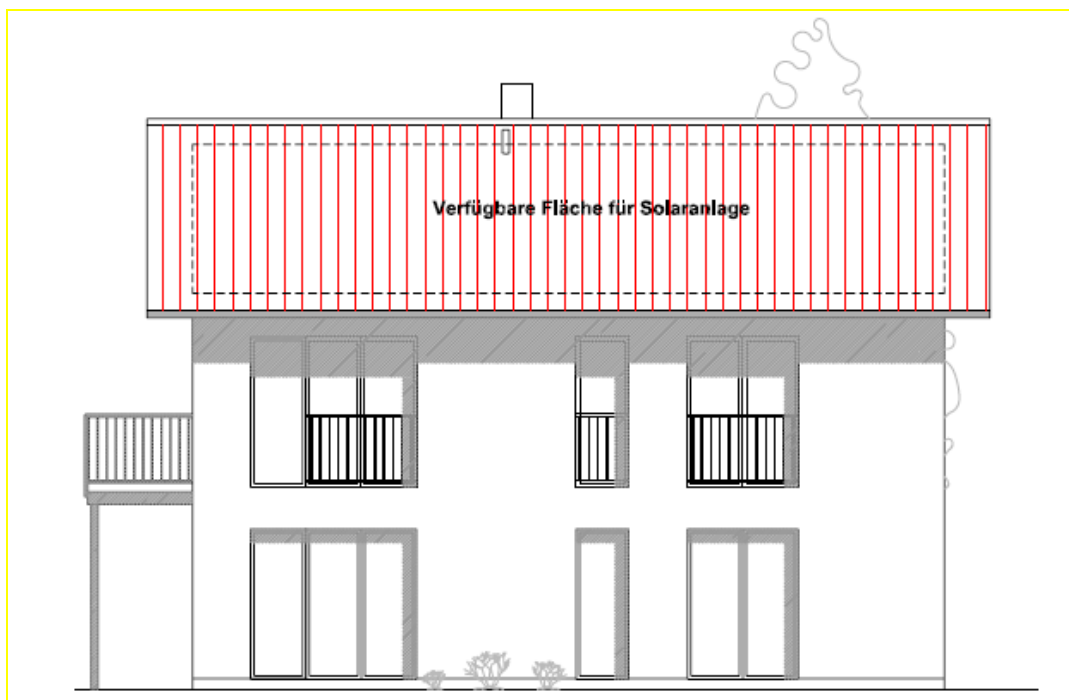


Abb. 3-3 Ansicht Süd

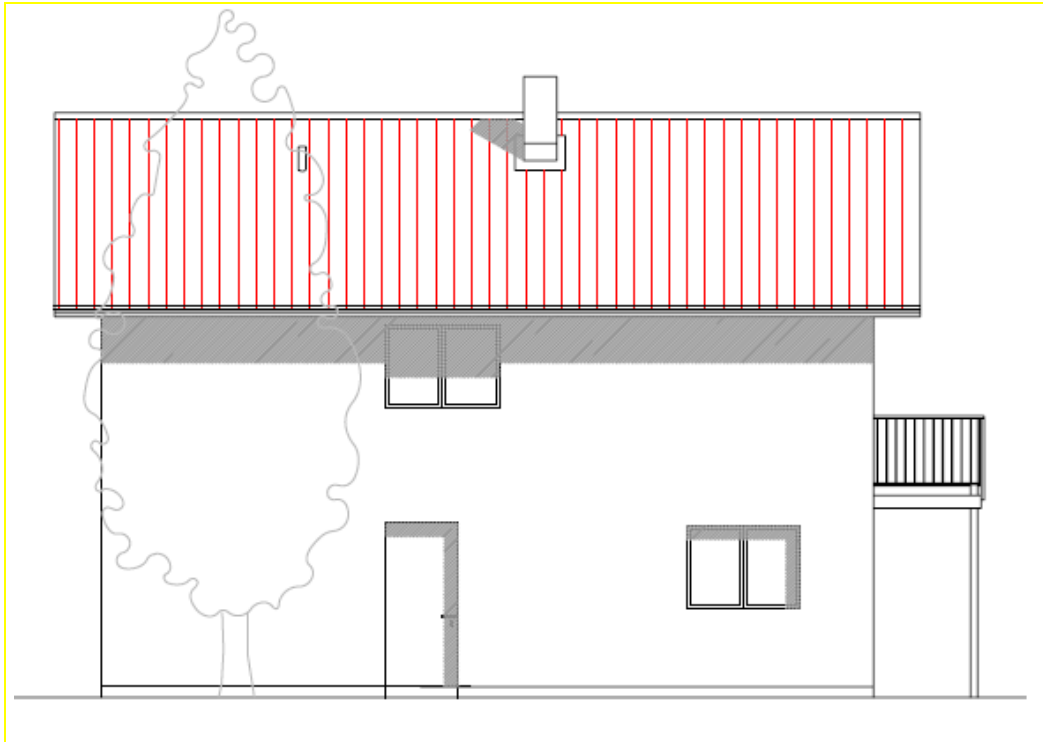


Abb. 3-4 Ansicht Nord

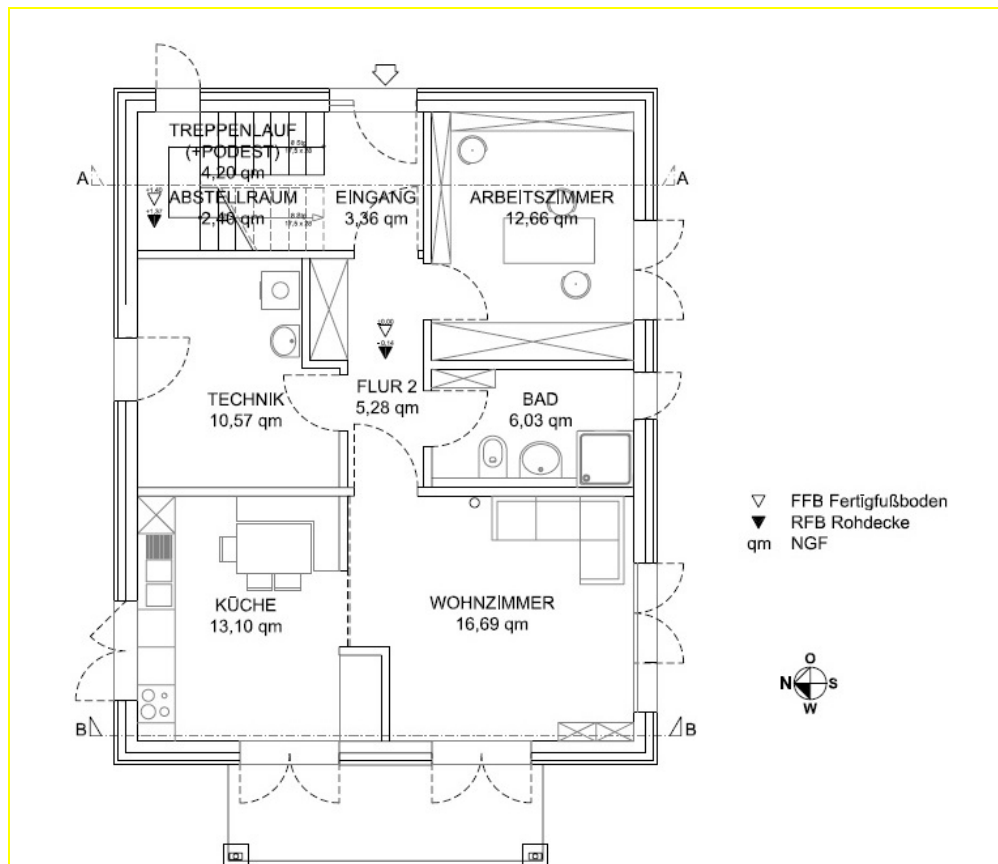


Abb. 3-5 Erdgeschoss