



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Plusenergie im Bestand

Ökonomologische Transformationsanalyse einer energetischen Einfamilienhaussanierung und Überprüfung der Übertragbarkeit des konzeptionellen Ansatzes auf einen exemplarischen Geschosswohnungsbau



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Plusenergie im Bestand

Ökonomologische Transformationsanalyse einer energetischen Einfamilienhaussanierung und Überprüfung der Übertragbarkeit des konzeptionellen Ansatzes auf einen exemplarischen Geschosswohnungsbau

Vom Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Tag der Einreichung: 18.12.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2016

Verfasser:

Dipl.-Ing. Ingmar Kurtz, geboren in Darmstadt

Erstreferent:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichelmann, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik,
Fachbereich Architektur, Technische Universität Darmstadt

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Holger Wallbaum, Professur für Nachhaltiges Bauen,
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Technische Hochschule Chalmers Göteborg

Darmstadt 2016

D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik am Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt. Mein Dank geht an den Leiter des Fachgebiets, Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichelmann, der mich bei der Bearbeitung der Arbeit betreut hat, sowie Prof. Dr.-Ing. Holger Wallbaum für seine Tätigkeit als Korreferent.

Teile dieser Arbeit entstanden im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt „Ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Wohngebäudes zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität. Anwendungsempfehlungen für vergleichbare Bauten“, welches unter dem Aktenzeichen 31232 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde. Einzelne Texte und Grafiken der vorliegenden Arbeit wurden von mir im Rahmen dieses Forschungsprojektes erstellt und bilden den Kern dieser Arbeit. Diese Teile sind im Inhaltsverzeichnis mit * gekennzeichnet. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich für die konstruktive Zusammenarbeit mit der DBU.

Mein Dank gilt weiterhin meinen Kollegen am Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik sowie den Mitarbeitern des Fachgebietes Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, welche durch Ihre Diskussionsbereitschaft, Beratung, Unterstützung und Hinweise Ihren Teil zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere bedanke ich mich bei Anja Amann, Patrick Beck, Ümit Esiyok, Joost Hartwig, Annekatriin Koch, Joachim Schulze, Wieland Weise, Timm Wetzel sowie meiner Familie für die hilfreichen fachlichen Diskussionen und das Korrekturlesen der Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Nikolas Müller vom Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre der TUD für die Durchsicht der ökonomischen Untersuchung, sowie bei Dennis Werkmeister und Bastian Ziegler, die maßgeblich an der Sanierung des energy+Home beteiligt waren und mich mit wertvollen Informationen zur Sanierung versorgt haben.

I. Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	VI
II	Abbildungsverzeichnis	VIII
III	Tabellenverzeichnis	XIV
IV	Zusammenfassung	XVI
1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Beschreibung zur Ausgangssituation / Stand der Technik *	4
1.3	Untersuchungsobjekt „energy+Home“ *	11
2	Ökologische Untersuchung der Sanierung	21
2.1	Einleitung*	21
2.2	Ziel- und Untersuchungsrahmen*	21
2.3	Sachbilanz Gebäudekonstruktion*	26
2.4	Geometrische und materielle Bestimmung des Bestandes *	28
2.5	Recherche der Umwelt-Produkteigenschaften *	34
2.6	Wirkungsabschätzung*	38
2.7	Gesamtwirkungsabschätzung*	54
2.8	Auswertung*	64
2.9	Treibhauspotential der PV-Anlage	69
2.10	Vergleich energy+Home und unsanierter Bestand	71
2.11	Schlussfolgerung, Interpretation	72
3	Ökologischer Vergleich alternativer Sanierungsstrategien *	73
3.1	Untersuchungsrahmen	73
3.2	Sanierung nach EnEV	74
3.3	Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes	81
3.4	Abbruch und Neubau nach EnEV	87
3.5	Auswertung und vergleichende Betrachtung der Sanierungsvarianten	93
3.6	Gegenüberstellung der Umweltwirkungspotentiale der betrachteten Sanierungsvarianten	97
4	Ökonomische Lebenszyklusanalyse und Wirtschaftlichkeitsbewertung *	101
4.1	Ermittlung und Analyse der Investitionskosten	101
4.2	Ermittlung der Herstellungskosten	101
4.3	Ermittlung der Nutzungskosten	102
4.4	Aufteilung der LCC-Kosten nach DIN 276 und DIN 18960	107
4.5	Lebenszykluskosten im weiteren Sinne (WLC)	109
4.6	Differenzierte Kostenbetrachtung	113
4.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	119
5	Ökonomische Untersuchung alternativer Sanierungsstrategien und erweiterte Wertschöpfungsbetrachtungen *	123
5.1	Kostenvergleich Sanierung - Neubau	123
5.2	Vergleichende Betrachtung der Kostenvarianten	128
5.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Elektromobilität im Zusammenhang mit selbsterzeugtem Strom aus Photovoltaik	130
5.4	Wertsteigerung durch die Sanierung zum energy+Home	133

5.5	Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	139
6.	Gegenüberstellung und Bewertung von ökologischen und ökonomischen Kennwerten *	141
6.1	Kennwertgegenüberstellung LCA / LCC	141
7	Energetische Untersuchung und Monitoring *	147
7.1	Einleitung	147
7.2	Ermittelte Messdaten	147
7.3	Gegenüberstellung der prognostizierten und gemessenen Daten	149
8	Prüfung der Übertragbarkeit auf einen exemplarischen Geschosswohnungsbau	155
8.1	Einleitung	155
8.2	Die Fritz-Dächert-Siedlung in Darmstadt Eberstadt: Gebäudetypologisch repräsentative Bestandsgebäude	156
8.3	Geschoßwohnungsbauten der 50er Jahre	171
9	Beispielhafte Konzeption einer Geschosswohnungsbau- sanierung zum Plusenergiegebäude	175
9.1	Vergleichende Betrachtung von Sanierungsmaßnahmen	175
9.2	Variantenvergleich und Ableitung eines Planungsszenarios	186
9.3	Modellrechnung zur Wirtschaftlichkeitsbewertung	189
9.4	Vergleichende Gegenüberstellung von EFH-Sanierung und MFH-Sanierung	191
10	Planungsempfehlungen und Schlussbetrachtungen	201
10.1	Planungsempfehlungen für die Sanierung von Bestandsgebäuden hin zu Plusenergiegebäuden *	201
10.2	Schlussbetrachtungen	205
	Literaturverzeichnis	209
	Anhang	215
A.1	Erweiterte Betrachtung der Wirkungskategorien alternativer Sanierungsvarianten	215
A.2	Auswertung und vergleichende Betrachtung der Sanierungs- und Neubauvarianten	234
A.3	Herstellungskosten energy+Home - Kostenfeststellung	238
A.4	Nutzungskosten energy+Home	242
A.5	Kostenschätzung der Varianten	248
A.6	Lebenslauf / Wissenschaftlicher Werdegang	254
A.7	Eidesstattliche Erklärung	255

* Bestandteil des DBU Forschungsprojekts „Ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Wohngebäudes zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität. Anwendungsempfehlungen für vergleichbare Bauten“.

II. Abbildungsverzeichnis

Titelseite:	energy+Home, Foto: diephotodesigner.de	
Abbildung 1.1:	Entwicklung des energiesparenden Bauens am Beispiel des Primärenergiebedarfes für Heizung einer Doppelhaushälfte	6
Abbildung 1.2:	Ostseite des Bestandsgebäudes nach der Fertigstellung im Jahr 1970	11
Abbildung 1.3:	Wohnzimmer des Bestandsgebäudes vor der Sanierung	11
Abbildung 1.4:	Treppenhaus des Bestandsgebäudes vor der Sanierung	12
Abbildung 1.5:	Westseite des Bestandsgebäudes vor der Sanierung	12
Abbildung 1.6:	Ostseite des modernisierten energy+Home im Jahr 2011	13
Abbildung 1.7:	Westseite des modernisierten energy+Home im Jahr 2011	13
Abbildung 1.8:	Terrasse des sanierten energy+Home im Jahr 2011	14
Abbildung 1.9:	Dachfläche des sanierten energy+Home im Jahr 2011	14
Abbildung 1.10:	Wohnzimmer mit Blick zur Küche des sanierten energy+Home	15
Abbildung 1.11:	Küche des sanierten energy+Home	15
Abbildung 1.12:	Energiekonzept des energy+Home	16
Abbildung 1.13:	Schnitt A-A	17
Abbildung 1.14:	Schnitt B-B	17
Abbildung 1.15:	Schnitt C-C	17
Abbildung 1.16:	Ansicht Nord	18
Abbildung 1.17:	Ansicht West	18
Abbildung 1.18:	Ansicht Ost	18
Abbildung 1.19:	Grundriss Erdgeschoss	19
Abbildung 1.20:	Grundriss Obergeschoss	19
Abbildung 1.21:	Lageplan	20
Abbildung 2.1:	Grundriss EG als Grundlage der Massenermittlung	29
Abbildung 2.2:	Grundriss UG als Grundlage der Massenermittlung	29
Abbildung 2.3:	Grundriss EG Bestand (schwarz)/ Abbruch (gelb) / Neubau (rot)	30
Abbildung 2.4:	Grundriss UG Bestand (schwarz)/ Abbruch (gelb) / Neubau (rot)	30
Abbildung 2.5:	Schema Treibhauspotential	38
Abbildung 2.6:	Schema Ozonabbaupotential	39
Abbildung 2.7:	Schema Photochemisches Oxidantienbildungspotential	39
Abbildung 2.10:	Schema Versauerungspotential	40
Abbildung 2.8:	Schema Eutrophierungspotential	40
Abbildung 2.9:	Schema Primärenergieverbrauch	40
Abbildung 2.11:	Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	42
Abbildung 2.12:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion	43
Abbildung 2.13:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion	43
Abbildung 2.14:	Vergleich des Ozonabbaupotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	44
Abbildung 2.15:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion	45
Abbildung 2.16:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion	45
Abbildung 2.17:	Vergleich des Photochemische Oxidantienbildungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	46
Abbildung 2.18:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Photochemische Oxidantienbildungspotential der Gebäudekonstruktion	47
Abbildung 2.19:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Photochemische Oxidantienbildungspotential der Gebäudekonstruktion	47
Abbildung 2.20:	Vergleich des Versauerungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	48
Abbildung 2.21:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Versauerungspotential der Gebäudekonstruktion	49
Abbildung 2.22:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am	49

	Versauerungspotential der Gebäudekonstruktion	49
Abbildung 2.23:	Vergleich des Eutrophierungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	50
Abbildung 2.24:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion	51
Abbildung 2.25:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion	51
Abbildung 2.26:	Vergleich des Gesamtprimärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert	52
Abbildung 2.27:	prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Gesamtprimärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion	53
Abbildung 2.28:	absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Gesamtprimärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion	53
Abbildung 2.29:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	58
Abbildung 2.30:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Ozonabbaupotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	59
Abbildung 2.31:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung POCP des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	60
Abbildung 2.32:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Versauerungspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	61
Abbildung 2.33:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Eutrophierungspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	62
Abbildung 2.34:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Gesamtprimärenergiebedarfs des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude	63
Abbildung 2.35:	Sensitivitätsprüfung Betrachtungszeitraum	65
Abbildung 2.36:	Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	67
Abbildung 2.37:	Entwicklung des Ozonabbaupotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	67
Abbildung 2.38:	Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren absolut	68
Abbildung 2.39:	Entwicklung des Gesamtprimärenergiebedarfs des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren absolut	68
Abbildung 2.40:	Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzwert	70
Abbildung 2.41:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung GWP des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzgebäude	70
Abbildung 2.42:	Entwicklung GWP des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren inkl. PV-Anlage	70
Abbildung 2.43:	Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert und dem unsanierten Bestand	71
Abbildung 2.44:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung GWP des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude und dem unsanierten Bestand	71
Abbildung 2.45:	Entwicklung GWP des energy+Home, des Referenzgebäudes und des unsanierten Bestandes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	72
Abbildung 3.1:	Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzwert	76
Abbildung 3.2:	prozentualer Anteil der Bauteile der Sanierung nach EnEV am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion	76
Abbildung 3.3:	Vergleich des Primärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzwert	77
Abbildung 3.4:	prozentualer Anteil der Bauteile der Sanierung nach EnEV am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion	77
Abbildung 3.5:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude	79

Abbildung 3.6:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Primärenergiebedarfs der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude	79
Abbildung 3.7:	Entwicklung des Treibhauspotentials der Sanierung nach EnEV und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	80
Abbildung 3.8:	Vergleich GWP der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzwert	82
Abbildung 3.9:	prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion	82
Abbildung 3.10:	Vergleich PEI der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzwert	83
Abbildung 3.11:	prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion	83
Abbildung 3.12:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung GWP von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzgebäude	85
Abbildung 3.13:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung PEI von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzgebäude	85
Abbildung 3.14:	Entwicklung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	86
Abbildung 3.15:	Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzwert	88
Abbildung 3.16:	prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau EnEV am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion	88
Abbildung 3.17:	Vergleich des Primärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzwert	89
Abbildung 3.18:	prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau EnEV am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion	89
Abbildung 3.19:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude	91
Abbildung 3.20:	Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Primärenergiebedarfs von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude	91
Abbildung 3.21:	Entwicklung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau EnEV und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	92
Abbildung 3.22:	Entwicklung des Treibhauspotentials von energy+Home, Sanierung EnEV, Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude und Abbruch und Neubau nach EnEV im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	95
Abbildung 3.23:	Gegenüberstellung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten	95
Abbildung 3.24:	Entwicklung des Gesamtprimärenergiebedarfs der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	96
Abbildung 3.25:	Gegenüberstellung des Gesamtprimärenergiebedarfs der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten	96
Abbildung 3.26:	Gegenüberstellung der Umweltwirkungspotentiale der betrachteten Sanierungsvarianten in Prozent, bezogen auf den DGNB Referenzwert	97
Abbildung 3.27:	potentielle Entwicklung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten	98
Abbildung 3.28:	potentielle Entwicklung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten von der Sanierung 2011 bis 2030	99
Abbildung 4.1:	Aufteilung der Herstellungskosten des energy+Home auf die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276-1	101
Abbildung 4.2:	Prozentuale Aufteilung der gebäudebezogenen Lebenszykluskosten des energy+Home über 50 Jahre	107
Abbildung 4.3:	Systematische Unterteilung der Lebenszykluskosten nach Kostenkategorien	108
Abbildung 4.4:	Aufteilung der Investitionskosten des energy+Home nach Kostenkategorien	108
Abbildung 5.1:	Verteilung der Sanierungskosten auf die Kostengruppen nach	

	DIN 276 für die Variante `Sanierung nach EnEV`	124
Abbildung 5.2:	Verteilung der Kosten auf die KG 300 und 400 nach DIN 276 für die Variante `Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes`	125
Abbildung 5.3:	Verteilung der Kosten auf die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 für die Variante `Abbruch und Neubau eines Plusenergie`	126
Abbildung 5.4:	Vergleich der Herstellungskosten alternativer Sanierungs- bzw. Neubaustrategien aufgeteilt nach den KG 300 und 400 in €	127
Abbildung 5.5:	prozentualer Vergleich der Lebenszykluskostenentwicklung der Sanierungs- bzw. Neubauprodukten über einen Zeitraum von 50a	129
Abbildung 5.6:	Aufsummierung der Anschaffungs- und Verbrauchskosten für I-MieV und VW Polo über einen Zeitraum von 15 Jahren	131
Abbildung 6.1:	Vergleich des Treibhauspotentials der Sanierungs- und Neubauprodukten in Prozent	141
Abbildung 6.2:	Vergleich der Herstellungs- und Lebenszykluskosten der Sanierungs- und Neubauprodukten in Prozent	142
Abbildung 6.3:	prozentuale Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten (LCC) der Sanierungsvarianten energy+Home und EnEV	142
Abbildung 6.4:	Lebenszykluskosten (LCC) und Treibhauspotential (GWP) - prozentuale Gegenüberstellung der untersuchten Varianten	143
Abbildung 6.5:	Treibhauspotential (GWP) - absolute Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten energy+Home und EnEV	144
Abbildung 7.1:	Messgerät zur Erfassung der Strommengen	147
Abbildung 7.2:	Messgerät zur Erfassung der Wärmeabgabe der Wärmepumpe an den Warmwasserspeicher	147
Abbildung 7.3:	Messgerät zur Erfassung des Trinkwasserverbrauchs und der Zirkulationswärmeverluste	147
Abbildung 7.4:	prognostizierter und gemessener Stromverbrauch und -ertrag des energy+Home im Jahr 2014	149
Abbildung 7.5:	Gemessener Stromverbrauch des energy+Home im Jahr 2014, aufgeteilt nach Verbrauchern.	149
Abbildung 7.6:	prognostizierter und gemessener Heiz- und Brauchwassernutzwärmeverbrauch des energy+Home im Jahr 2014	151
Abbildung 7.7:	prognostizierter und gemessener Stromverbrauch der Lüftungsanlage des energy+Home im Jahr 2014	152
Abbildung 7.8:	prognostizierter und gemessener Haushaltstromverbrauch des energy+Home gesamt und getrennt nach Stromverbraucher	153
Abbildung 7.9:	gemessene Innenraumtemperaturen im energy+Home in 2014	154
Abbildung 8.1:	Fritz-Dächert-Weg, Ostfassade	156
Abbildung 8.2:	Fritz-Dächert-Weg, Westfassade	157
Abbildung 8.3:	Bestand Fritz-Dächert-Weg, Dachgäbuben, Fenster, Hauseingangstür, Grundriss EG, Ansicht Ost	159
Abbildung 8.4:	Bestand Fritz-Dächert-Weg, Treppenhaus, Kellerabteil, Hausanschluss, Grundriss 1.OG, Ansicht West	160
Abbildung 8.5:	Bestand Fritz-Dächert-Weg, links: Ostfassade, Durchgang, Grundriss 2.OG, Schnitt, Ansicht Süd	161
Abbildung 8.6:	Thermografie der Nordfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.7:	Thermografie der Westfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.8:	Thermografie der unsanierten Ostfassade des Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.10:	Nordfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.11:	Westfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.9:	Ostfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	165
Abbildung 8.12:	Thermografie Innenraum Nord-West-Ecke EG Fritz-Dächert-Weg 56	166
Abbildung 8.13:	Innenraum Nord-West-Ecke EG Fritz-Dächert-Weg 56	166
Abbildung 8.14:	Innenraumaufnahme der U-Wert-Messung der Außenwand im	

	unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	169
Abbildung 8.16:	Innenraumaufnahme der U-Wert-Messung des Daches im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	169
Abbildung 8.15:	Außenaufnahme der U-Wert-Messung der Außenwand im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	169
Abbildung 8.17:	Außenaufnahme der U-Wert-Messung des Daches im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58	169
Abbildung 9.1:	Lage und Nummerierung der Wohnungen im Fritz-Dächert-Weg 56-58	175
Abbildung 9.2:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen im Bestand in kWh/m ² a.	177
Abbildung 9.3:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 01a in kWh/m ² a.	178
Abbildung 9.4:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 01b in kWh/m ² a.	179
Abbildung 9.5:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 02 in kWh/m ² a.	180
Abbildung 9.6:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 03 in kWh/m ² a.	181
Abbildung 9.7:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 04a in kWh/m ² a.	182
Abbildung 9.8:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 04b in kWh/m ² a.	183
Abbildung 9.9:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 05 in kWh/m ² a.	184
Abbildung 9.10:	Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 06 in kWh/m ² a.	185
Abbildung 9.11:	Primärenergiebedarf für Heizwärme in kWh/m ² a der einzelnen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich	186
Abbildung 9.12:	Entwurfsskizze des Fritz-Dächert-Weg 56-58 als Plusenergiegebäude, Grundriss 1. und 2. OG, Ansicht West, Ansicht Süd, Schnitt A-A und Visualisierung	187
Abbildung 9.13:	monatlicher PV-Ertrag in kWh in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Dachfläche bei 100 m ² PV-Fläche je Himmelsrichtung	193
Abbildung 9.14:	Solare Einstrahlung auf das energy+Home bei Ost-/West und Nord-/Süd Ausrichtung bei 15° und 30° Dachneigung	194
Abbildung 9.15:	Monatlicher Strombedarf und -erzeugung der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg in kWh/m ² a	194
Abbildung 9.16:	Monatliche Bilanz von Eigennutzung, Netzbezug und Netzeinspeisung der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg.	195
Abbildung 9.17:	Monats- und Stundenbilanz der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg mit Angabe der prozentualen Anteile von Eigennutzung, Netzbezug und Einspeisung.	195
Abbildung 9.18:	Vergleich von Energiebedarf und Ertrag der PV-Anlage in Abhängigkeit des Flächenverbrauchs pro Bewohner	197
Abbildung 9.19:	Notwendige PV-Fläche des Referenzgebäudes in Abhängigkeit des Flächenverbrauchs der Bewohner	198
Abbildung A.1:	Ozonabbaupotential, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert	216
Abbildung A.2:	Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent	216
Abbildung A.3:	Photochemische Oxidantienbildungspotential POCP, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert	217
Abbildung A.4:	Anteil der Bauteile am POCO in Prozent	217
Abbildung A.5:	Versauerungspotential AP, Vergleich Sanierung EnEV / DGNB Referenzwert	218
Abbildung A.6:	Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent	218
Abbildung A.7:	Eutrophierungspotential, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert	219
Abbildung A.8:	Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent	219

Abbildung A.9:	Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential Sanierung nach EnEV	220
Abbildung A.10:	Gesamtwirkungsabschätzung photochemisches Oxidantienbildungspotential Sanierung nach EnEV	220
Abbildung A.11:	Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential Sanierung nach EnEV	221
Abbildung A.12:	Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungs-	221
Abbildung A.13:	Ozonabbaupotential ODP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert	222
Abbildung A.14:	Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent	222
Abbildung A.15:	Photochemische Oxidantienbildungspotential POCP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert	223
Abbildung A.16:	Anteil der Bauteile am POCP in Prozent	223
Abbildung A.17:	Versauerungspotential AP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert	224
Abbildung A.18:	Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent	224
Abbildung A.19:	Eutrophierungspotential EP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert	225
Abbildung A.20:	Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent	225
Abbildung A.21:	Gesamtwirkungsabschätzung ODP Abbruch und Neubau Plusenergie	226
Abbildung A.22:	Gesamtwirkungsabschätzung POCP Abbruch und Neubau Plusenergie	226
Abbildung A.23:	Gesamtwirkungsabschätzung AP Abbruch und Neubau Plusenergie	227
Abbildung A.24:	Gesamtwirkungsabschätzung EP Abbruch und Neubau Plusenergie	227
Abbildung A.25:	Ozonabbaupotential ODP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert	228
Abbildung A.26:	Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent	228
Abbildung A.27:	POCP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert	229
Abbildung A.28:	Anteil der Bauteile am POCP in Prozent	229
Abbildung A.29:	Versauerungspotential AP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert	230
Abbildung A.30:	Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent	230
Abbildung A.31:	Eutrophierungspotential EP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert	231
Abbildung A.32:	Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent	231
Abbildung A.33:	Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential Abbruch und Neubau EnEV	232
Abbildung A.34:	Gesamtwirkungsabschätzung photochemisches Oxidantienbildungspotential Abbruch und Neubau EnEV	232
Abbildung A.35:	Gesamtwirkungsabschätzung AP Abbruch und Neubau EnEV	233
Abbildung A.36:	Gesamtwirkungsabschätzung EP Abbruch und Neubau EnEV	233
Abbildung A.37:	Entwicklung des ODP im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	234
Abbildung A.38:	Gegenüberstellung des ODP der Sanierungs- und Neubauvarianten	234
Abbildung A.39:	Entwicklung POCP im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	235
Abbildung A.40:	Gegenüberstellung des POCP der Sanierungs- und Neubauvarianten	235
Abbildung A.41:	Entwicklung AP im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	236
Abbildung A.42:	Gegenüberstellung des AP der Sanierungs- und Neubauvarianten	236
Abbildung A.43:	Entwicklung EP im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	237
Abbildung A.44:	Gegenüberstellung des EP der Sanierungs- und Neubauvarianten	237
Abbildung A.45:	Kostengruppe 300 Baukonstruktion, Verteilung der Kosten	240
Abbildung A.46:	Kostengruppe 400 Technische Anlagen, Verteilung der Kosten	240
Abbildung A.47:	Kostengruppe 500 Außenanlagen, Verteilung der Kosten	240
Abbildung A.48:	Herstellungskosten nach Gewerken sortiert	241
Abbildung A.49:	Kostengruppe 300 Baukonstruktion, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes	250
Abbildung A.50:	Kostengruppe 400 Technische Anlagen, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes	250
Abbildung A.51:	Kostengruppe 300 Baukonstruktion, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes	253
Abbildung A.52:	Technische Anlagen, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes	253

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Im Untersuchungsrahmen enthaltene Bauteile, nach DIN 276 gegliedert	22
Tabelle 2.2:	Untersuchte Bauteile und deren Lebensdauer gemäss BBSR nach Kostengruppen gegliedert	34
Tabelle 2.3:	Umweltwirkungen, Referenzeinheiten und Lebensdauer der verbauten Baustoffe im energy+Home	35
Tabelle 2.4:	Referenzwerte der betrachteten Umweltwirkungspotentiale, ermittelt nach DGNB Kriterium ENV 1.1	41
Tabelle 2.5:	Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home	42
Tabelle 2.6:	ODP der Gebäudekonstruktion des energy+Home	44
Tabelle 2.7:	POCP der Gebäudekonstruktion des energy+Home	46
Tabelle 2.8:	AP der Gebäudekonstruktion des energy+Home	48
Tabelle 2.9:	EP der Gebäudekonstruktion des energy+Home	50
Tabelle 2.10:	PEI der Gebäudekonstruktion des energy+Home	52
Tabelle 2.11:	Gesamtwirkungsabschätzung des energy+Home	56
Tabelle 2.12:	Gesamtwirkungsabschätzung des Referenzgebäudes	57
Tabelle 3.1:	Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten der Sanierungsvarianten	74
Tabelle 3.2:	Gesamtwirkungsabschätzung Sanierung nach EnEV	78
Tabelle 3.3:	Gesamtwirkungsabschätzung Sanierung und Neubau Plusenergiehaus	84
Tabelle 3.4:	Gesamtwirkungsabschätzung Abbruch und Neubau nach EnEV	90
Tabelle 4.5:	Ver- und Entsorgungskosten des energy+Home	104
Tabelle 4.6:	Lebenszykluskosten des energy+Home über 50 Jahre	107
Tabelle 4.7:	Differenzierung der Kostenkategorien	114
Tabelle 4.8:	Sanierungskosten des energy+Home, nach Kostenkategorien getrennt	114
Tabelle 4.9:	Erweiterte Lebenszykluskostenanalyse	117
Tabelle 4.10:	Kapitalgebundene Kosten der energieeffizienzbedingten Kosten	120
Tabelle 4.11:	Kosten der eingesparten kWh Endenergie	122
Tabelle 5.1:	Kostenschätzung einer Sanierung nach EnEV	124
Tabelle 5.2:	Kostenschätzung für Abbruch und Neubau im EnEV-Standard	125
Tabelle 5.3:	Kostenschätzung für Abbruch und Neubau im Plusenergie-Standard	126
Tabelle 5.4:	Herstellungskosten alternativer Sanierungs- bzw. Neubaustrategien	127
Tabelle 5.5:	Lebenszykluskosten der Sanierungs- bzw. Neubauvarianten im Vergleich	129
Tabelle 5.6:	Kostenvergleich	130
Tabelle 5.7:	Normalherstellungskosten zur Bestimmung des Sachwertes der baulichen Anlagen des Gebäudebestandes	135
Tabelle 5.8:	Normalherstellungskosten zur Bestimmung des Sachwertes der baulichen Anlagen des energy+Home	130
Tabelle 7.7:	Prognostizierte und gemessene Stromerzeugung und -verbrauch	150
Tabelle 7.8:	Prognostizierte und gemessene Wärmeerzeugung und -speicherung	151
Tabelle 7.9:	Prognostizierte und gemessene Hilfsenergien	152
Tabelle 7.10:	Prognostizierte und gemessene Energieverbrauch sonstiger Verbraucher	153
Tabelle 7.11:	Prognostizierte und gemessene monatliche Innenraumtemperaturen	154
Tabelle 8.1:	U-Werte des Bestandes und Mindestanforderungen nach EnEV 2014	168
Tabelle 8.2:	Energiebilanz des bestehenden Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg 56-58	170
Tabelle 8.3:	Bauteilkennwerte von Gebäuden der 50er Jahre - Vergleich IWU, BMVBS und Fritz-Dächert-Weg	172
Tabelle 9.5:	energetische Kennwerte des Bestandsgebäudes	176
Tabelle 9.6:	energetische Kennwerte der Maßnahme 01a	177
Tabelle 9.7:	energetische Kennwerte der Maßnahme 01b	178
Tabelle 9.8:	energetische Kennwerte der Maßnahme 02	179
Tabelle 9.9:	energetische Kennwerte der Maßnahme 03	180
Tabelle 9.10:	energetische Kennwerte der Maßnahme 04a	181

Tabelle 9.11:	energetische Kennwerte der Maßnahme 04b	182
Tabelle 9.12:	energetische Kennwerte der Maßnahme 05	183
Tabelle 9.13:	energetische Kennwerte der Maßnahme 06	184
Tabelle 9.14:	Kostenberechnung nach DIN 276 und DIN 18960 für die Sanierung zum Geschosswohnungsbau-Plusenergiegebäude	188
Tabelle 9.14:	Vergleich von A/V Verhältnis, Energiebezugsfläche und Gebäudehüllfläche von EFH und MFH	191
Tabelle A.1:	Herstellungskosten des energy+Home, KG 300 Baukonstruktion	238
Tabelle A.2:	Herstellungskosten des energy+Home, KG 400 Technische Anlagen	239
Tabelle A.3:	Herstellungskosten des energy+Home, KG 500 Außenlagen	239
Tabelle A.4:	Herstellungskosten nach Gewerken sortiert	241
Tabelle A.5:	Inspektion und Wartung - Investitionskosten der KG 300 und 400 nach DIN 276 in Form der KG 352 und 353 nach DIN 18960	243
Tabelle A.6:	Instandsetzungskosten Technische Anlagen - KG 400 nach DIN 276 in Form der KG 420 nach DIN 18960	245
Tabelle A.7:	Instandsetzung - Investitionskosten der KG 300 nach DIN 276 in Form der KG 410 nach DIN 18960	246
Tabelle A.8:	Instandsetzungskosten - KG 300 nach DIN 276 in Form der KG 410 nach DIN 18960	247
Tabelle A.9:	Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des Einfamilienhauses im EnEV-Standard	248
Tabelle A.10:	Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des Einfamilienhauses im EnEV-Standard	251

IV. Zusammenfassung

Mit der Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Einfamilienhauses aus den 1970er Jahren zu einem Plusenergiegebäude, dem energy+Home, wird das ökologische, ökonomische und energetische Potential von Bestandssanierungen hin zu Plusenergiegebäuden aufgezeigt und eine Grundlage für die Sanierung vergleichbarer Bauten geschaffen. Der Nachweis der Übertragbarkeit der Sanierungsstrategie auf eine Geschosswohnungsbau-Zeile aus den 1950er Jahren unterstützt diese Zielsetzung.

Gegenstand der Untersuchung ist ein typisches Einfamilienhaus sowie eine typische Geschosswohnungsbau-Zeile im zentralen Rhein-Main-Gebiet. Beim energy+Home handelt es sich um ein Reihendhaus in Hanglage und Ost/West Ausrichtung mit einem leicht geneigten Satteldach. Das in Massivbauweise errichtete Gebäude wurde vor der Sanierung mit Heizöl beheizt und verfügte über eine Wohnfläche von 176 m². Es kann damit als repräsentatives bzw. typisches Einfamilienhaus aus den 70er Jahren bezeichnet werden. Die Geschosswohnungsbau-Zeile ist ebenfalls in Massivbauweise errichtet, Ost-/West ausgerichtet und weist 3 Vollgeschosse sowie ein 48° geneigtes Satteldach auf. Auch dieses Gebäude kann als typisch für seine Baualtersklasse bezeichnet werden.

Das Einfamilienhaus wurde im Jahr 2011 modernisiert und dabei die Wärmeverluste der Gebäudehülle reduziert, sowie die veraltete Anlagentechnik durch die Verwendung ausschließlich regenerativer Energien zur Deckung des Energiebedarfs ersetzt. Damit einher ging eine architektonische Umwandlung des Gebäudes, welche zu erhöhter Wohnqualität und einer nachhaltigen Nutzung des Gebäudes führt. Eine detaillierte Erläuterung der **Sanierungsmaßnahmen** ist in **Kapitel 1** dargestellt.

In **Kapitel 2** werden die im Gebäude enthaltenen Baustoffarten und -massen ermittelt sowie die entsprechenden Umweltwirkungen der einzelnen Baustoffe dargestellt. Dies dient als Grundlage für eine **Ökobilanzierung**, welche die potentiellen Umweltwirkungen des Gebäudes im gesamten Lebenszyklus ermittelt und einem Referenzgebäude, welches ein durchschnittliches Einfamilienhaus in Deutschland darstellt, gegenübergestellt. Die Gesamtwirkungsabschätzung von Gebäudekonstruktion und -betrieb zeigt die ökologische Wirksamkeit der Sanierung. In sämtlichen betrachteten Wirkungskategorien liegen die Umweltwirkungen des energy+Home deutlich unterhalb denen des Referenzgebäudes. Dies ist vor allem auf die Nutzung der bestehenden Gebäudesubstanz sowie der energetischen Ertüchtigung der Außenbauteile zurückzuführen, aus der ein niedriger Heizwärmebedarfs resultiert. In Kombination mit der Nutzung regenerativer Energien durch die Wärmepumpe sowie der Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik-Anlage resultieren die geringen Umweltwirkungen der Sanierung. Beispielsweise liegt das Treibhauspotential des energy+Home bei lediglich ca. 10% und der Primärenergiebedarf bei ca. 14% des Referenzwertes.

Der Frage, ob die Sanierung zum energy+Home gegenüber einer Sanierung nach EnEV und gegenüber einem Abbruch und Neubau des Gebäudes im EnEV- bzw. Plusenergie-Standard aus **ökologischer Sicht** sinnvoll ist wird in **Kapitel 3** nachgegangen. Dabei lässt sich feststellen, dass Sanierungen aufgrund der Nutzung der bereits vorhandenen Bausubstanz gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes grundsätzlich geringere Umweltwirkungen im Bereich der Gebäudekonstruktion aufweisen. Dieser als positiv zu bewertende Effekt lässt sich durch die Entscheidung zur Sanierung zum Plusenergiegebäude nochmals deutlich steigern. Es zeigt sich, dass die Gesamtwirkungsabschätzung über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren für diese Sanierung gegenüber den EnEV-Varianten in allen Wirkungskategorien deutlich geringere Werte aufweist. Der Mehraufwand für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion amortisiert sich dabei gegenüber der EnEV-Sanierung nach 17 Jahren. Im Vergleich mit den drei betrachteten Varianten weist die Sanierung zum energy+Home die geringsten Umweltwirkungen auf und spart im Betrachtungszeitraum gegenüber dem unsanierten Bestand ca. 7.000 kg CO₂/m²_{NGF} ein.

Der **ökonomische Aspekt** der Sanierung wird in **Kapitel 4** betrachtet. Dabei werden zunächst die Investitionskosten der Sanierung auf einen gehobenen Wohnstandard ermittelt, welche ca. 1.300 €/m² für die Baukonstruktion und die technischen Anlagen betragen. Darauf aufbauend werden die Nutzungskosten über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt, aufgeteilt in Betriebs- und Instandsetzungskosten. Bei den resultierenden Lebenszykluskosten entfallen etwa zwei Drittel auf die Baukosten und lediglich ca. 10% auf die Betriebskosten. Die restlichen 25% gehen zulasten von Inspektion, Wartung und Instandsetzung. In Kapitel 4.6 erfolgt eine differenzierte Betrachtung, bei der die Investition in energieeffizienzbedingte Kosten, Instandsetzungskosten und Modernisierungskosten unterteilt werden. Die anschließende Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigt, daß trotz der verhältnismäßig hohen Investitionskosten die Sanierung zum energy⁺Home als wirtschaftlich zu bezeichnen ist.

Darauf aufbauend erfolgt in **Kapitel 5** ein **ökonomischer Vergleich** der Sanierung zum energy⁺Home mit einer Sanierung nach EnEV und einem Abbruch und Neubau des Gebäudes im EnEV-Standard und als Plusenergiegebäude. Die Analyse zeigt, daß sich die erhöhten Herstellungskosten gegenüber einer EnEV-Sanierung aufgrund niedrigerer Betriebskosten nach ca. 50 Jahren und gegenüber dem unsanierten Bestand nach ca. 40 Jahren amortisieren. Der Abbruch und Neubau des Gebäudes führt zu erhöhten Lebenszykluskosten, welche im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren nicht amortisiert werden.

Die **Gegenüberstellung und Bewertung von ökologischen und ökonomischen Kennwerten** in **Kapitel 6** dient dem abschließenden Vergleich der zuvor ermittelten Daten. Dabei wird das Treibhauspotential und die Lebenszykluskosten der Sanierung zum energy⁺Home einer Sanierung nach EnEV und eines Abbruchs und Neubaus des Gebäudes prozentual gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Sanierung zum energy⁺Home zwar ein höheres Treibhauspotential und höhere Kosten gegenüber der EnEV-Sanierung in der Herstellung aufweist, daß aber am Ende des Lebenszyklus sich die Mehrkosten wieder amortisieren und das Treibhauspotential der energy⁺Home Sanierung um den Faktor 6 kleiner ist als bei der EnEV-Sanierung. Die Varianten „Abbruch und Neubau“ weisen sowohl ein höheres Treibhauspotential, als auch höhere Lebenszykluskosten auf. Gegenüber dem unsanierten Bestand weisen beide Sanierungsvarianten geringere Lebenszykluskosten auf tragen wesentlich zur Reduzierung von CO₂-Emissionen bei.

Die Ergebnisse aus dem **Monitoring** des Betriebsjahres 2014 werden in **Kapitel 7** dargestellt und bilden die Grundlage der energetischen Untersuchung der Sanierung. Dabei werden die Prognose von Stromverbrauch und -erzeugung, Wärmeerzeugung und -speicherung, Hilfsenergien und die Effizienz der Wärmerückgewinnung sowie sonstiger Energieverbraucher den gemessenen Werten gegenübergestellt. Der gemessene Stromertrag der PV-Anlage übertrifft die Erwartungen, welche im Vorfeld der Sanierung an die Anlage gestellt wurden um 3% und liefert ca. 10.190 kWh Endenergie, welche zu 22% selbst verbraucht werden. Dem Stromertrag gegenüber steht ein Gesamtenergiebedarf, welcher aufgrund des erhöhten Heizenergiebedarfs der Nutzer ca. 14% höher ist als die prognostizierten Werte. Durch die Aufsummierung von Stromertrag und Gesamtenergiebedarf lässt sich der Nettoenergieverbrauch ermitteln, welcher in der Jahressumme trotz dem erhöhten Bedarf einen negativen Wert aufweist und damit das Plusenergieniveau des energy⁺Home belegt.

Auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln durchgeführten analytischen Betrachtungen wird in **Kapitel 8 und 9** untersucht, wie sich das Konzept des energy⁺Home auch auf die Sanierung eines Geschosswohnungsbaus übertragen lässt und welchen Einfluss verschiedene bauliche Maßnahmen sowie die Parameter Kompaktheit, Ausrichtung, Eigenbedarfsanteil, Stromspeicherung und Belegungsdichte auf die Konzeption bzw. die Energiebilanz haben. Diese Untersuchung wird anhand einer typischen, freistehenden Geschosswohnungsbauzeile aus den 50er Jahren durchgeführt, deren Konstruktion und energetische Qualität in

Kapitel 8 ermittelt und mit bekannten Annahmen dieser Baualtersklasse verglichen wird. In Kapitel 9 wird ein Konzept für eine mögliche Sanierung erarbeitet und der untersuchte Gebäudetyp mit dem energy+Home verglichen.

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Untersuchungen werden in **Kapitel 10 Strategien und Empfehlungen für die Sanierung** von Einfamilienhäusern aus den 70er Jahren und Geschosswohnungsbau-Zeilen aus den 50er Jahren abgeleitet sowie **Schlussbetrachtungen** vorgenommen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass Sanierungen von Einfamilienhäusern aus den 70er Jahren hin zu Plusenergiegebäuden ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar sind, und dass sich das Konzept des energy+Home auch auf Geschosswohnungsbau-Zeilen der 50er Jahre übertragen lässt. Das bessere Verhältnis solaraktive Hüllfläche zu Energiebezugsfläche sowie die geringere Wohndichte führen dazu, dass es einfacher ist, ein Einfamilienhaus zum Plusenergiegebäude umzuwandeln als einen Geschosswohnungsbau. Unabhängig davon haben eine Vielzahl von Faktoren Einfluss auf die Bilanzierung, und es muss im Einzelfall geprüft werden, ob und wie ein Gebäude zum Plusenergiegebäude umgewandelt werden kann. Die untersuchte Geschosswohnungsbau-Zeile aus den 50er Jahren ist dabei durchaus für die Übertragung des energy+Home Konzeptes geeignet.

Die Umwandlung und Nutzung bestehender Bausubstanz bietet sowohl gegenüber dem un sanierten Bestand, als auch gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes die Möglichkeit, langfristig Kosten und Graue Energie einzusparen. Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung sollte dabei immer sowohl ökonomische wie ökologische Gesichtspunkte berücksichtigen und diese als Entscheidungsgrundlage ansetzen. Da die geschaffenen Qualitäten für die nächsten 40 bis 50 Jahre den Wohnanforderungen gerecht werden müssen, bedarf es zudem bei jedem Eingriff immer gleichzeitig einer Aufrechterhaltung oder Verbesserung der architektonischen Qualität des Bestandes.

1 Einleitung

Mehr als die Hälfte aller Wohneinheiten in Deutschland wurden vor Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung im Zeitraum zwischen 1949 und 1978 erstellt und sind verantwortlich für fast ein Drittel des Endenergieverbrauchs. Dieser Wohngebäudebestand verursacht dadurch auch einen Großteil aller energiebedingten Treibhausgasemissionen.¹ Eines der wichtigsten Ziele und zugleich eine der bedeutendsten Maßnahmen im Energiekonzept Deutschlands ist daher die Reduktion des Energiebedarfs dieser Gebäude.

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von mindestens 40% bis 2020 und 80% bis 2050 gegenüber dem Stand von 1990 zu erreichen.² Um diese Klimaschutzziele realisieren zu können ist eine energetische Verbesserung des Gebäudebestandes ein zentraler Ansatz, jedoch ist die heutige Sanierungsquote nicht ausreichend, um dieses Ziel rechtzeitig zu erreichen. Neben einer Steigerung der Quote ist die wirtschaftliche Verbesserung der energetischen Qualität von sanierten Gebäuden das effektivste Mittel, die ehrgeizigen Ziele noch zu erreichen.

Um den hohen Energieverbrauch von Bestandsgebäuden zu reduzieren, haben sich energetische Sanierungs-Strategien etabliert, die aus einer Kombination der Verringerung von Wärmeverlusten und der Nutzung von energieeffizienter Anlagentechnik zur Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen oder der Nutzung regenerativer Energien bestehen.

Die bisher veröffentlichten Beispielsanierungen von Bestandsgebäuden weisen in den letzten Jahren durchschnittlich eine rechnerische Reduktion des Heizenergiebedarfs von etwa 85% auf, da dies in den meisten Fällen als die Grenze der Wirtschaftlichkeit für energetische Sanierungsmaßnahmen dargestellt wird. Um das globale Klimaziel eines annähernd CO₂-neutralen Gebäudebestandes im Jahr 2050 und die Begrenzung der globalen Erwärmung zu erreichen, ist die Reduktion des Heizwärmebedarfs von Bestandsgebäuden um 85% jedoch nicht ausreichend. Vielmehr müssen bestehende Gebäude in einen klimaneutralen und CO₂-freien Betrieb überführt werden, der im besten Fall noch zusätzlich Energie erzeugt. Im Hinblick auf den Wohnungsneubau zeichnet sich bereits eine Entwicklung zum Plusenergiestandard ab. Für Bestandsgebäude gibt es hingegen bisher kaum Beispiele für die Modernisierung zu einem Plusenergiegebäude.

Die Methodik der Umwandlung eines Bestandsgebäudes in ein CO₂-neutrales Gebäude, welches im Betrieb mehr Energie erzeugt als es verbraucht, soll mit dieser Arbeit erfasst werden. Dabei werden die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Sanierung in Abgrenzung zu einem Abbruch und Neubau des Gebäudes unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten aufgezeigt.

Am Beispiel des energy+Home, eines im Jahr 2011 sanierten Einfamilienhauses aus den 70er Jahren, wurde erstmalig demonstriert, wie für ein repräsentatives Bestandsgebäude mit Erdölversorgung eine CO₂-neutrale Energieversorgung wirtschaftlich umsetzbar und mit höchster Komfort- und Wohnqualität verbunden werden kann. Dabei geht eine architektonische Aufwertung der äußeren Erscheinung und der inneren Struktur einher mit der Umwandlung des Hauses in ein energieeffizientes, emissionsarmes und zeitgemäßes Wohngebäude, mit dem Ziel, die Nutzungsdauer um mindestens weitere 50 Jahre zu erhöhen. Während der Brennstoffverbrauch für Heizung und Warmwasser vor der Sanierung noch bei 5.650 Litern Heizöl pro Jahr lag - was einem CO₂-Äquivalent von etwa 17.500 kg pro Jahr entspricht - so erzeugt das Gebäude nach der Sanierung pro Jahr mehr Energie, als für Beheizung, Warmwasser- und Stromversorgung benötigt werden. Die überschüssige Energiemenge kann in das Stromnetz eingespeist oder für den Betrieb eines Elektro-PKW genutzt werden.³

1 Vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH: dena-Gebäudereport 2012, S. 11 ff.

2 Vgl. www.bmub.bund.de/P215/ [13.07.2015].

3 Vgl. Tichelmann, 2014.

Der Verzicht auf Erdöl als nichterneuerbarer Energieträger führt zur Vermeidung von toxischen Raumluftemissionen durch die im Haus gelagerten Heizöltanks. Die dafür notwendigen Primärinvestitionen werden durch die Vergrößerung der Wohnfläche infolge der Umnutzung der bisherigen Brennstofflagerflächen amortisiert.

Ein weiterer innovativer Ansatz beim energy+Home ist die Berücksichtigung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten bei der Auswahl der eingesetzten Baustoffe und Baukonstruktionen. So wurde beispielsweise im Vorfeld der Maßnahme anhand einer Ökobilanz überprüft, welcher Außenwandaufbau die geringsten klimaschädlichen Emissionen bedingt.

Zudem wurde beim Rückbau der bestehenden Konstruktion eine Wiederverwendung der Baustoffe angestrebt. Beispielsweise wurden entfernte Holzbalken von Zwischendecken verwendet, um damit die neuen Außenwände der Wohnraumerweiterung im Untergeschoss zu erstellen.

Alternativ zur Sanierung des bestehenden Gebäudes wäre ein Abriss der bestehenden Bausubstanz und die Erstellung eines Ersatzneubaus ein möglicher Lösungsweg gewesen. Dabei spielen immobilienökonomische und baubetriebswirtschaftliche Fragestellungen sowie die Rahmenbedingungen des bestehenden Baurechts eine entscheidende Rolle bei der Wahl der richtigen Sanierungsstrategie. Die Auswirkungen solcher rechtlichen und betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf den Entscheidungsprozess sind neben den ökologischen Überlegungen ein sehr wichtiger Faktor im Umgang mit bestehender Bausubstanz.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Frage nachgegangen, welche Umweltwirkungen aus der Sanierung zu einem Plusenergiegebäude entstehen und wie diese im Verhältnis zum unsanierten Bestand bzw. einem durchschnittlichen Einfamilienhaus in Deutschland stehen. Darüber hinaus wird untersucht, inwiefern der Abriss und Neubau des Gebäudes oder eine Sanierung nach EnEV als alternative Sanierungsstrategien infrage kommen, um daraus das ökologische Potential von Sanierungen nach dem Vorbild des energy+Home abzuleiten. Der ökonomische Aspekt der Sanierung wird anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Lebenszykluskostenanalyse erforscht.

Der Frage, inwiefern die Erkenntnisse aus dieser Sanierung auf eine beispielhafte Geschosswohnungsbau-Zeile übertragen werden können, wird im abschließenden Teil der vorliegenden Arbeit nachgegangen. Dazu wird die beispielhafte Konzeption der Sanierung eines repräsentativen Geschosswohnungsbaus aus den 50er Jahren durchgeführt, und dabei herausgearbeitet, welche Faktoren die Energiebilanz der beiden Gebäudetypen beeinflussen.

1.1 Zielsetzung

Ziel der Untersuchungen ist die Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten einer energetischen Sanierungen hin zu einem Plusenergiegebäude. Diese komplexe Betrachtung sich gegenseitig überlagernder energetischer, ökologischer und ökonomischer Einflussfaktoren soll einen Beitrag zur Nachhaltigkeitsdebatte in Deutschland leisten und neue Wege im Umgang mit bestehender Bausubstanz aufzeigen. Dabei wird analysiert, welche Faktoren einen Einfluss auf die Umweltwirkungen, Lebenszykluskosten und Energieverbrauch einer Sanierung und den nachfolgenden Gebäudebetrieb haben und wie sich diese auswirken.

Die Arbeit soll das Potential von Sanierungen hin zu Plusenergiegebäuden untersuchen, und Klarheit darüber schaffen, welche Chancen in der Aktivierung bestehender Bausubstanz liegen.

Es bedarf in der Öffentlichkeit vorgestellter und diskutierter Modellvorhaben, die sowohl die energetischen, ökologischen als auch die ökonomischen Aspekte einer Modernisierung von Bestandsgebäude in CO₂-neutrale Gebäude dokumentieren, um energetisch höherwertige Zielsetzungen bei zukünftigen Gebäudesanierungen zu bewirken. Durch die Dokumentation einer realen Sanierung eines Bestandsgebäudes zu einem Plusenergiegebäude und die Darstellung von Planungsempfehlungen für eben solche Sanierungen wird ein verstärktes Interesse von Bauherren, Planern und Ausführenden erwartet.

In Deutschland existieren zur Zeit ca. 6 Mio. Einfamilienhäuser, welche mit einer Ölheizung befeuert werden.⁴ Da ein großer Teil dieses Gebäudebestands eine vergleichbare energetische Qualität aufweist wie das gewählte Referenzgebäude aus den 1970er Jahren, sind die Ergebnisse der Untersuchung auf eine entsprechend große Anzahl von Gebäuden übertragbar.

Die Gegenüberstellung der Varianten Sanierung zum Plusenergiegebäude, Sanierung zum EnEV-Standard Haus und der Variante Abriss und Neubau eines Plusenergiegebäudes bzw. eines EnEV-Standard Hauses sollen eine fundierte Entscheidungsgrundlage unter Berücksichtigung energetischer, ökonomischer und ökologischer Kriterien für zukünftige Sanierungen bilden.

Mithilfe einer Ökobilanzierung lassen sich die potentiellen Umweltwirkungen eines Gebäudes über dessen gesamten Lebenszyklus, also vom Ressourcenabbau der verwendeten Materialien über die Herstellung, dessen Betrieb, den Rückbau und die Entsorgung des Gebäudes darstellen. Das methodische Vorgehen zur Bewertung dieser umweltbezogenen Qualität ist in DIN EN 15978 geregelt. Auf Grundlage der ermittelten Baustoffe und Baumassen wird daher eine Ökobilanzierung des energy+Home vorgenommen und die Ergebnisse dieser Untersuchung mit alternativen Sanierungsvarianten verglichen.

Zur Bewertung, ob die Sanierung aus wirtschaftlicher Sicht vertretbar ist wird zudem die ökonomischen Qualität der Sanierung untersucht. Dazu werden die Investitionskosten der Sanierung auf einen gehobenen Wohnstandard ermittelt, sowie neben einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Lebenszykluskosten (LCC) über einen Zeitraum von 50 Jahren abgeschätzt. Darauf aufbauend erfolgt ein ökonomischer Vergleich der Sanierung zum energy+Home mit einer Sanierung nach EnEV und einem Abbruch und Neubau des Gebäudes im EnEV-Standard und als Plusenergiegebäude.

Die Gegenüberstellung und Bewertung von ökologischen und ökonomischen Kennwerten dient dem Vergleich der zuvor ermittelten Daten und als Ausgangspunkt von Empfehlungen zur Sanierung von Einfamilienhäusern hin zu Plusenergiegebäuden.

Zur Beurteilung der energetischen Qualität des Gebäudes werden die Ergebnisse aus dem Monitoring des Betriebsjahres 2014 dargestellt. Dabei werden die im Vorfeld der Sanierung durchgeführten Prognosen den nach der Sanierung gemessenen Werten gegenübergestellt. Dies dient zur Verifizierung der im Vorfeld der Sanierung durchgeführten Prognose des Energieverbrauchs und zum Nachweis des Plusenergiestandards.

Die konzeptionelle Übertragung der Sanierungsstrategie auf einen repräsentativen Geschosswohnungsbau aus den 50er Jahren gibt abschliessend einen Ausblick auf das Potential von Plusenergiesanierungen und zukünftige Fragestellungen, welche im vorliegenden Forschungsfeld zu beantworten sind.

4 Vgl. Destatis, Mikrozensus 2010, Tabelle 11.

1.2 Beschreibung zur Ausgangssituation / Stand der Technik

Zahlreiche Publikationen haben sich in den letzten Jahren mit dem Plusenergiestandard auseinandergesetzt und zu verschiedensten Definitionen des Begriffs geführt. Im Folgenden werden einige ausgewählte Beiträge zum Thema vorgestellt und deren Bedeutung für den Untersuchungsgegenstand herausgestellt. Eine Erläuterung der einzelnen Gebäudestandards bzw. Definitionen folgt in Kapitel 1.2.1 und eine Beschreibung normativer Voraussetzungen, welche die Grundlage der nachfolgenden Untersuchungen bilden in Kapitel 1.2.2. Verweise auf sonstige relevante Literatur werden in den jeweiligen Kapiteln gegeben.

- Ausgangsbasis der Arbeit bilden die Untersuchungen zum energy+Home, der ersten Sanierung eines Einfamilien-Wohnhauses zu einem Plusenergiegebäude mit Elektromobilität.⁵ Dieses Projekt ist in dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Programm zur messtechnischen Begleitung von Plusenergiegebäuden im Rahmen des Programms ZukunftBau aufgenommen und wurde in dem von der Deutschen Bundesumweltstiftung geförderten Forschungsprojekt „Ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Wohngebäudes zu einem Plusenergie-Haus mit Elektromobilität. Anwendungsempfehlungen für vergleichbare Bauten“ hinsichtlich seiner ökologischen und ökonomischen Qualität untersucht. Teile der vorliegenden Dissertation wurden vom Verfasser im Rahmen dieses Forschungsprojektes erstellt und bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit.⁶

- Im Rahmen des Modellvorhabens „Niedrigenergiehaus im Bestand“⁷ der Deutschen Energie Agentur (dena) wird anhand von rund 400 Best-Practice-Beispielen gezeigt, wie das vorhandene Einsparpotenzial im Gebäudebereich gehoben werden kann, die im Modellvorhaben sanierten Wohngebäude unterschreiten die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 an vergleichbare Neubauten jedoch nur im Schnitt um 45 Prozent. Dies wird gleichzeitig als Grenze des wirtschaftlich machbaren dargestellt. Konzepte zur Sanierung eines Bestandsgebäudes in ein Plusenergiegebäude wurden in der Studie nicht betrachtet.

- Auf dem Weg zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands ist der KfW55-Standard nicht ausreichend. Es müssen Konzepte entwickelt und nachgewiesen werden, dass auch das „Niedrigst-Energiehaus im Bestand“ bzw. das „Effizienzhaus-Plus im Bestand“ heute schon umsetzbar, wirtschaftlich tragfähig und ökologisch nachhaltig ist. Dieses Ziel wird mit der dena-Studie „Auf dem Weg zum Effizienzhaus Plus“⁸ verfolgt. Anhand von 36 Ein- und Mehrfamilienhäusern werden solche Konzepte betrachtet, die Best-Practice-Lösungen für nahezu klimaneutrale Energiestandards bei Neubauten und lediglich einer einzigen Sanierung, dem energy+Home, zeigen. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass bis zum Standard Effizienzhaus 70 im Mietwohnbereich energetische Sanierungsmaßnahmen wärmemietenneutral umgesetzt werden können.⁹ Konzepte zur Sanierung eines Bestandsgebäudes hin zu einem Plusenergiegebäude wurden in der Studie nicht betrachtet und sind aufgrund dessen auch nicht Thema in den Diskussionen der am Wohnungsmarkt beteiligten Verbände und Interessengemeinschaften. Am Beispiel des energy+Home soll gezeigt werden, dass das KfW-Effizienzhaus 70 nicht die Grenze für wirtschaftliche energetische Modernisierungen darstellt, sondern dass für einen relativ großen Gebäudebestand aus den 70er Jahren auch eine Modernisierung zu einem Plusenergiegebäude wirtschaftlich durchführbar ist und sogar wirtschaftlicher als eine Standardsanierung nach EnEV oder KfW 70 sein kann. Die hierzu erforderlichen Maßnahmen und Konzepte sollen im Rahmen dieser Promotion wis-

5 Vgl. Tichelmann, 2014.

6 Vgl. Kurtz u.a., 2015.

7 Vgl. <http://www.dena.de/projekte/gebäude/modellvorhaben-effizienzhaeuser.html> [19.06.2015]

8 Vgl. <http://www.zukunft-haus.info/bauen-sanieren/beispielhaeuser/dena-modellvorhaben-effizienzhaeuser/aktuelle-projektphase-auf-dem-weg-zum-effizienzhaus-plus.html> [19.06.2015]

9 Vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH, dena-Sanierungsstudie Teil 1+2, dena-Gebäudereport, 2012.

senschaftlich aufbereitet und dokumentiert werden, um als allgemeiner Planungsleitfaden für zukünftige Sanierungen zu klimaneutralen Gebäuden zu dienen. Die Ausarbeitung der Übertragbarkeit des Konzepts und der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Vorhaben sind Teil der Untersuchungen.

- Das Förderprogramm Effizienzhaus Plus des BMUB fördert als Teil der Forschungsinitiative ZukunftBau die Realisierung und wissenschaftliche Begleitung und Auswertung von 35 Modellvorhaben im Effizienzhaus Plus Standard.¹⁰ Die Messwerte der Monitoring-Untersuchungen werden vom Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart dokumentiert und sind online abrufbar auf der Internetseite des BMUB.¹¹ Im Einfamilienhaus-Bereich ist auch hierbei das energy+Home das einzige Sanierungsobjekt. Im Mehrfamilienhaus-Segment werden zurzeit (2015) zwei Gebäudezeilen der Wohnungsbaugesellschaft Nuwog in Neu-Ulm zum Effizienzhaus Plus saniert. Erste Betriebsergebnisse und wissenschaftliche Auswertungen sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verfügbar.

- Hegger¹² untersucht mithilfe einer Ökobilanz die Umweltwirkungen eines Plusenergiegebäudes in Hamburg. Bei dem Gebäude handelt es sich um eine Sanierung mit Anbau, welcher im Rahmen der Velux Model Homes 2020 realisiert wurde. Als maßgebend für die positive Bilanz des Gebäudes identifiziert er die Nutzung der vorhandenen Primärstruktur des Bestandsgebäudes und die konsequente Ausführung des Neubaus als Holzbau. Im Bereich des Gebäudebetriebes wird die Qualität der Gebäudehülle, die Nutzung regenerativer Energie durch die eingebaute Wärmepumpe und Solarthermie sowie die PV-Anlage zur Deckung des Strombedarfs als ausschlaggebend für die positive Bilanz identifiziert. Eine ökonomische Untersuchung der Sanierung wird nicht vorgenommen.

- Mit dem Forschungsprojekt „Aktiv-Stadthaus“ des Fachgebietes Entwerfen und energieeffizientes Bauen der TU Darmstadt wurden die bisherigen Entwicklungen von Plus-Energie-Gebäuden im Einfamilienhausbau erstmals auf einen großmaßstäblichen Neubau als Geschosswohnungsbau im Innenstadtbereich übertragen und ihre Umsetzbarkeit in Form eines Demonstrativ-Bauvorhabens aufgezeigt.¹³ Beim Aktiv-Stadthaus handelt es sich um den Neubau eines MFH, das die ABG Frankfurt Holding in Frankfurt am Main errichtet. Es wird nach seiner Fertigstellung 2015 insgesamt acht Geschosse mit 74 Wohneinheiten erhalten. Bei dem Projekt handelt es sich um einen Neubau im innerstädtischen Bereich, daher sind nur einzelne Aspekte der Konzeption auf eine Geschosswohnungsbau-Sanierung übertragbar.

- Fisch¹⁴ untersucht das Betriebskonzept und den Energieverbrauch der ersten beiden Betriebsjahre eines Netto-Plusenergie-Gebäudes in Leonberg-Warmbronn im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBau. Die durchgeführten Untersuchungen analysieren jedoch lediglich den Energieverbrauch und nicht die ökologischen Auswirkungen bzw. die Lebenszykluskosten des Gebäudes, bei dem es sich auch um einen Neubau, und nicht um eine Sanierung handelt.

Wie der obigen Recherche zu entnehmen ist, liegen bisher keine ganzheitlichen Betrachtungen sowohl energetischer, ökologischer und ökonomischer Kennwerte von Sanierungen hin zu Plusenergiegebäuden vor.

10 Vgl. BMUB, 2014.

11 Vgl. <http://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/modellvorhaben/netzwerk/> [19.06.2015]

12 Vgl. Hegger, 2011.

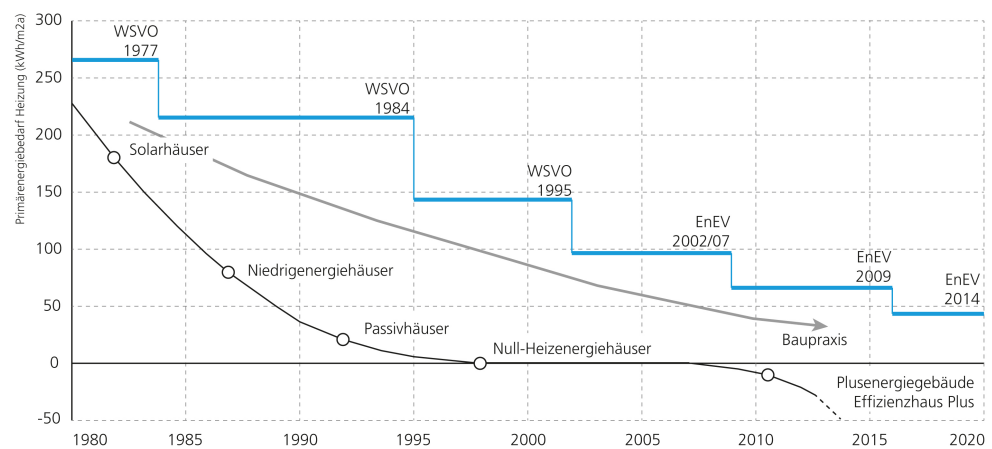
13 Vgl. Hegger 2014.

14 Vgl. Fisch, 2013.

1.2.1 Energetische Standards

Seit der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung Ende der 70er Jahre sind die Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden stetig gestiegen. Parallel dazu wurden die Möglichkeiten des energiesparenden Bauens kontinuierlich weiterentwickelt und haben zu immer neuen Gebäudetypen wie den Solarhäusern, den Niedrigenergiehäusern oder Passivhäusern geführt, welche den jeweiligen Stand des technisch machbaren demonstrieren und immer weniger Energie verbrauchen. Die Baupraxis bewegt sich dabei in diesem Spannungsfeld zwischen dem technisch machbaren einerseits und den gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen andererseits.

Abbildung 1.1: Entwicklung des energiesparenden Bauens am Beispiel des Primärenergiebedarfes für Heizung einer Doppelhaushälfte
Abbildung nach: BMUB, 2014, S.6.



Gegenüber den Anforderungen der derzeit gültigen EnEV 2014 tragen Passivhäuser durch ihr Konzept der strikten Bedarfsoptimierung erheblich zur Reduktion des Energiebedarfs bei. Die engen Vorgaben zur Erreichung dieses Standards lassen sich jedoch vor allem im Bestand nur schwer erreichen. Zum Beispiel ist die nachträgliche Dämmung der Bodenplatte oder die Vermeidung von Wärmebrücken im Bestand oft nur schwer umsetzbar. Kombiniert man jedoch das Konzept des Passivhauses mit den Ideen von Solarhäusern, so lassen sich Gebäude realisieren, die rechnerisch eine neutrale oder sogar positive Jahresenergiebilanz aufweisen.

Durch die EU-Gebäuderichtlinie 2010/31/EU und ihrer Forderung des Niedrigstenergiestandards sind die gesetzlichen Anforderungen nochmals gestiegen. Neben dem Bau von Niedrigenergiehäusern werden seit Beginn des 21. Jahrhunderts im Neubaubereich durchaus vermehrt Gebäude gebaut, welche im Jahresmittel mehr Energie erzeugen als sie verbrauchen. Dabei haben sich verschiedene Begrifflichkeiten und Standards herausgebildet, welche diese energetische Qualität beschreiben, teils jedoch unterschiedlich definiert sind. Im Folgenden werden daher Gebäudestandards erläutert, welche über die energetische Qualität eines Passivhauses oder eines Niedrigenergiegebäudes hinausgehen.

Plusenergiegebäude

Der Begriff Plusenergiegebäude, auch als Plus-Energie-Haus oder Energieplushaus bezeichnet, beschreibt ein Haus, das im Jahresmittel mehr Energie erzeugt, als es und seine Bewohner verbrauchen.¹⁵ Die Energieversorgung basiert meistens auf rein regenerativ erzeugter Energie aus Solarstrom, Erdwärme oder Holzpellets. Darüber hinaus zeichnet sich das Plusenergiegebäude durch die Verwendung natürlicher Baustoffe, Brauchwasserer-

15 Die Schreibweise 'Plusenergiehaus' wird oft als Synonym verwendet, wurde jedoch vom Freiburger Architekten Rolf Disch als Markenname registriert. (Vgl. www.plusenergiehaus.de, Stand 09.06.2015).

wärmung mithilfe solarthermischer Kollektoren, guter Tageslichtnutzung bei gleichzeitig hochwärmegedämmter Gebäudehülle sowie der Verwendung einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung aus. Eine eindeutige und verbindliche Definition des Begriffes mit Vorgaben zur Bauweise, Berechnungsmethodik bzw. eine allgemeingültige Beschreibung zum verwendeten Bilanzraum existiert nicht.

Effizienzhaus Plus

Der Effizienzhaus Plus Standard wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit als technologieoffenes Niveau beschrieben, welches sowohl einen negativen Jahres-Primärenergiebedarf, als auch einen negativen Jahres-Endenergiebedarf und die Einhaltung der Bedingungen der Energieeinsparverordnung voraussetzt.¹⁶ Als Bewertungsmethode ist ein Nachweis in Anlehnung an die Energieeinsparverordnung 2014 nach DIN V 18599 inklusive Haushaltsstrombedarf und abzüglich netzeingespeicher regenerativer Energieüberschüsse im Monatsbilanzverfahren zu führen und die Grundstücksgrenze als Bilanzgrenze anzusetzen. Als Nebenanforderung wird die Verwendung von Haushaltsgeräten der Energieeffizienzklasse A⁺⁺ sowie eine Ausweisung des Eigennutzungsgrades der generierten, erneuerbaren Energien gefordert.

Aktivhaus

Unter dem Titel Active House Alliance haben sich im Jahr 2010 verschiedene Akteure der Baubranche zusammengeschlossen, um einen ganzheitlichen Gebäudestandard zu definieren, der die Aspekte Energie, Raumklima und Umwelt umfasst und auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen beruht.¹⁷ Als Bilanzierungsmethode gelten die jeweils gültigen nationalen Regelwerke, wobei der Bilanzraum der EnEV in Deutschland um den Strombedarf für Haushaltsgeräte sowie die Gutschrift selbstgenerierter, regenerativ erzeugter Energien erweitert wird. Die Bewertung von Tageslicht, thermische Umgebung, Raumluftqualität (CO₂-Gehalt), Lärm und Akustik soll den Komfort und ein gesundes Innenraumklima gewährleisten. Darüber hinaus erfolgt die Bewertung der ökologischen Qualität, welche neben einer Beurteilung des Frischwasserbedarfs anhand einer Ökobilanzierung festgestellt wird. Diese ermittelt die möglichen Umweltwirkungen des Gebäudes in einem Lebenszyklus von 75 Jahren.

Energieautarkes Haus

Versorgt das Gebäude sich ausschließlich selbst mit regenerativ erzeugter Energie, spricht man von einem energieautarkem Gebäude. Diese sind im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Gebäuden nicht netzgekoppelt und müssen die erzeugte Energie speichern können. Da dies sowohl technisch als auch finanziell aufwendig ist, ist dieser Gebäudetyp bisher wenig verbreitet.

Verallgemeinernd kann man sagen, dass ein Plusenergiegebäude die Weiterführung des Passivhauses ist, bei dem alle Potentiale der Energieeinsparung ausgeschöpft werden und zusätzlich mehr regenerative Energie erzeugt als im Jahr verbraucht wird. Dabei handelt es sich in Abgrenzung zu den energieautarken Gebäuden um netzgekoppelte Bauwerke, die das öffentliche Stromnetz als Speicher benutzen. Die Bilanzierung bezieht sich dabei allein auf die Betriebsphase und beinhaltet nicht die graue Energie, welche zur Herstellung der Bauteile notwendig ist. Das im Folgenden untersuchte energy⁺Home erfüllt die Anforderungen an ein solches Plusenergiegebäude.

16 Vgl. BMUB, 2014, S. 9.

17 Vgl. Hegger, 2013, S. 92 ff.

1.2.2 Normative Grundlagen und Regelungen zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Gebäuden

Normativ wird die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden in **DIN EN 15643-1:2011-05** beschrieben. Sie liefert ein System zur Bewertung von Gebäuden durch Anwendung eines Lebenszykluskonzeptes, bei dem die Norm neben den allgemeinen Rahmenbedingungen des Bewertungssystems (Teil 1) die umweltbezogenen (Teil 2), sozialen (Teil 3) und ökonomischen (Teil 4) Qualitäten von der Herstellungsphase über die Nutzungsphase bis zum Entsorgungsstadium erfasst. Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität müssen die Auswirkungen und Aspekte, die während des Lebenszyklus eines Gebäudes mit der Bausubstanz und mit dem Betrieb in Zusammenhang stehen untersucht und getrennt voneinander dargestellt werden.¹⁸ Die Informationen zu den Umweltwirkungen der Bauprodukte müssen die Anforderungen von **DIN EN 15804:2012-04** erfüllen und sind beispielsweise Umweltproduktdeklarationen vom Typ III zu entnehmen. Zur Bewertung der Auswirkungen des Betriebes sind Informationen zum Energiebedarf von Heizung, Kühlung, Lüftung, Warmwasser, Beleuchtung und anderen gebäudetechnischen Systemen notwendig. Die ermittelten Daten sind im Rahmen einer Ökobilanzierung auszuwerten.

Die Grundsätze und Rahmenbedingungen zur Erstellung von Ökobilanzen sind nach **DIN EN ISO 14040:2009-09** Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen genormt. Darin beschrieben sind die Grundsätze, Phasen und Eigenschaften sowie der methodische Rahmen bei der Erstellung von Ökobilanzen unabhängig von der Art des beschriebenen Produktes. Teil einer Ökobilanz muss demnach die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sei. Es wird unter anderem die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie, die angesprochene Zielgruppe sowie die Art der Veröffentlichung angegeben. Der Untersuchungsrahmen beschreibt unter anderem die funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Annahmen und Einschränkungen. Darauf folgt die Sachbilanz, in der die Datenerhebung und -berechnung durchgeführt wird. Bei einer Gebäude-Ökobilanz also die Baumassenermittlung und die Erhebung der Umweltwirkungspotentiale der einzelnen Baustoffe, z.B. anhand von Umwelt-Produktdeklarationen. Anschließend werden die gesammelten Daten in der Wirkungsabschätzung miteinander verknüpft und ausgewertet.

Ergänzend zu DIN EN ISO 14040 enthält **DIN EN ISO 14044:2006-10** die Anforderungen, welche an Ökobilanzen gestellt werden sowie Anleitungen zur Erstellung einer Ökobilanz. Die Berechnungsmethode zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität ist in **DIN EN 15978:2012-10** beschrieben. Darin ist auch beschrieben, dass bzw. wie vor Ort erzeugte Energie als Vorteil bzw. Gutschrift mit in die Bilanzierung einbezogen werden darf.¹⁹

Grundlage zur Beschreibung und Beurteilung der Umweltwirkungen von Baustoffen sind Umweltproduktdeklarationen (EPD), welche nach **DIN EN 15804:2012-04** geregelt sind. Diese Norm beinhaltet die Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte und bietet eine Grundlage zur Sicherstellung der einheitlichen Ableitung, Verifizierung und Darstellung von EPD's sowie zur Beschreibung der Umweltbelastungen der in Gebäuden verbauten Stoffe. Die Auswirkung der Baukonstruktion (und des Betriebs) eines Gebäudes können sehr vielfältig sein und von der Versauerung und Überdüngung von Böden und Gewässern, über die Bildung von bodennahem Ozon, dem Abbau der UV-absorbierenden UV-Schicht bis zur Verstärkung des Treibhauseffektes reichen. Die Parameter und funktionellen Einheiten dieser Umweltwirkungskategorien sind ebenfalls in DIN EN 15804 beschrieben.²⁰

18 Vgl. DIN EN 15643-2:2011-05, S. 26.

19 Vgl. DIN EN 15978:2012-10, S. 25.

20 Vgl. DIN EN 15804:2012-04, S. 33.

Neben der ökologischen Bewertung der Gebäudekonstruktion entstehen im Betrieb eines Gebäudes Umweltwirkungen, welche je nach energetischer Qualität des Gebäudes einen erheblichen Anteil an der Gesamtwirkungsabschätzung des Gebäudes haben. **DIN 4108:2003-06** liefert die bauphysikalischen Grundlagen des Wärmeschutzes im Hochbau, und damit auch die bauphysikalischen Grundlagen zur Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfes. Zur Ermittlung der energetischen Qualität lässt sich der Heizwärmebedarf eines Gebäudes nach DIN 4108-6:2003-06 berechnen. Zur energetischen Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen bedarf es zusätzlich **DIN 4701-10:2003-08**, welche jedoch bei der Verwendung neuer Heizungstechniken an ihre Grenzen stößt.²¹

Neben diesen beiden älteren Normen liefert **DIN V 18599:2011-12** die Grundlage zur energetischen Bewertung von Gebäuden sowie zur Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, sowie einer daraus resultierenden Energiebilanz. Die Norm bietet ebenfalls die Möglichkeit der Bilanzierung von Bestandsbauten und die Integration von im räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude produzierter Energie und eignet sich demnach auch für die Bilanzierung von Plusenergiegebäuden im Bestand.²² Die Ergebnisse einer Bilanzierung nach DIN 18599 liefert in Kapitel 2 daher die Grundlage der Wirkungsabschätzung für die Nutzungsphase der Ökobilanzierung des energy+Home.

Grundsätzliche Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden sind in der Energieeinsparverordnung (**EnEV**) beschrieben. Die Hauptanforderung besteht in der Einhaltung des auf die Gebäudenutzfläche bezogenen Primärenergiebedarfes, welcher eines mit normierten Randbedingungen berechneten Referenzgebäudes gegenübergestellt wird. Dabei erlaubt die EnEV die Anrechnung von im unmittelbarem Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugtem, aus erneuerbaren Energien gewonnenem Strom zur Kompensation der Primärenergie. Dies erfolgt unter der Bedingung, dass der Strom unmittelbar nach Erzeugung oder nach vorübergehender Speicherung selbst genutzt und nur die überschüssige Energiemenge in das öffentliche Netz eingespeist wird. Die Bilanzierung der Erträge hat monatsweise nach DIN V 18599 Teil 9 zu erfolgen und es darf nur jeweils soviel Strom angerechnet werden, wie für die Nutzung von Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung und Klimatisierung einschließlich Hilfsenergie benötigt wird.²³ In Anlehnung daran wird auch der Jahres-Primärenergiebedarf zum Nachweis des Effizienzhaus Plus Niveaus nach BMUB berechnet, jedoch werden dabei auch die netzeingespeisten, innerhalb der Bilanzgrenze erzeugten, regenerativen Energieüberschüsse berücksichtigt.²⁴ Dies führt mitunter zu einer unterschiedlichen Einschätzung der energetischen Qualität eines Gebäudes je nach verwendeter Bilanzierungsmethode. Bei einer Berechnung nach EnEV handelt es sich beim energy+Home beispielsweise nicht um ein Plusenergiegebäude, da es einen Primärenergiebedarf von 26,9 kWh/m²a aufweist. Berücksichtigt man jedoch die Stromerträge, welche in das öffentliche Netz eingespeist werden (Berechnung in Anlehnung an EnEV nach BMUB), so erhält man einen negativen Primärenergiebedarf und kann das Gebäude als Plusenergiegebäude bzw. Effizienzhaus Plus bezeichnen.

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bildet eine Analyse der Lebenszykluskosten (LCC) über einen Zeitraum von 50 Jahren, welche sich in Herstellungskosten nach **DIN 276-1:2008-12** und Nutzungskosten nach **DIN 18960:2008-02** unterteilen lassen. Im Rahmen der Ermittlung der Herstellungskosten liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf den Kostengruppe 300 (Baukonstruktion) und 400 (Technische Anlagen). Die Nutzungskosten lassen sich aufteilen in Betriebskosten (Ver- und Entsorgung), Kosten für Bedienung, Inspektion und Wartung sowie Instandsetzungskosten nach Ablauf der jeweiligen Nutzungsdauer der Bauteile bzw. technischen Anlagen. Die Annahme dieser Nutzungsdauern

21 Vgl. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, 2014, S. 36.

22 Vgl. DIN 18599-1:2011-12, S. 9.

23 Vgl. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, 2014, S. 37.

24 Vgl. BMUB 2014, S. 8.

orientieren sich für die Baukonstruktion an den Vorgaben des **Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen** (BNB) des Bundesamtes für Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung und den Vorgaben aus der **VDI-Richtlinie 2067** für die Nutzungsdauer technischer Anlagen. Diese enthält ebenso Angaben für den prozentualen Aufwand für Instandsetzung, Inspektion und Wartung.

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen ist ein System zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung von Gebäuden unter Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen, soziokulturellen Qualität. Obwohl das System nur für die Bewertung von Neubauten ausgelegt ist, so lassen sich dennoch grundsätzliche Methoden der Lebenszyklusanalyse auch auf andere Gebäudetypen übertragen, wie beispielsweise die dynamische Berechnung der Nutzungskosten als Barwert aller Auszahlungen mit einem gewählten Kalkulationszinssatz von 5,5% und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

Dieser Zeitraum entspricht auch dem Betrachtungszeitraum, den die **Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen** (DGNB) im Rahmen ihrer Gebäudezertifizierung ansetzt. Dieses Zertifizierungsprogramm enthält für den Neubau kleiner Wohngebäude 28 Kriterien, anhand derer die Nachhaltigkeit einer Immobilie bewertet wird. Das Kriterium „ECO 1.1 Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ enthält dabei Angaben zur Ermittlung der Lebenszykluskosten und mit dem Ziel einer Minimierung der Kosten von Gebäuden über deren gesamten Lebenszyklus. Das Zertifizierungssystem enthält ebenfalls Kriterien zur Beurteilung der Umweltwirkungen eines Gebäudes.²⁵ Zum Zweck der Vergleichbarkeit des energy+Home mit anderen zertifizierten Gebäuden wird die ökologische und ökonomische Qualität des Gebäudes im Folgenden in Anlehnung an diese Kriterien ermittelt.

25 Vgl. DGNB ENV 1.1 und ENV 2.1.

1.3 Untersuchungsobjekt „energy+Home“

1.3.1 Ein gebäudetypologisch repräsentatives Bestandsgebäude



Abbildung 1.2: Ostseite des Bestandsgebäudes nach der Fertigstellung im Jahr 1970
Foto: TUD, FG twe



Abbildung 1.3: Wohnzimmer des Bestandsgebäudes vor der Sanierung
Foto: TUD, FG twe

Gegenstand der Untersuchungen ist ein typisches Einfamilienhaus einer charakteristischen Wohnsiedlung im zentralen Rhein-Main-Gebiet. Das Gebäude wurde im Jahr 1969 errichtet und ist repräsentativ für eine Vielzahl von Gebäuden in dieser Baualtersklasse.

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein Reihenendhaus in Hanglage und Ost-/West-Ausrichtung mit einem leicht geneigten Satteldach. Das in Massivbauweise errichtete Gebäude wurde vor der Sanierung mit Heizöl beheizt und verfügte über eine Wohnfläche von 176m². Es kann damit als repräsentatives bzw. typisches Einfamilienhaus aus den 70er Jahren bezeichnet werden, welches in der Rhein-Main Region ca. 12.000 mal gebaut wurde und für einen 4- bis 5-Personen-Haushalt ausgelegt war.

Ölzentralheizung, zentrale Warmwasserversorgung, überdachter Balkon und Terrasse sowie eine beheizte Garage gehörten zu der Ausstattung des nach damaligen Vorstellungen hochwertigen Einfamilienhauses. Als freistehendes Haus, bzw. Doppel- oder Reihenhaus wurde es von vielen Wohnungsbaugesellschaften als Verkaufs- und Vermietungsobjekt gebaut.²⁶

Das Gebäude weist einen dokumentierten mittleren Brennstoffverbrauch für Heizung und Warmwasser von 5.650 Litern Heizöl pro Jahr auf. Dies entspricht einem CO₂-Äquivalent von etwa 17.500 kg/Jahr und Emissionen von mehr als 640 Tonnen CO₂ in den vergangenen 40 Jahren.²⁷

Der Einsatz von Heizöl als Energieträger bedingt zudem die Notwendigkeit von Aufstellflächen für Öltanks in einer Größe von ca. 16 m², die den Bewohnern demzufolge bisher nicht als Wohn- oder Nutzfläche zur Verfügung standen und gleichzeitig eine

26 Tichelmann, 2014, S.12.

27 Tichelmann, 2014, S.12.

gesundheitliche Gefährdung aufgrund der von Heizöl ausgehenden karzinogenen Phenoldämpfe für die Bewohner darstellten.

Das Gebäude wurde in Massivbauweise aus Bimshohlblocksteinen ohne Dämmschicht errichtet. Das Satteldach mit einer Dachneigung von 15° ist Ost-West orientiert und verfügte über einen nicht ausgebauten unbeheizten und ungedämmten Dachraum. Der Balkon auf der Westseite wurde nicht thermisch getrennt und als durchlaufende Geschossdecke konstruiert.

Die Raumaufteilung entsprach den zum Zeitpunkt der Errichtung üblichen Vorstellungen von zeitgemäßem Wohnen. Ein abgetrenntes Wohn- und Esszimmer mit separater Küche im Erdgeschoß und verhältnismäßig kleinen Zimmern im Untergeschoss entsprachen zum Zeitpunkt der Errichtung den damals üblichen Vorstellungen einer modernen und funktionalen Wohnung.

Abbildung 1.4: Treppenhaus des Bestandsgebäudes vor der Sanierung
Foto: TUD, FG twe



Abbildung 1.5: Westseite des Bestandsgebäudes vor der Sanierung
Foto: TUD, FG twe



1.3.2 Die strategische Weiterentwicklung zum energy+Home



Abbildung 1.6: Ostseite des modernisierten energy+Home im Jahr 2011
Foto: TUD, FG twe



Abbildung 1.7: Westseite des modernisierten energy+Home im Jahr 2011
Foto: diephotodesigner.de

Das Haus wurde im Jahr 2011 komplett modernisiert und dabei die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste der Gebäudehülle reduziert, die solaren Gewinne maximiert sowie die veraltete Anlagentechnik ersetzt. Seit der Sanierung wird der Energiebedarf ausschließlich durch die Verwendung regenerativer Energien gedeckt.

Neben der energetischen Betrachtung hatte die architektonische „Metamorphose“ des Gebäudebestandes²⁸ eine große Bedeutung, da nur eine architektonische und baukulturelle Qualität zu einer nachhaltigen Nutzung führt und nur damit die Voraussetzung für eine sinnvolle Realisierbarkeit von energiesparenden Eingriffen gegeben ist.

Aus einem kleinteiligen und unzureichend belichteten Haus wurde ein großzügiger Lebensraum für vier Personen mit individuellen, nutzungsneutralen Räumen und einem zentralen Wohn- und Essbereich entwickelt. Im Zuge der Sanierung vergrößerte sich die nutzbare Wohnfläche des Gebäudes von 176 m² auf 199 m², verteilt über zwei Etagen. Der Grundriss wurde großzügiger organisiert und die Wohnqualität wurde in den Dimensionen der Nutzbarkeit, der Behaglichkeit und des Wohlbefindens, der Raumqualität, der Anpassungs- und Raumflexibilität und des individuellen Gestaltungsspielraums wesentlich verbessert.

Im Rahmen der Sanierung wurden die vorhandenen Fensteröffnungen durch das Entfernen der Brüstungen und Rolladenkästen vergrößert und die Holzbalkendecke im Obergeschoß zurückgebaut, wodurch die Raumhöhe im Wohn- und Essbereich auf fast fünf Meter steigt. Im Dach wurden große Dachflächenfenster integriert. Der Fensteranteil in den Außenwänden und zusätzlich in der Dachfläche wurde im Zuge der Sanierung auf über 34 % der Geschossfläche erhöht. Die vergrößerten Glasflächen erzeugen im Winter höhere solare Wärmeeinträge und verbessern im gesamten Jahresverlauf die natürliche Belichtung der Innenräume.

Dies steigert nachweislich das Wohlbefinden der Bewohner und steigert darüber hinaus die Nutzungsdauern zusätzlicher künstlicher Lichtquellen mit dem damit einhergehenden sinkenden Energie- und Ressourcenverbrauch. Es sollte nicht allein das technisch Machbare umgesetzt, dieses sollte auch in einem Kontext von hohen Raum- und Wohnqualitäten in ein zeitlos-klassisches Erscheinungsbild integriert werden.

Im Äußeren wurde hierfür eine gestalterische Unterscheidung zwischen der hellen Putzfassade, der Nord und Südfassaden (Giebelwände) und den dunklen Fassadenpaneelen an der Ost- und Westfassade gewählt, die dem Baukörper ein klares Erscheinungsbild gibt. Die dunkle Plattenverkleidung bildet zusammen mit den gleichfarbigen Dachsteinen der Dachdeckung eine Einheit, die sich als durchgehende, optisch homogene Haut von der Westfassade über die Dachdeckung bis zur Ostfassade entwickelt.

Die Innenräume wurden mit flächenbündigen raumhohen Türen und dunklen Massivholzdielen ausgestattet. Alle Räume haben eine Niedertemperatur-Fußbodenheizung erhalten.

Durch die verbesserte Tageslichtqualität in den Innenräumen, die differenzierte Fassadengestaltung und dem dadurch entstehenden Zusammenspiel von Innen und Außen entstand eine hohe bauliche Qualität, welche den Anspruch an ein Modellvorhaben unterstreicht.

Abbildung 1.8: Terasse des sanierten energy+Home im Jahr 2011
Foto: diephotodesigner.de



Abbildung 1.9: Dachfläche des sanierten energy+Home im Jahr 2011
Foto: diephotodesigner.de





Abbildung 1.10: Wohnzimmer mit Blick zur Küche des sanierten energy+Home
Foto: diephotodesigner.de



Abbildung 1.11: Küche des sanierten energy+ Home
Foto: diephotodesigner.de

Neben diesen baulichen Maßnahmen, die das passive thermische Verhalten des Gebäudes verbessern, wurde die veraltete Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung ausgetauscht und durch die Verwendung ausschließlich regenerativer Energien zur Deckung des Energiebedarfs ersetzt.

Um den Energiebedarf des Gebäudes im Rahmen der Modernisierung zu reduzieren, wurden umfangreiche Maßnahmen am Gebäude durchgeführt. Die Wärmeverluste der wärmeübertragenden Gebäudehülle, bestehend aus der Grundfläche, Wänden gegen Erdreich und Außenluft, Fenstern und dem Dach, wurden durch das Integrieren oder Aufbringen von Wärmedämmung und den Ersatz der Fenster auf ein Minimum reduziert. Die bestehenden, alten Isolierglasfenster wurden gegen hochdämmende 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasungen ausgetauscht. Diese Maßnahmen reduzieren einerseits die Wärmeverluste und erhöhen andererseits die thermische Behaglichkeit in allen Räumen aufgrund höherer Oberflächentemperaturen.

Ehemals wurde ein Ölkessel zur Wärmeerzeugung verwendet, der einen separaten Raum für die Lagerung des Heizöls bedingte. An die Stelle des Ölkessels tritt nun eine kompakte Luft-Wasser-Wärmepumpe, die ihre Betriebsenergie aus den auf dem Dach integrierten Solarstrommodulen bezieht. Durch den Ausbau des Ölkessels werden auch der Öltank und die entsprechende Aufstellfläche im Gebäude überflüssig. Der durch den Rückbau des Öltanks neu gewonnene Platz erweitert die nutzbare Wohnfläche. Mit diesem Flächengewinn geht eine zusätzliche Wertsteigerung des Gebäudes einher, die sich im Falle einer Vermietung auch in einer Erhöhung der Mieteinnahmen niederschlägt.

Die eingebaute Wärmepumpe entzieht der Außenluft Wärme und überträgt diese an einen Warmwasserspeicher. Durch den Einbau der Wärmepumpe in Kombination mit einem Niedertemperatur-Flächenheizungssystem ergibt sich ein besonders effizientes Heizsystem, welches eine individuelle Beheizung der einzelnen Räume ermöglicht.

Die Anlagenaufwandszahl, die ein Indikator für die Effizienz der Anlage zur Wärmebereitstellung ist, sank von 1,57 auf 0,66. Dies bedeutet, dass der Heizungsanlage im Bestandsgebäude 57% mehr Energie zugeführt werden musste, als zur Beheizung des Gebäudes notwendig war. Nach der Sanierung müssen nur noch 66% der benötigten Heizenergie durch die Solaranlage auf dem Dach zur Verfügung gestellt werden, da die übrigen 34% durch Umweltwärme gedeckt werden. Die Heiz- und Anlagentechnik sowie die Photovoltaik-Anlage wurden mit dem Ziel der absoluten CO₂-Neutralität so konzipiert, dass ein Maximum an erneuerbaren Energien erwirtschaftet und direkt eingesetzt werden kann.

Die Primärenergienmengen für Heizwärme als Flächenheizung, Brauch- und Warmwasser, Gebäudetechnik, Beleuchtung, Haushaltsstrom und anteilig die Elektromobilität werden vollständig mit erneuerbaren Energien gedeckt. Erwirtschaftete Energieüberschüsse aus der Photovoltaikanlage in der Sommerperiode werden in das öffentliche Netz eingespeist, das im Gegenzug den Stromverbrauch über den Netzverbund absichert.

Aus ästhetischen Gründen werden die Photovoltaikmodule flächigbündig in das Dach integriert und nicht als Fremdkörper additiv aufmontiert – auch dies ein sichtbares Argument für die Akzeptanz energiegewinnender Systeme und die Forcierung dezentraler Energieerzeugung.

Weiterhin wurde optional ein Kamin mit Wärmerückgewinnung und Heizregister in das Energiekonzept integriert, der sowohl zur Wärmeeinspeisung in das Fußbodenheizungssystem als auch zur Unterstützung der Warmwassererzeugung für das energy+Home eingesetzt werden kann. Durch die thermische Verwertung des heimischen und klimaneutralen

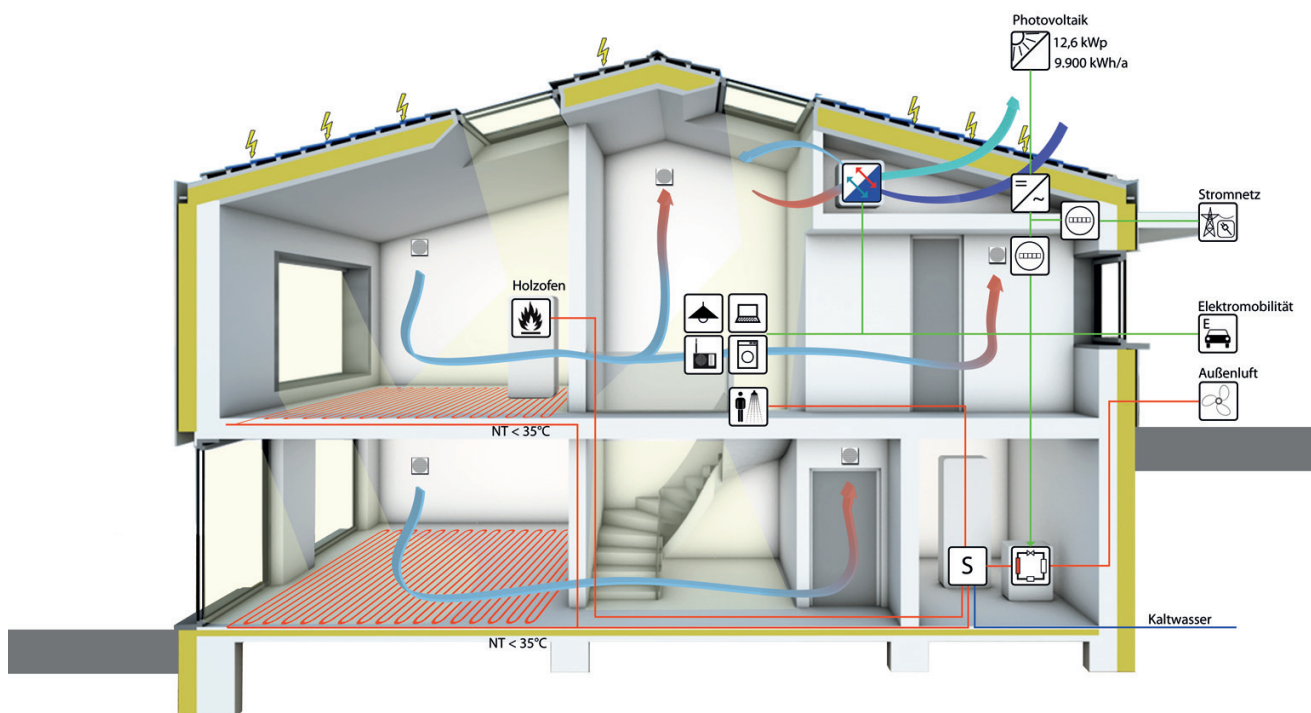


Abbildung 1.12: Energiekonzept des energy+Home
Abbildung aus: Tichelmann, 2014

Abbildung 1.13: Schnitt A-A

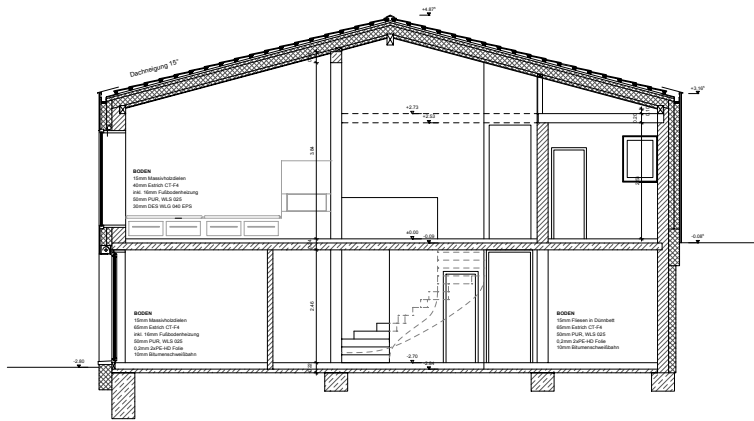


Abbildung 1.14: Schnitt B-B

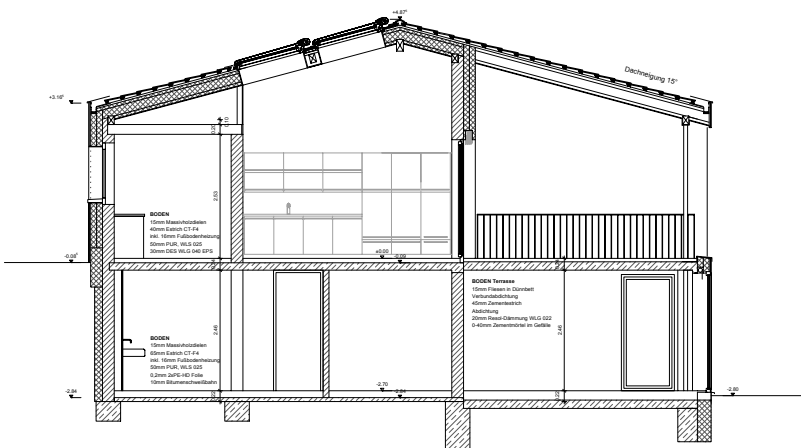
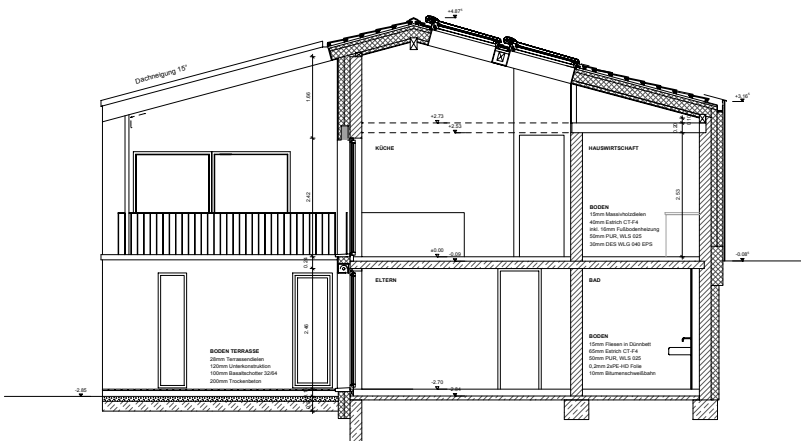


Abbildung 1.15: Schnitt C-C



Energieträgers Holz kann die Leistung der Wärmepumpe in den Spitzenlasten deutlich reduziert und der selbsterzeugte Strom eingespart werden. Da die Heizenergie der Wärmepumpe jedoch in den ersten Betriebsjahren zur Temperierung der Räume ausreichend war, wurde der Kaminanschluss seit Inbetriebnahme des Gebäudes jedoch nicht in Betrieb genommen.

Mit seinem Energiekonzept ohne fossile Energieträger erzeugt das Haus in der Jahressumme genug Strom für Heizung, Warmwassererzeugung, Lüftung und Haushaltsstrom, sowie einen Überschuss, welcher in das Stromnetz eingespeist wird oder zum Betrieb eines Elektromobils genutzt werden kann.

Insgesamt demonstriert das energy+Home damit die zukunftsweisende Sanierung von Bestandsobjekten zu CO₂-neutralen Gebäuden mit minimiertem Energiebedarf und selbstversorgender Energieerzeugung mit Naturressourcen durch die Anwendung technisch entwickelter und ästhetisch anspruchsvoller Lösungen.

Eine ausführliche Dokumentation der Sanierungsmaßnahmen ist auf der Homepage des Fachgebiets Tragwerksentwicklung & Bauphysik des Fachbereichs Architektur der TU Darmstadt downloadbar.²⁹

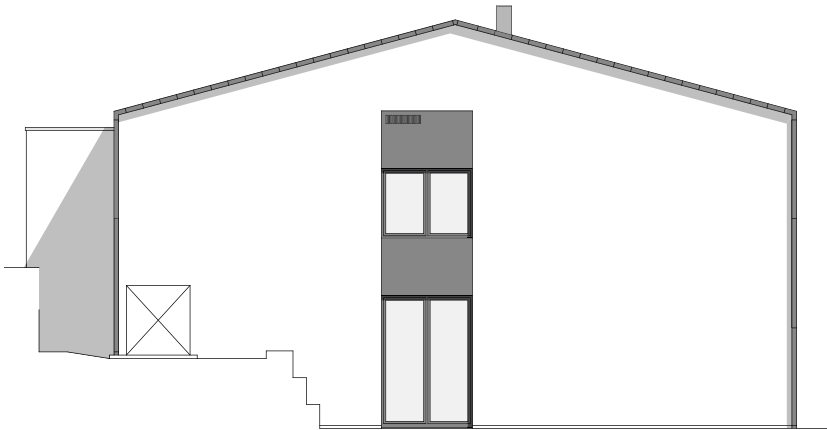


Abbildung 1.16: Ansicht Nord



Abbildung 1.17: Ansicht West



Abbildung 1.18: Ansicht Ost

Abbildung 1.19: Grundriss Erdgeschoss

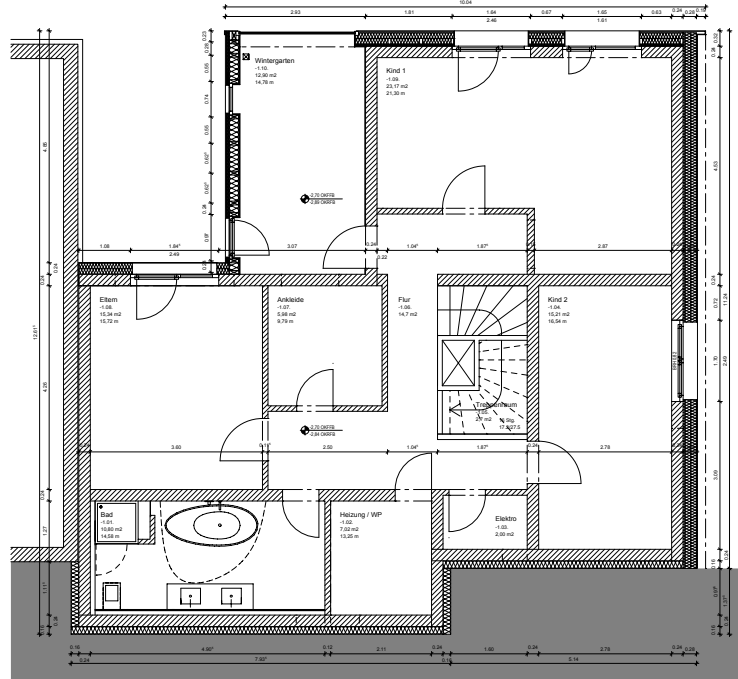


Abbildung 1.20: Grundriss Obergeschoss

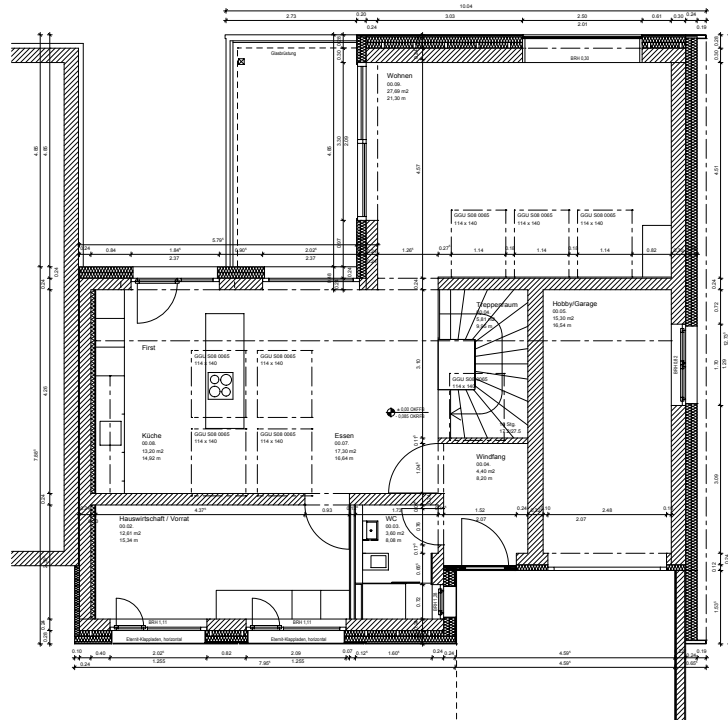
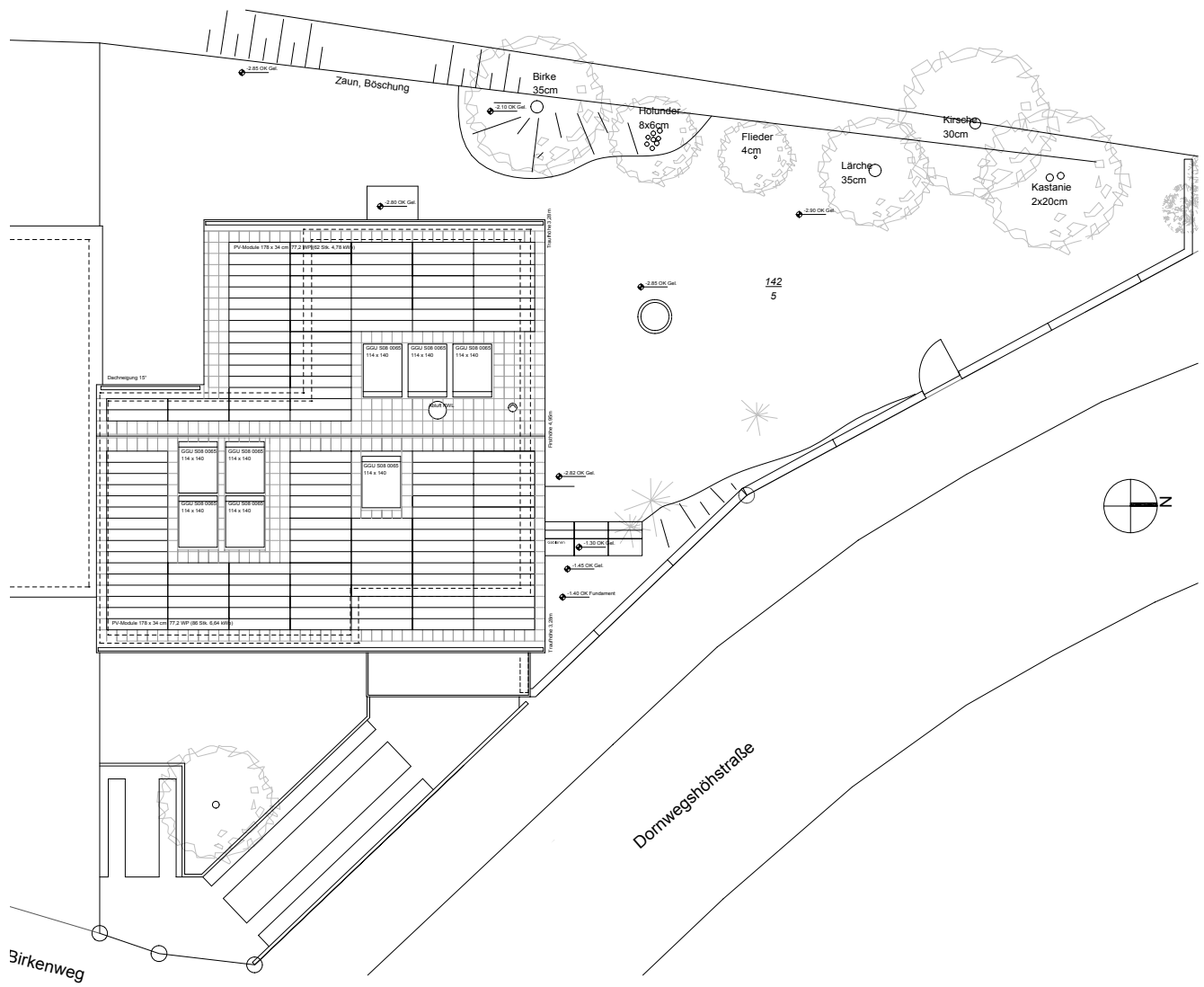


Abbildung 1.21: Lageplan



2 Ökologische Untersuchung der Sanierung

2.1 Einleitung

Mithilfe einer Ökobilanzierung lassen sich die potentiellen Umweltwirkungen eines Gebäudes über dessen gesamten Lebenszyklus, also vom Ressourcenabbau der verwendeten Materialien über die Herstellung, dessen Betrieb, den Rückbau und die Entsorgung des Gebäudes darstellen.¹ Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität wird daher im Folgenden eine Ökobilanz auf Grundlage der Bilanzierungsmethode der DGNB erstellt, um die Umweltaspekte und -auswirkungen des Gebäudes während seines Lebenszyklus darzustellen. Dies geschieht in Übereinstimmung mit den in DIN EN ISO 14044:2006-04, DIN EN ISO 14040:2009-09, DIN 15978:2012-10, DIN EN 15804:2012-04 enthaltenen Grundsätzen, Anweisungen und Anforderungen und beruht auf quantifizierbaren umweltbezogenen Informationen aus den Bauprodukten, Prozessen und Dienstleistungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden unter Berücksichtigung von ISO 21930 durch Produktdeklarationen vom Typ III nach DIN 15804:2012-04.

Dabei wird die Erstellung, der Betrieb, die Instandhaltung, der Abriss und die Entsorgung - sprich der gesamte Lebenszyklus - des Gebäudes unter den Aspekten der potentiellen Umweltwirkungen betrachtet. Die Ökobilanz wurde im Oktober 2013 erstellt.

2.2 Ziel- und Untersuchungsrahmen

2.2.1 Ziel der ökologischen Untersuchung

Ziel der Studie ist die Darstellung der Umweltwirkungen, die sich aus der Sanierung des energy+Home, eines angenommenen Betriebs von 50 Jahren, der Instandhaltung in dieser Zeit und der anschließenden Entsorgung der Gebäudekonstruktion ergeben. Dabei werden die Werte des energy+Home einem Referenzwert² gegenübergestellt und der Anteil der einzelnen Bauteile an den Umweltwirkungen aufgezeigt. Ergänzt wird diese Untersuchung durch eine Wirkungsabschätzung des Gebäudebetriebs, so dass die Gesamtumweltwirkungen des Gebäudes beurteilt werden können.

Angesprochen werden durch diese Studie Bauherren, Planer und Ausführende Unternehmer, welche an der Wahl einer Sanierungsstrategie und -bauweise beteiligt sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind zur Veröffentlichung vorgesehen und enthalten entsprechende vergleichende Aussagen zu den Umweltwirkungen der untersuchten Baustoffe und Bauweisen.

2.2.2 Untersuchungsrahmen

Untersucht wird der gesamte Lebenszyklus der im Rahmen der Sanierung verwendeten Baumaterialien von ihrer Herstellung über den Betrieb, die Instandhaltung bis zur Entsorgung. Verwendet wird dafür das sogenannte „Vereinfachte Rechenverfahren“ das die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) für die Ökobilanzierung von Gebäuden im Rahmen ihrer Zertifizierung eingeführt hat. Folgende Bauteile, gegliedert gemäß DIN 276-1:2008-12 werden dabei untersucht:

¹ Vgl. König, 2009, S. 38.

² Referenzwert der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Das Referenzgebäude entspricht einer durchschnittlichen Bauweise in Deutschland im Bereich der Konstruktion und dem EnEV Referenzgebäude im Betrieb.

Tabelle 2.1: Im Untersuchungsrahmen enthaltene Bauteile, nach DIN 276 gegliedert

KG	Bauteil	KG	Bauteil
322	Fundamente	340	Innenwände, Stützen und Türen
324	Bodenplatte	350	Decken
325	Bodenbeläge	360	Dach
330	Außenwände	362	Dachfenster
334	Außenfenster	420	Wärmeerzeugungsanlagen
335	Außenwandbekleidungen	430	Lufttechnische Anlagen

Da die Ermittlung der Mengen nur über Flächen, ohne Berücksichtigung von Anschlüssen gerechnet wird, sowie in KG 400 nur die Wärmeerzeugungsanlagen einbezogen werden, wird ein Sicherheitszuschlag von 10% auf die Ergebnisse versehen.³

Die Nutzungsdauer des Gebäudes wird mit 50 Jahren angenommen.⁴ Dabei handelt es sich um ein Szenario, das gewählt wird, um die Vergleichbarkeit des untersuchten Gebäudes mit anderen Ökobilanzierungen zu gewährleisten. Alle Bauteile, deren Lebensdauer weniger als 50 Jahre beträgt, werden innerhalb des Gebäudelebenszyklus entsprechend ausgetauscht. Das bedeutet, dass die Umweltwirkungen für Herstellung und Entsorgung des Bauteils nochmals anfallen. Die Lebensdauer der Bauteile orientiert sich an der BBSR-Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB“.⁵ Abweichungen von den Vorgaben der Tabelle sind in der Sachbilanz gekennzeichnet und begründet.

Am Ende ihres Lebenszyklus werden die Baustoffe je nach Art des Baustoffes entweder deponiert, thermisch verwertet oder aufbereitet und der jeweilige end-of-life-Datensatz der ökobau.dat Datenbank der Berechnung der Umweltwirkungen zugrunde gelegt.

Für die Berechnung der Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs werden die Energieverbräuche für Strom und Wärme aus dem Energieeinsparnachweis nach DIN 18599 entnommen.

2.2.3 Funktionelle Einheit

Als Bezugsgröße für den In- und Output der Produkt-, Stoff- und Energieflüsse gemäss DIN 14044 und den Vorgaben der DGNB ist die funktionelle Einheit mit 1m² Nettogrundfläche (NGF) bezogen auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren festgelegt. Daraus ergeben sich die Flächen- und jahresbezogenen Umweltwirkungen über den Lebenszyklus für Konstruktion und Betrieb des Gebäudes. Für das Treibhauspotential bedeutet dies beispielweise: kg CO₂-Äquivalent / m²_{NGF}*a.⁶

2.2.4 Systemgrenzen und Abschneidekriterien

Als Systemgrenze wurde ein umfassender Ansatz gewählt, welcher die Herstellung inklusive sämtlicher Vorketten (Energiegewinnung, Rohstofftransporte, eigentliche Herstellung) erfasst. Weiterhin ist, sofern als Folge einer kürzeren Lebensdauer im Vergleich zur Nutzungsdauer erforderlich, auch die Erneuerung berücksichtigt. Für das Ende des Lebenszy-

3 DGNB; Ökobilanzierung „Neubau kleine Wohngebäude 2012“.

4 Analog zum Bewertungssystem der DGNB.

5 Abrufbar unter: <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html> [11/2013].

6 Vgl. Hegger, 2011, S. 4.

klus (end-of-life) sind der Transport vom Objekt zur Deponie, Müllverbrennungsanlage oder dem entsprechenden Werk zur Weiterverarbeitung einbezogen, ebenso wie die eigentliche Entsorgung oder Nachnutzung.

Da bei der Untersuchung die Varianten Sanierung bzw. Abbruch und Neubau betrachtet werden sollen, werden die Wirkungskategorien getrennt für die neu hinzugefügten Baustoffe, die bestehende Gebäudesubstanz und die abgebrochenen Baustoffe ermittelt. Dies ermöglicht, die Umweltwirkungen des Bestandes mit den Umweltwirkungen der Sanierung zu vergleichen und die bei der Sanierung erzeugten Umweltwirkungen mit der Variante eines Abbruchs und Neubaus des Gebäudes zu vergleichen.

In der ausgeführten Variante Sanierung zum energy+Home wird der bestehende Gebäude- teil nicht in der Bilanz berücksichtigt. Ebenso sind Abfallmengen, die sich aus dem Teila- briss des vorhandenen Gebäudes ergeben nicht Teil der vorliegenden Untersuchung. Nach der Logik der Lebenszyklusbetrachtung sind diese Stoffmengen Teil des Lebenszyklus des ursprünglichen Gebäudes und gehen somit nicht in die neue Bilanz ein, da sie ansonsten doppelt gezählt würden.⁷ Aus Sicht des aktuell untersuchten Produktsystems werden die bestehenden Gebäudestrukturen daher vernachlässigt, bzw. ohne Umweltwirkungen bilan- ziert.

Für die Ermittlung des Ressourcenverbrauchs sowie der Wirkgrößen wurden die spezi- fischen Daten der einzelnen Baustoffe und Produkte den Umweltdeklarationen des je- weiligen Herstellers entnommen. Sonstige notwendige Umweltindikatoren finden sich in der Datenbank Ökobau.dat des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (siehe auch www.nachhaltigesbauen.de). Diese wurden durch den For- schungsnehmer PE International GmbH mit Unterstützung der Deutschen Baustoffindustrie entwickelt. Welche Datensätze den einzelnen Wandbaustoffen zugrunde liegen, ist aus den Tabellen der Sachbilanz ersichtlich.

Der Energieaufwand für den Einsatz verschiedener elektrischer Geräte zum Einbau der jeweiligen Materialien wurde bei der Betrachtung vereinfachend nicht berücksichtigt, eben- sowenig wie der Wasserverbrauch im Gebäudebetrieb und Produkte und Aufwendungen, die sich nur auf den Baustellenbetrieb beziehen.

Der Ansatz der Umweltindikatoren zum Transport beinhaltet systembedingte Ungenauig- keiten, da sowohl bei der Herstellung, als auch beim end-of-life Ansatz die Erzeugerwerk- dichte sowie Dichte der weiterverarbeitenden Betriebe unberücksichtigt blieb. Vor diesem Hintergrund besteht hier weiterer Untersuchungsbedarf zur Ermittlung von mittleren Transportentfernungen für die verwendeten Produkte.⁸

In dieser Studie wurde vorausgesetzt, dass mineralische Baustoffe der Bauschuttzuberei- tung zugeführt werden und Bauteile aus Holz und Kunststoff thermisch verwertet werden. Sofern ein Recycling des Baustoffes nicht möglich ist oder praktisch nicht durchgeführt wird wurde eine Deponierung als Bauschutt angenommen.

In Übereinstimmung mit der Vorgehensweise der DGNB wurde im Rahmen der Studie für die mineralischen Baustoffe eine Bauschuttzubereitung angenommen und den jeweiligen Wirkungskategorien für den Lebenszyklus „end-of-life“ eine Gutschrift in der Höhe des jeweiligen Äquivalents der Wirkungskategorie für das Rezyklat Schotter gutgeschrieben.

Bisher ist es nicht möglich, zerkleinertes Kalksandstein-Abrissgut der Produktion von KS-Steinen zuzuführen. Hier können nur Schnittabfälle Verwendung finden, da die Sorten-

7 Vgl. Hegger, 2011, S.4.

8 Vgl. Heller, H. / Tichelmann, K., 2010, S.10.

reinheit des Materials notwendig ist. Klein gemahlener Kalksandstein kann unter anderem im Erdbau als Befestigungsmaterial oder als mineralischer Baustoff für Tragschichten im Straßenbau eingesetzt werden. Er verfügt über die Güteklasse RC1 (Recycling-Baustoffe). Es ist derzeitige Praxis, Kalksandstein-Abrissgut zu deponieren, da sich das Sortieren in der Regel nicht wirtschaftlich gestalten lässt. Ein wesentlicher Faktor hierbei sind das energieintensive Brechen des gehärteten Kalksandstein sowie der dann erforderliche höhere Bindemittelanteil bei Verwendung des sortierten Abbruchmaterials.⁹

¹⁰Am Ende ihres Lebenszyklus können Gipsprodukte in Recyclinganlagen für Gipsbaustoffe wieder aufbereitet und bei der Herstellung von neuen Gipsprodukten verwendet werden (vgl. hierzu auch Angaben zur „Ökobilanz Recycling“ in der Umweltdeklaration „Gipsprodukte“). Die Umweltindikatoren der Gipsprodukte beinhalten bereits den entsprechenden Anteil an Rezyklat, welcher jedoch derzeit gegenüber dem Rohgipsanteil noch gering ist. Da der Anteil an Gipsprodukten, der dem Recycling zugeführt wird, nicht erhoben ist, wurde in dieser Studie die Annahme getroffen, dass auch die Gipsprodukte vollständig auf der Deponie entsorgt werden.

¹¹Für das Holz wird die thermische Verwertung in Form von Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) berücksichtigt. Es findet somit keine Verrottung oder Deponierung statt. Die Wirkgrößen wurden dabei der Ökobilanz entnommen und beziehen sich auf eine mittlere Rohdichte von 529 kg/m³. Der dort hinterlegte Datensatz zur Bilanzierung vom Rohstoffabbau bis zum fertigen Produkt („cradle to gate“) beinhaltet bereits die CO₂-Aufnahme bei der Holzentstehung im Wald.

¹²Bei den mineralischen Dämmprodukten gibt es verschiedene Ansätze für den „end-of-life“. Diese hängen in wesentlichem Maße von der Art der Verwendung ab. Prinzipiell ist ein Recycling durch Einschmelzen des Rohstoffes möglich, z.B. für Produktionsabfälle oder Glaswollfilz-Abrissgut aus Trennwänden und Steildächern. Die dort eingebauten Produkte sind in der Regel sortenrein und können unverschmutzt rückgebaut werden. Alternativ sind Dämmmaterialien als Zuschlagstoffe bei der Ziegelporosierung verwendbar. Wegen der großen Volumina fehlt nach heutigem Stand jedoch ein funktionales Logistikverfahren, um die Dämmstoffe zu den weiterverarbeitenden Werken zu transportieren.

Insbesondere bei Wärmedämmverbundsystemen und vergleichbaren Anwendungen ist momentan nur eine Deponierung möglich. Produkte aus Mineralfaser, welche vor 1993 produziert wurden, sind dabei der Deponieklasse 3 zugehörig.

Aus vorgenannten Gründen und wegen fehlender belastbarer Daten zum Anteil des tatsächlich recycelten Abfallguts wurde in dieser Untersuchung für Dämmmaterialien ebenfalls die Deponierung zugrunde gelegt.

2.2.5 Allokationsverfahren

In einer Sachbilanz werden grundlegende Prozesse innerhalb eines Produktsystems, welche Energie- und Materialflüsse enthalten, zueinander zugeordnet.¹³ Bei der Herstellung, Instandhaltung, Betrieb und Rückbau von Gebäuden entstehen Umweltwirkungen, welche sich auf die Verwendung von Bauprodukten und energetischen Aufwendungen zurückführen lassen. Die Zuweisung von verwendeten Materialien und Energieflüssen zu den unter-

9 Vgl. Heller, H. / Tichelmann, K., S.10f.
10 Vgl. Heller, H. / Tichelmann, K., S.11.
11 Vgl. Heller, H. / Tichelmann, K., S.11.
12 Vgl. Heller, H. / Tichelmann, K., S.11.
13 Vgl. DIN EN ISO 14044:2006-04, S.11.

suchten Wirkungskategorien ist in den verwendeten Umwelt-Produktdeklarationen beziehungsweise Datensätzen der Ökobau.dat hinterlegt.¹⁴

2.2.6 Datenkategorien

Für die in Kapitel 2.2.2 dargestellten Bauteile gemäss DIN 276-1:2008-12 werden die Bauteilmassen und deren potentielle Umweltwirkungen für die Lebensabschnitte Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung betrachtet. Dieses Vorgehen orientiert sich an den Vorgaben der DGNB und findet in Übereinstimmung mit DIN 14040:2009-09 statt.

Um im weiteren Projektverlauf die Bauteildaten für bestehende Bauteile, neu hinzukommende Bauteile und abgebrochene Bauteile differenzieren zu können werden die einzelnen Baustoffe innerhalb der Kostengruppen getrennt aufgeführt.¹⁵ Auf diese Weise lassen sich die Varianten „Sanierung“ bzw. „Abbruch und Neubau“ getrennt voneinander darstellen und bei der Variante „Abbruch und Neubau“ die bestehenden Baustoffe als Neubau definieren, ohne die Daten mehrfach ermitteln zu müssen. Bei dieser Vorgehensweise wird davon ausgegangen, daß das neu errichtete Gebäude eine identische Volumetrie und Konstruktion wie der Bestand aufweist.

2.2.7 Anforderungen an die Datenqualität

Grundlage der Datenermittlung bilden die Ausführungspläne der Architekten (Planstand November 2010) sowie die Abrechnungen der einzelnen Unternehmer, welche die Arbeiten ausgeführt haben. In geringem Umfang wurden Annahmen getroffen und dementsprechend in der Sachbilanz gekennzeichnet. Als Datengrundlage für die Umweltwirkungen dient die Ökobau.dat Datenbank des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Diese stellt durchschnittliche Datensätze für ca. 700 Baumaterialien zur Verfügung. Lagen für die verwendeten Produkte spezifische Environmental Product Declarations (EPD) vor so wurden diese verwendet. Grundsätzlich wurden, wenn vorhanden, spezifische Datensätze (EPD's der Hersteller) verwendet. Waren diese nicht erhältlich, so wurden generische Datensätze aus der Ökobau.dat verwendet.

Gemäß den Anforderungen der DIN EN ISO 14044: 2006-10 sollten Öko- und Sachbilanzdaten auf Vollständigkeit, hinsichtlich Ihrer Sensitivität sowie Konsistenz geprüft und kritisch reflektiert werden. Dies wird im Folgenden und in Kapitel 2.6 durchgeführt. Gegenstand der Untersuchung ist eine vergleichende Betrachtung resultierender Umweltindikatoren auf der Ebene von Bauteilen bzw. Baustoffen. Die dafür erforderlichen Daten sind vorhanden und in den nachfolgenden Kapiteln dokumentiert, deren *Vollständigkeit* ist gegeben. Die *Sensitivität* der Endergebnisse wurde dahingehend geprüft, ob Unsicherheiten in den Daten, der Allokation oder der Berechnung der Wirkungsindikatorwerte Einfluss auf die Ergebnisse der vergleichenden Studie haben. Die *Konsistenz* der Ergebnisse wurde durch Übereinstimmung der Methoden und Annahmen mit dem Ziel der Studie gewährleistet. Dazu wurden in der Untersuchung die verschiedenen Wirkungskategorien getrennt voneinander bewertet und untereinander nicht gewichtet. Die Datensätze der Ökobau.dat sind ungeprüft und mit einem Sicherheitsaufschlag von 10% behaftet. Die daraus entstehende Datenqualität betrifft alle Bauteile gleichermaßen und befindet sich bei dieser vergleichenden Studie dadurch im Einklang mit dem Ziel der Untersuchung.

14 Heller, H. / Tichelmann, K., S.12.

15 Siehe dazu Kapitel 2.3.5 Massenermittlung Gebäudekonstruktion.

2.3 Sachbilanz Gebäudekonstruktion

In der Sachbilanzphase werden, als Grundlage für die darauffolgende Wirkungsabschätzung, die In- und Outputdaten des Gebäudes gesammelt. Für die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Bauteile werden im Folgenden die Massen ermittelt und detailliert dargestellt. Wandaufbauten und Massen konnten größtenteils aus der Werkplanung und den Handwerker-Abrechnungen exakt ermittelt werden und es mussten nur geringfügige Annahmen getroffen werden.

Die Massen wurden nicht nach den Regelaufbauten sortiert aufgelistet, da die einzelnen Wandaufbauten zum Teil stark variieren. So finden sich zum Beispiel bei den Außenwände massive Außenwände mit WDVS, massive Außenwände mit Eternit-Fassadenplatten sowohl mit 20cm als auch mit 24 cm Mineralwolle, mit und ohne keramischen Fliesen auf der Innenwandoberfläche, mit 24cm und 30cm Bimshohlblocksteinen usw. Die einzelnen Bauteile werden daher tabellarisch aufgelistet und die einzelnen Wandschichten nach Baustoffen und Bestand/Neubau/Abbruch getrennt aufgelistet. Dies ermöglicht, für jeden einzelnen Baustoff, sortiert nach den Kostengruppen der DIN 276-1:2008-12 die Massen darzustellen.

Für die Datensammlung wurden Stöße und Verschneidungen vereinfachend vernachlässigt. Dies entspricht dem Vorgehen im „Vereinfachten Verfahren“ der DGNB und wird durch einen Aufschlag von 10% auf die jeweiligen Umweltwirkungen ausgeglichen. Dieser Aufschlag ist bereits in den generischen Datensätzen der Ökobau.dat enthalten.

Die zur Wirkungsabschätzung notwendigen Umweltwirkungen der einzelnen Baustoffe wird in Kapitel 2.3.13 dokumentiert und werden in der Wirkungsabschätzung (Kapitel 2.4) mit den ermittelten Massen verknüpft.

2.3.1 Einschränkungen der Sachbilanz Gebäudekonstruktion

Die Sachbilanz der Gebäudekonstruktion enthält die übliche Unschärfe der vereinfachten Methode nach DGNB. Durch die Nichtbeachtung von Anschlussdetails und untergeordneten Bauteilen (z.B. Leitungen, Schalter, Anschlussbleche etc.) stellt das Modell kein exaktes Abbild des realen Gebäudes dar. Die Ungenauigkeiten dieses Vorgehens werden durch einen pauschalen Aufschlag auf die Ergebnisse der Wirkungsbilanz berücksichtigt.¹⁶

Einen positiven Einfluß auf die Bilanz bietet bei Sanierungen die Möglichkeit, die bestehende Primärstruktur als Teil eines vorangegangenen Lebenszyklus zu betrachten und nicht in die Bilanzierung einzubeziehen. Diese Methode vernachlässigt die möglichen Umweltwirkungen der bestehenden Baustuktur und wäre durch die Annahme einer verlängerten Nutzungsdauer für diese Bauteile ausgleichbar. Da im Bestand die verbauten Baustoffe oft nicht mehr eindeutig bestimmbar sind, der Aufwand für die Herstellung zum Zeitpunkt der Erstellung nicht ermittelt werden und zum Zeitpunkt der Sanierung kein Einfluss mehr auf die vorgefundene Primärkonstruktion ausgeübt werden kann, wird diese in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Aufgrund fehlender Datensätze in der ökobau.dat 2011 zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Untersuchung konnte die Photovoltaikanlage bei den Wärmeerzeugungsanlagen nicht berücksichtigt werden. Die Datenbank GEMIS bietet zwar Werte für Herstellung und Entsorgung an, jedoch nicht für alle untersuchten Wirkungskategorien und auch nicht spezifisch für die verwendete Anlagenart. Um dennoch eine grobe Einschätzung der

16 Vgl. Hegger, 2011, S. 46.

Umweltwirkungen der PV-Anlage zu erhalten wurde das Treibhauspotential anhand der Angaben von Mariska Wild de Scholten in „Life Cycle Assessment of Photovoltaics“¹⁷ berechnet und separat in Kapitel 2.9 dargestellt.

Bauteile mit unterschiedlicher Nutzungsdauer werden im Rahmen der Untersuchung anhand ihrer rechnerischen Nutzungsdauer instandgesetzt, unabhängig davon ob der Austausch des jeweiligen Bauteils den Ersatz anderer Bauteile mit längerer Nutzungsdauer nach sich ziehen würde.

2.3.2 Sachbilanz Betrieb

Die Sachbilanz des Gebäudebetriebs basiert auf dem Energieeinsparnachweis nach der Energieeinsparverordnung EnEV 2009, berechnet nach DIN V 18599 : 2007/02.

Für die Ökobilanzierung werden der rechnerisch ermittelte Endenergiebedarf für Wärme und Strom verwendet.

Dieser beträgt für Wärme 6.367 kWh/a. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 50 Jahren werden demnach 318.350 kWh für die Wärmeerzeugung verbraucht. Für den Haushaltsstromverbrauch wird von einem Wert von 2.500 kWh/a ausgegangen.

Die Photovoltaik hat eine errechnete Stromproduktion von durchschnittlich 9.880 kWh/a. Das ergibt eine Stromproduktion von 494.000 kWh innerhalb der angenommenen Gebäudenutzungsdauer von 50 Jahren. Ca. 23% des produzierten Stroms werden direkt zum Betrieb der Wärmepumpe und der elektrischen Geräte des energy+Home genutzt, die restlichen 77% werden direkt in das Stromnetz eingespeist und ersetzen dabei dort Strom aus anderen Energiequellen. Dementsprechend kann eine vermiedene Stromproduktion aus dem Strom-Mix Deutschland gutgeschrieben werden.

In die Berechnung der Ökobilanz wird die Einspeisung entsprechend EEG in den ersten 20 Jahren als negativer Wert separat ausgewiesen und bilanziert und für die folgenden 30 Jahre der Energiebedarf des Gebäudes um die Leistung der installierten Anlage reduziert und damit in die Berechnung einbezogen.¹⁸

2.3.3 Einschränkungen der Sachbilanz Gebäudebetrieb

Da es sich bei der EnEV-Berechnung nur um eine theoretische Berechnung handelt, welche durch das Nutzerverhalten maßgeblich beeinflusst wird, repräsentiert der ermittelte Bedarf nicht die realen Gegebenheiten. Da die Ökobilanzierung jedoch selbst nur ein auf einem theoretischen Modell möglicher Umweltwirkungen basiert, sind die ermittelten Werte als ausreichend anzunehmen. Insbesondere durch die vereinheitlichte Berechnung auf Grundlage des Energiebedarfs wird eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Gebäuden gewährleistet.

17 Vgl. Mariska Wild de Scholten in „Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2013, S.16, abrufbar unter <http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2013-Life-Cycle-Assessment-of-Photovoltaics.pdf> [15.09.2014].

18 Vgl. DGNB Kriteriensteckbrief ENV 1.1 Ökobilanz - Emissionsbedingte Umweltwirkungen, S.9.

2.4 Geometrische und materielle Bestimmung des Bestandes

In diesem Kapitel werden die für die ökologische Bilanzierung des Gebäudes relevanten Baustoffarten, Baustoffmassen und Flächen des Bestandsgebäudes, sowie weitere Kennzahlen der Sanierungsmaßnahme zusammengestellt. Diese Untersuchung dient als Grundlage für die folgende Bilanzierung der Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion und des Gebäudebetriebs. Die Ermittlung erfolgt anhand der Ausführungsplanung, den Handwerkeraufmaßen, Ausschreibungstexten sowie den Abrechnungen der ausgeführten Arbeiten und vergüteten Materialbewegungen.

2.4.1 Massenermittlung Gebäudekonstruktion

Nachfolgend werden die Bezeichnungen der Innen- und Außenwände für die Grundrisse Erdgeschoss und Untergeschoss dargestellt sowie die Grundrisse mit Eintragung der neuen (rot) und abgebrochenen (gelb) Bauteile. Die Differenzierung der Wandbezeichnungen ist den unterschiedlichen Bauteilaufbauten der einzelnen Wandabschnitte geschuldet und dient der systematischen Erfassung der Baumassen.

Im Anschluss daran werden die Bauteilaufbauten und ermittelten Stoffmengen als Grundlage für die Wirkungsbilanz aufgeführt. Die Bauteilaufbauten sind gemäß DIN 276 gegliedert und unter Berücksichtigung der für das sogenannte „Vereinfachte Rechenverfahren“ der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGBN) für die Ökobilanzierung von Gebäuden im Rahmen der Zertifizierung eingeführten Gliederung sortiert:

- (1) Außenwände inklusive Fenster
- (2) Dächer
- (3) Geschossdecken inkl. Fußbodenaufbau und -belägen
- (4) Gründung und Fundamente
- (6) Innenwände, Türen und Stützen
- (7) Wärmeerzeugungsanlagen sowie Lufttechnische Anlagen

In der Auswertung der Massen werden die einzelnen Baustoffe dargestellt, welche in der bestehenden Bausubstanz bereits bei der Errichtung des Gebäudes 1969 verbaut wurden, die Baustoffe, welche bei der Sanierung 2011 dem Gebäude hinzugefügt wurden und welche Baustoffe im Rahmen der Sanierung abgebrochen und entsorgt wurden. Diese Ermittlung dient der vergleichenden Beurteilung der im Kapitel 3 betrachteten Sanierungsvarianten.

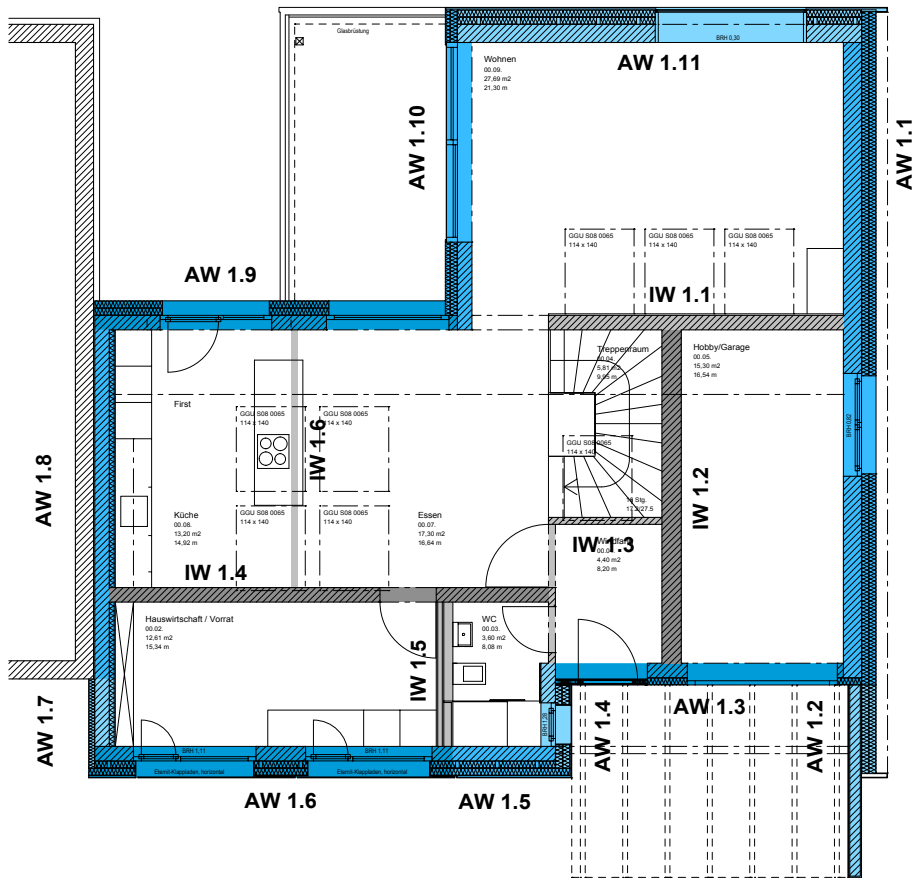


Abbildung 2.1: Grundriss EG
Bezeichnung der Außen- und Innenwände als Grundlage der Massenermittlung

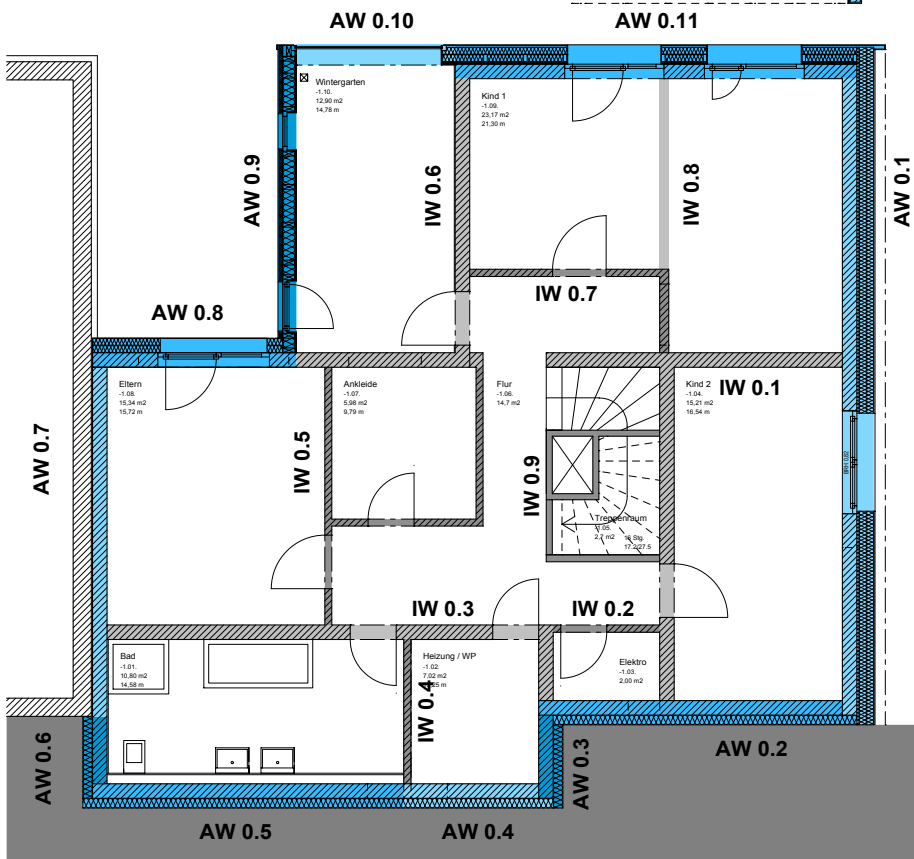


Abbildung 2.2: Grundriss UG
Bezeichnung der Außen- und Innenwände als Grundlage der Massenermittlung

Abbildung 2.3: Grundriss EG
 Bestand (schwarz)/ Abbruch (gelb)
 / Neubau (rot)

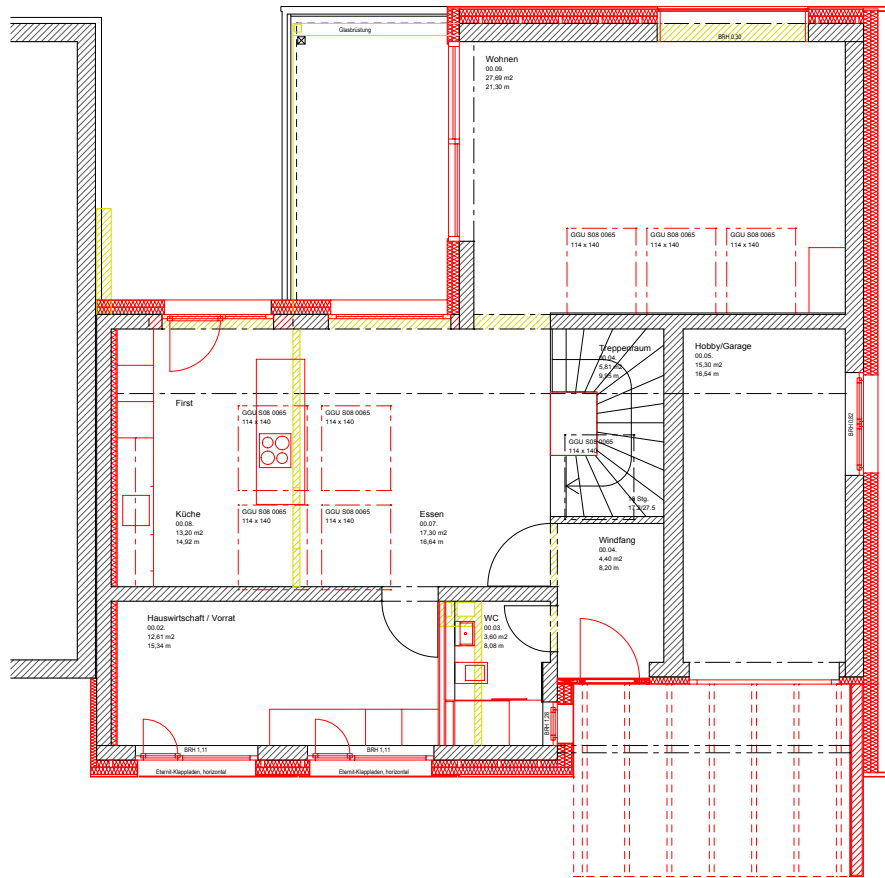
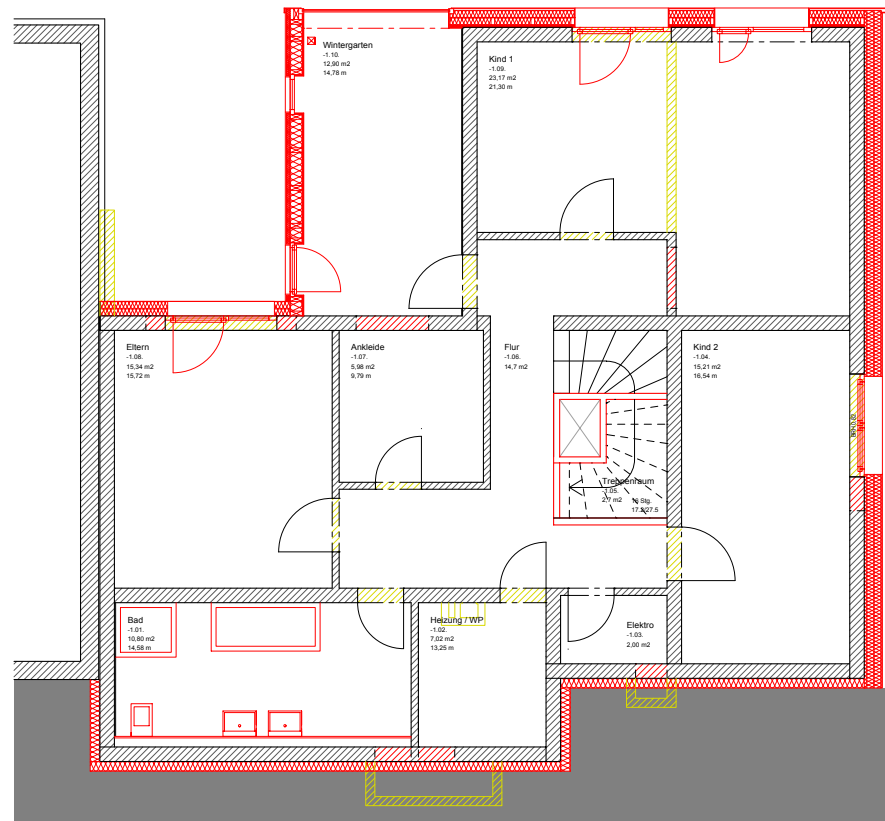


Abbildung 2.4: Grundriss UG
 Bestand (schwarz)/ Abbruch (gelb)
 / Neubau (rot)



2.4.2 Massenermittlung KG 330: Außenwände inkl. Fenster

Außenwände

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebens- dauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Kalksandstein	54,74	6.174,98		[kg]	50	1.3.01 Kalksandstein	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
2	Bimshohlblocksteine	58,69		2,21	[m³]	50	1.3.04 Bimshohlblocksteine	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
3	Holz, KVH C24		2,00		[m³]	50	3.1.02 Konstruktionsvollholz	3.4.03 End of life Holz in MVA
4	Betonfertigteil			5,97	[m²]	50	3.3.05 Betonfertigteil	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
5	Kalkzementputz	11.783,46	4.678,20	233,60	[kg]	40	1.4.04 Gipsputz	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
6	Gipsputz	3.522,84	107,25	116,80	[kg]	45	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
7	Eternit Fassadenplatten		1.177,47		[kg]	50	EPD-ETE-2008111-D	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
8	Dämmung / Mineralwolle		1.911,81		[kg]	50	EPD-GHI-2008111	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
9	Polystyrol Schaum		199,52		[kg]	40	2.3.01 XPS Dämmstoff	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
10	Holzfaserdämmplatte		0,72		[m³]	40	2.10.01 Holzfaserdämmplatte	3.4.03 End of life Holz in MVA
11	Winddichtungsfolie		16,62		[kg]	40	6.6.03 PE-HD mit PP Vlies	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA
12	PE-Folie		16,26		[kg]	40	6.6.02 Dampfbremse PE	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA
13	Polyurethan Schaum		50,05		[kg]	50	2.4.03 Polyurethan	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
14	Fensterglas		2,34		[m²]	50	7.2.01 Fensterglas	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
15	Gipskarton		47,22		[m²]	50	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
16	Außenfenster / Kunststoff		113,95	100,14	[m]	40	7.1.09 Blendrahmen PVC-U	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA
17	Beschläge		15,00	16,00	[Stk]	30	7.4.01 Verbund Fenster Stahl	7.5.01 End of life Tür Fenster Verband
18	Verglasung		54,51	42,83	[m²]	30	7.2.01 Fensterglas	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
19	Dichtungsprofile		113,95	100,14	[m]	20	7.3.01 Dichtungsprofile	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA

2.4.3 Massenermittlung KG 360: Dach

Dächer

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebens- dauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Tragkonstruktion Holz	3,19	3,41	2,38	[m³]	50	Konstruktionsvollholz	3.4.03 End of life Holz in MVA
2	Dachflächenfenster Kunststoff		7,00		[Stk]	40	Velux GGU SK08-073	Velux GGU SK08-073
3	Dachdeckung / Faserzement		9.071,87	9.071,87	[kg]	50	EPD-ETE-2008211-D	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
4	Dämmung / Mineralwolle		1.934,86		[kg]	50	EPD-GHI-2008111-D	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
5	Stahl galvanisch verzinkt		18,84		[kg]	30	4.1.04 Stahl-Feinblech	7.5.01 End of life Tür- und Fensterband
6	Unterdach / Unterspannbahn		92,28		[kg]	30	6.6.01 Unterspannbahn	6.9.01 Verbrennung in MVA
7	Dampfbremse PE-Folie		31,18		[kg]	40	6.6.02 Dampfbremse PE	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA
8	Zementgebundene Faserplatte		295,80		[kg]	50	VEPD-ETE-2009131-D	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
9	Eternit-Fassadenplatten		49,90		[kg]	50	EPD-ETE-2008111-D	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
10	Gipskarton		141,75		[m²]	50	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung

2.4.4 Massenermittlung KG 324: Geschossdecken

Decken

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Decken Stahlbeton	19,76			[m³]	50	1.4.01 Transportbeton	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
2	Bewehrungsstahl	0,40			[m³]	50	4.1.02 Bewehrungsstahl	EPF-BFS-2010111-D
3	Trittschalldämmung / PUR		3,36	3,75	[m³]	50	2.4.03 Polyurethan	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
4	Zementestrich, inkl. FBH		10.139,80	8.603,10	[kg]	50	1.4.03 Zementestrich	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
5	Massivholzdielen		67,90		[m²]	50	3.3.02 Stabparkett	3.4.03 End of life Holz in MVA
6	Keramische Fliesen		31,89	65,70	[m²]	50	Mosa EPD Floor Tiles	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
7	Teppichboden			25,60	[kg]	10	-	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
8	Natursteinplatten			290,00	[kg]	50	-	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
9	PE-Folie		27,41	48,14	[kg]	35	6.6.02 Dampfbremse PE	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA
10	Holzbalkendecke	6,09		3,72	[m³]	50	3.1.02 Konstruktionsvollholz	3.4.03 End of life Holz in MVA
11	Gipskarton		41,20		[m²]	50	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung

2.4.5 Massenermittlung KG 350: Bodenplatte

Gründung

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Bodenplatte / Stahlbeton	17,67	1,67		[m³]	50	1.4.01 Transportbeton	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
2	Schotter		1.559,04		[kg]	50	1.2.02 Schotter	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
3	Trittschalldämmung / PUR		5,68	3,03	[m³]	50	2.4.03 Polyurethan	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
4	Zementestrich, inkl. FBH		12.295,80	13.345,20	[kg]	50	1.4.03 Zementestrich	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
5	Massivholzdielen		90,25		[m²]	50	3.3.02 Stabparkett	3.4.03 End of life Holz in MVA
6	Keramische Fliesen		18,70	80,40	[m²]	50	Mosa EPD Floor Tiles	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
7	Abdichtung Bodenplatte / PE-Folie		74,82	136,09	[kg]	35	6.6.02 Dampfbremse PE	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA

2.4.6 Massenermittlung KG 322: Fundament

Fundamente

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Fundamente / Stahlbeton	18,03	1,97		[m³]	50	1.4.01 Transportbeton	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
2	Bewehrungsstahl	0,36	0,04		[m³]	50	4.1.02 Bewehrungsstahl	EPF-BFS-2010111-D

2.4.7 Massenermittlung KG 340, 344: Innenwände und Türen

Innenwände

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Mauerwerkswand / KS	57.967,30	472,52	3.530,21	[kg]	50	1.3.01 Kalksandstein	9.5.01 Bauschuttzubereitung
2	Metallständerwand		19,32		[m ²]	50	ESD-BVG Metallständerwand	ESD-BVG Metallständerwand
3	Stahlstütze		68,64		[kg]	50	4.1.03 Stahl-Hohlprofile	Fehler in Tab Wirkungskat.
4	Innenanstriche / Dispersion	45,50	6,52		[kg]	15	5.5.02 Innenfarbe Dispersion	9.5.01 Bauschuttzubereitung
5	Gipsputz	3.021,13	17,63	327,13	[kg]	50	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
6	Keramische Fliesen		2,46	15,13	[m ²]	50	Mosa EPD Wall Tiles	9.5.01 Bauschuttzubereitung
7	Gipskartonplatten		19,34		[m ²]	50	1.3.13 Gipskartonplatte	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
8	Mineralwolle 032		24,42		[kg]	50	EPD-GHI-2008111	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
9	Glas		3,24		[m ²]	50	7.2.01 Fensterglas	9.5.02 Bauschutt-Deponierung

Türen

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Spanplatten		1,21	1,21	[m ²]	50	EPD-VHI-2012111-D	EPD-VHI-2012111-D
2	Beschläge		13,00	14,00	[Stk]	30	7.4.01 Verbund Fenster Stahl	7.5.01 End of life Tür Fenster Verband
3	Verglasung		2,24		[m ²]	30	7.2.01 Fensterglas	9.5.02 Bauschutt-Deponierung
4	Dichtungsprofile		74,69	71,39	[m]	20	7.3.01 Dichtungsprofile	6.8.02 Verbrennung Kunststoff in MVA

2.4.8 Massenermittlung KG 420: Wärmeerzeugungsanlagen

Wärmeerzeugungsanlagen

	Baustoff	Menge			Einheit	Lebensdauer	Datensatz Herstellung	Datensatz Entsorgung
		Bestand	Neu	Abbruch				
1	Luft-Wasser-Wärmepumpe		1		[Stk.]	20	8.1.01 Strom-Wärmepumpe	8.7.01 End of life Strom-Wärmepumpe
2	Warmwasserspeicher		140,00		[kg]	20	8.1.03 Pufferspeicher	8.7.01 End of life Pufferspeicher
3	Lüftungsgerät mit WRG		1		[Stk.]	20	8.2.01 Lüfter zentral	8.7.02 End of life Lüftung zentral
4	Öl-Brennwertkessel			1	[Stk.]			8.7.01 End of life Öl-Brennwertkessel
5	Öltank			1	[Stk.]			8.7.01 End of life Öltank

2.5 Recherche der Umwelt-Produkteigenschaften

Für die untersuchten Bauteile werden im Folgenden die Bestandswerkstoffe und deren Umweltwirkungen dargestellt. Als Datengrundlage für die Umweltwirkungen dient die Ökobau.dat Datenbank des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Diese stellt durchschnittliche Datensätze für ca. 700 Baumaterialien zur Verfügung. Lagen für die verwendeten Produkte spezifische EPD's (Environmental Product Declarations) vor, so wurden diese verwendet. Waren diese nicht erhältlich, so wurden die generischen Datensätze aus der Ökobau.dat verwendet.

Die Gliederung der betrachteten Bauteile bzw. Materialien erfolgt nach Kostengruppen, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Die angegebenen Nutzungsdauern der Bauteilen orientieren sich an den Vorgaben des Bundesinstituts für Bau- Stadt- und Raumforschung.¹⁹ Wenn Materialien in verschiedenen Bauteilen verwendet wurden sind sie in Tabelle 2.2 mehrfach genannt, auch wenn die EPD's identisch sind (z.B. Stahlbeton bei der Gründung und den Decken).

Tabelle 2.2: Untersuchte Bauteile und deren Lebensdauer gemäss BBSR nach Kostengruppen gegliedert

KG	Bauteil / Material	t _{life} [a]	KG	Bauteil / Material	t _{life} [a]
320	Gründung		350	Decken	
322	Fundamente, Bodenplatte	≥ 50	351	Stahlbetondecke	≥ 50
324	Schotter	≥ 50	351	Holzbalkendecke	≥ 50
325	Zementestrich	≥ 50	352	Trittschalldämmung	≥ 50
325	Trittschalldämmung	≥ 50	352	Zementestrich	≥ 50
325	Massivholzdielen	≥ 50	352	keramische Fliesen	≥ 50
325	keramische Fliesen	≥ 50	352	Massivholzdielen	≥ 50
325	textiler Bodenbelag	10	353	Gipskartonbekleidung	≥ 50
325	Natursteinplatten	≥ 50	360	Dächer	
326	Abdichtung Bodenplatte	35	361	Tragkonstruktion Holz KVH	≥ 50
330	Außenwände		362	Dachflächenfenster	40
331	Bimshohlblocksteine	≥ 50	363	Dachdeckung / Faserzement	≥ 50
331	Holz KVH	≥ 50	363	Auf- und Zwischensparren-	≥ 50
331	Betonfertigteil	≥ 50		dämmung	
334	Außenfenster / Kunststoff	40	363	Stahlblech galv. verzinkt	30
334	Beschläge	40	364	Unterdach / Unterspannbahn	30
334	Verglasung	40	364	Dampfbremse PE-Folie	40
334	Dichtungsprofile	20	400	Energieerzeugungsanlagen	
335	Außenanstrich	20	420	Wärmepumpe	20
335	Kalkzementputz	45	420	Pufferspeicher	20
335	Gipsputz	45	430	Lüftungsanlage	20
340	Innenwände				
341	Kalksandstein	≥ 50			
342	Metallständerwand	≥ 50			
343	Stahlstütze	≥ 50			
345	Innenanstriche / Dispersion	15			
345	Gipsputz	≥ 50			
345	keramische Fliesen	≥ 50			
345	Gipskartonplatten	≥ 50			

¹⁹ Vgl. Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB; <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html> [15.10.2013].

Tabelle 2.3: Umweltwirkungen, Referenzeinheiten und Lebensdauer der verbauten Baustoffe im energy'Home

Material	t _{life} a	PE _{ne} MJ	PE _e MJ	GWP 100 kg CO ₂ - Äquiv.	ODP kg R ₁₁ - Äquiv.	POCP kg C ₂ H ₄ - Äquiv.	AP kg SO ₂ - Äquiv.	EP kg PO ₄ - Äquiv.	Datensatz
Transportbeton C20/25	m3 ≥ 50	1133	20,7	2,17E+02	5,90E-06	4,00E-02	3,94E-01	5,59E-02	ökobau.dat - 1.4.01
Bewehrungsstahl	kg ≥ 50	10,2	1,13	6,29E-01	2,10E-09	1,72E-04	1,62E-03	1,33E-04	ökobau.dat - 4.1.02
Kies	kg ≥ 50	0,0334	0,00409	2,34E-03	6,70E-12	7,26E-07	7,00E-07	9,21E-07	ökobau.dat - 1.2.01
Schotter 16/32	kg ≥ 50	0,221	0,0332	1,40E-02	6,16E-11	2,60E-06	3,20E-05	3,89E-06	ökobau.dat - 1.2.02
Magerbeton / Normalmörtel	kg ≥ 50	0,649	0,0116	8,94E-02	2,26E-09	2,34E-05	2,07E-04	4,23E-05	ökobau.dat - 1.4.02
Polyurethan Trittschalldämmung PUR 023	m3 ≥ 50	3033	51,27	1,47E+02	2,45E-06	7,80E-02	4,65E-01	4,77E-02	ökobau.dat - 2.4.03*
Zementestrich	kg ≥ 50	1,56	0,0249	1,79E-01	4,95E-09	4,26E-05	3,64E-04	5,61E-05	ökobau.dat - 1.4.03
Massivholzdielen	m2 ≥ 50	126	611	-3,35E+01	3,38E-09	1,12E-02	3,88E-02	3,99E-03	ökobau.dat - 3.3.02
Keramische Bodenfliesen	m2 75	163,074	0	8,81E+00	9,17E-07	2,05E-03	1,69E-02	1,74E-03	Mosa.Tiles
textiler Bodenbelag	m2 10	107	2,17	6,45E+00	3,29E-07	2,29E-03	1,50E-02	2,47E-03	ökobau.dat - 6.2.05
Natursteinplatten, hart	m2 ≥ 50	564	50,01	4,22E+01	6,14E-07	2,87E-02	4,46E-01	4,19E-02	ökobau.dat - 1.3.08
Kalksandstein	kg ≥ 50	1,053	0,048	1,31E-01	2,32E-09	1,08E-05	1,11E-04	1,58E-05	ökobau.dat - 1.3.01
Bimshohlblocksteine	m3 ≥ 50	744	57,4	8,38E+01	2,24E-06	2,86E-02	2,83E-01	3,04E-02	ökobau.dat - 1.3.04
Holz KVH C24	m3 ≥ 50	4271	10680	-8,22E+02	6,11E-07	6,16E-02	6,63E-01	7,23E-02	ökobau.dat - 3.1.02
Betonfertigteil	m2 ≥ 50	311	15,6	4,14E+01	2,41E-08	1,14E-02	9,71E-02	1,15E-02	ökobau.dat - 3.3.05
Kunststoff Blendrahmen	m 40	161	6,98	8,28E+00	8,18E-08	4,37E-03	2,56E-02	2,50E-03	ökobau.dat - 7.1.09
Flügelrahmen	m 40	186	8,26	9,29E+00	9,97E-08	4,92E-03	2,84E-02	2,81E-03	ökobau.dat - 7.1.09
Beschläge	Stk. 40	125	11,4	8,94E+00	4,52E-08	3,82E-03	3,45E-02	2,50E-03	ökobau.dat - 7.4.01
Verglasungen 3-fach Isolierverglasung	m2 40	645	19,05	5,13E+01	3,45E-08	1,85E-02	2,64E-01	4,08E-02	ökobau.dat - 7.2.01 (*1,5)
Dichtungsprofile	m 40	42,5	1,55	1,57E+00	3,19E-08	1,43E-03	3,98E-03	8,00E-04	ökobau.dat - 7.3.01
Außenanstrich, Fassadenfarbe Dispersion	kg 20	47,08	2,1	2,16E+00	6,73E-09	1,94E-02	1,01E-02	6,69E-04	ökobau.dat - 5.4.01
Kalkzementputz	kg 45	1,51	0,153	1,98E-01	5,70E-09	3,50E-05	3,43E-04	7,97E-05	ökobau.dat - 1.4.04
Keramische Wandfliesen	m2 ≥ 50	93,258	-	5,63E+00	4,60E-07	5,84E-04	4,13E-03	8,50E-04	Mosa.Tiles
Gipsputz	kg 45	2,24	0,115	1,43E-01	1,94E-10	2,12E-05	2,01E-04	2,32E-05	ökobau.dat - 1.4.04
Zementgebundene Faserplatte	kg ≥ 50	6,467	1,014	7,00E-01	3,14E-08	1,52E-04	1,29E-03	1,83E-04	VEPD-ETE-2009131-D
Eternit-Fassadenplatte	kg ≥ 50	14,323	3,89	9,29E-01	8,98E-09	5,20E-04	4,73E-03	3,40E-04	EPD-ETE-2008111-D

Material	t _{life} a	PE ne MJ	PE e MJ	GWP 100 kg CO ₂ - Äquiv.	ODP kg R ₁₁ - Äquiv.	POCP kg C ₂ H ₄ - Äquiv.	AP kg SO ₂ - Äquiv.	EP kg PO ₄ - Äquiv.	Datensatz
Mineralwolle 032 Isover Ultimate	kg ≥ 50	57,7	1,7	3,27E+00	2,00E-07	6,00E-04	1,47E-02	2,40E-03	EPD- GHI-2008311
Mineralwolle 040 Isover Steinwolle	kg ≥ 50	25,25	1,13	1,61E+00	1,30E-07	3,60E-04	4,40E-03	5,04E-04	EPD-GHI- 2008111-D
Polystyrol Extruderschäum	kg 40	95,6	1,96	3,16E+00	1,57E-08	2,86E-03	6,98E-03	6,37E-04	ökobau.dat - 2.3.01
Holzfaserdämmplatte	m3 40	2026	3353	-2,30E+02	2,27E-07	4,02E-02	1,93E-01	2,23E-02	ökobau.dat - 2.10.01
OSB-Platte	m3 40	5374	12307	-7,78E+02	2,53E-05	1,28E-01	9,41E-01	1,31E-01	ökobau.dat - 3.2.04
Spanplatten, beschichtet	m3 50	4930	9750	-7,19E+02	2,46E-05	1,39E-01	7,31E-01	2,28E-01	EPD-VHI- 2012111-D
Spanplatten, beschichtet	m3 50	-12600	-524	3,80E+02	-8,17E-05	-5,58E-02	-6,84E-01	-3,68E-02	EPD-VHI- 2012111-D
Winddichtungsfolie	kg 40	85,09	1,56	2,38E+00	3,22E-09	1,09E-03	4,65E-03	3,91E-04	ökobau.dat - 6.6.03
PE-Folie	kg 40	70,9	1,8	2,10E+00	3,55E-09	1,20E-03	7,53E-03	6,48E-04	ökobau.dat - 6.6.02
Metallständerwand GK doppelt beplankt	m2 ≥ 50	264,73	15,7	1,62E+01	2,27E-08	1,02E-03	3,65E-02	5,72E-03	ESD-BVG- 2013111-D
Metallständerwand GKF doppelt beplankt	m2 ≥ 50	13,69	4,5	4,18E+00	6,08E-10	1,97E-03	6,12E-03	2,29E-02	ESD-BVG- 2013111-D
Stahl-Hohlprofil	kg ≥ 50	28,3	0,669	2,04E+00	1,74E-08	8,31E-04	4,93E-03	4,18E-04	ökobau.dat - 4.1.03
Innenanstriche / Dispersion	kg 15	65,01	2,75	2,84E+00	6,94E-09	9,75E-03	1,15E-02	8,06E-04	ökobau.dat - 5.5.02
Fensterglas, einfach	m2 ≥ 50	134	3,075	8,67E+00	5,48E-08	4,51E-03	8,13E-02	8,31E-03	ökobau.dat - 7.2.01
Gipskartonplatte	m2 ≥ 50	37,3	2,11	2,16E+00	1,71E-07	4,79E-04	5,53E-03	8,77E-04	ökobau.dat - 1.3.13
Stahlblech	kg 30	29,8	0,705	2,16E+00	1,17E-09	1,16E-03	7,86E-03	6,53E-04	ökobau.dat - 4.1.04
Unterspannbahn PES Spinnvlies mit Acrylatbeschichtung	kg 30	82,4	2,68	3,44E+00	6,03E-09	3,30E-03	1,08E-02	1,09E-03	ökobau.dat - 6.6.01
Dachfenster Velux GU	Stk. 40			1,65E+02	1,00E-05	6,00E-02	9,80E-01	1,60E-01	Velux GGU SK08-073
Eternit Dachsteine Solesia Kapstadt	kg ≥ 50	2,345	0,03	2,54E-01	9,90E-09	6,00E-05	5,70E-04	6,12E-08	EPD-ETE- 2008211-D
Bauschutttaufbereitung	kg	0,0535	0,00214	2,72E-03	1,90E-12	2,69E-06	2,53E-05	4,43E-06	ökobau.dat - 9.5.01
Bauschutt-Deponierung	kg	0,196	0,0145	2,22E-02	1,10E-11	1,16E-05	9,27E-05	1,30E-05	ökobau.dat - 9.5.02
Thermische Verwertung Holz	kg	-11,9	-0,91	1,07E+00	-1,69E-11	-8,32E-05	-8,27E-04	-7,34E-05	ökobau.dat - 3.4.03
Thermische Verwertung Polystyrol	kg	-27,7	-2,2	1,65E+00	-4,09E-09	-2,05E-04	-2,20E-03	-2,14E-04	ökobau.dat - 6.8.01
Thermische Verwertung Kunststoff	kg	-24,4	-1,94	9,42E-01	-3,61E-09	-1,75E-04	-1,51E-03	-1,86E-04	ökobau.dat - 6.8.02
Recycling Fenster	Stk.	-60,8	-14,9	-4,70E+00	-3,83E-07	-1,53E-03	-2,67E-02	-8,49E-03	ökobau.dat - 7.5.01

Material	t _{life} a	PE ne MJ	PE e MJ	GWP 100 kg CO ₂ - Äquiv.	ODP kg R ₁₁ - Äquiv.	POCP kg C ₂ H ₄ - Äquiv.	AP kg SO ₂ - Äquiv.	EP kg PO ₄ - Äquiv.	Datensatz
Wärmepumpe	Stk. 20	183698	4248	5,33E+03	3,90E-04	2,45E+00	1,25E+01	1,07E+00	ökobau.dat - 8.1.01
Wärmepumpe - eol	Stk.	-1919	-51,1	-1,56E+02	-2,78E-07	-8,49E-02	-6,71E-01	-5,05E-02	ökobau.dat - 8.7.01
Pufferspeicher	kg 20	6510	240,8	3,85E+02	1,13E-06	1,92E-01	1,13E+00	1,06E-01	ökobau.dat - 8.1.03
Pufferspeicher - eol	kg	-2170	-18,34	-1,14E+02	-8,32E-09	-8,90E-02	-5,36E-01	-4,82E-02	ökobau.dat - 8.7.01
Lüftungsanlage	Stk. 20	4668	493	3,52E+02	1,80E-06	1,58E-01	1,60E+00	1,07E-01	ökobau.dat - 8.2.01
Lüftungsanlage - eol	Stk.	-2533	-319	-2,15E+02	-1,10E-06	-9,84E-02	-1,01E+00	-6,17E-02	ökobau.dat - 8.7.02
Öl-Brennwertkessel - eol	Stk.	-6455	-361	-4,79E+02	-1,39E-06	2,62E-01	-2,20E+00	-1,56E-01	ökobau.dat - 8.7.01
Öltank - eol	Stk.	-1342	-31,7	-4,83E+01	-4,52E-08	-4,45E-02	-3,05E-01	-2,54E-02	ökobau.dat - 8.7.01
Nutzung Strom		9,65	1,64	5,96E-01	3,06E-09	8,38E-05	1,18E-03	1,09E-04	ökobau.dat - 9.2.05

2.6 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung ist der Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebenswegs des Produktes gilt.²⁰ Dieses Produkt ist in der vorliegenden Untersuchung das energy+Home.

In der Wirkungsabschätzungsphase wird die Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt. Dazu werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft, wobei versucht wird, die potenziellen Wirkungen zu erkennen und Informationen für die Auswertung der Ökobilanz zu gewinnen.²¹

Die Daten der Sachbilanz während des Produktlebenszyklus stellen die Basis für die Wirkungsabschätzung dar. Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse, ermittelt in Kapitel 2.4 „Geometrische und materielle Bestimmung des Bestandes“, zu den Wirkungsindikatoren sowie deren Werteberechnung ist in den Umwelt-Produktdeklarationen sowie der verwendeten Datenbank Ökobatt dat vorgenommen und wurde in Kapitel 2.5 „Recherche der Umwelt-Produkteigenschaften“ dargelegt.

Die Auswahl der untersuchten Kategorien stellt lediglich einen Ausschnitt der viel umfangreicheren Faktoren ökologischer Auswirkungen dar, wie sie als gängige Schablone bei der Betrachtung von Ökobilanzen angewendet wird. Die einzelnen Wirkungskategorien wurden dabei untereinander nicht gewichtet sondern getrennt bewertet.

2.6.1 Auswahl von Wirkungskategorien und -indikatoren

²² Folgende allgemein als Grundlage für die Normung anerkannte Umweltindikatoren gemäss DIN 15978:2012-10 und DIN 15804:2012-04 wurden betrachtet:

Umweltindikatoren

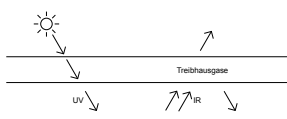
- Treibhauspotential (GWP 100) in [kg CO₂ - Äquivalent]
- Ozonabbaupotential (ODP) in [kg R₁₁ Äquivalent]
- Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP) in [kg C₂H₄ - Äquivalent]
- Versauerungspotential (AP) in [kg SO₂ - Äquivalent]
- Eutrophierungspotential (EP) in [kg PO₄ - Äquivalent]

Als Indikatoren für den Einsatz von Ressourcen wurden folgende Umweltaspekte untersucht:

Umweltaspekte

- Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar PEI n.-ern [MJ]
- Primärenergiebedarf erneuerbar PEI ern. [MJ]

Abbildung 2.5: Schema Treibhauspotential



a. Treibhauspotential GWP [kg CO₂ – Äq.]

Der Treibhauseffekt beschreibt die Wechselwirkung zwischen Sonneneinstrahlung und Erdatmosphäre. Kurzwellige UV- und Lichtstrahlung von der Sonne dringt in die Atmosphäre und wird dort durch Absorption in langwellige Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) umge-

²⁰ Vgl. DIN EN ISO 14044:2006-10, S.33 ff.

²¹ DIN EN ISO 14040:2009-11, S.27.

²² Vgl. König, 2009, S. 45ff sowie DGNB Kriterium ENV 1.1, S. 2 ff und Hegger 2011 S. 47 ff.

wandelt. Spurengase in der Erdatmosphäre (Wasserdampf, Kohlendioxid) verhindern, dass die Infrarotstrahlung ungehindert ins Weltall abgestrahlt wird. Durch diesen „natürlichen Treibhauseffekt“ wird die Temperatur auf der Erdoberfläche bei durchschnittlich +15°C gehalten, ansonsten läge sie bei -18°C. Durch menschliche Aktivitäten (z.B. Verbrennungsprozesse) werden zusätzliche, so genannte anthropogene Treibhausgase wie z.B. Kohlendioxid, Methan oder FCKW freigesetzt. Diese Gase verstärken den natürlichen Treibhauseffekt und sorgen somit für eine zusätzliche Erwärmung der Atmosphäre. Das Treibhauspotential (Global Warming Potential) beschreibt den Beitrag eines Stoffs zum anthropogenen Treibhauseffekt und wird in kg Kohlendioxid - Äquivalent (CO_2 - Äq.) angegeben. Je niedriger der Wert des CO_2 -Äquivalents ist, umso niedriger ist die potentielle Wirkung auf die globale Erwärmung und den damit verbundenen Umweltwirkungen. Alle Emissionen werden bezüglich ihres potentiellen Treibhauseffektes zu CO_2 ins Verhältnis gesetzt. Da die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre berücksichtigt werden muss, wird der betrachtete Zeitraum immer mit angegeben. Dieser ist üblicherweise auf 100 Jahre normiert.

b. Ozonabbaupotential ODP [kg R_{11} -Äq.]

Das Ozon (O_3) in der Stratosphäre absorbiert einen Teil der UV-Strahlung der Sonne, die beim Menschen zu Schädigungen von Haut und Augen führen kann. Als Ozonabbau bezeichnet man die Verringerung dieser Ozonschicht vor allem über der Antarktis (Ozonloch). Verursacht wird die Zerstörung der Ozonschicht vor allem durch halogenierte Kohlenwasserstoffe, wie zum Beispiel Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW). Halogenierte Kohlenwasserstoffe wurden als Treibmittel in Sprays, bei der Herstellung von Schaumstoffen, als Kälte- und Reinigungsmittel und in medizinischen Anwendungen eingesetzt. Durch internationale Abkommen ist die Verwendung von halogenierten Kohlenwasserstoffen inzwischen restriktiv geregelt.²³ Das Ozonabbaupotential wird in kg R_{11} (Trichlorfluormethan) Äquivalent angegeben.

c. Photochemisches Oxidantienbildungspotential POCP [kg C_2H_4 -Äq.]

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial beschreibt die Entstehung von aggressiven Reaktionsprodukten aus flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Kohlenmonoxid und Stickoxiden unter Einwirkung von Sonnenstrahlung. Die entstehenden Reaktionsprodukte, insbesondere Ozon, werden auch Sommersmog genannt. Bodennahe Ozon wirkt in höheren Konzentrationen toxisch auf den Menschen, Nutzpflanzen und ganze Ökosysteme. Die zur photochemischen Oxidantienbildung beitragenden Emissionen werden vor allem vom Autoverkehr (Stickoxide, Kohlenwasserstoffe) und von Industrieanlagen (Kohlenwasserstoffe) freigesetzt. Begünstigt wird die Bildung von Sommersmog durch starke Sonnenstrahlung und austauscharme Wetterlagen.²⁴ Das Ozonbildungspotenzial wird auf die Wirkung von Ethen (C_2H_4) bezogen.²⁵

Abbildung 2.6: Schema Ozonabbaupotential

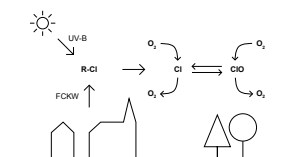
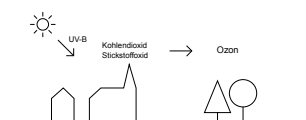


Abbildung 2.7: Schema Photochemisches Oxidantienbildungspotential



23 Vgl. Klöpffer, Walter / Grahl, Birgit, 2009. S. 257ff.

24 Vgl. Klöpffer, Walter / Grahl, Birgit, 2009. S. 257ff.

25 Vgl. Hegger, 2005, S. 99.

Abbildung 2.10: Schema Versauerungspotential

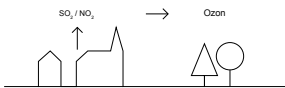


Abbildung 2.8: Schema Eutrophierungspotential

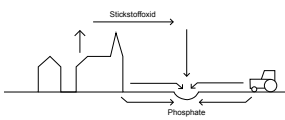
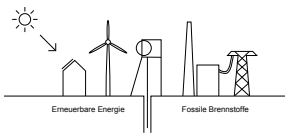


Abbildung 2.9: Schema Primärenergieverbrauch



d. Versauerungspotential AP [kg SO₂-Äq.]

Als Versauerung wird die Verringerung des pH-Werts von Niederschlag durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren (saurer Regen) bezeichnet. Dies führt zu Waldschäden (Waldsterben) und der Versauerung von Böden. An Gebäuden können durch die Korrosion von Metallen und die Zersetzung von Naturstein Schäden entstehen.²⁶ Zur Versauerung tragen hauptsächlich die Emissionen aus der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Brennstoffe wie Kohle und Öl bei, sowie Stickoxide die ebenfalls bei Verbrennungsprozessen freigesetzt werden. Das Versauerungspotential wird in kg Schwefeldioxid (SO₂)-Äquivalent angegeben.²⁷

e. Eutrophierungspotential EP [kg PO₄-Äquivalent]

Unter Überdüngung bzw. Eutrophierung versteht man die lokale Anreicherung von Nährstoffen in einem Ökosystem. In überdüngten Gewässern kann es zu vermehrtem Algenwachstum und Fischsterben bis zum biologischen Tod („Umkippen“) des Gewässers kommen. Überdüngte Pflanzen weisen eine Schwächung des Gewebes und eine geringere Resistenz gegen Umwelteinflüsse auf. Ein hoher Nährstoffeintrag führt außerdem zur Nitratanreicherung im Grund- und Trinkwasser, wo es zu für Menschen giftigem Nitrit reagieren kann. Zur Überdüngung tragen Phosphor und Stickstoff, zum Beispiel aus Düngemitteln oder Haushalts- und Industrieabwässern, bei. Das Überdüngungspotenzial wird in PO₄-Äquivalent angegeben.²⁸

f. Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar PEI n.-ern [MJ]

Der Energieerzeugung und -nutzung kommt sowohl in Bezug auf den ökologischen als auch in Bezug auf den ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitsaspekt besondere Bedeutung zu. Diese Größe enthält aggregiert die Energieäquivalenzwerte der Ressourcen Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran. Die potenzielle Wirkung eines Stoffes für Verbrauch fossiler Energieträger wird in Megajoule (MJ) angegeben.

g. Primärenergiebedarf erneuerbar PEI ern. [MJ]

Analog zum Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PEI n.-ern.) beschreibt diese Wirkungskategorie die Energieäquivalenzwerte der erneuerbaren Energieträger. Obwohl diese Energieträger erneuerbar sind, ist dennoch ein effizienter Umgang mit diesen Ressourcen notwendig, um möglichst schnell einen hohen Anteil erneuerbarer Energieträger an der Energieversorgung erreichen zu können. Diese Effizienz wird in der Wirkungskategorie „Primärenergiebedarf erneuerbar“ beschrieben.

Die beiden Wirkungskategorien Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar werden in der Betrachtung zusammengefasst in der Wirkungskategorie „Gesamtprimärenergiebedarf (PEI)“.

26 Vgl. Klöpffer, Walter / Grahl, Birgit, 2009. S. 263ff.

27 Vgl. Hegger, 2005, S. 99.

28 Vgl. Hegger, 2005, S. 99.

2.6.2 Klassifizierung / Zuordnung der Sachbilanzergebnisse

Wirkungsabschätzung Gebäudekonstruktion

Die folgende Wirkungsabschätzung wird in den oben beschriebenen Wirkungskategorien dargestellt und in je drei Grafiken pro Umweltwirkung illustriert.

- Die potentielle Umweltwirkung der Sanierung zum energy+Home, unterteilt in die Lebenszyklusphasen Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung. Bezugseinheit ist jeweils 1m^2 NGF und Jahr bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren (z.B. $\text{kg CO}_2\text{-Äqv}/\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a}$). Verglichen wird dieser Wert mit dem Referenzwert der DGNB, der sich ebenfalls auf 1m^2 NGF und eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bezieht. Dieser Wert stellt einen durchschnittlichen Wert für ein konventionelles Gebäude (Neubau kleine Wohngebäude, unterschiedliche Bauweise) in Deutschland dar.
- Die potentielle Umweltwirkung des Gebäudes mit Darstellung des prozentualen Anteils der einzelnen Bauteile der Baukonstruktion (Kostengruppe 300) an der Umweltwirkungskategorie, bezogen auf die absoluten Werte über 50 Jahren.
- Um die Bauteile mit dem größten Einfluß auf die jeweilige Umweltwirkungskategorie identifizieren zu können werden die zuvor ermittelten Werte der einzelnen Bauteile als absolute Werte der Umweltkategorie getrennt nach Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung dargestellt.

Die DGNB Referenzwerte errechnen sich aus den im Folgenden abgebildeten Kennwerten:

Netto-Grundfläche NGF	[m ²]	234,85				
Betrachtungszeitraum td	[a]	50				
Endenergiebedarf Strom	[kWh]	2.500	Strombedarf Ref.geb.	S_{ref}	10,65 kWh/m ² a	
Endenergiebedarf Wärme	[kWh]	6.367	Wärmebedarf Ref.geb.	W_{ref}	76,09 kWh/m ² a	
Energieertrag PV	[kWh]	9.880				

Referenzwert	UWP	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Konstruktion	$UWP_{K_{\text{ref}}}$	9,40E+00	5,30E-07	4,20E-03	3,70E-02	4,70E-03
Nutzung	$UWP_{NS_{\text{ref}}}$	6,60E+00	3,27E-08	8,11E-04	1,10E-02	1,06E-03
	$UWP_{NW_{\text{ref}}}$	2,21E-01	2,89E-09	3,01E-03	2,98E-02	1,85E-03
	$UWP_{N_{\text{ref}}}$	2,87E+01	3,56E-08	3,82E-03	4,08E-02	2,91E-03
Gebäude	$UWP_{G_{\text{ref}}}$	3,81E+01	5,66E-07	8,02E-03	7,78E-02	7,61E-03

Referenzwert PE	PE_{ne}	PE_{Ges}	
Konstruktion	$PE_{\text{ne}, K_{\text{ref}}}$	123	151
Nutzung	$PE_{NS_{\text{ref}}}$	9,35E+01	1,09E+02
	$PE_{N_{\text{ref}}}$	4,25E+02	4,43E+02
	$PE_{NW_{\text{ref}}}$	3,32E+02	3,34E+02
Gebäude	$PE_{G_{\text{ref}}}$	5,48E+02	5,94E+02

Tabelle 2.4: Referenzwerte der betrachteten Umweltwirkungspotentiale, ermittelt nach DGNB Kriterium ENV 1.1, S. 15 ff

2.6.3 Treibhauspotential Gebäudekonstruktion

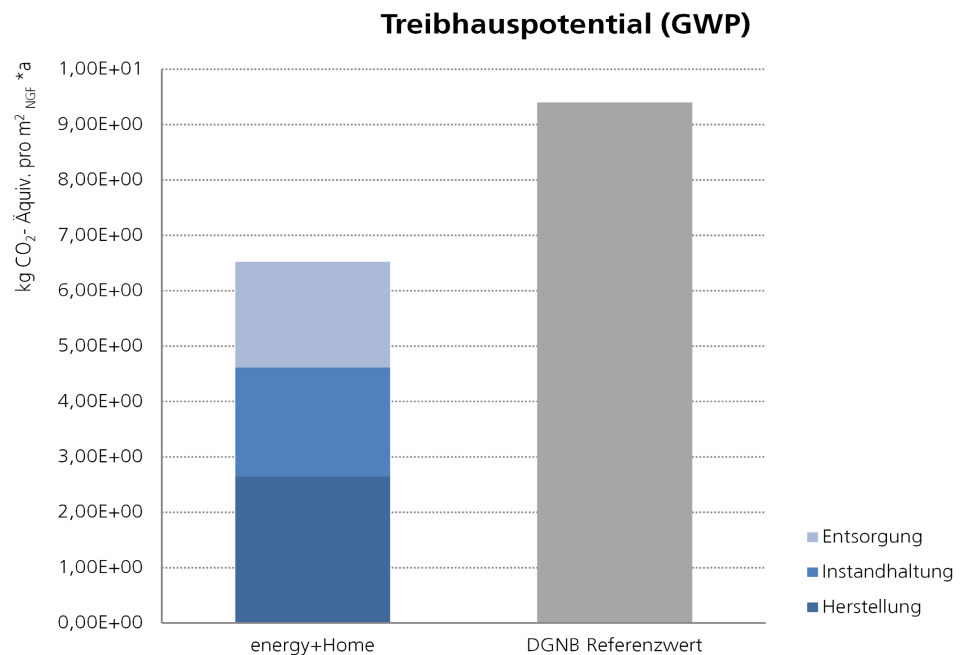
Das Treibhauspotential (GWP) der Gebäudekonstruktion des energy+Home liegt bei 69% des Referenzwertes. Der Hauptanteil davon (41%) liegt dabei bei der Herstellung. Auf die Instandhaltung entfallen 30% und auf die Entsorgung 29%.

Erwartungsgemäss haben die Außenwände, Fenster und das Dach den größten Anteil am Treibhauspotential. Bei diesen Bauteilen wurden die größten Sanierungsmaßnahmen vorgenommen.

Tabelle 2.5: Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home

GWP_k absolut und 50 Jahre				
[kg CO ₂ - Äquiv.]	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	1,33E+04	1,99E+03	7,25E+03	2,25E+04
Fenster	5,11E+03	7,32E+03	2,03E+03	1,45E+04
Dach	4,76E+03	1,57E+03	7,63E+03	1,40E+04
Decke	4,61E+02	8,33E+01	1,59E+03	2,13E+03
Bodenplatte	7,18E+02	2,27E+02	1,50E+03	2,44E+03
Fundamente	4,27E+02	0,00E+00	-5,25E+01	3,75E+02
Innenwände	8,44E+02	5,56E+01	2,00E+03	2,90E+03
Türen	-5,21E+02	6,43E+02	9,51E+02	1,07E+03
Wärmeerzeuger	6,07E+03	1,12E+04	-4,85E+02	1,68E+04
Total p.a.	6,22E+02	4,61E+02	4,48E+02	1,53E+03
pro m ² *a	2,65E+00	1,96E+00	1,91E+00	6,52E+00
DGNB Referenzwert				9,40E+00
GWP energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				69 %

Abbildung 2.11: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



Treibhauspotential (GWP) Anteil der Bauteile in Prozent

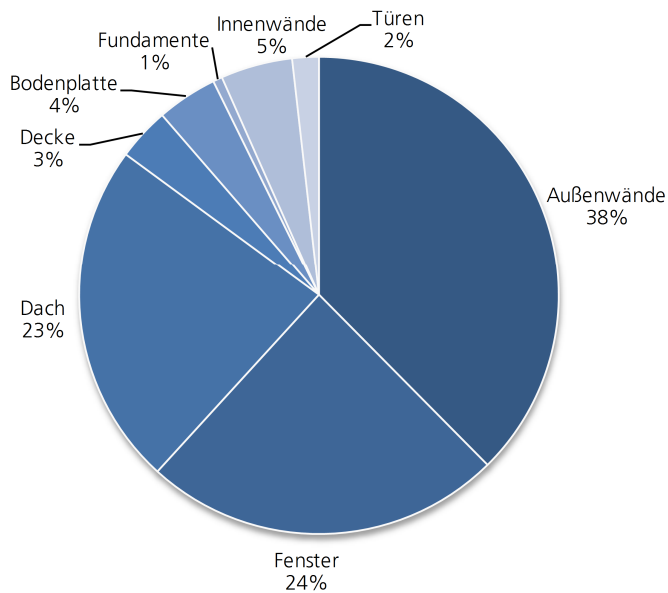


Abbildung 2.12: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion

Treibhauspotential (GWP), alle Bauteile (absolut)

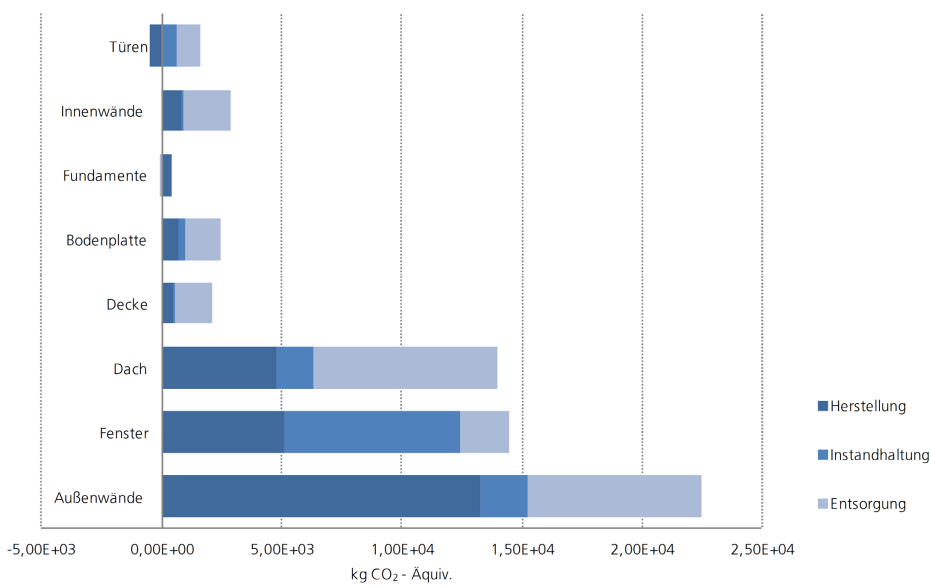


Abbildung 2.13: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion

2.6.4 Ozonabbaupotential Gebäudekonstruktion

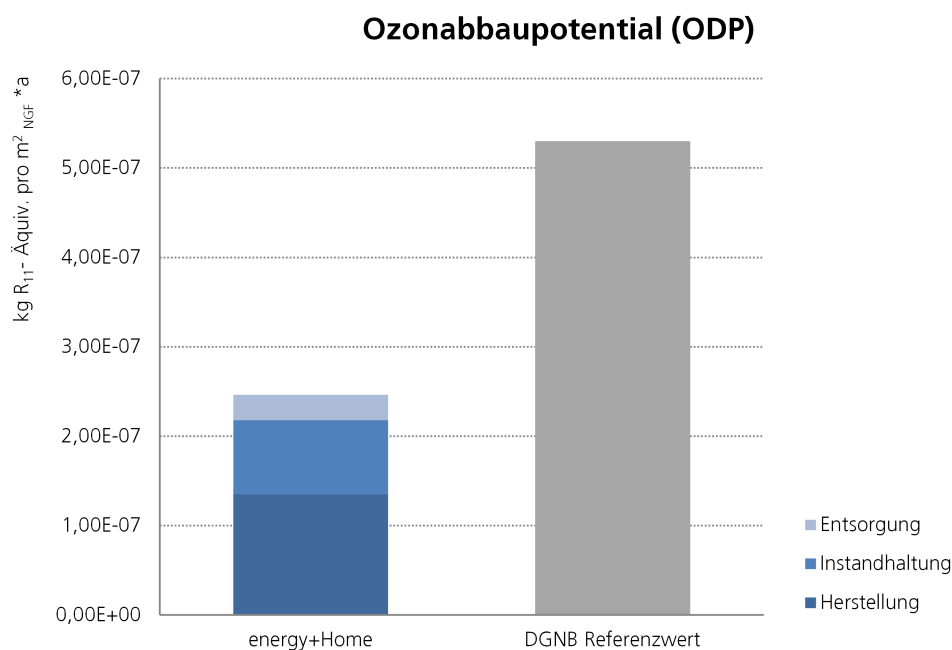
Das Ozonabbaupotential (ODP) der Gebäudekonstruktion des energy+Home liegt bei 46% des DGNB Referenzwerts. Der Hauptanteil davon (55%) liegt dabei bei der Herstellung. Auf die Instandhaltung entfallen 33% und auf die Entsorgung 12%.

Auch beim Ozonabbaupotential haben die Außenwände und das Dach den größten Anteil. Hierbei entsteht vor allem in der Herstellungsphase ein großer Anteil am Ozonabbaupotential.

Tabelle 2.6: Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home

ODP _K absolut und 50 Jahre				
[kg R ₁₁ - Äquiv.)	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	4,68E-04	3,63E-05	1,20E-04	6,25E-04
Fenster	2,69E-05	7,88E-05	4,83E-05	1,54E-04
Dach	4,48E-04	6,03E-05	1,07E-04	6,15E-04
Decke	9,50E-05	-1,64E-09	1,25E-05	1,08E-04
Bodenplatte	1,02E-04	-4,49E-09	4,06E-06	1,06E-04
Fundamente	1,16E-05	0,00E+00	-2,78E-07	1,13E-05
Innenwände	1,33E-05	1,36E-07	4,05E-05	5,40E-05
Türen	3,28E-05	9,00E-06	3,56E-06	4,53E-05
Wärmeerzeuger	3,93E-04	7,83E-04	-1,39E-06	1,17E-03
Total p.a.	3,18E-05	1,94E-05	6,69E-06	5,79E-05
pro m ² *a	1,36E-07	8,24E-08	2,85E-08	2,46E-07
DGNB Referenzwert				5,30E-07
ODP energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				46%

Abbildung 2.14: Vergleich des Ozonabbaupotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



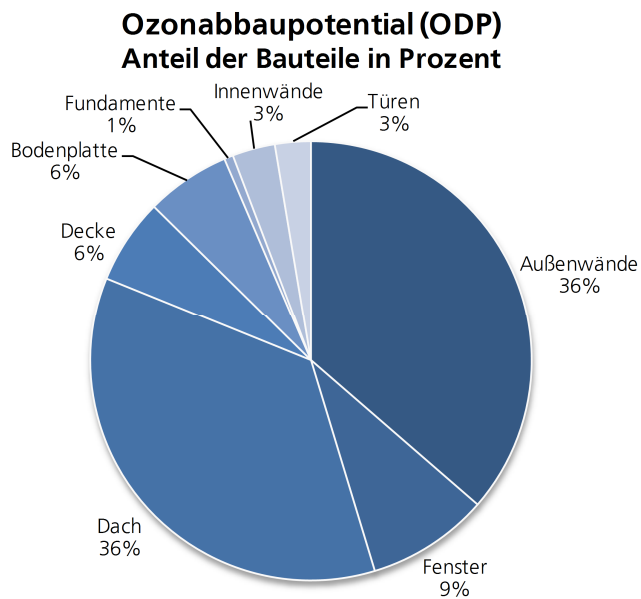


Abbildung 2.15: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion

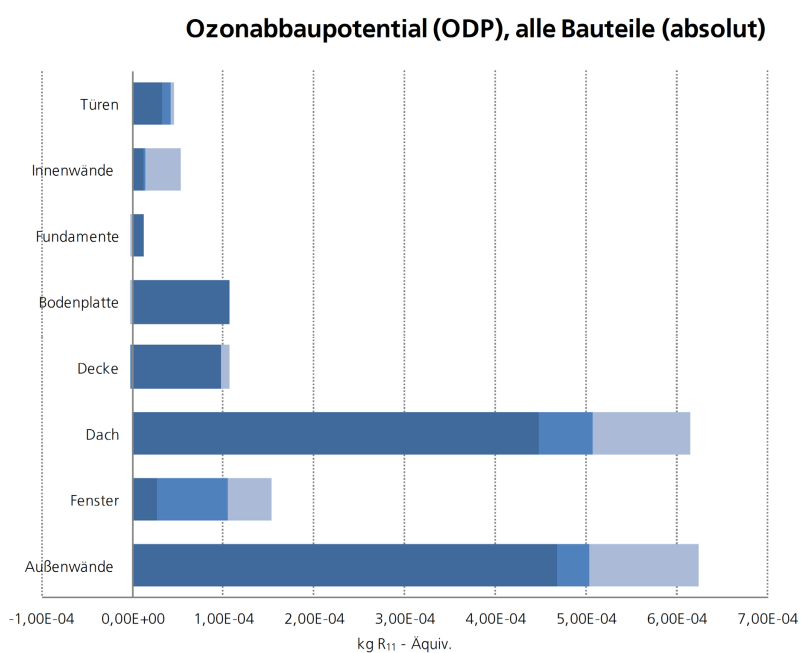


Abbildung 2.16: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion

2.6.5 Photochemisches Oxidantienbildungspotential Gebäudekonstruktion

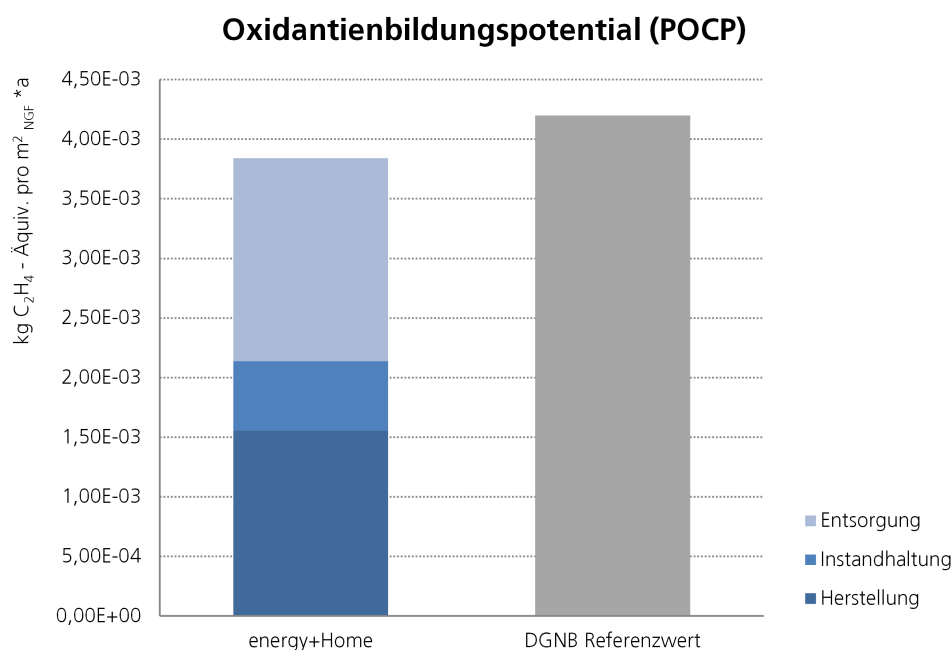
Das Photochemische Oxidantienbildungspotential (POCP) der Gebäudekonstruktion des energy+Home liegt 9 % unter dem DGNB Referenzwert. Der größte Anteil davon (41%) liegt dabei bei der Herstellung. Auf die Instandhaltung entfallen 15% und auf die Entsorgung 44%.

Den größten Anteil am photochemischen Oxidantienbildungspotential haben die Außenwände, gefolgt von den Fenstern und dem Dach. Der relativ große Anteil der Fenster ist resultiert aus dem großen Anteil der Instandhaltung, vor allem der Aluminiumkomponenten.

Tabelle 2.7: Photoschemisches Oxidantienpotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home

POCP _K absolut und 50 Jahre				
[kg C ₂ H ₄ - Äquiv.]	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	6,38E+00	1,08E+00	5,33E+00	1,28E+01
Fenster	2,28E+00	4,60E+00	2,15E+00	9,03E+00
Dach	2,37E+00	7,23E-01	5,08E+00	8,17E+00
Decke	1,57E+00	2,81E-02	5,11E-01	2,11E+00
Bodenplatte	2,18E+00	8,98E-02	1,06E-01	2,37E+00
Fundamente	7,88E-02	0,00E+00	1,25E-02	9,13E-02
Innenwände	2,35E-01	1,91E-01	1,72E+00	2,14E+00
Türen	3,66E-01	4,00E-01	3,56E-02	8,02E-01
Wärmeerzeuger	2,80E+00	-2,72E-01	5,05E+00	7,58E+00
Total p.a.	3,65E-01	1,37E-01	4,00E-01	9,02E-01
pro m ² *a	1,56E-03	5,82E-04	1,70E-03	3,84E-03
DGNB Referenzwert				4,20E-03
POCP energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				91 %

Abbildung 2.17: Vergleich des Photochemische Oxidantienbildungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



Oxidantienbildungspotential (POCP) Anteil der Bauteile in Prozent

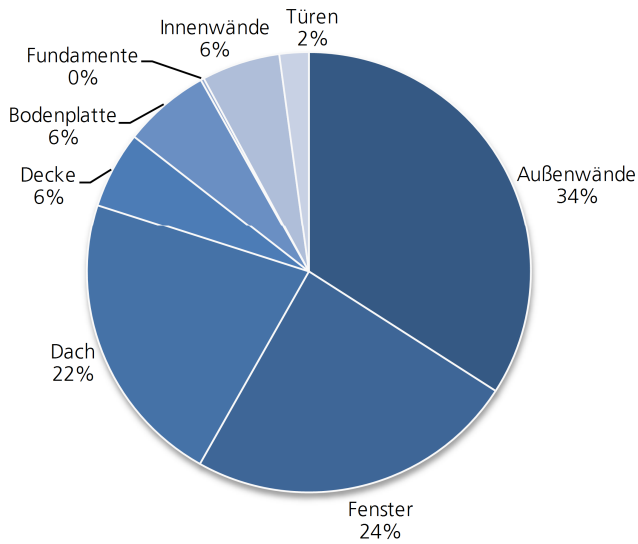


Abbildung 2.18: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Photochemische Oxidantienbildungspotential der Gebäudekonstruktion

Oxidantienbildungspotential (POCP), alle Bauteile (absolut)

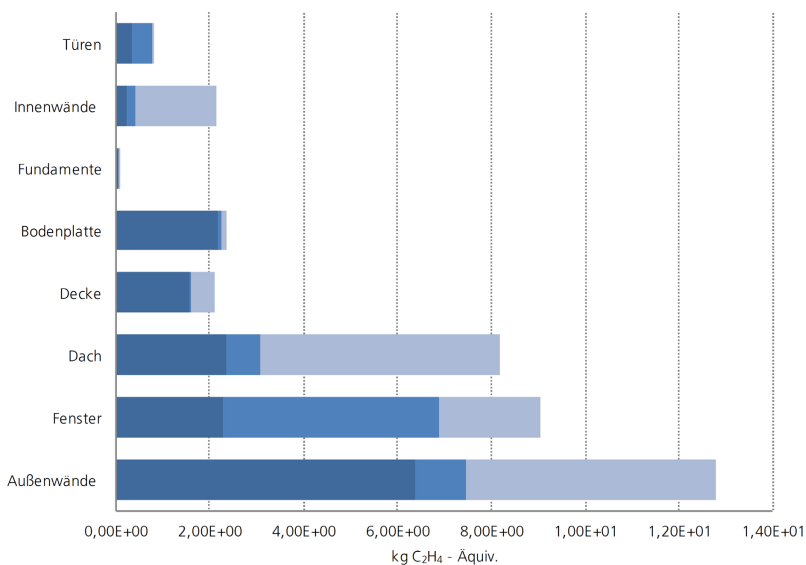


Abbildung 2.19: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Photochemische Oxidantienbildungspotential der Gebäudekonstruktion

2.6.6 Versauerungspotential Gebäudekonstruktion

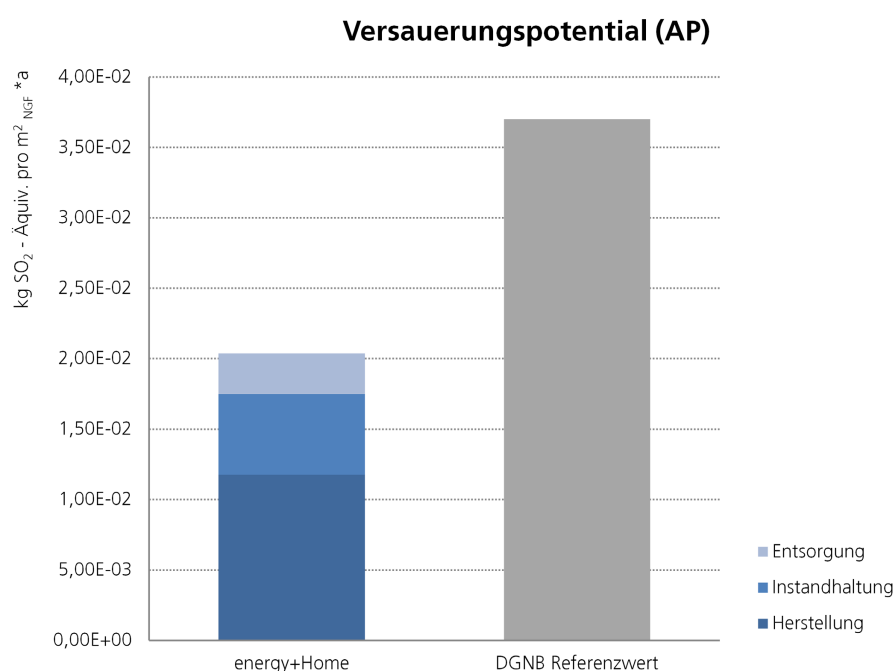
Das Versauerungspotential (AP) der Gebäudekonstruktion des energy+Home liegt bei 55% des DGNB Referenzwerts. Der Hauptanteil davon (58%) liegt dabei bei der Herstellung. Auf die Instandhaltung entfallen 28% und auf die Entsorgung 14%.

Wie auch schon beim Oxidantienbildungspotential teilen sich die Außenwände, Fenster und Dach die vorderen Ränge. Dies ist auch beim Versauerungspotential durch die Größe der Eingriffstiefe sowie die verwendeten Materialien zu erklären.

Tabelle 2.8: Versauerungspotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home

AP_k absolut und 50 Jahre				
[kg SO ₂ - Äquiv.]	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	4,92E+01	4,10E+00	1,39E+01	6,73E+01
Fenster	1,86E+01	2,39E+01	4,87E+00	4,74E+01
Dach	2,56E+01	7,36E+00	1,23E+01	4,52E+01
Decke	8,86E+00	1,65E-01	7,44E-01	9,77E+00
Bodenplatte	1,22E+01	4,50E-01	-6,16E-01	1,20E+01
Fundamente	7,76E-01	0,00E+00	-3,12E-02	7,45E-01
Innenwände	2,54E+00	2,25E-01	5,05E+00	7,82E+00
Türen	2,22E+00	2,08E+00	-1,55E-01	4,14E+00
Wärmeerzeuger	1,52E+01	2,60E+01	-2,21E+00	3,91E+01
Total p.a.	2,76E+00	1,35E+00	6,77E-01	4,79E+00
pro m ² *a	1,18E-02	5,73E-03	2,88E-03	2,04E-02
DGNB Referenzwert				3,70E-02
AP energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				55%

Abbildung 2.20: Vergleich des Versauerungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



Versauerungspotential (AP): Anteil der Bauteile in Prozent

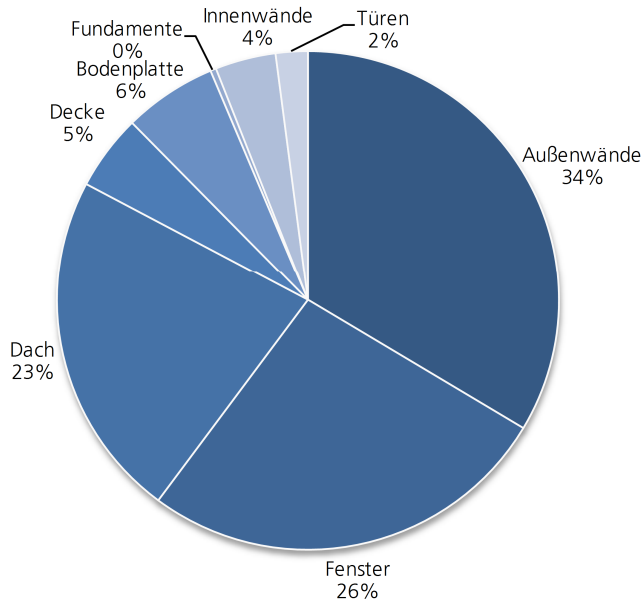


Abbildung 2.21: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Versauerungspotential der Gebäudekonstruktion

Versauerungspotential (AP), alle Bauteile (absolut)

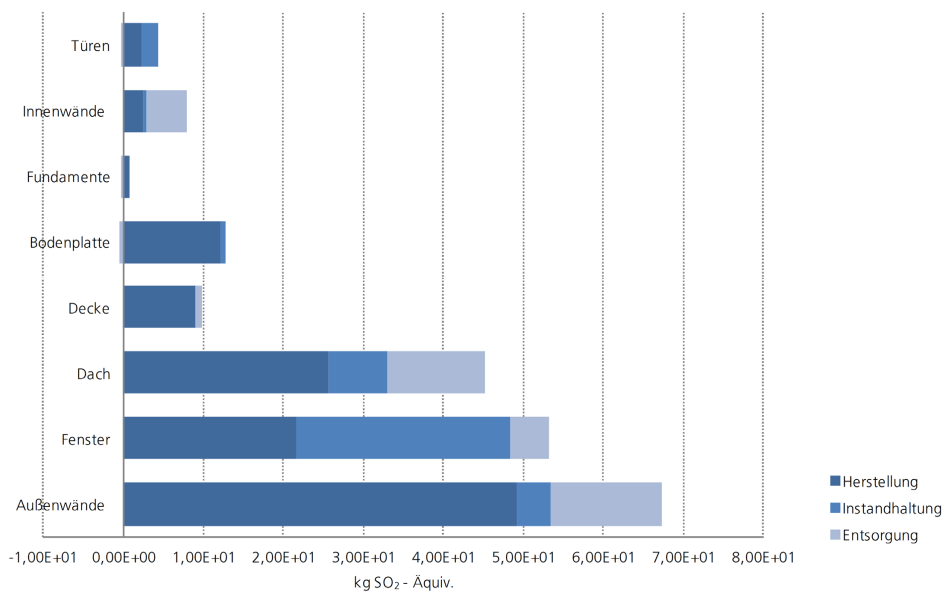


Abbildung 2.22: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Versauerungspotential der Gebäudekonstruktion

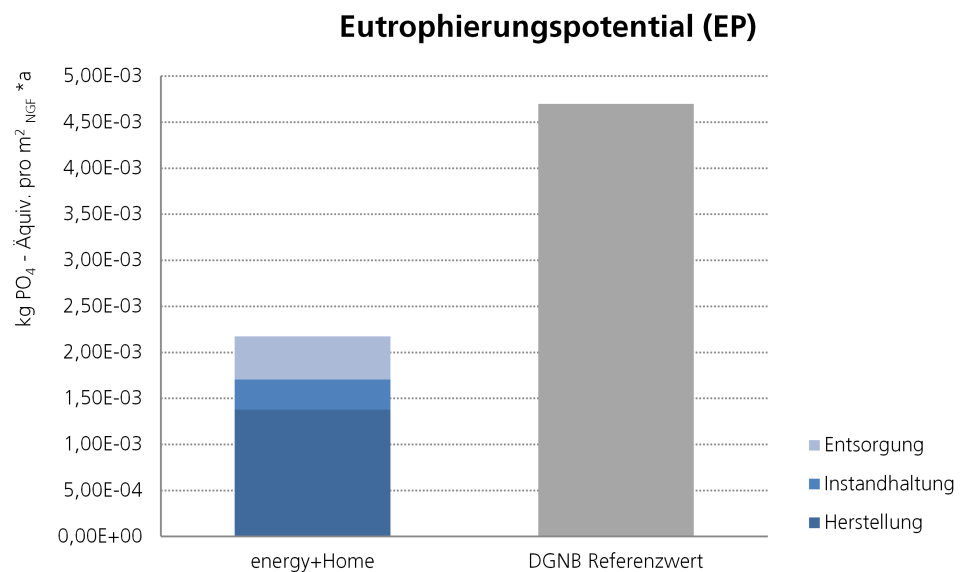
2.6.7 Eutrophierungspotential Gebäudekonstruktion

Das Eutrophierungspotential (EP) der Gebäudekonstruktion des energy+Home liegt bei 46% des DGNB Referenzwerts. Der Hauptanteil davon (63%) liegt dabei bei der Herstellung. Auf die Instandhaltung entfallen 15% und auf die Entsorgung 22%.

Tabelle 2.9: Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home

EP_k absolut und 50 Jahre				
[kg PO ₄ - Äquiv.]	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	5,73E+00	7,00E-01	2,95E+00	9,37E+00
Fenster	2,96E+00	-5,07E-01	-1,22E+00	1,23E+00
Dach	2,67E+00	1,01E+00	2,59E+00	6,27E+00
Decke	1,11E+00	1,27E-02	2,63E-01	1,38E+00
Bodenplatte	1,50E+00	3,46E-02	3,82E-02	1,57E+00
Fundamente	1,10E-01	0,00E+00	2,52E-03	1,13E-01
Innenwände	3,64E-01	1,59E-02	1,02E+00	1,40E+00
Türen	4,59E-01	3,33E-01	3,62E-02	8,28E-01
Wärmeerzeuger	1,29E+00	2,25E+00	-1,60E-01	3,38E+00
Total p.a.	3,24E-01	7,71E-02	1,10E-01	5,11E-01
pro m ² *a	1,38E-03	3,28E-04	4,69E-04	2,18E-03
DGNB Referenzwert				4,70E-03
EP energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				46%

Abbildung 2.23: Vergleich des Eutrophierungspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



Eutrophierungspotential (EP): Anteil der Bauteile in Prozent

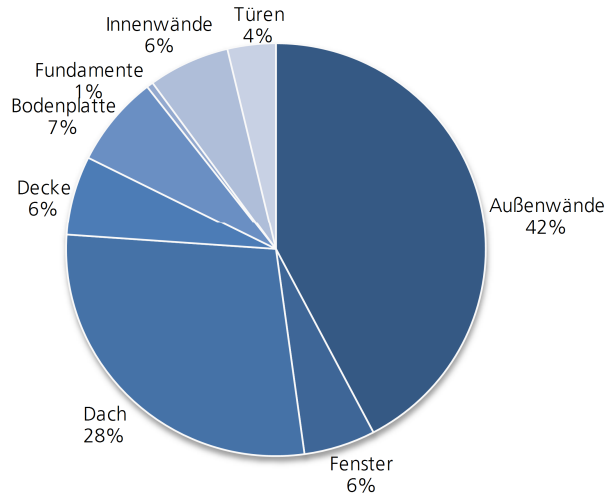


Abbildung 2.24: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion

Eutrophierungspotential (EP), alle Bauteile (absolut)

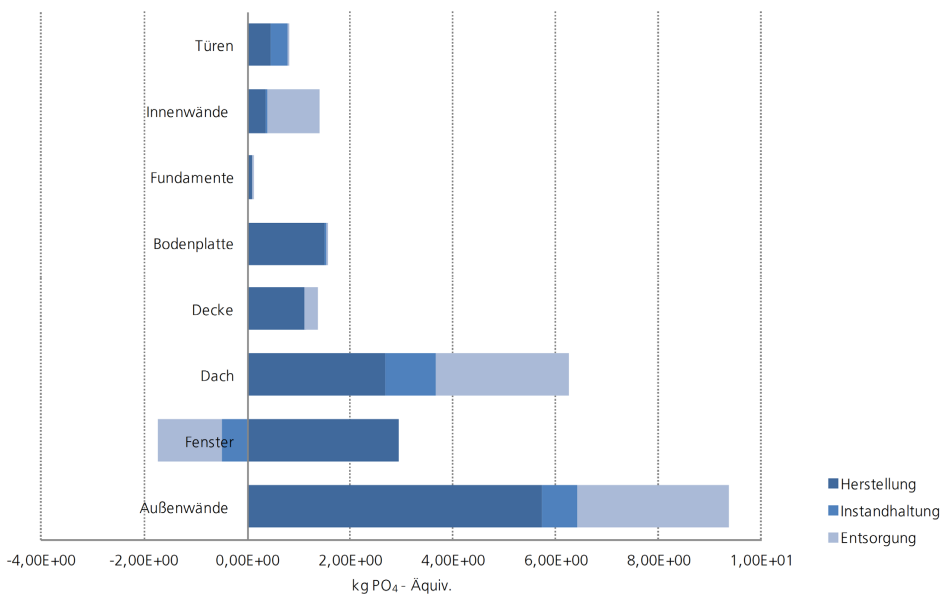


Abbildung 2.25: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion

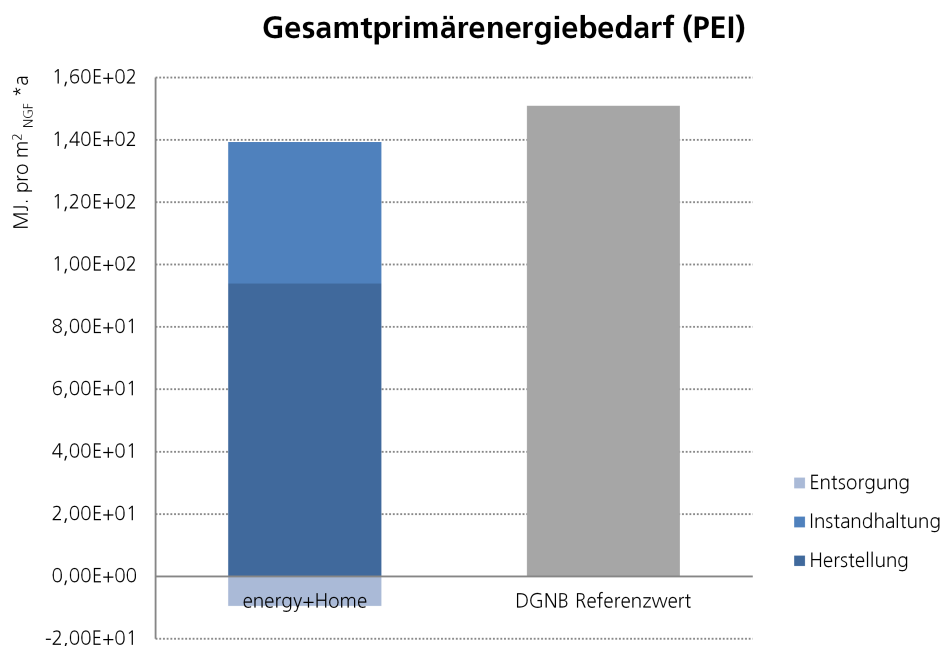
2.6.8 Gesamtprimärenergiebedarf Gebäudekonstruktion

Der Gesamtprimärenergiebedarf (PEI) der Gebäudekonstruktion des energy+Home setzt sich zusammen aus dem Primärenergiebedarf nicht erneuerbar und dem Primärenergiebedarf erneuerbar. Er liegt 14 % unter dem DGNB Referenzwert.

Tabelle 2.10: Gesamtprimärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion des energy+Home

PEI _k absolut und 50 Jahre				
[MJ]	Herstellung	Instandhaltung	Entsorgung	Gesamt
Außenwände	3,16E+05	3,19E+04	-1,33E+04	3,35E+05
Fenster	8,45E+04	8,37E+04	-5,80E+03	1,62E+05
Dach	2,50E+05	1,80E+04	-3,40E+04	2,34E+05
Decke	8,65E+04	1,27E+03	-1,45E+04	7,33E+04
Bodenplatte	1,17E+05	3,47E+03	-2,17E+04	9,85E+04
Fundamente	4,46E+03	0,00E+00	-9,25E+02	3,54E+03
Innenwände	2,29E+04	1,33E+03	2,30E+03	2,65E+04
Türen	2,21E+04	7,78E+03	-1,68E+04	1,31E+04
Wärmeerzeuger	2,00E+05	3,86E+05	-7,01E+03	5,79E+05
Total p.a.	2,21E+04	1,07E+04	-2,23E+03	3,05E+04
pro m ² *a	9,40E+01	4,54E+01	-9,51E+00	1,30E+02
DGNB Referenzwert				1,51E+02
PEI energy+Home gegenüber DGNB Referenzwert				86 %

Abbildung 2.26: Vergleich des Gesamtprimärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion des energy+Home mit dem DGNB Referenzwert



Gesamtprimärenergiebedarf (PEI) Anteil der Bauteile in Prozent

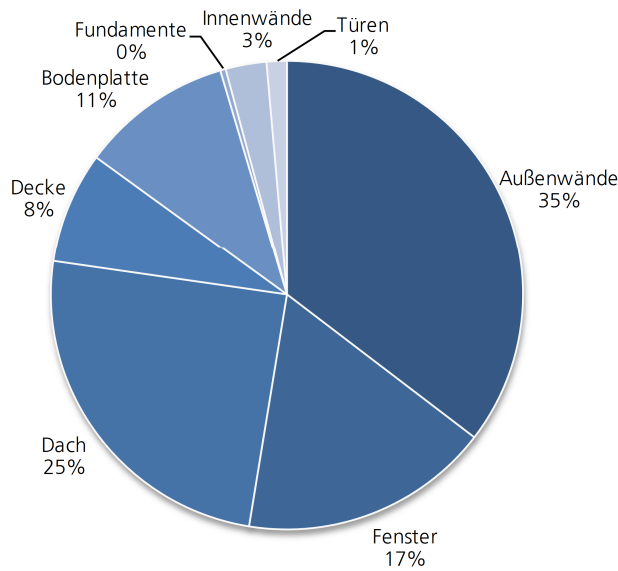


Abbildung 2.27: prozentualer Anteil der Bauteile des energy+Home am Gesamtprimärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion

Gesamtprimärenergiebedarf (PEI), alle Bauteile (absolut)

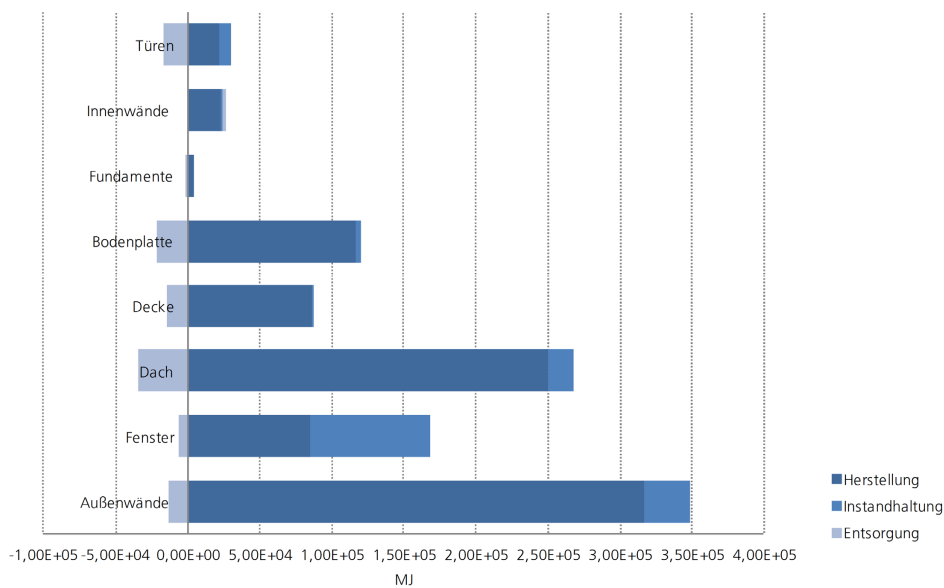


Abbildung 2.28: absoluter Anteil der Bauteile des energy+Home am Gesamtprimärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion

2.7 Gesamtwirkungsabschätzung

Der Betrieb des Gebäudes hat neben der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung einen wesentlichen Anteil an den Umweltwirkungen. Als Wärmeerzeuger wird im energy+Home eine Luft-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt. Es handelt sich um eine Wärmepumpe, die der Außenluft Umweltwärme entzieht und diese an einen Warmwasserspeicher überträgt. Auf den Einsatz von Solarthermie zur Warmwassererzeugung im Sommer wird bewusst verzichtet, da die Wärmepumpe bei hohen Außenlufttemperaturen im Sommer einen besonders großen Umweltenergieanteil von teilweise über 85 % nutzen kann. Der Effizienzgewinn wäre beim Einsatz einer Solarthermie-Anlage sehr gering und daher wirtschaftlich nicht sinnvoll.²⁹

Der notwendige Strom zum Betrieb der Wärmepumpe wird durch eine Photovoltaikanlage aus monokristallinen Solarzellen auf dem Dach des Gebäudes mit einer Leistung von 12,8 kWp erzeugt. Erwirtschaftete Energieüberschüsse aus der Photovoltaikanlage in der Sommerperiode werden in das öffentliche Netz eingespeist, das im Gegenzug den Stromverbrauch über den Netzverbund absichert.

In der Berechnung der Ökobilanz wird die Einspeisung entsprechend EEG in den ersten 20 Jahren als negativer Wert separat ausgewiesen und bilanziert und für die folgenden 30 Jahre der Energiebedarf des Gebäudes um die Leistung der installierten Anlage reduziert und damit in die Berechnung einbezogen. Dieses Vorgehen entspricht dem DGNB Kriteriensteckbrief ENV 1.1, ungeachtet der rechnerischen Lebensdauer von Photovoltaikanlagen von lediglich 20 Jahren.³⁰

Das gesamte Umweltwirkungspotential UWP_G setzt sich aus dem Umweltwirkungspotential aus der Gebäudekonstruktion UWP_K über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung, siehe Kapitel 2.6.3 bis 2.6.7), sowie dem prognostizierten jährlichen Umweltwirkungspotential für den Betrieb UWP_N zusammen. Die Indikatorenergebnisse werden auf die Nettogrundfläche NGF bezogen und als durchschnittlicher Jahreswert angegeben [kg UWP/m²*a].

Der durchschnittliche Jahreswert für den Betrieb setzt sich aus dem Umweltwirkungspotential UWP_{NS} des Strombedarfs, sowie dem Umweltwirkungspotential des Wärmebedarfs UWP_{NW} während der Nutzung, zusammen. Beide Werte ergeben sich aus dem Strombedarf (Haushaltsstrom bzw. Strom zum Betrieb der Wärmepumpe), gerechnet nach DIN V 18599, multipliziert mit dem UWP Faktor des deutschen Strommix aus der Ökobau.dat. Der auf diese Weise ermittelte Wert wird im Folgenden durch die Gutschrift der PV-Anlage reduziert und sowohl als Wert pro m² und 50 Jahre, als auch als Gesamtwert des energy+Home über 50 Jahre angegeben.

Als Vergleichswert dient an dieser Stelle auch wieder das DGNB Referenzgebäude, dessen Umweltwirkungspotential der Gebäudekonstruktion bereits in Kapitel 2.6.2 dargestellt wurde. Der Strombedarf für Haushaltsstrom wurde in der Berechnung analog zum energy+Home mit 2.500 kWh pro Jahr angenommen, der Wärmebedarf nach DIN V 18599 mit 17.870 kWh angenommen und auf eine Gutschrift durch eine Photovoltaik-Anlage verzichtet, da diese im EnEV-Referenzgebäude nicht enthalten ist.

Die Gesamtumweltwirkungen des energy+Home ergeben sich aus den Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion im Lebenszyklus und den Umweltwirkungen des Betriebs über

29 Tichelmann 2014, S.46 f.

30 Vgl. DGNB Kriterium ENV1.1, S.9.

einen angenommenen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

Den beiden folgenden Tabellen ist zu entnehmen, daß die Gutschrift aus der PV-Anlage jeweils größer ist als das Umweltwirkungspotential des Gebäudebetrieb, so dass die Gesamtwirkung lediglich durch die Gebäudekonstruktion erzeugt wird. Durch das Fehlen einer PV-Anlage im Referenzgebäude und den um den Faktor 3 größeren Wärmebedarf im Betrieb, sowie die größeren Referenzwerte der Gebäudekonstruktion weist die Ökobilanz des energy+Home gegenüber dem Referenzgebäude deutlich geringere Werte aus.

Im darauf folgenden werden die Gesamtumweltwirkungen des energy+Home und des Referenzgebäudes nach DGNB vergleichend dargestellt.

Tabelle 2.11: Gesamtwirkungsabschätzung des energy+Home

Gesamtwirkungsabschätzung energy+Home

UWP		[kg UWP/ m2*a]	Gutschrift PV	0-20 Jahre	21-50 Jahre	Gesamt	Gesamt	
			pro m ² *a	pro m ²	pro m ²	pro m ²	energy+Home über 50 Jahre	
GWP _K		6,52E+00		-3,71E+02	1,96E+02			
GWP _N	GWP _{NS}	6,34E+00	2,25E+01	-2,51E+01	4,50E+02	-7,71E+01		
	GWP _{NW}	1,62E+01						
GWP _G		2,90E+01		7,90E+01	1,19E+02	1,98E+02	4,64E+04	kg CO2 - Äquiv.
ODP _K		2,46E-07		2,35E-06	7,39E-06			
ODP _N	ODP _{NS}	3,26E-08	1,16E-07	-1,29E-07	2,31E-06	-3,96E-07		
	ODP _{NW}	8,30E-08						
ODP _G		3,62E-07		4,66E-06	7,00E-06	1,17E-05	2,74E-03	kg R11 - Äquiv.
POCP _K		3,84E-03		6,30E-03	1,15E-01			
POCP _N	POCP _{NS}	8,92E-04	3,16E-03	-3,53E-03	6,33E-02	-1,08E-02		
	POCP _{NW}	2,27E-03						
POCP _G		7,00E-03		6,96E-02	1,04E-01	1,74E-01	4,09E+01	kg C2H4 - Äquiv.
AP _K		2,04E-02		-5,85E-01	6,11E-01			
AP _N	AP _{NS}	1,26E-02	4,46E-02	-4,96E-02	8,91E-01	-1,53E-01		
	AP _{NW}	3,20E-02						
AP _G		6,49E-02		3,06E-01	4,59E-01	7,64E-01	1,80E+02	kg SO2 - Äquiv.
EP _K		2,18E-03		-4,82E-02	6,53E-02			
EP _N	EP _{NS}	1,16E-03	4,12E-03	-4,59E-03	8,23E-02	-1,41E-02		
	EP _{NW}	2,96E-03						
EP _G		6,29E-03		3,41E-02	5,12E-02	8,53E-02	2,00E+01	kg PO4 - Äquiv.
PE e _K		2,71E+01		-8,38E+02	8,13E+02			
PE e _N	PE e _{NS}	1,75E+01	6,19E+01	-6,90E+01	1,24E+03	-2,12E+02		
	PE e _{NW}	4,45E+01						
PE e _G		8,90E+01		4,01E+02	6,01E+02	1,00E+03	2,35E+05	MJ
PE ne _K		5,47E+01		-7,03E+03	1,64E+03			
PE ne _N	PE ne _{NS}	1,03E+02	3,64E+02	-4,06E+02	7,29E+03	-1,25E+03		
	PE ne _{NW}	2,62E+02						
PE ne _G		4,19E+02		2,61E+02	3,91E+02	6,52E+02	1,53E+05	MJ
PEI _K		8,18E+01		-7,86E+03	2,45E+03			
PEI _N	PEI _{NS}	1,20E+02	4,26E+02	-4,75E+02	8,53E+03	-1,46E+03		
	PEI _{NW}	3,06E+02						
PEI _G		5,08E+02		6,61E+02	9,92E+02	1,65E+03	3,88E+05	MJ
UWP _K	Umweltwirkungspotential für Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung							
UWP _N	Umweltwirkungspotential für den Betrieb				UWP _{NW}	Umweltwirkungspotential Wärmebedarf		
UWP _{NS}	Umweltwirkungspotential Strombedarf				UWP _G	Umweltwirkungspotential Gesamt		

Tabelle 2.12: Gesamtwirkungsabschätzung des Referenzgebäudes

Gesamtwirkungsabschätzung Referenzgebäude

UWP		[kg UWP/ m ² *a]	Gutschrift PV	0-20 Jahre pro m ²	21-50 Jahre pro m ²	Gesamt pro m ²	Gesamt	
			pro m ² *a	pro m ²	pro m ²	pro m ²	Referenzgeb. über 50 Jahre	
GWP _K		9,40E+00		1,88E+02	7,52E+02			
GWP _N	GWP _{NS} 6,60E+00 GWP _{NW} 2,21E+01	2,87E+01	0,00E+00	5,73E+02	2,29E+03			
GWP _G		3,81E+01		7,61E+02	3,05E+03	3,81E+03	8,94E+05	kg CO ₂ - Äquiv.
ODP _K		5,30E-07		1,06E-05	1,59E-05			
ODP _N	ODP _{NS} 3,27E-08 ODP _{NW} 2,89E-09	3,56E-08	0,00E+00	7,11E-07	1,07E-06			
ODP _G		5,66E-07		1,13E-05	1,70E-05	2,83E-05	6,64E-03	kg R11 - Äquiv.
POCP _K		4,20E-03		8,40E-02	1,26E-01			
POCP _N	POCP _{NS} 8,11E-04 POCP _{NW} 3,01E-03	3,82E-03	0,00E+00	7,63E-02	1,15E-01			
POCP _G		8,02E-03		1,60E-01	2,41E-01	4,01E-01	9,41E+01	kg C ₂ H ₄ - Äquiv.
AP _K		3,70E-02		7,40E-01	1,11E+00			
AP _N	AP _{NS} 1,10E-02 AP _{NW} 2,98E-02	4,08E-02	0,00E+00	8,16E-01	1,22E+00			
AP _G		7,78E-02		1,56E+00	2,33E+00	3,89E+00	9,13E+02	kg SO ₂ - Äquiv.
EP _K		4,70E-03		9,40E-02	1,41E-01			
EP _N	EP _{NS} 1,06E-03 EP _{NW} 1,85E-03	2,91E-03	0,00E+00	5,81E-02	8,72E-02			
EP _G		7,61E-03		1,52E-01	2,28E-01	3,80E-01	8,93E+01	kg PO ₄ - Äquiv.
PE e _K		2,80E+01		5,60E+02	8,40E+02			
PE e _N	PE e _{NS} 1,58E+01 PE e _{NW} 2,28E+00	1,80E+01	0,00E+00	3,61E+02	5,41E+02			
PE e _G		4,60E+01		9,21E+02	1,38E+03	2,30E+03	5,41E+05	MJ
PE ne _K		1,23E+02		2,46E+03	3,69E+03			
PE ne _N	PE ne _{NS} 9,35E+01 PE ne _{NW} 3,32E+02	4,25E+02	0,00E+00	8,50E+03	1,28E+04			
PE ne _G		5,48E+02		1,10E+04	1,64E+04	2,74E+04	6,44E+06	MJ
PEI _K		1,51E+02		3,02E+03	4,53E+03			
PEI _N	PEI _{NS} 1,09E+02 PEI _{NW} 3,34E+02	4,43E+02	0,00E+00	8,87E+03	1,33E+04			
PEI _G		5,94E+02		1,19E+04	1,78E+04	2,97E+04	6,98E+06	MJ

UWP_K Umweltwirkungspotential für Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung

UWP_N Umweltwirkungspotential für den Betrieb

UWP_{NS} Umweltwirkungspotential Strombedarf

UWP_{NW}

UWP_G

Umweltwirkungspotential Wärmebedarf

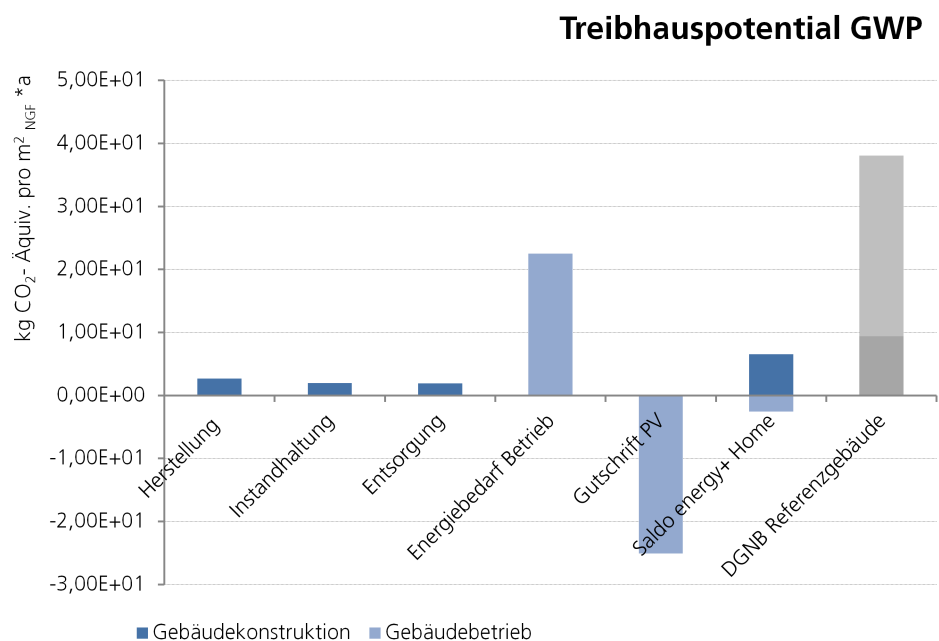
Umweltwirkungspotential Gesamt

2.7.1 Gesamtwirkungsabschätzung Treibhauspotential

Das Treibhauspotential des energy+Home ist deutlich geringer als das des DGNB Referenzgebäudes. Ausschlaggebend dafür ist vor allem die Nutzungsphase des Gebäudes, bei der das energy+Home aufgrund der Erträge aus der Photovoltaik-Anlage einen negativen Saldo aufweist. Das Referenzgebäude hat einerseits einen deutlich höheren Energieverbrauch und nutzt andererseits zum Beheizen des Gebäudes Erdgas und Erdöl, wohingegen das energy+Home lediglich Strom „aus eigenem Anbau“ verwendet. Die Möglichkeit einer Gutschrift hat das Referenzgebäude aufgrund einer fehlenden PV-Anlage nicht.

Aufgrund der bereits vorhandenen Konstruktion aus dem bestehenden Gebäude, welche nicht in die Bilanzierung mit eingerechnet werden muss liegt der Wert für das Treibhauspotential aus der Konstruktion lediglich bei 69 % des Referenzwertes und der Gesamtwert inklusive Betrieb bei lediglich 10 %.

Abbildung 2.29: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude



2.7.2 Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential

Das Ozonabbaupotential der Gebäudekonstruktion des energy+Home beträgt lediglich 46% der Umweltwirkungen des DGNB Referenzgebäudes. Im Betrieb heben sich die Umweltwirkungen des Betriebs des energy+Home und die Gutschrift aus der Photovoltaik-Anlage gegenseitig auf, mit einem leichten Plus durch die Gutschrift, so daß in der Summe das Ozonabbaupotential des energy+Home bei 41% gegenüber dem Wert des DGNB Referenzgebäudes liegt.

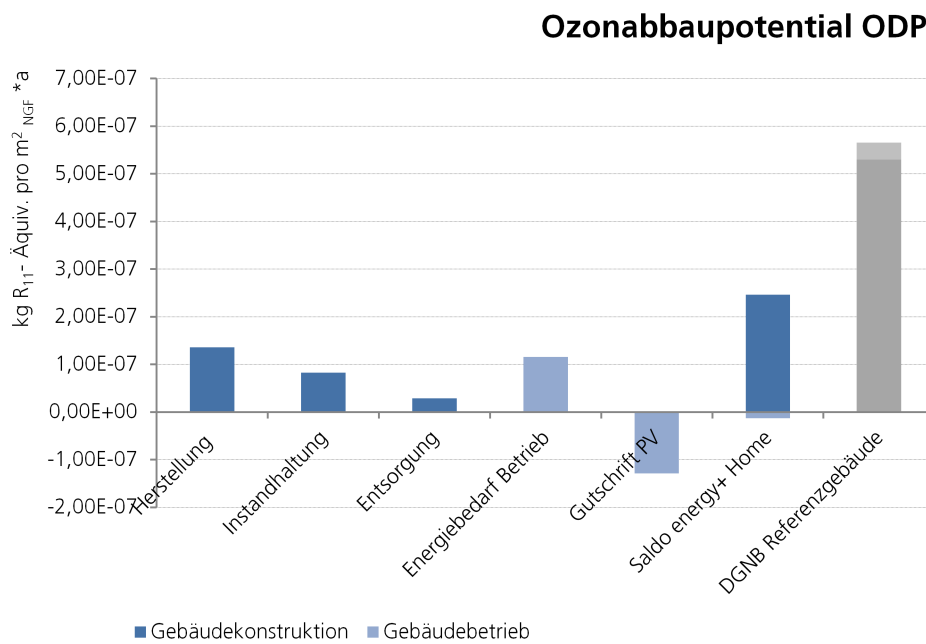
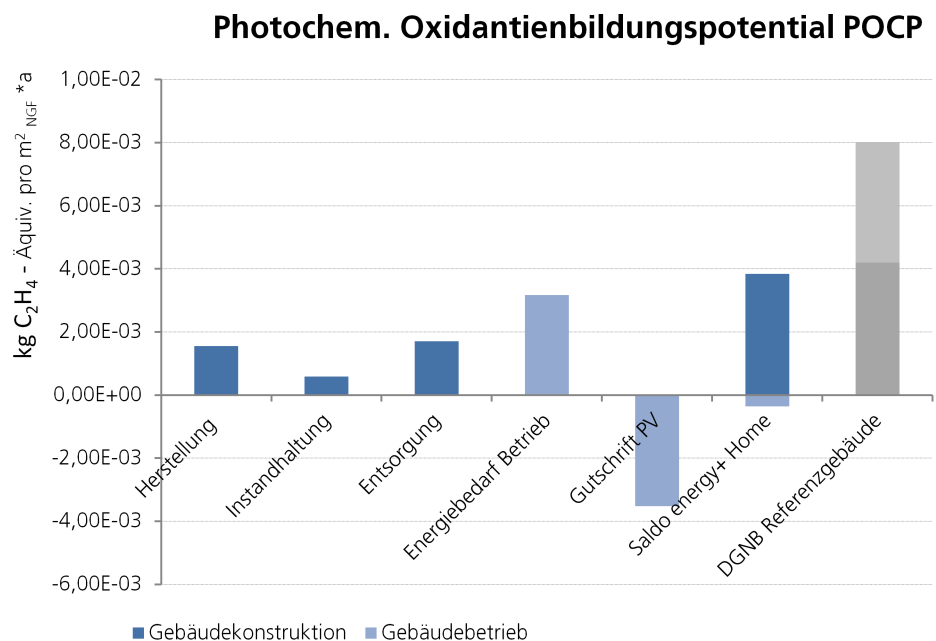


Abbildung 2.30: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Ozonabbaupotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude

2.7.3 Gesamtwirkungsabschätzung Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Ähnlich wie beim Ozonabbaupotential verhält es sich beim photochemischen Oxidantienbildungspotential im Betrieb. Die Umweltwirkung, welche aus dem Strom- und Wärmebedarf resultiert wird durch die Gutschrift aus der PV-Anlage kompensiert. Die Gebäudekonstruktion ist daher überwiegend für die Umweltwirkung verantwortlich. Betrachtet man das photochemische Oxidantienbildungspotential der Gebäudekonstruktion, liegen das energy+Home und das DGNB Referenzgebäude nahezu gleich auf. In der Gesamtwirkungsbilanz schneidet das energy+Home aufgrund der ausgeglichenen Betriebsbilanz jedoch deutlich besser ab (43% gegenüber dem Referenzwert).

Abbildung 2.31: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des photochemischen Oxidantienbildungspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude



2.7.4 Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential

Der erhöhte Energieverbrauch des Referenzgebäudes, basierend auf den Energieträgern Erdöl und Erdgas, ist auch beim Versauerungspotential die ausschlaggebende Größe für das positive Abschneiden des energy+Home. In Summe beträgt das Versauerungspotential des energy+Home lediglich 20% des DGNB Referenzgebäudes. Auch hierbei ist die Gutschrift im Betrieb höher als die Umweltwirkung, so dass die ohnehin kleinere Umweltwirkung der Gebäudekonstruktion nochmals verringert wird. Bei der Konstruktion selbst ist die Verwendung des Altbaus, welcher nicht in der Bilanzierung berücksichtigt werden muß, die Ursache für die positive Bewertung.

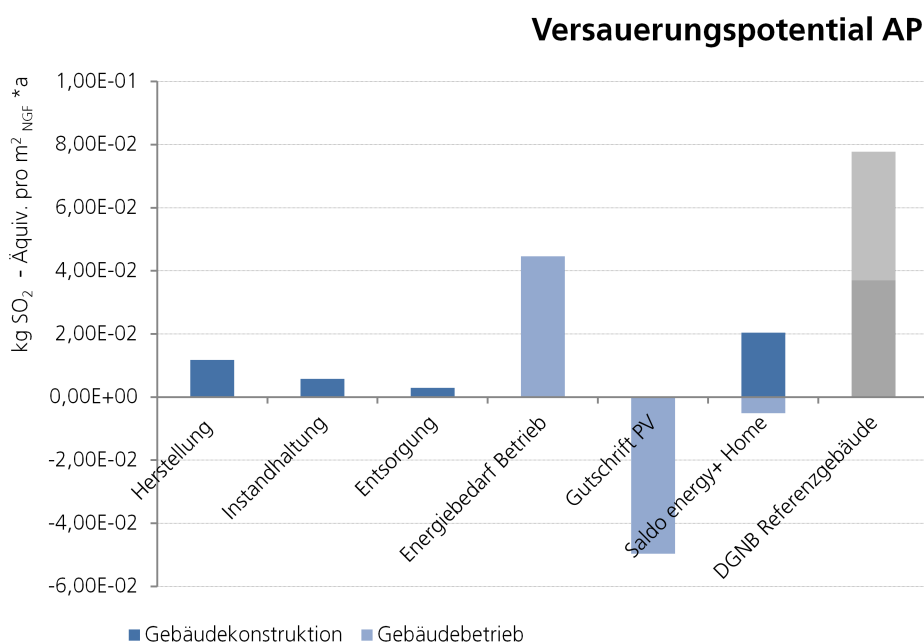
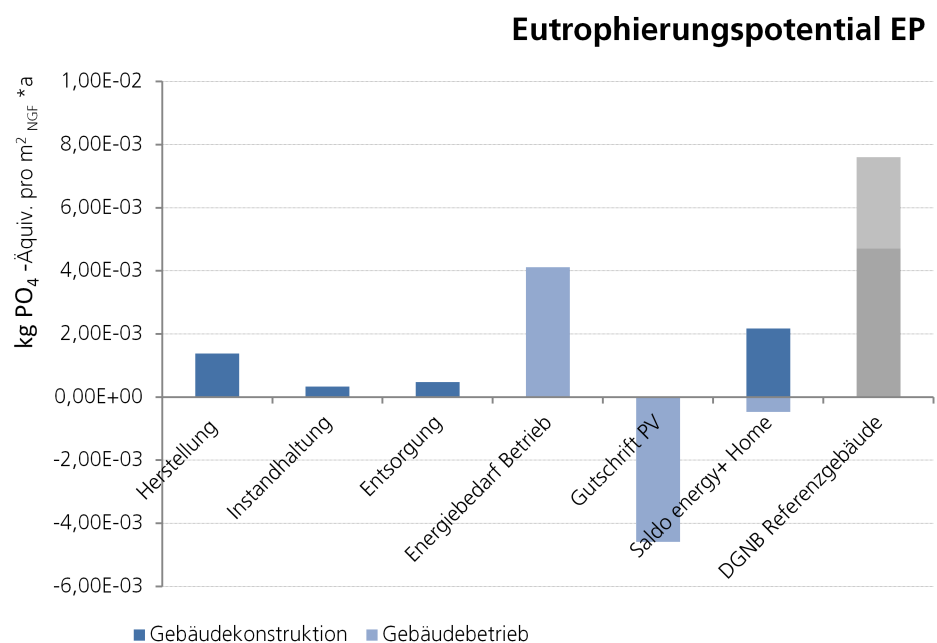


Abbildung 2.32: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Versauerungspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude

2.7.5 Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential

Das Eutrophierungspotential des energy+Home liegt deutlich unter dem Wert des DGNB Referenzgebäudes. Im Bereich der Konstruktion hat die Herstellungsphase den größten Anteil an den Umweltwirkungen. Wie bei den zuvor betrachteten Wirkungspotentialen ist auch beim Eutrophierungspotential die Gutschrift aus der Photovoltaik-Anlage etwas größer als die Umweltwirkung, welche aus dem Betrieb resultiert. Gesamthaft beträgt das Eutrophierungspotential des energy+Home lediglich 22% des Wertes des Referenzgebäudes.

Abbildung 2.33: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Eutrophierungspotentials des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude



2.7.6 Gesamtwirkungsabschätzung Gesamtprimärenergiebedarf

Der Gesamtprimärenergiebedarf des energy+Home liegt deutlich unter dem Wert des DGNB Referenzgebäudes. Während die Umweltwirkung aus der Konstruktion nahezu gleich groß ist, unterscheiden sich die Werte aus der Betriebsphase deutlich. Auch hierbei spielt der photovoltaisch erzeugte Strom eine große Rolle, gleicht er doch die Umweltwirkungen aus dem Betrieb aus und erzeugt auf den betrachteten Nutzungszeitraum einen leicht negativen Primärenergieverbrauch. Der Gesamtprimärenergiebedarf des energy+Home beträgt lediglich 14% des Referenzgebäudes.

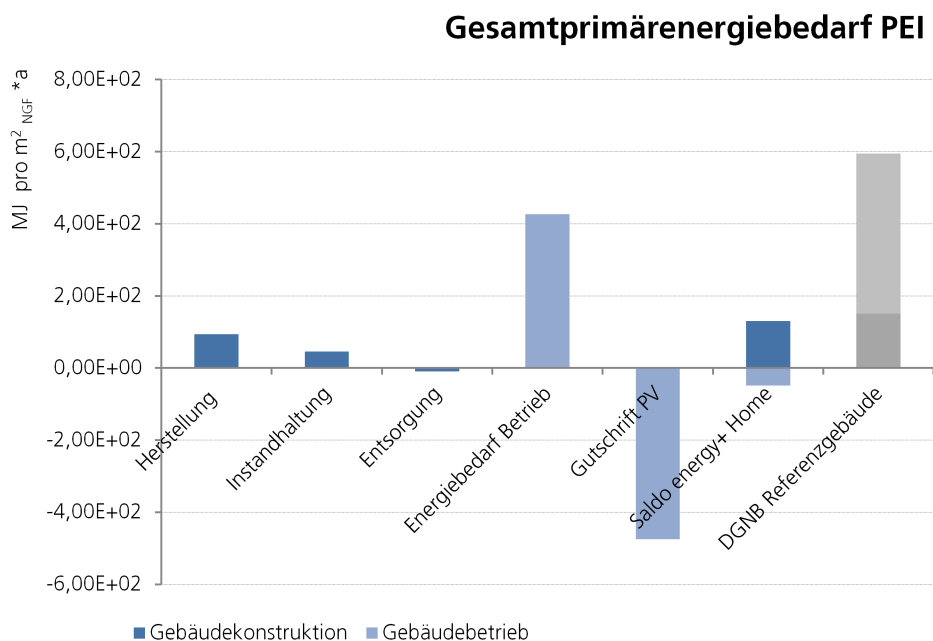


Abbildung 2.34: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Gesamtprimärenergiebedarfs des energy+Home mit dem DGNB Referenzgebäude

2.8 Auswertung

2.8.1 Identifikation der signifikanten Parameter

Im Rahmen der vorliegenden Ökobilanz wurden die potentiellen Umweltwirkungen des energy+Home von der Rohstoffgewinnung, der Herstellung über den Betrieb bis zur Entsorgung über einen angenommenen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt und einem Referenzgebäude gegenübergestellt. Die Ökobilanz dient nicht der Voraussage von absoluten oder genauen Umweltwirkungen, da die Methode der Ökobilanzierung per se nur eine relative Aussage über mögliche Umweltwirkungen, bezogen auf eine Referenzeinheit, geben kann. Da es sich um zukünftige Umweltwirkungen handelt, welche zwar möglich, aber aufgrund der inhärenten Unsicherheiten bei der Modellierung nicht gewiss sind, müssen die charakteristischen Werte identifiziert, überprüft und beurteilt werden. Die darauf beruhenden Schlussfolgerungen sollten in Übereinstimmung mit dem Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie stehen.³¹

Vollständigkeitsprüfung

Um in Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens und in Wechselwirkung mit dem Beurteilungsbestandteils die Ergebnisse der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzung zu strukturieren und die signifikanten Parameter zu bestimmen werden zunächst die signifikanten Parameter identifiziert.³² Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, ist es Ziel der Studie, die Umweltwirkungen, die sich aus der Sanierung, eines angenommenen Betriebs von 50 Jahren, der Instandhaltung in dieser Zeit und der anschließenden Entsorgung der Gebäudekonstruktion ergeben, darzustellen und zu bewerten.

Auf der Ebene der Sachbilanzphase sind die signifikanten Parameter die Bauteilmassen, welche anhand der Ausführungspläne und Ausschreibungstexte ermittelt wurden und mit den Wirkungskategorien der Umweltproduktdeklarationen verknüpft werden. Daraus leiten sich die untersuchten Umweltwirkungen ab, welche in Kapitel 2.6.1 erläutert wurden: das Treibhauspotential, das Ozonabbaupotential, das photochemische Oxidantienbildungspotential, das Versauerungspotential, das Eutrophierungspotential und der Primärenergiebedarf. Diese potentiellen Umweltwirkungen wurden im Rahmen der Wirkungsabschätzung für die Gebäudekonstruktion und den Betrieb über 50 Jahre ermittelt und jeweils pro m² Netto-Grundfläche und Jahr dargestellt. Für die Nutzungsphase spielt dabei der Energiebedarf für Strom und Wärme sowie die Erträge aus der Photovoltaikanlage eine entscheidende Rolle.

Die signifikanten Parameter sind demnach: Die verbauten Baustoffe und deren Baumasse, die Wirkungskategorien, ermittelt durch die zu den Baustoffen zugehörigen Umweltproduktdeklarationen, die betrachteten Umweltwirkungspotentiale sowie der Energiebedarf für Strom und Wärme.

Die für die Auswertung benötigten Daten standen aufgrund der gut dokumentierten Ausführungspläne zur Verfügung. Anschlussdetails wurden bei der Massenermittlung zwar vernachlässigt, dies entspricht aber dem herkömmlichen Vorgehen nach dem vereinfachten Verfahren der DGNB und werden durch einen Zuschlag von 10% auf die Wirkungskategorien berücksichtigt. Die Außenanlagen wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, da sie außerhalb der Systemgrenze der Ökobilanz-Betrachtung liegen. Auch dies entspricht dem herkömmlichen Vorgehen bei Ökobilanzen und führt daher zu einer Vergleichbarkeit mit anderen Objekten. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde das Umweltwirkungspotential der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Photovoltaikanlage. Dies ist dem Fehlen einer geeigneten Umwelt-Produktdeklaration geschuldet. Die Gutschrift aus der Strompro-

31 Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11.

32 Vgl. DIN EN ISO 4044:2006, S.49.

duktion im Gebäudebetrieb bleibt davon unberücksichtigt, lediglich das Umweltwirkungspotential für die Gebäudekonstruktion müsste bei allen betrachteten Wirkungspotentialen höher liegen. Da diese Einschränkung aber auch bei anderen Objekten vorliegt ist auch hier eine Vergleichbarkeit der Datensätze gegeben. Eine grobe Abschätzung des Treibhauspotentials inkl. PV-Anlage wird in Kapitel 2.9 dargestellt. Vereinfachend wurden auch Innenanstriche und Elektrokabel sowie Wasser- bzw. Heizleitungen nicht berücksichtigt. Diese Massen liegen jedoch unter dem im Abschneidekriterium definierten Bereich. Alle relevanten Informationen sind somit in die Sachbilanzierung mit eingeflossen, eine Vollständigkeit der Daten ist gegeben.

Sensitivitätsprüfung

Um beurteilen zu können, inwiefern sich Unsicherheiten in den Daten, Allokationsverfahren und der Berechnung der Wirkungsindikatorwerte auf die Endergebnisse auswirken wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Zuverlässigkeit der Endergebnisse eingeschätzt. Dazu wurde der Betrachtungszeitraum in einem Intervall von 10 Jahren von 10 auf 100 Jahre variiert und die Umweltwirkungspotentiale zum DGNB Referenzwert in Relation gesetzt. Wie der untenstehenden Abbildung zu entnehmen ist, variieren die Prozentsätze der Wirkungspotentiale gegenüber dem Referenzwert ab einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nur unwesentlich in Abhängigkeit der Instandsetzungsintervalle der einzelnen Bauteile.

Sensitivitätsprüfung Betrachtungszeitraum

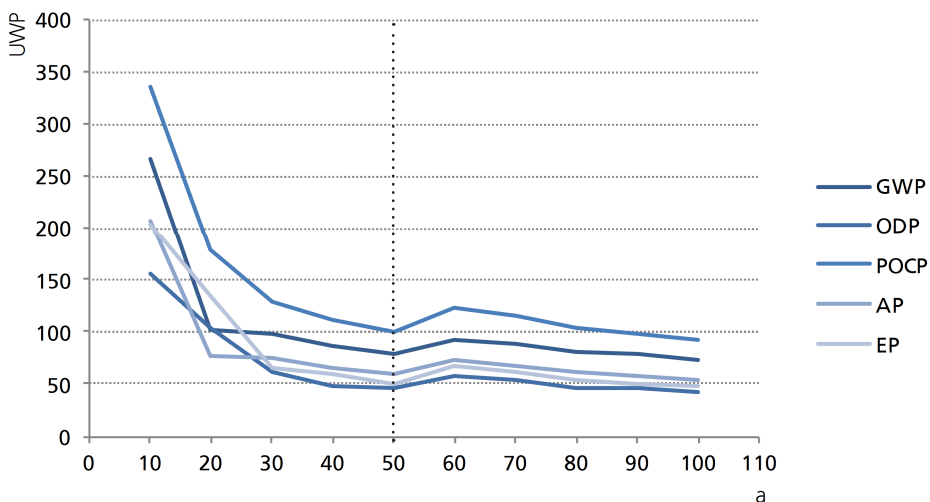


Abbildung 2.35: Sensitivitätsprüfung Betrachtungszeitraum

Eine Änderung der Eingangsdaten der verbauten Baumassen wirkt sich direkt auf das Umweltwirkungspotential der Gebäudekonstruktion aus. Aufgrund der Vielzahl der verbauten Baustoffe und -massen wirken sich kleine Abweichungen bei einem Bauteil jedoch nur geringfügig auf das Umweltwirkungspotential der gesamten Gebäudekonstruktion aus. Beispielsweise führt eine Verdoppelung der Menge Kalkzementputz lediglich zu einer Steigerung des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion von 1,65% und gesamthaft betrachtet zu einer Steigerung des Treibhauspotentials von lediglich 0,26%. Kleinere Ungenauigkeiten in der Sachbilanzphase werden auf diese Weise ausgeglichen und können als vernachlässigbar angenommen werden.

Konsistenzprüfung

Die Konsistenz des Untersuchungsrahmens wurde durch Übereinstimmung der Methoden und Annahmen mit dem Ziel der Studie gewährleistet. Dabei wurden die untersuchten Wirkungskategorien getrennt voneinander bewertet und untereinander nicht gewichtet. Sofern

eine unterschiedliche Qualität der Daten vorhanden ist wird dies aus der Dokumentation ersichtlich. Die unterschiedliche Datenqualität betrifft jedoch alle Bauteile gleichermaßen und befindet sich bei dieser vergleichenden Studie dadurch im Einklang mit dem Ziel der Untersuchung.

2.8.2 Auswertung Gebäudekonstruktion

In sämtlichen Wirkungskategorien liegen die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion unterhalb denen des Referenzgebäudes. Dies ist vor allem auf die Nutzung der bestehenden Gebäudesubstanz zurückzuführen. Üblicherweise hat die Primärstruktur einen erheblichen Anteil an den Wirkungskategorien. Da diese bei der Sanierung nicht mehr errichtet werden muss, und demnach auch nicht in die Bilanz eingerechnet werden muss, fällt die Gesamtwirkungsabschätzung niedriger aus als beim Referenzgebäude. Den größten Anteil an den Wirkungskategorien haben die Außenwände, das Dach und die Fenster, also jene Bauteile, welche auch den größten Veränderungen unterworfen wurden.

Auch wenn darauf geachtet wurde, dass die verwendeten Baustoffe möglichst geringe Umweltwirkungspotentiale aufweisen (Mineralwolle anstatt Styropor, Massivholzdielen anstelle keramischer Bodenbeläge, Holzrahmenbau für die Außenwände des Arbeitszimmers anstelle einer massiven Konstruktion, usw.) sind die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion gegenüber dem DGNB Referenzgebäude zwar wesentlich geringer, jedoch nicht CO₂-neutral. Diese oft zu lesende Bezeichnung ist in der Praxis auch gar nicht möglich, da jegliche Produktion Emissionen zur Folge hat. Dies gilt auch für die Verarbeitung von Holzprodukten, welche als natürlicher Baustoffe zwar genausoviel CO₂ einspeichern wie sie bei der thermischen Verwertung wieder freisetzen, jedoch bei der Verarbeitung, Transport und Einbau trotzdem Energie benötigen. Am Ende ihres Lebenszyklus ersetzen diese Bauteile als Energieträger jedoch andere, nicht natürlichen Energieträgern, so dass die Vermeidung der Emissionen als positiver Wert angerechnet werden kann.³³ Insofern ist die Aussage, ein Bauteil sei CO₂-neutral methodisch richtig, jedoch hauptsächlich im Sinne einer rechnerischen Einsparung an anderer Stelle zu verstehen.

2.8.3 Auswertung Gebäudebetrieb

Aufgrund der energetischen Ertüchtigung der Außenbauteile und des damit verbundenen niedrigen Heizwärmebedarfs und verringerter Lüftungswärmeverluste, in Kombination mit der Nutzung regenerativer Energien durch die Wärmepumpe sowie der Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik-Anlage liegen die Umweltwirkungen des energy+Home in allen betrachteten Wirkungskategorien unterhalb denen des Referenzgebäudes.

Das Referenzgebäude verfügt über keine Photovoltaik-Anlage und erhält dementsprechend auch keine Gutschriften in der Nutzungsphase. Das energy+Home hingegen erzeugt mit seiner PV-Anlage mehr Strom, als es für die Versorgung des Gebäudes mit Strom und Wärme benötigt. Die überschüssige Energie wird in das Stromnetz eingespeist und ersetzt dort Strom, welcher ansonsten aus anderen, nicht regenerativen Energiequellen erzeugt werden müsste. Dadurch vermeidet das energy+Home mehr CO₂-Emissionen, als es selbst durch den Verbrauch von Strom und Wärme erzeugt. In der Lebenszyklusbetrachtung spiegelt sich dies durch den Abbau der CO₂-Emissionen aus Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung wider. Abbildung 2.36 zeigt dies anhand des Treibhauspotentials.

Deutlich zu erkennen ist der leicht erhöhte CO₂ Ausstoß des Referenzgebäudes für Herstel-

33 Vgl. Hegger, 2011, S. 82 f.

lung, Instandhaltung und Entsorgung sowie der stark ansteigende CO₂ Ausstoß während des Betriebs. Das energy+Home hingegen weist einen niedrigeren CO₂ Ausstoß der Gebäudekonstruktion auf und reduziert diesen sogar während des Betriebs. Rein rechnerisch amortisiert sich das Treibhauspotential aus Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung zwar nicht im Betrachtungszeitraum, ausschlaggebend für die Bewertung ist jedoch die Differenz zwischen dem energy+Home und dem Referenzgebäude³⁴. Gegenüber diesem spart das energy+Home etwa 1.700 kg CO₂ pro m² NGF bzw. total 400.000 kg CO₂ im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ein. Das entspricht den Emissionen eines Autos mit Benzinmotor (Hubraum 1,4-2l, Euro 3 Norm, 0,22 kg CO₂ pro gefahrenen Kilometer), welches eine Fahrstrecke von ca. 1,8 Millionen Kilometern zurücklegt.

Der betrachtete Effekt trifft auch auf die anderen Wirkungskategorien zu, wobei die Schere zwischen dem Wirkungspotential des energy+Home und dem Referenzgebäude teilweise weniger stark ausgeprägt ist, wie Abbildung 2.37 des Ozonabbaupotentials zeigt:

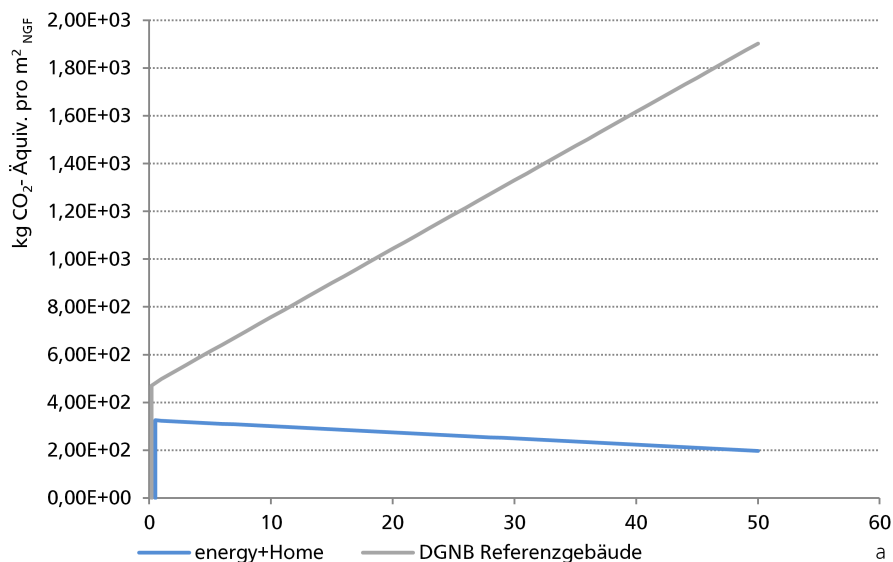


Abbildung 2.36: Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

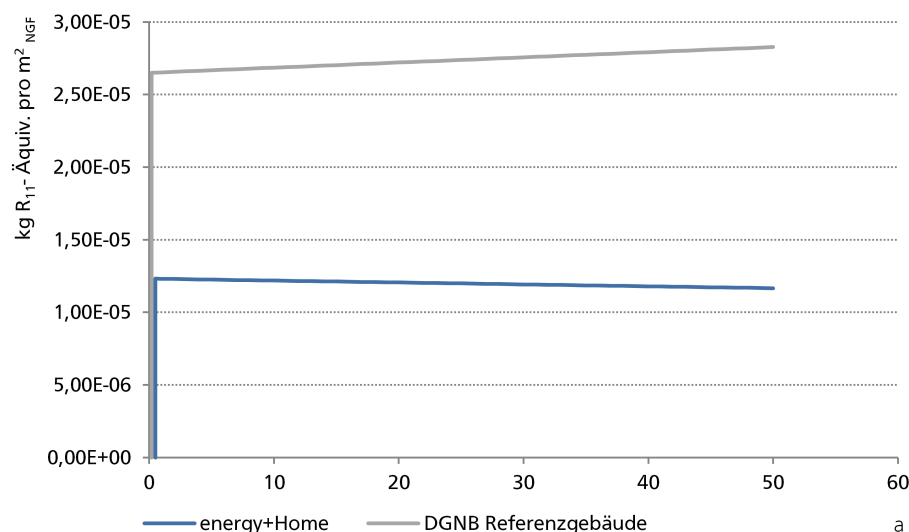


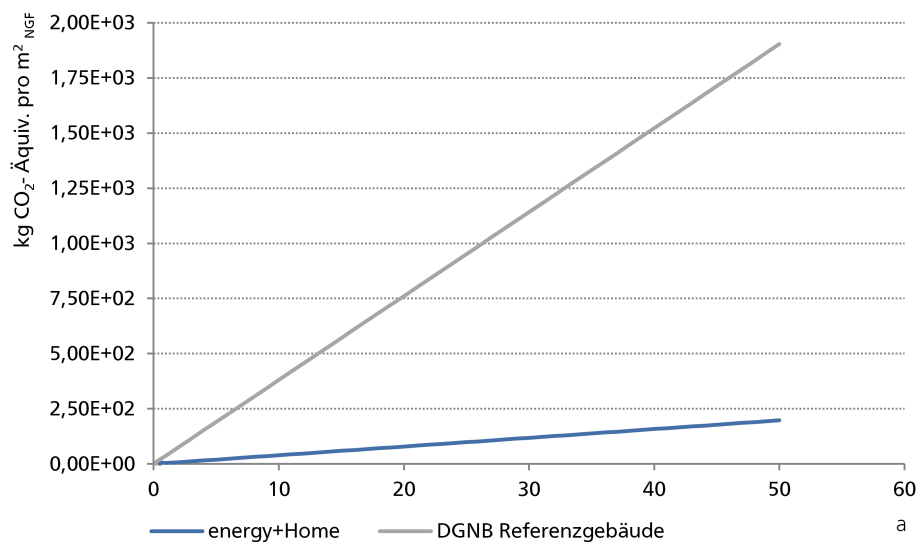
Abbildung 2.37: Entwicklung des Ozonabbaupotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

³⁴ Im DGNB Verfahren wird das aus dem Haushaltsstrom resultierende Wirkungspotential nicht berücksichtigt. Dies wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht getan. Würde man den Haushaltsstrom unberücksichtigt lassen, so würde sich das Treibhauspotential aus der Gebäudekonstruktion nach 42 Jahren amortisieren.

Wie man sieht verläuft die Amortisation des Ozonabbaupotentials weniger stark und beträgt lediglich 5% des Wirkungspotentials der Gebäudekonstruktion. Etwas besser sieht die Amortisationsrate beim photochemischen Oxidantienbildungspotential mit 9% aus, das Eutrophierungspotential wird mit 22% noch besser amortisiert, übertroffen nur noch vom Versauerungspotential (25%), dem Gesamtprimärenergiebedarf (37%) und dem Treibhauspotential (39%).

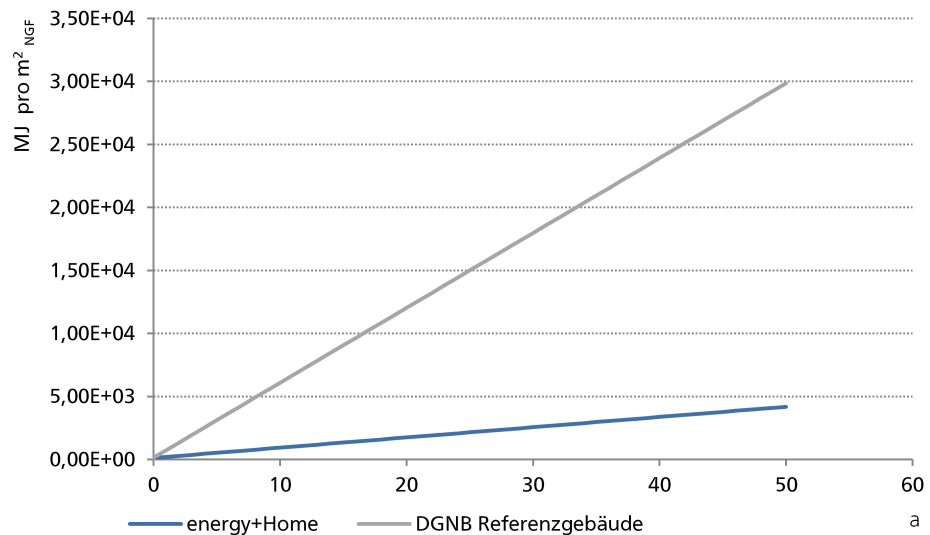
Betrachtet man die Gesamtwirkungsabschätzung nicht mit einer anfänglichen Umweltwirkung aus der Gebäudekonstruktion und einer anschliessenden Amortisation im Betrieb, sondern mit einem aufsummierten Wert aus Konstruktion und Betrieb pro Jahr über den Betrachtungszeitraum, so stellt sich die Grafik wie folgt dar:

Abbildung 2.38: Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren absolut



Die Differenz zwischen dem Wert des energy+Home nach 50 Jahren und dem Referenzgebäude bleibt bei dieser Betrachtung selbstverständlich gleich groß. Auf die Darstellung der übrigen Wirkungspotentiale wird an dieser Stelle aufgrund des ähnlichen Verlaufs der Kurven verzichtet. Abschließend sei an dieser Stelle nur nochmals die Differenz zwischen dem energy+Home und dem Referenzgebäude in punkto Primärenergiebedarf gezeigt:

Abbildung 2.39: Entwicklung des Gesamtprimärenergiebedarfs des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren absolut



2.9 Treibhauspotential der PV-Anlage

Die bisher ermittelten Werte der Umweltwirkungen wurden anhand spezifischer EPD's der Hersteller, oder wenn diese nicht vorlagen anhand der Werte der Ökobau.dat 2011 ermittelt. Für die Photovoltaikanlage lagen zum Zeitpunkt der Erstellung der Ökobilanz weder ein Datensatz der Herstellerfirma Eternit, noch ein generischer Datensatz für PV-Anlagen in der Ökobau.dat vor.

Um dennoch eine grobe Einschätzung der Umweltwirkungen der PV-Anlage zu erhalten wird im Folgenden das Treibhauspotential anhand von Literaturangaben abgeschätzt. Da sich hierzu überwiegend nur Angaben zum Treibhauspotential und nicht zu anderen Wirkungskategorien finden, sind die Angaben aus den vorherigen Kapiteln insofern konsistent, da sich sämtliche betrachteten Wirkungskategorien auf alle Baustoffe beziehen, für die Angaben zu Umweltwirkungen vorlagen und keine unterschiedlichen Baustoffe in verschiedenen Wirkungskategorien betrachtet wurden.

Das Treibhauspotential wird im Folgenden anhand der Angaben von Mariska Wild de Scholten in „Life Cycle Assessment of Photovoltaics“³⁵ angenommen. Darin wird ein Treibhauspotential von 2.728 kg CO₂-äquiv. pro kW_p für monokristalline Solarmodule angegeben. Wagner³⁶ vergleicht die Angaben aus einer Vielzahl von Veröffentlichungen zu CO₂-Emissionen der Stromerzeugung und stellt diese in CO₂-Äquivalenten pro erzeugter kWh Elektrizität dar. Als wesentliche Einflussfaktoren gibt er das solare Energieangebot, der Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Anlagen an. Die überwiegende Mehrheit der analysierten Studien gibt Werte von 50 bis 100 g CO₂/kWh an. Bei einem Ertrag von 9.880 kWh ergibt dies CO₂-Emissionen von 24.700 kgCO₂ bis 49.400 kgCO₂ in 50 Jahren. Nach den Angaben von Wild de Scholten kommt man auf Emissionen von 34.900 kgCO₂ bei einer Anlage mit 12,8 kW_p wie sie im energy+Home eingebaut ist. Dieser Wert liegt in dem von Wagner angegebenen Bereich und wird damit als plausibel angenommen.

Berücksichtigt man das Treibhauspotential für Herstellung der PV-Anlage und einer Instandsetzung innerhalb des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren, übersteigt das Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion den DGNB-Referenzwert um 33%. Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung der übrigen Baukonstruktion entsprechen demgegenüber zusammen lediglich 69% des Referenzwertes. Das Treibhauspotential der PV-Anlage entspricht ca. 90% des Wertes der übrigen Konstruktion.

Die Mehraufwendungen des Treibhauspotentials bei der Gebäudekonstruktion werden jedoch gegenüber dem DGNB Referenzwert bereits nach 5 Jahren aufgrund der jährlichen Gutschrift durch den Ertrag der PV-Anlage amortisiert (siehe Abbildung 2.42). Bei dieser Betrachtung wurde ein einmaliger Austausch der PV-Anlage im Betrachtungszeitraum eingerechnet und der Wert der Gebäudekonstruktion kumuliert zu Beginn des Betrachtungszeitraums angesetzt. In Realität entstehen die Umweltwirkungen der Konstruktion jedoch erst bei Instandsetzung der Anlage nach 25 Jahren, so dass die Werte des Referenzgebäudes jederzeit über denen des energy+Home liegen. Nach 50 Jahren Betrieb entspricht das Treibhauspotential unter Berücksichtigung der PV-Anlage lediglich 26% des Treibhauspotentials des DGNB-Referenzgebäudes. Ohne Berücksichtigung der Umweltwirkungen der PV-Anlage beträgt dieser Wert sogar nur 10%.

35 Vgl. Mariska Wild de Scholten in „Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2013, S.16, abrufbar unter <http://smartgreenscans.nl/publications/deWildScholten-2013-Life-Cycle-Assessment-of-Photovoltaics.pdf> [15.09.2014].

36 Vgl. Wagner, 2007, S.44 ff.

Abbildung 2.40: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzwert

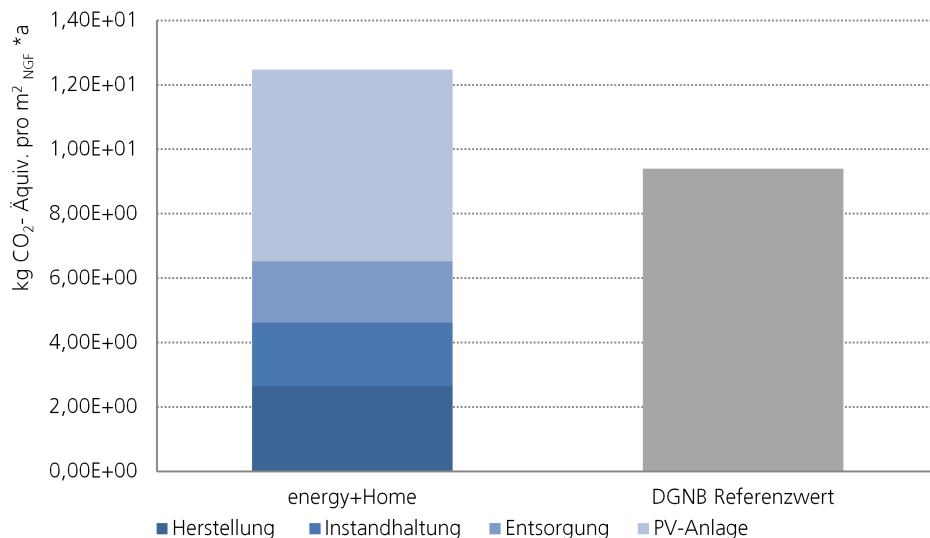


Abbildung 2.41: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzgebäude

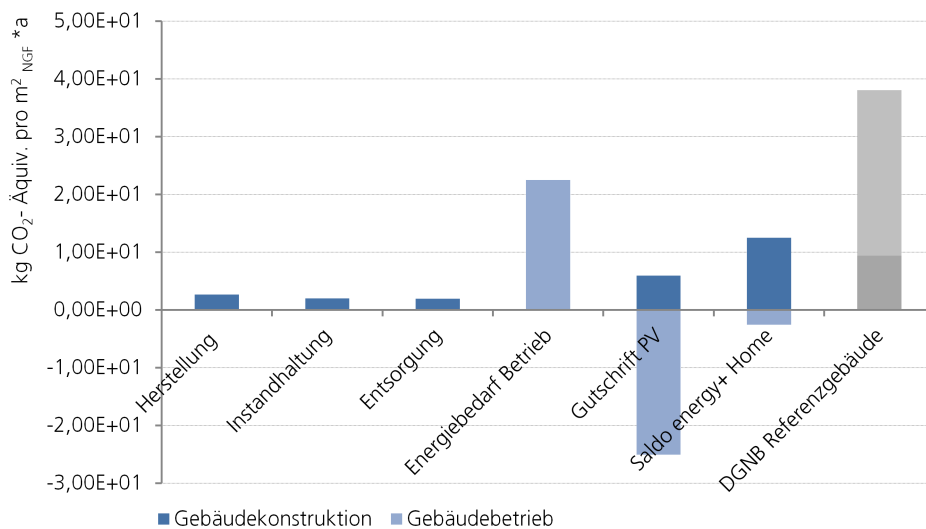
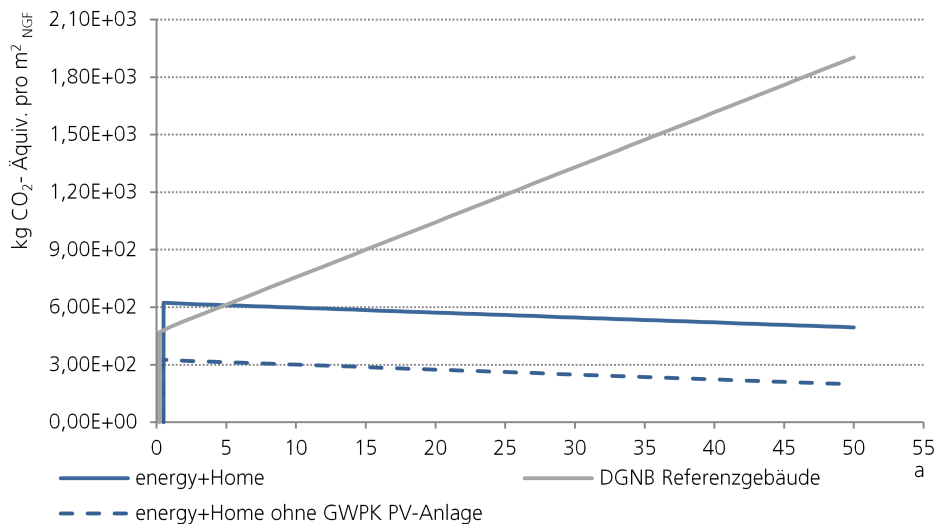


Abbildung 2.42: Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren inkl. PV-Anlage



2.10 Vergleich energy+Home und unsanierter Bestand

Die folgende Gegenüberstellung der zuvor ermittelten Werte mit dem unsanierten Bestandsgebäude zeigt, dass die Gebäudekonstruktion des unsanierten Bestandes gegenüber dem DGNB-Referenzwert und dem energy+Home das geringste Treibhauspotential aufweist. Grund dafür ist die relativ einfache Bauweise des Gebäudes aus den 60er Jahren.

In der Nutzungsphase kehren sich die Verhältnisse jedoch um. Aufgrund der Ölheizung weist der unsanierte Bestand ein deutlich höheres Treibhauspotential als das DGNB-Referenzgebäude, dessen Energieverbrauch dem EnEV-Referenzgebäude entspricht (50% Gas/50% Ölheizung) und als das energy+Home.

Im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren weist der Wert des energy+Home lediglich 11% des Treibhauspotentials des unsanierten Bestandes auf.

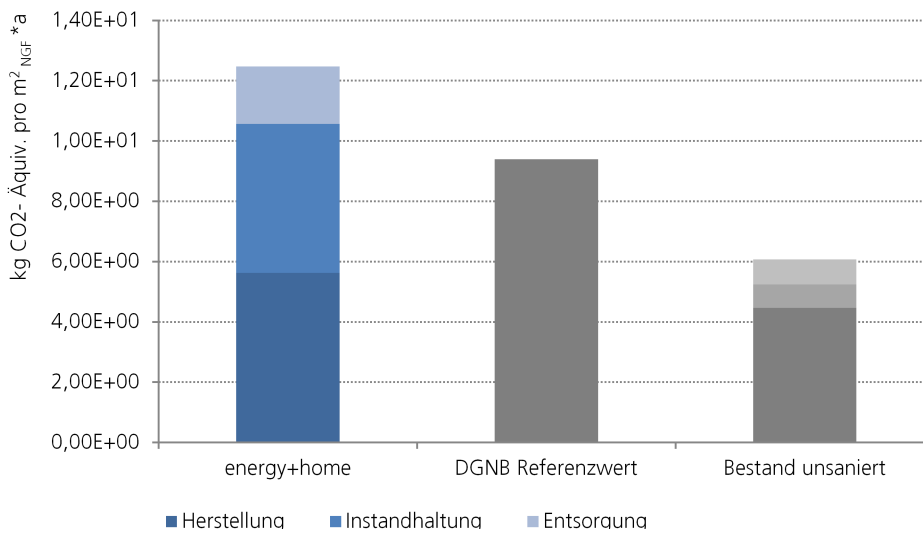


Abbildung 2.43: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzwert und dem unsanierten Bestand

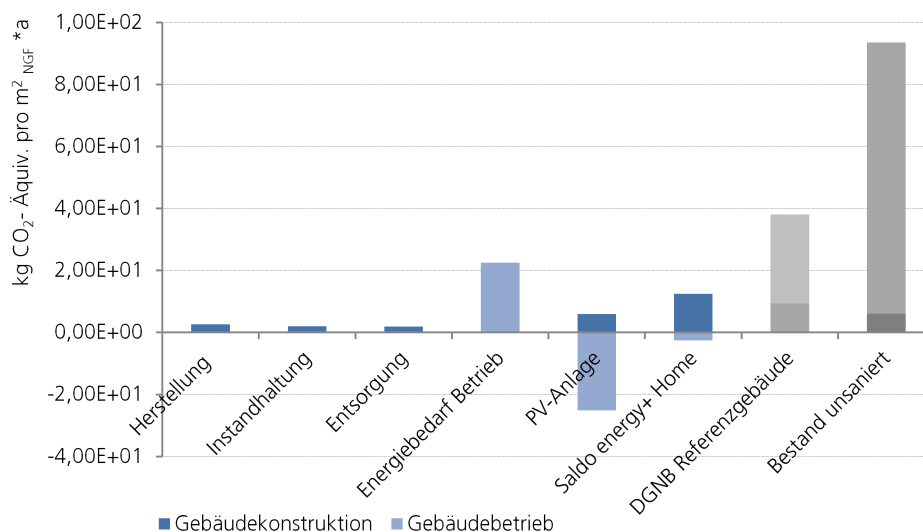
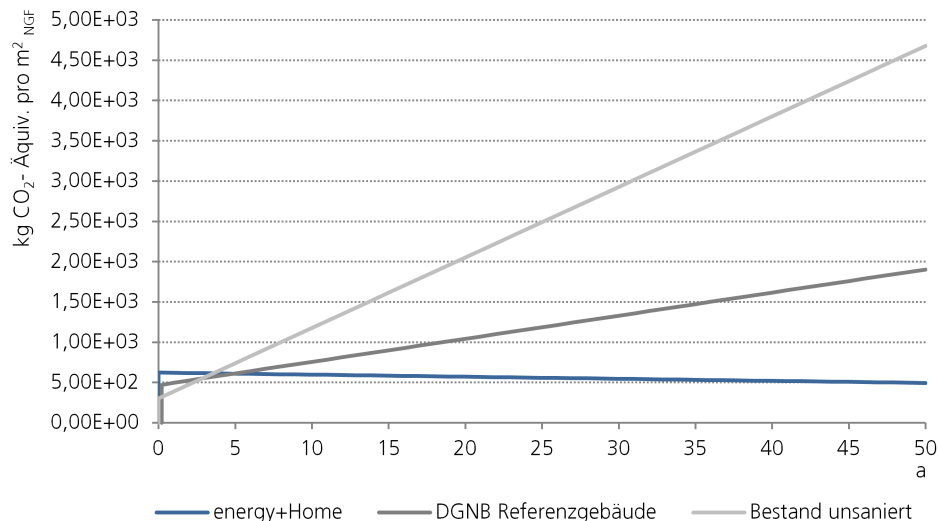


Abbildung 2.44: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials des energy+Home inkl. PV-Anlage mit dem DGNB Referenzgebäude und dem unsanierten Bestand

Abbildung 2.45: Entwicklung des Treibhauspotentials des energy+Home, des Referenzgebäudes und des unsanierten Bestandes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren



2.11 Schlussfolgerung, Interpretation

Die dargestellten Wirkungsabschätzungen enthalten nur relative Aussagen, die keine Aussage über „Endprodukte“ der Wirkungskategorien, Überschreitungen von Schwellenwerten, Sicherheitsmargen oder über Risiken darstellen.³⁷ Genausowenig erhebt die Ökobilanzierung den Anspruch, das Gebäude 100prozentig wirklichkeitsgetreu abzubilden. Ungenauigkeiten in der Erhebung der Daten, der Vernachlässigung von Anschlüssen, welche durch einen prozentualen Aufschlag auf die Wirkungskategorien ausgeglichen werden, sowie die Unschärfe durch die Verwendung generischer Datensätze aus der ökobau.dat führen zwangsweise zu einer Idealisierung des Gebäudes, wie auch der Referenzwert der DGNB lediglich einen durchschnittlichen Wert, generiert aus mehreren vergleichbaren Gebäuden, darstellt. Die Einschätzung der ökologischen Qualität anhand des DGNB-Referenzgebäudes ist aufgrund mangelnder direkter Vergleichbarkeit nur bedingt aussagekräftig und aufgrund fehlender vergleichbarer Objekte für zukünftige Forschung ein zu bearbeitendes Themengebiet.

Trotzdem zeigt die Betrachtung sehr deutlich, dass die Sanierung zum energy+Home unter Verwendung regenerativer Energiequellen in Verbindung mit einer Reduzierung des Energiebedarfs und niedriger Umweltwirkungen aus der Gebäudekonstruktion zu wesentlich geringeren Umweltwirkungen gegenüber dem Bestand bzw. gegenüber einem konventionell errichteten Gebäude führt. Die Annahme, dass die Sanierung, und damit die Nutzung der vorhandenen Gebäudestruktur, gegenüber einem Neubau aus ökologischer Sicht im Vorteil ist wird durch die vorliegende Untersuchung bestätigt. Vor allem die effiziente Anlagentechnik mit Wärmepumpe und Photovoltaik-Anlage führt dazu, dass über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, sämtliche betrachteten Umweltwirkungen wesentlich geringere Werte als ein konventionell errichtetes Gebäude aufweisen. Bezogen auf den Gebäudebestand in Deutschland mit ca. 6 Millionen vergleichbaren Bauten mit Ölheizung bietet sich durch die Strategie des energy+Home ein immenses Potential, den CO₂-Ausstoß des Gebäudebestandes zu reduzieren.

37 Vgl. DIN EN 15804:2012-04.

3 Ökologischer Vergleich alternativer Sanierungsstrategien

3.1 Untersuchungsrahmen

Alternativ zur Sanierung des bestehenden Gebäudes wäre eine Sanierung nach EnEV oder der Abriss der bestehenden Bausubstanz und die Erstellung eines Ersatzneubaus ein alternativer Lösungsweg gewesen. Dabei spielen neben den ökologischen Aspekten auch immobilienökonomische und baubetriebswirtschaftliche Fragestellungen sowie die Rahmenbedingungen des bestehenden Baurechts eine entscheidende Rolle bei der Wahl der richtigen Sanierungsstrategie. Ist ein Grundstück z.B. nicht hinsichtlich der bebaubaren Fläche voll ausgenutzt, so kann es unter Umständen aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein, ein Gebäude abzureißen und durch ein größeres Gebäude zu ersetzen. Die Auswirkungen solcher rechtlichen und betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf den Entscheidungsprozess sind neben den ökologischen Überlegungen ein sehr wichtiger Faktor im Umgang mit bestehender Bausubstanz.

Im Hinblick auf die große Anzahl privat genutzter Einfamilienhäuser in Deutschland geht es im Rahmen dieser Untersuchung jedoch um die Fragestellung, inwiefern sich die Sanierung eines Einfamilienhauses im Gegensatz zum Abbruch und Neubau eines Einfamilienhauses mit vergleichbarer Kubatur verhält, und dies jeweils für den energetischen Standard eines EnEV- bzw. Plusenergiegebäudes. Die Annahme, dass Einfamilienhäuser in ländlicher Gegend per se aufgrund des höheren Flächenverbrauchs und längeren Fahrstrecken unökologischer sind als Mehrfamilienhäuser im städtischen Kontext bleibt hierbei unberücksichtigt.

Betrachtet werden dabei die vier Szenarien:

- a) Sanierung zum energy+Home
- b) Sanierung nach EnEV
- c) Abbruch und Neubau eines Plusenergiehauses und
- d) Abbruch und Neubau nach EnEV

Dabei wird untersucht, wie groß die Differenz zwischen den Umweltwirkungen bei den Varianten Sanierung bzw. Abbruch und Neubau ist, und wie lange es dauert, bis sich die einzelnen Varianten gegenüber den CO₂-Emissionen eines nicht sanierten Bestandsgebäudes wieder amortisiert.

Die ökologische Betrachtung für die Variante a) Sanierung zum energy+Home wurde bereits ausführlich in Kapitel 2 dargestellt. Im folgenden werden die Wirkungsabschätzungen für die Varianten b, c und d dargestellt und in Kapitel 3.5 gegenübergestellt.

Die Schwierigkeit bei der Bewertung der einzelnen Untersuchungsergebnisse liegt unter anderem in der Tatsache, dass die unterschiedlichen Wirkungskategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Ob die Auswirkungen des Treibhauspotentials auf die Erderwärmung schwerer zu gewichten sind als beispielsweise die Auswirkungen auf das Ozonloch liegt im Ermessen des Betrachters bzw. des Untersuchungsgegenstandes. Dementsprechend lässt sich auch kein gemeinsamer Indikator finden, welcher sämtliche Umweltwirkungen auf einen Wert reduzieren lässt.¹ In den meisten Fällen liegt der Fokus der Betrachtung jedoch auf dem Treibhauspotential und der Primärenergie, welche im Folgenden dargestellt werden. Der Vergleich des Treibhauspotentials beinhaltet auch jeweils die Werte des Umweltwirkungspotentials der Gebäudekonstruktion der PV-Anlage.

Eine Analyse der Wirkungskategorien Ozonabbaupotential, photochemisches Oxidantienbildungspotential, Versauerungspotential sowie Eutrophierungspotential findet sich in Anhang A.

1 Vgl. Hegger, 2011, S.82.

3.2 Sanierung nach EnEV

Bei der Variante „Sanierung nach EnEV“ werden die Bauteilaufbauten hinsichtlich der Dämmstoffdicken und die Qualität der Fenster modifiziert, so daß sie die Anforderungen der zum Zeitpunkt der Sanierung gültigen EnEV 2009 erfüllen. In untenstehender Tabelle sind die Wandaufbauten der ausgeführten Sanierung zum energy+Home mit den jeweiligen U-Werten den Wandaufbauten gegenübergestellt, wie sie in der Variante „Sanierung nach EnEV“ angenommen wurden.

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der Bauteilaufbauten der Sanierungsvarianten

Sanierung energy+Home			Sanierung EnEV 2009		
	Aufbau / Material von innen nach außen	Dicke [mm]	U-Wert [W/(m²K)]	Dicke [mm]	U-Wert [W/(m²K)]
Außenwand I	Gipsputz	15		15	
	Bimshohlblockstein	240/300		240/300	
	Kalkzementputz	20		20	
	Mineralische Dämmung WLG 041	240		140	
	Kalkzementputz	20	0,14	20	≤ 0,24
	Außenwand II	Gipsputz	15		15
	Bimshohlblockstein	240/300		240/300	
	Kalkzementputz	20		20	
	Mineralische Dämmung WLG 032	240		140	
	Lattung / Hinterlüftung	40		40	
	Faserzement - Fassadentafel	15	0,14	15	≤ 0,24
Fenster	Dreifachverglasung (g=0,50)		0,80	2-fach Verglasung (g=0,6)	≤ 1,3
Dach	Gipskartonbekleidung	12,5		12,5	
	Untersparrendämmung	60		60	
	Feuchteadaptive Dampfbremse	0,2		0,2	
	Sparren mit Aufdopplung und Dämmung WLG 035/ 032	240		120	
	Unterspannbahn	0,2		0,2	
	Lattung / Konterlattung	40		40	
	Dachstein		0,14		≤ 0,24
	Bodenplatte	Massivholzdielen	20		20
	Dünnschicht Estrich mit Heizschleifen	45		45	
	PE-Folie	0,2		0,2	
	Trittschall- und Wärmedämmung	50		80	
	bituminöse Abdichtung	0,2		0,2	
	Stahlbetondecke Bestand	100	0,38 ¹	100	≤ 0,30

2 Aufgrund eingeschränkter Raumhöhe konnte bei der Sanierung die erforderliche Dämmstoffdicke zur Dämmung der Bodenplatte auf Passivhaus-Niveau nicht eingehalten werden.

Durch die Reduzierung der Dämmstoffdicken und Veränderung der Fenstertypen reduzieren sich die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion. Im Bereich der Wärmeerzeugungsanlagen wird anstelle der Luft-Wasser-Wärmepumpe der Ersatz eines Gas-Brennwertkessels eingerechnet.

Die Umweltwirkungen im Gebäudebetrieb verändern sich durch die Annahme, dass bei der Sanierung nach EnEV keine Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung benutzt wird, sondern stattdessen ein Gas-Brennwertkessel verwendet wird. Die erforderliche Endenergie zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser wurde nach DIN V 18599 mit 17.870 kWh pro Jahr berechnet. Die Endenergie für Haushaltsstrom und Beleuchtung wurde genauso hoch wie beim energy+Home mit 2.500 kWh angesetzt.

Die Energieeinsparverordnung sieht darüber hinaus keine Photovoltaik-Anlage beim EnEV-Standard-Gebäude vor. Daher kann auf Seiten des Betriebs auch keine Gutschrift aus der Stromerzeugung angesetzt werden.

3.2.1 Umweltwirkungen Gebäudekonstruktion

Im folgenden werden die Umweltwirkungen, welche aus der Gebäudekonstruktion resultieren dargestellt. Wie in Kapitel 2 wird die Variante „Sanierung nach EnEV“ mit dem DGNB Referenzwert gegenübergestellt und die Anteile der einzelnen Bauteile an der jeweiligen Umweltwirkung in Prozent dargestellt.

3.2.1.1 Treibhauspotential Gebäudekonstruktion GWP_k

Das Treibhauspotential (GWP) der Gebäudekonstruktion für die Sanierung nach EnEV liegt bei lediglich 48% des DGNB Referenzwerts und damit deutlich unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, welches einen Anteil von 69% gegenüber dem Referenzwert aufweist.

Der größte Teil der Umweltwirkungen (42%) entfallen dabei auf die Herstellung der neuen Bauteilschichten, mit 35% etwas weniger auf den Abbruch der bei der Sanierung und am Ende des Lebenszyklus entfernten Bauteile und 22% auf die Instandhaltung der Baukonstruktion.

$$GWP_k = 4,50E+00 \text{ kgCO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung 3.1: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzwert

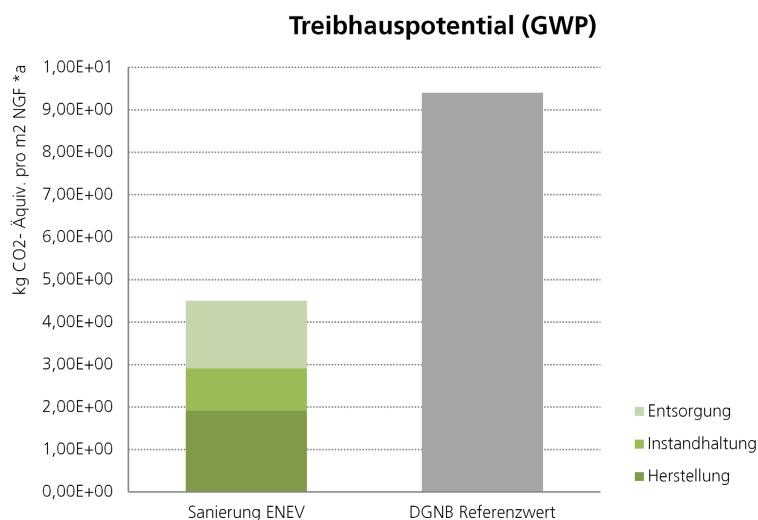
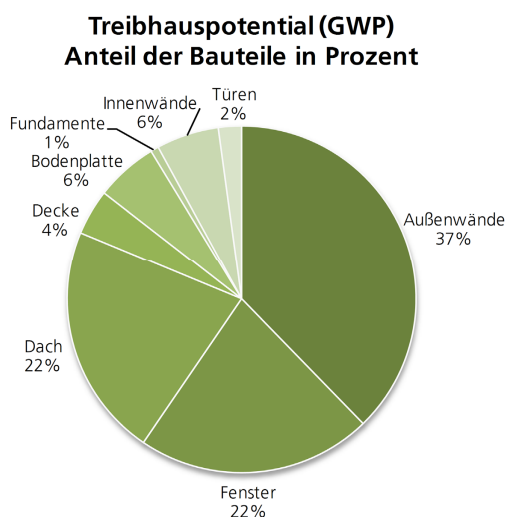


Abbildung 3.2: prozentualer Anteil der Bauteile der Sanierung nach EnEV am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion



3.2.1.2 Primärenergiebedarf Gebäudekonstruktion PEI_k

Der Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion liegt 50% unter dem Wert des DGNB Referenzwertes, während bei der Variante „Sanierung zum energy+Home“ der Wert bei 86% des Referenzwertes lag. Grund hierfür ist, wie bei den vorangegangenen Wirkungskategorien auch, die geringere Masse an Baustoffen, welche dem Gebäude hinzugefügt wurden sowie die geringeren Umweltwirkungen aus der berücksichtigten Wärmeerzeugungsanlage.

PEI_k 7,50E+01 MJ/m²*a

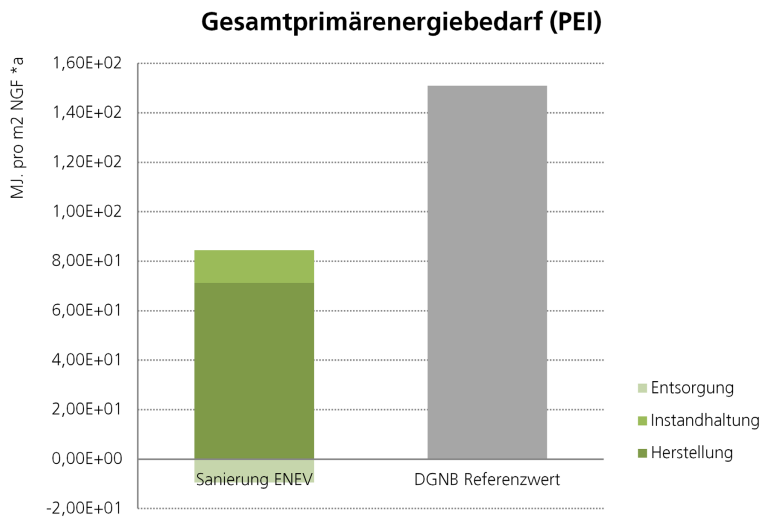


Abbildung 3.3: Vergleich des Primärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzwert

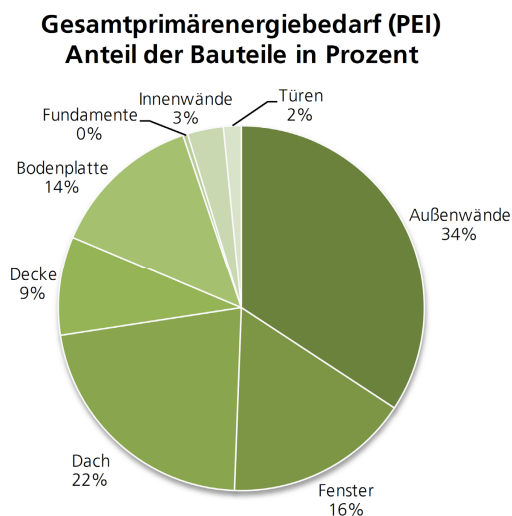


Abbildung 3.4: prozentualer Anteil der Bauteile der Sanierung nach EnEV am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion

3.2.2 Gesamtwirkungsabschätzung Sanierung EnEV

Der durchschnittliche Jahreswert für den Betrieb setzt sich aus dem Umweltwirkungspotential UWP_{NS} des Strombedarfs, sowie dem Umweltwirkungspotential des Wärmebedarfs UWP_{NW} während der Nutzung, zusammen. Für den Strombedarf wurde an dieser Stelle der gleiche Wert wie bei der Variante „Sanierung zum energy+Home“ angesetzt. Für den Wärmebedarf hingegen wurde der Wert nach DIN V 18599 neu berechnet und in die Bilanzierung einbezogen. Eine Gutschrift aus einer Photovoltaik-Anlage entfällt, da diese in der EnEV nicht als Standard vorgesehen ist.

Tabelle 3.2: Gesamtwirkungsabschätzung Sanierung nach EnEV

UWP		[kg UWP/ m ² *a]	Gutschrift PV	0-20 Jahre	21-50 Jahre	Gesamt	Gesamt	
			pro m ² *a	pro m ²	pro m ²	pro m ²	EnEV-Variante über 50 Jahre	
GWP _K		4,50E+00		9,01E+01	1,35E+02			
GWP _N	GWP _{NS}	6,34E+00						
	GWP _{NW}	1,44E+01	0,00E+00	4,16E+02	6,24E+02			
GWP _G		2,53E+01		5,06E+02	7,59E+02	1,26E+03	2,97E+05	kg CO ₂ - Äquiv.
ODP _K		1,43E-07		2,86E-06	4,29E-06			
ODP _N	ODP _{NS}	3,26E-08						
	ODP _{NW}	1,47E-09	0,00E+00	6,81E-07	1,02E-06			
ODP _G		1,77E-07		3,54E-06	5,31E-06	8,85E-06	2,08E-03	kg R11 - Äquiv.
POCP _K		2,80E-03		5,60E-02	8,40E-02			
POCP _N	POCP _{NS}	8,92E-04						
	POCP _{NW}	2,21E-03	0,00E+00	6,21E-02	9,31E-02			
POCP _G		5,90E-03		1,18E-01	1,77E-01	2,95E-01	6,93E+01	kg C ₂ H ₄ - Äquiv.
AP _K		1,58E-02		3,16E-01	4,74E-01			
AP _N	AP _{NS}	1,26E-02						
	AP _{NW}	2,41E-02	0,00E+00	7,33E-01	1,10E+00			
AP _G		5,24E-02		1,05E+00	1,57E+00	2,62E+00	6,16E+02	kg SO ₂ - Äquiv.
EP _K		1,54E-03		3,08E-02	4,62E-02			
EP _N	EP _{NS}	1,16E-03						
	EP _{NW}	1,55E-03	0,00E+00	5,43E-02	8,14E-02			
EP _G		4,25E-03		8,51E-02	1,28E-01	2,13E-01	5,00E+01	kg PO ₄ - Äquiv.
PE e _K		2,38E+01		4,77E+02	7,15E+02			
PE e _N	PE e _{NS}	1,75E+01						
	PE e _{NW}	8,43E-01	0,00E+00	3,66E+02	5,49E+02			
PE e _G		4,21E+01		8,43E+02	1,26E+03	2,11E+03	4,95E+05	MJ
PE ne _K		4,76E+01		9,51E+02	1,43E+03			
PE ne _N	PE ne _{NS}	1,03E+02						
	PE ne _{NW}	2,12E+02	0,00E+00	6,29E+03	9,44E+03			
PE ne _G		3,62E+02		7,24E+03	1,09E+04	1,81E+04	4,25E+06	MJ
PEI _K		7,50E+01		1,50E+03	2,25E+03			
PEI _N	PEI _{NS}	1,20E+02						
	PEI _{NW}	2,13E+02	0,00E+00	6,66E+03	9,99E+03			
PEI _G		4,08E+02		8,16E+03	1,22E+04	2,04E+04	4,79E+06	MJ

3.2.2.1 Gesamtwirkungsabschätzung Treibhauspotential

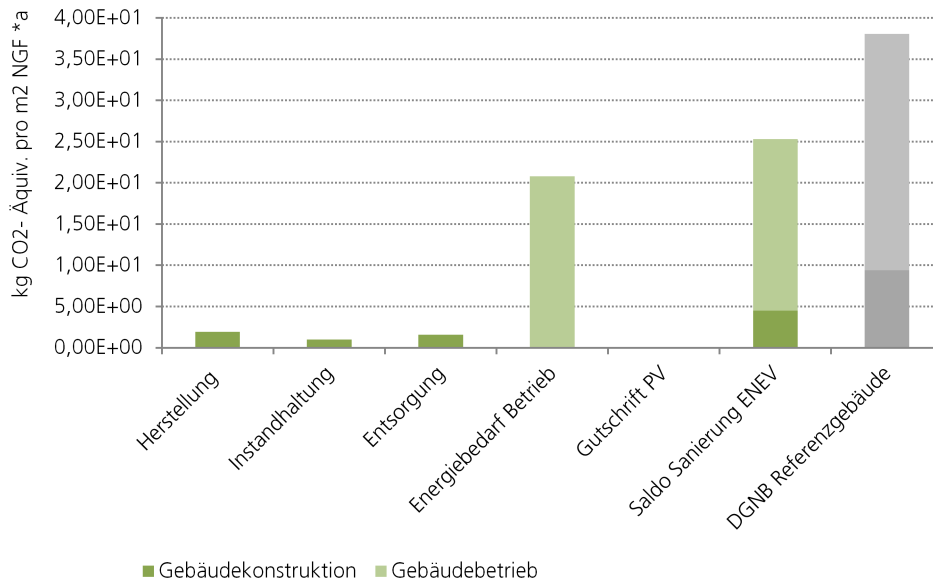


Abbildung 3.5: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude

3.2.2.2 Gesamtwirkungsabschätzung Primärenergiebedarf

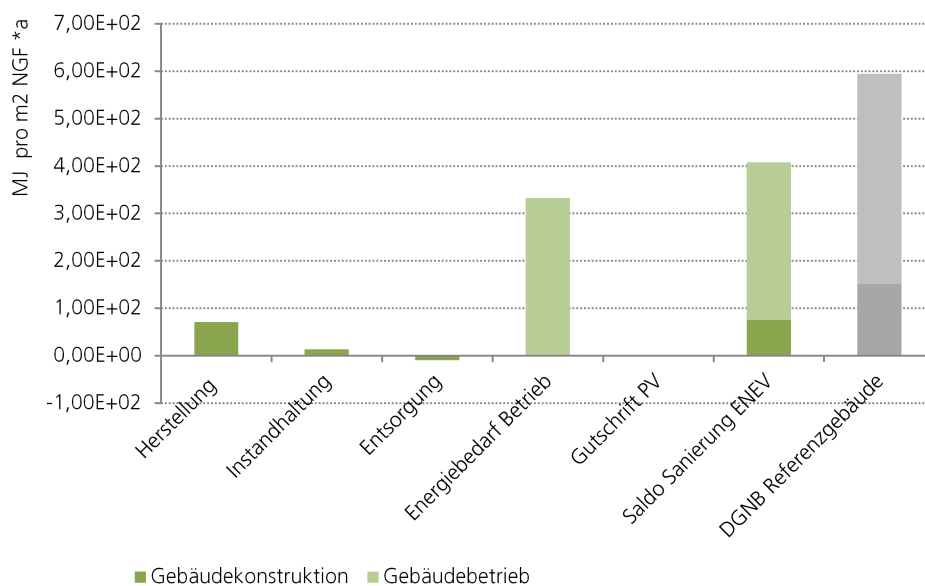


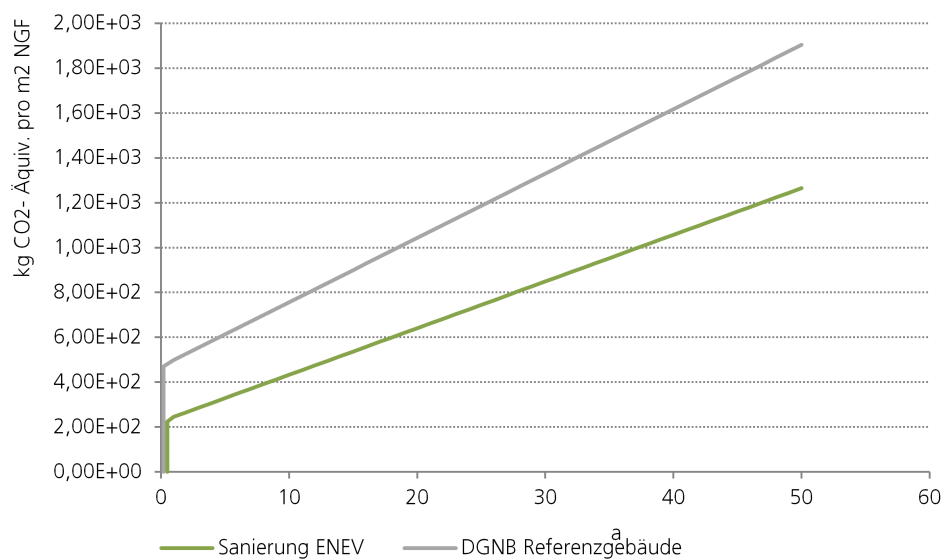
Abbildung 3.6: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Primärenergiebedarfs der Sanierung nach EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude

3.2.3 Auswertung der Variante „Sanierung nach EnEV“

Ähnlich wie bei der Variante Sanierung zum energy+Home (Kapitel 2) sind die möglichen Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion geringer als diejenigen des DGNB-Referenzwertes, welcher sich auf ein durchschnittliches Gebäude in Deutschland bezieht. Durch die Nutzung der vorhandenen Gebäudestruktur können schon in der Bauphase Umweltwirkungen eingespart werden. Diese sind in der Variante „Sanierung nach EnEV“ nochmals geringer als bei der in Kapitel 2 betrachteten Variante „Sanierung zum energy+Home“. Der Grund dafür liegt in der Verwendung geringerer Dämmstärken und Fenstern mit 2-fach Verglasung anstelle der 3-fach Isolierverglasung, sowie der Verwendung eines Brennwertkessels zur Wärmeerzeugung anstelle einer Wärmepumpe.

Daraus resultiert für die Betriebsphase jedoch ein größerer Wärmebedarf und damit auch höhere Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus. Im EnEV-Standard ist keine Photovoltaik-Anlage vorgesehen, daher besteht bei dieser Variante auch nicht die Möglichkeit der Gutschrift durch ins Netz eingespeisten Strom. Die Umweltwirkungen steigen während der Betriebsphase an. Beispielhaft dafür ist in Abbildung 3.7 das Treibhauspotential im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren dargestellt. Am Ende des Betrachtungszeitraums wird das nach EnEV sanierte Gebäude lediglich 66% des Treibhauspotentials des Referenzgebäudes erzeugt haben. Das energy+Home zum Vergleich dazu sogar nur lediglich 10%.

Abbildung 3.7: Entwicklung des Treibhauspotentials der Sanierung nach EnEV und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren



3.3 Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes

Analog zum Vorgehen bei der Ermittlung der Wirkungskategorien für die Variante „Sanierung zum energy+Home“ wurden die Wirkungskategorien für die Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ ermittelt. Dabei wurden die Baumassen, welche in Kapitel 2 als Bestand aufgeführt sind als neu errichtete Baumasse in die Bilanzierung einbezogen und zusätzlich zur Entsorgung am „end of life“ als Abbruch am Anfang des Lebenszyklus bilanziert. Die daraus entstandenen Umweltwirkungen wurden je nach Art der Aufbereitung (mineralische Baustoffe: Bauschutttaufbereitung; Gips, Faserplatten und Mineralwolle: Bauschuttdeponierung; Holz und Plastik: Thermische Verwertung) als Gutschrift bzw. Belastung angerechnet.

Erwartungsgemäß sind die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion in allen untersuchten Kategorien höher als bei der Variante der Sanierung zum energy+Home. Grund hierfür sind die Umweltwirkungen aus dem Abbruch und die erheblich größere Masse verbauter Baustoffe.

3.3.1 Umweltwirkungen Gebäudekonstruktion

Im folgenden werden die Umweltwirkungen, welche aus der Gebäudekonstruktion resultieren dargestellt. Wie in Kapitel 2 wird die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes mit dem DGNB Referenzwert gegenübergestellt und die Anteile der einzelnen Bauteile an der jeweiligen Umweltwirkung in Prozent dargestellt. Das Treibhauspotential der PV-Anlage ist in der Berechnung inbegriffen.

3.3.1.1 Treibhauspotential Gebäudekonstruktion GWP_k

Das Treibhauspotential (GWP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes liegt bei 179% des DGNB Referenzwerts und damit deutlich über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“.

26% der Umweltwirkungen entfallen dabei auf den Abbruch der bestehenden Bausubstanz und die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus und damit deutlich weniger als auf die Herstellung (44%). Der Anteil der Instandhaltung ist dagegen mit 31% vergleichsweise gering.

$$GWP_k = 1,68E+01 \text{ kgCO}_2\text{-Äquiv./m}^{2*}\text{a}$$

Abbildung 3.8: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzwert

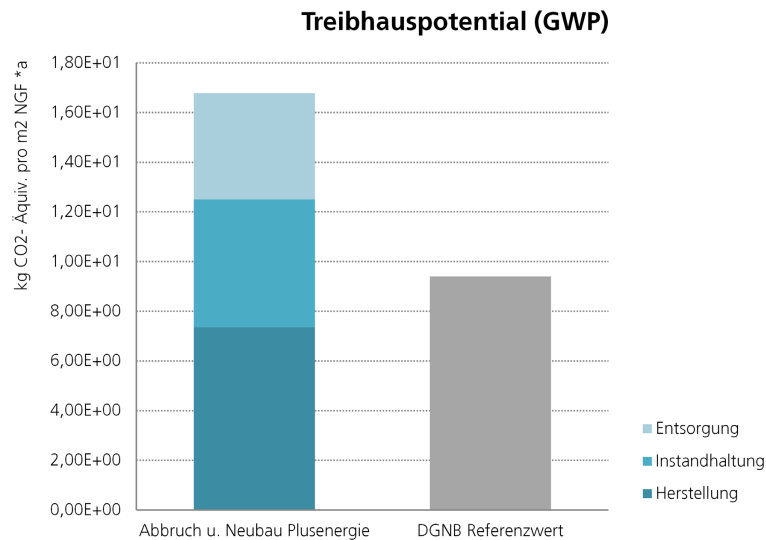
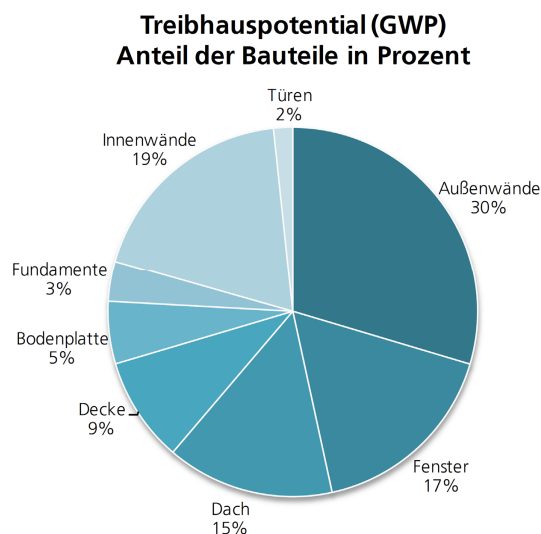


Abbildung 3.9: prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion



3.3.1.2 Primärenergiebedarf Gebäudekonstruktion PEI_k

Der Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion liegt 19% über dem Wert des DGNB Referenzwertes. Bei der Variante „Sanierung zum energy+Home“ lag der Wert 14% unter dem Referenzwert. Auffallend ist, dass der Anteil des Abbruchs bzw. der Entsorgung als negativer Wert der Umweltwirkung zugute kommt. Dies resultiert hauptsächlich aus der Gutschrift mineralischer Baustoffe aufgrund ihres Recyclingpotentials. Diese Baustoffe haben jedoch auch den größten Anteil am Primärenergiebedarf für die Herstellung.

PEI_k 1,80E+02 MJ/m²*a

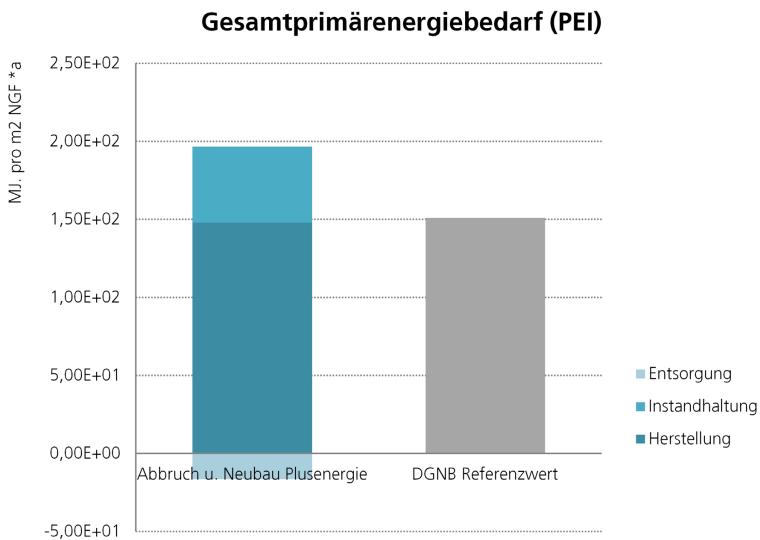


Abbildung 3.10: Vergleich des Primärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzwert

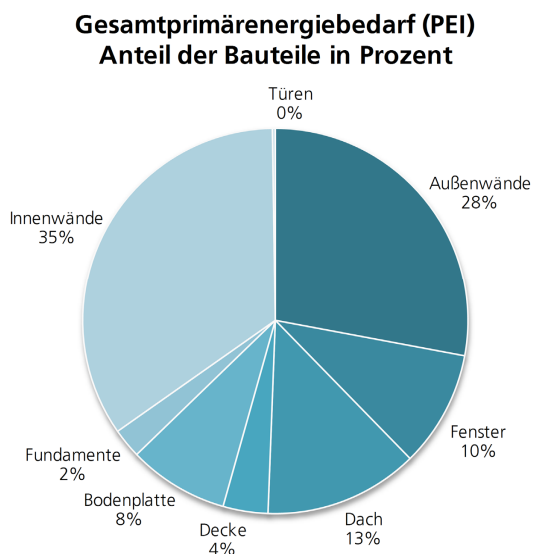


Abbildung 3.11: prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion

3.3.2 Gesamtwirkungsabschätzung Abbruch und Neubau Plusenergie

Der durchschnittliche Jahreswert für den Betrieb setzt sich aus dem Umweltwirkungspotential UWP_{NS} des Strombedarfs, sowie dem Umweltwirkungspotential des Wärmebedarfs UWP_{NW} während der Nutzung, zusammen. Beide Werte entsprechen denen der Variante „Sanierung zum energy+Home“, welche in Kapitel 2 beschrieben sind. Für die Gesamtwirkungsabschätzung sind somit lediglich die veränderten Werte der Gebäudekonstruktion ausschlaggebend.

Tabelle 3.3: Gesamtwirkungsabschätzung Sanierung und Neubau Plusenergiehaus

UWP		[kg UWP/ m ² *a]	Gutschrift PV	0-20 Jahre	21-50 Jahre	Gesamt	Gesamt	
			pro m ² *a	pro m ²	pro m ²	pro m ²	A+N Plusenergie über 50 a	
GWP _K		1,68E+01		-1,66E+02	5,04E+02			
GWP _N	GWP _{NS}	6,34E+00						
	GWP _{NW}	1,62E+01	2,25E+01	-2,51E+01	4,50E+02	-7,71E+01		
GWP _G		3,93E+01		2,84E+02	4,26E+02	7,11E+02	1,67E+05	kg CO ₂ - Äquiv.
ODP _K		3,25E-07		3,93E-06	9,76E-06			
ODP _N	ODP _{NS}	3,26E-08						
	ODP _{NW}	8,30E-08	1,16E-07	-1,29E-07	2,31E-06	-3,96E-07		
ODP _G		4,41E-07		6,24E-06	9,36E-06	1,56E-05	3,66E-03	kg R11 - Äquiv.
POCP _K		5,03E-03		3,01E-02	1,51E-01			
POCP _N	POCP _{NS}	8,92E-04						
	POCP _{NW}	2,27E-03	3,16E-03	-3,53E-03	6,33E-02	-1,08E-02		
POCP _G		8,19E-03		9,34E-02	1,40E-01	2,33E-01	5,48E+01	kg C ₂ H ₄ - Äquiv.
AP _K		2,57E-02		-4,79E-01	7,71E-01			
AP _N	AP _{NS}	1,26E-02						
	AP _{NW}	3,20E-02	4,46E-02	-4,96E-02	8,91E-01	-1,53E-01		
AP _G		7,02E-02		4,12E-01	6,18E-01	1,03E+00	2,42E+02	kg SO ₂ - Äquiv.
EP _K		3,44E-03		-2,29E-02	1,03E-01			
EP _N	EP _{NS}	1,16E-03						
	EP _{NW}	2,96E-03	4,12E-03	-4,59E-03	8,23E-02	-1,41E-02		
EP _G		7,56E-03		5,94E-02	8,92E-02	1,49E-01	3,49E+01	kg PO ₄ - Äquiv.
PE e _K		3,86E+01		-6,09E+02	1,16E+03			
PE e _N	PE e _{NS}	1,75E+01						
	PE e _{NW}	4,45E+01	6,19E+01	-6,90E+01	1,24E+03	-2,12E+02		
PE e _G		1,00E+02		6,30E+02	9,44E+02	1,57E+03	3,70E+05	MJ
PE ne _K		1,15E+02		-5,82E+03	3,45E+03			
PE ne _N	PE ne _{NS}	1,03E+02						
	PE ne _{NW}	2,62E+02	3,64E+02	-4,06E+02	7,29E+03	-1,25E+03		
PE ne _G		4,79E+02		1,47E+03	2,20E+03	3,67E+03	8,61E+05	MJ
PEI _K		1,53E+02		-6,43E+03	4,60E+03			
PEI _N	PEI _{NS}	1,20E+02						
	PEI _{NW}	3,06E+02	4,26E+02	-4,75E+02	8,53E+03	-1,46E+03		
PEI _G		5,80E+02		2,10E+03	3,14E+03	5,24E+03	1,23E+06	MJ

3.3.2.1 Gesamtwirkungsabschätzung Treibhauspotential

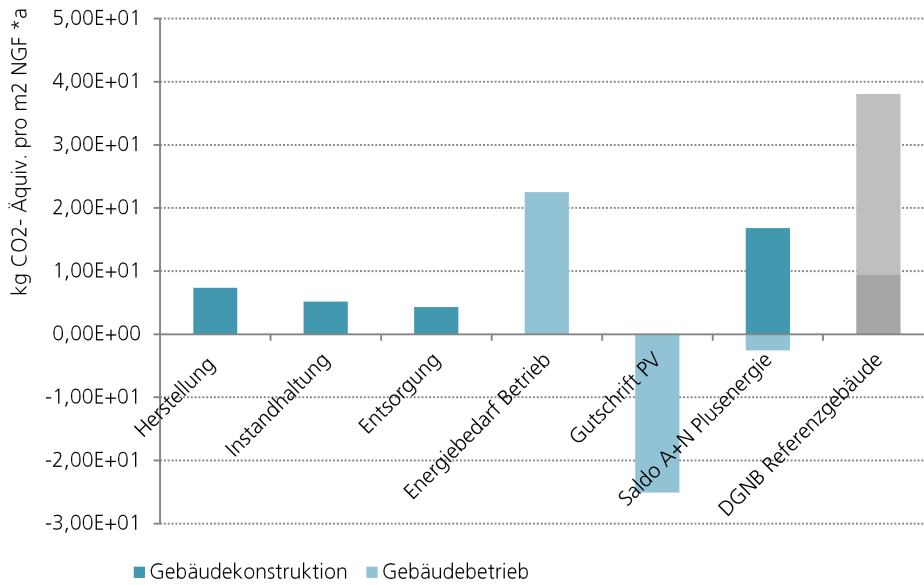


Abbildung 3.12: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzgebäude

3.3.2.2 Gesamtwirkungsabschätzung Primärenergiebedarf

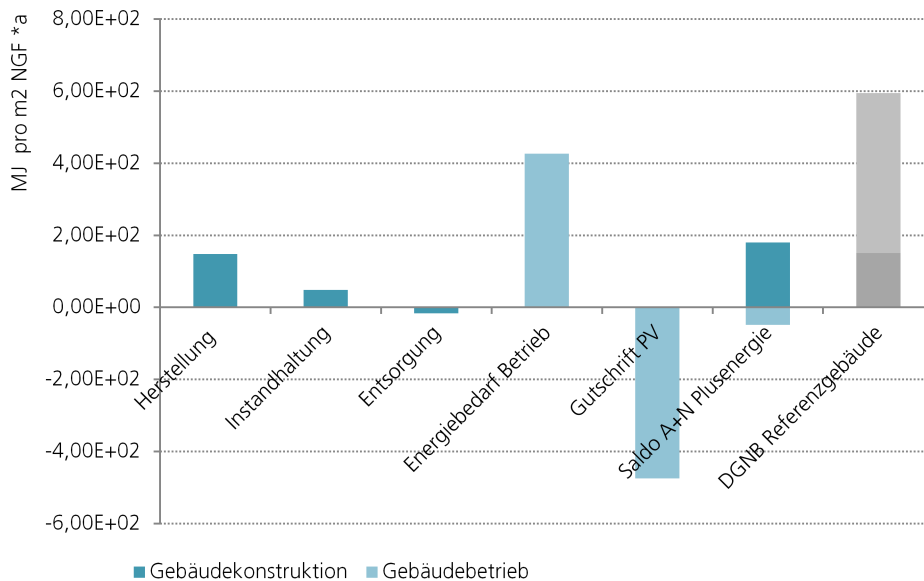


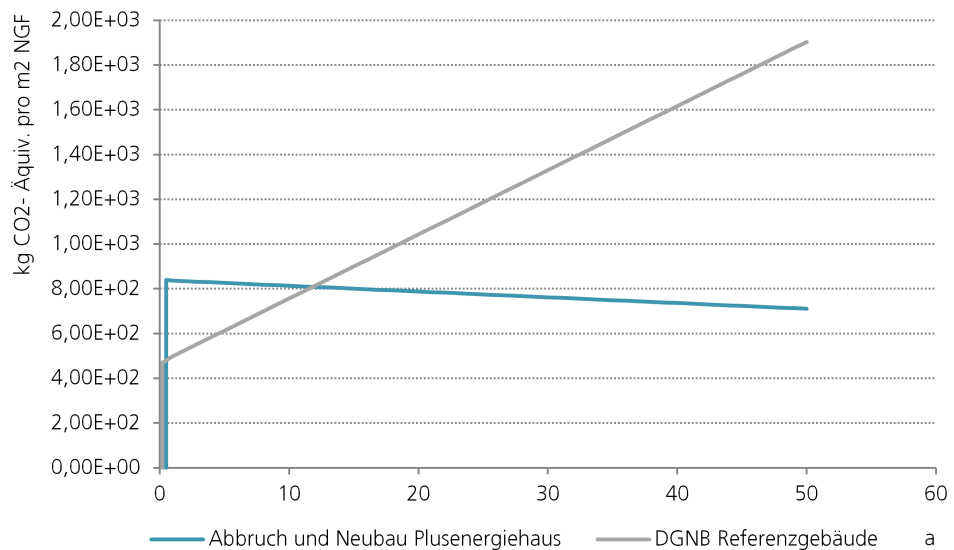
Abbildung 3.13: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Primärenergiebedarfs von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude mit dem DGNB Referenzgebäude

3.3.3 Auswertung der Variante „Abbruch und Neubaus eines Plusenergiegebäudes“

Während bei der Variante Sanierung zum energy+Home (Vgl. Kapitel 2) die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion lediglich aus den neu hinzugefügten Bauteilen resultierten und die bestehende Primärkonstruktion als bestehende Struktur nicht in die Bilanzierung eingerechnet wurde, sind bei der in diesem Kapitel untersuchten Variante die gesamte Baumasse inklusive Primärstruktur berücksichtigt. Zusätzlich dazu entstehen noch Umweltwirkungen aus dem Abriss und der Entsorgung des bestehenden Gebäudes. Dadurch sind alle Wirkungskategorien der Gebäudekonstruktion signifikant höher als bei der ausgeführten Sanierungsvariante zum energy+Home, das Treibhauspotential zum Beispiel um 44%.

Für den Gebäudebetrieb wurden die selben Werte für den Strom- und Wärmebedarf angenommen wie beim energy+Home. Auch die Größe und Leistung der Photovoltaikanlage wurde unverändert in die Bilanzierung eingerechnet. Dadurch amortisieren sich die Umweltwirkungen aus der Gebäudekonstruktion auch bei dieser Variante, wenn auch etwas langsamer als beim energy+Home. Das gegenüber dem Referenzgebäude leicht erhöhte Treibhauspotential und der erhöhte Primärenergiebedarf amortisieren sich z.B. nach 12 Jahren Betriebszeit.

Abbildung 3.14: Entwicklung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren



3.4 Abbruch und Neubau nach EnEV

Analog zum Vorgehen bei der Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ wurde bei der Variante „Abbruch und Neubau nach EnEV“ die Baumasse des Bestandes mit in die Bilanzierung eingerechnet und der Abbruch des bestehenden Gebäudes berücksichtigt. Die Dämmstoffstärken, Fensterqualitäten und anlagentechnischen Komponenten entsprechen denen der Variante „Sanierung nach EnEV“. Es wurde also auch bei dieser Variante davon ausgegangen, dass die Bauteilanforderungen denen der Energieeinsparverordnung 2009 entsprechen, die Beheizung des Gebäudes über einen Gas-Brennwertkessel erfolgt und keine Photovoltaik-Anlage vorhanden ist. Dementsprechend wurde im Bereich der Gebäudenutzung auch keine Gutschriften aus Einspeisung von Strom in das öffentliche Netz angerechnet.

3.4.1 Umweltwirkungen Gebäudekonstruktion

Im folgenden werden die Umweltwirkungen, welche aus der Gebäudekonstruktion resultieren dargestellt. Wie in Kapitel 2 wird die Variante Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes mit dem DGNB Referenzwert gegenübergestellt und die Anteile der einzelnen Bauteile an der jeweiligen Umweltwirkung in Prozent dargestellt.

3.4.1.1 Treibhauspotential Gebäudekonstruktion GWP_k

Das Treibhauspotential (GWP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Hauses mit vergleichbarer Volumetrie wie das energy+Home liegt bei 94% des DGNB Referenzwerts und damit deutlich über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, dessen Wert bei 69% des DGNB-Referenzwertes lag.

Der DGNB Referenzwert beruht auf der Annahme eines durchschnittlichen Gebäudes in Deutschland. Das Ergebnis zeigt den hohen Anteil des Umweltwirkungspotentials aus dem Abbruch der bestehenden Gebäudesubstanz, welcher mit 45% sogar noch das UWP der Herstellung leicht übersteigt (41%). Auf die Instandhaltung entfällt mit 14% nur ein relativ geringer Anteil.

$$GWP_k = 8,82E+00 \text{ kgCO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung 3.15: Vergleich des Treibhauspotentials der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzwert

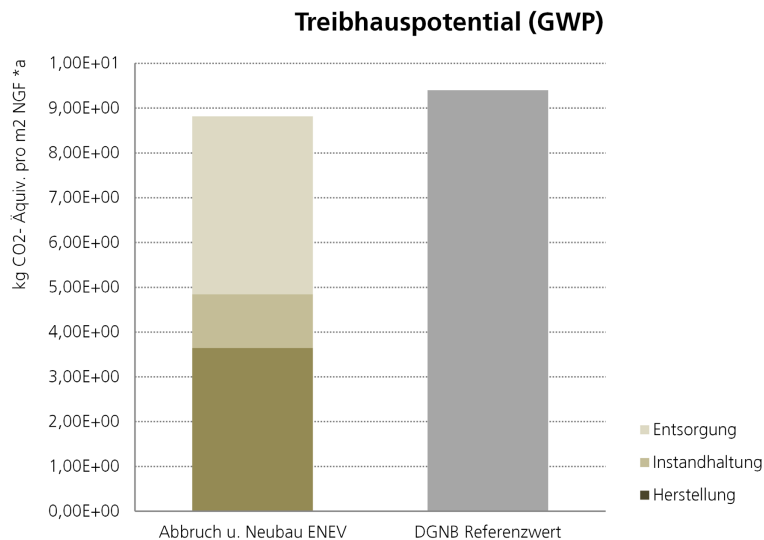
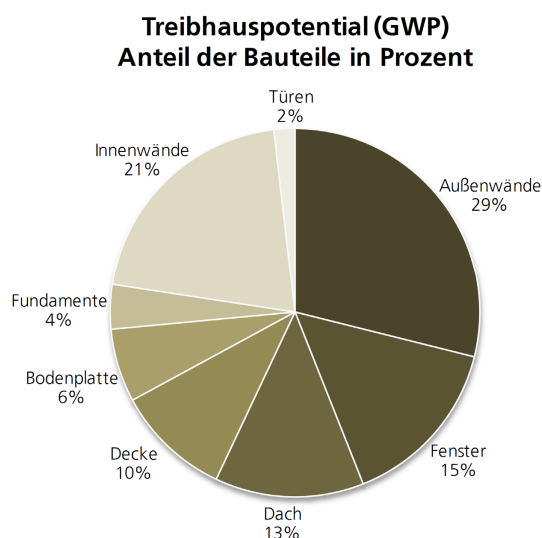


Abbildung 3.16: prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau EnEV am Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion



3.4.1.2 Primärenergiebedarf Gebäudekonstruktion PEI_K

Der Primärenergiebedarf für die Gebäudekonstruktion beträgt 83% des DGNB Referenzwertes. Dieser Wert ist erwartungsgemäss geringer als bei der Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiehauses“ (119%) und in etwa so hoch wie bei der Variante „Sanierung zum energy+Home“ (86% gegenüber dem Referenzwert).

Auch bei dieser Variante haben die massiven Bauteile wie die Innenwände aus KS-Mauerwerk, die Außenwände aus Bimshohlblocksteinen sowie die massiven Stahlbetondecke bzw. Bodenplatte den größten Anteil am Primärenergiebedarf.

$$PEI_K = 1,25E+02 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$$

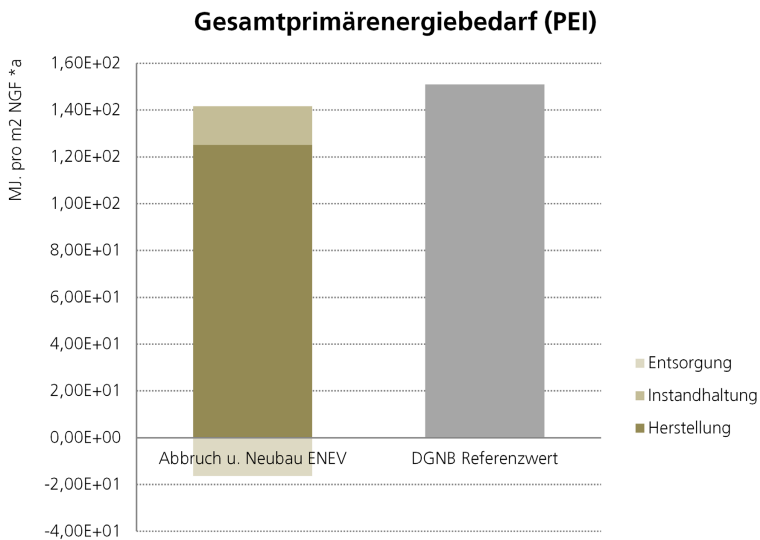


Abbildung 3.17: Vergleich des Primärenergiebedarfs der Gebäudekonstruktion von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzwert

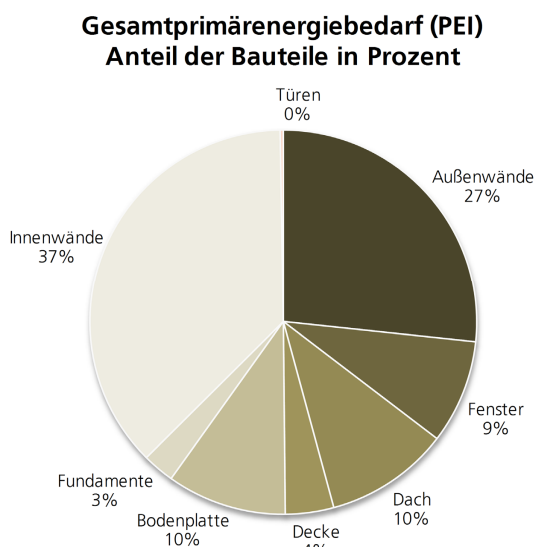


Abbildung 3.18: prozentualer Anteil der Bauteile von Abbruch und Neubau EnEV am Primärenergiebedarf der Gebäudekonstruktion

3.4.2 Gesamtwirkungsabschätzung Abbruch und Neubau EnEV

Der durchschnittliche Jahreswert für den Betrieb setzt sich aus dem Umweltwirkungspotential UWP_{NS} des Strombedarfs, sowie dem Umweltwirkungspotential des Wärmebedarfs UWP_{NW} während der Nutzung, zusammen. Beide Werte entsprechen denen der Variante „Sanierung nach EnEV“, welche in Kapitel 3.2 beschrieben sind. Eine Gutschrift durch Einspeisung von Strom erfolgt nicht, da bei EnEV-Standard Haus keine PV-Anlage vorgesehen ist.

Tabelle 3.4: Gesamtwirkungsabschätzung Abbruch und Neubau nach EnEV

UWP		[kg UWP/ m ² *a]	Gutschrift PV	0-20 Jahre pro m ²	21-50 Jahre pro m ²	Gesamt pro m ²	Gesamt A+N EnEV über 50 a	
			pro m ² *a	pro m ²	pro m ²	pro m ²	A+N EnEV über 50 a	
GWP _K		8,82E+00		1,76E+02	2,65E+02			
GWP _N	GWP _{NS} 6,34E+00 GWP _{NW} 1,44E+01	2,08E+01	0,00E+00	4,16E+02	6,24E+02			
GWP _G		2,96E+01		5,92E+02	8,88E+02	1,48E+03	3,48E+05	kg CO2 - Äquiv.
ODP _K		2,22E-07		4,44E-06	6,66E-06			
ODP _N	ODP _{NS} 3,26E-08 ODP _{NW} 1,47E-09	3,40E-08	0,00E+00	6,81E-07	1,02E-06			
ODP _G		2,56E-07		5,12E-06	7,68E-06	1,28E-05	3,00E-03	kg R11 - Äquiv.
POCP _K		3,99E-03		7,98E-02	1,20E-01			
POCP _N	POCP _{NS} 8,92E-04 POCP _{NW} 2,21E-03	3,10E-03	0,00E+00	6,21E-02	9,31E-02			
POCP _G		7,09E-03		1,42E-01	2,13E-01	3,55E-01	8,33E+01	kg C2H4 - Äquiv.
AP _K		2,11E-02		4,22E-01	6,33E-01			
AP _N	AP _{NS} 1,26E-02 AP _{NW} 2,41E-02	3,66E-02	0,00E+00	7,33E-01	1,10E+00			
AP _G		5,77E-02		1,15E+00	1,73E+00	2,89E+00	6,78E+02	kg SO2 - Äquiv.
EP _K		2,81E-03		5,62E-02	8,42E-02			
EP _N	EP _{NS} 1,16E-03 EP _{NW} 1,55E-03	2,71E-03	0,00E+00	5,43E-02	8,14E-02			
EP _G		5,52E-03		1,10E-01	1,66E-01	2,76E-01	6,48E+01	kg PO4 - Äquiv.
PE e _K		3,53E+01		7,06E+02	1,06E+03			
PE e _N	PE e _{NS} 1,75E+01 PE e _{NW} 8,43E-01	1,83E+01	0,00E+00	3,66E+02	5,49E+02			
PE e _G		5,36E+01		1,07E+03	1,61E+03	2,68E+03	6,29E+05	MJ
PE ne _K		6,33E+01		1,27E+03	1,90E+03			
PE ne _N	PE ne _{NS} 1,03E+02 PE ne _{NW} 2,12E+02	3,15E+02	0,00E+00	6,29E+03	9,44E+03			
PE ne _G		3,78E+02		7,56E+03	1,13E+04	1,89E+04	4,44E+06	MJ
PEI _K		1,25E+02		2,51E+03	3,76E+03			
PEI _N	PEI _{NS} 1,20E+02 PEI _{NW} 2,13E+02	3,33E+02	0,00E+00	6,66E+03	9,99E+03			
PEI _G		4,58E+02		9,16E+03	1,37E+04	2,29E+04	5,38E+06	MJ

3.4.2.1 Gesamtwirkungsabschätzung Treibhauspotential

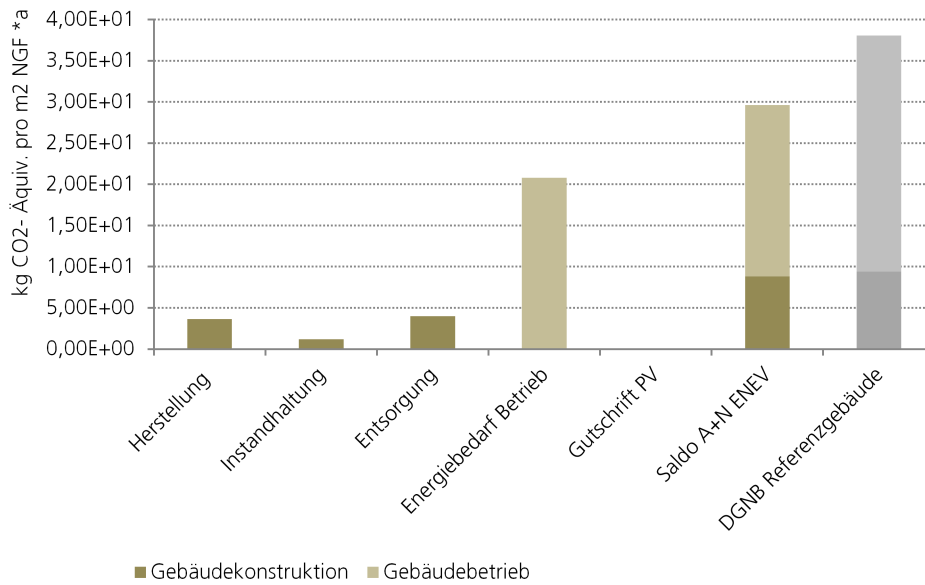


Abbildung 3.19: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude

3.4.2.2 Gesamtwirkungsabschätzung Primärenergiebedarf

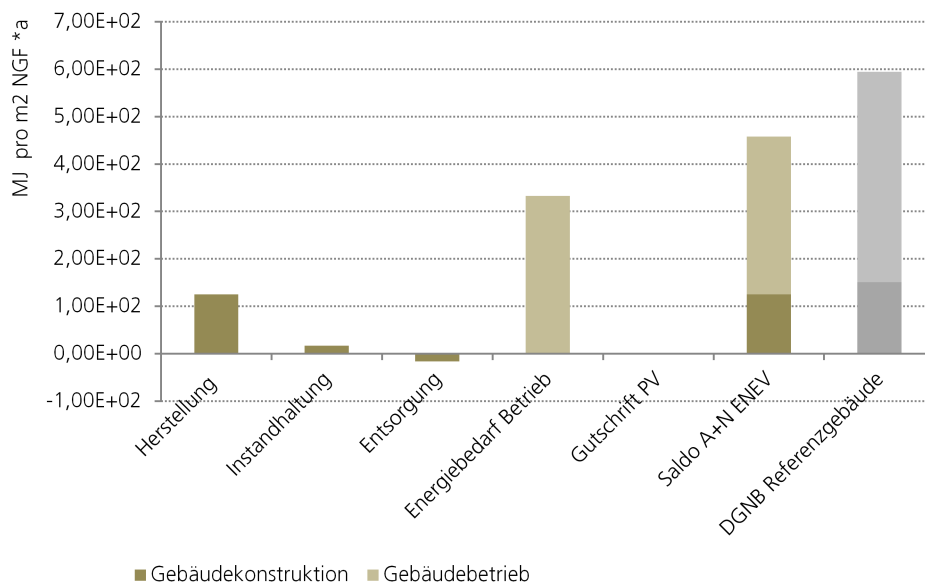


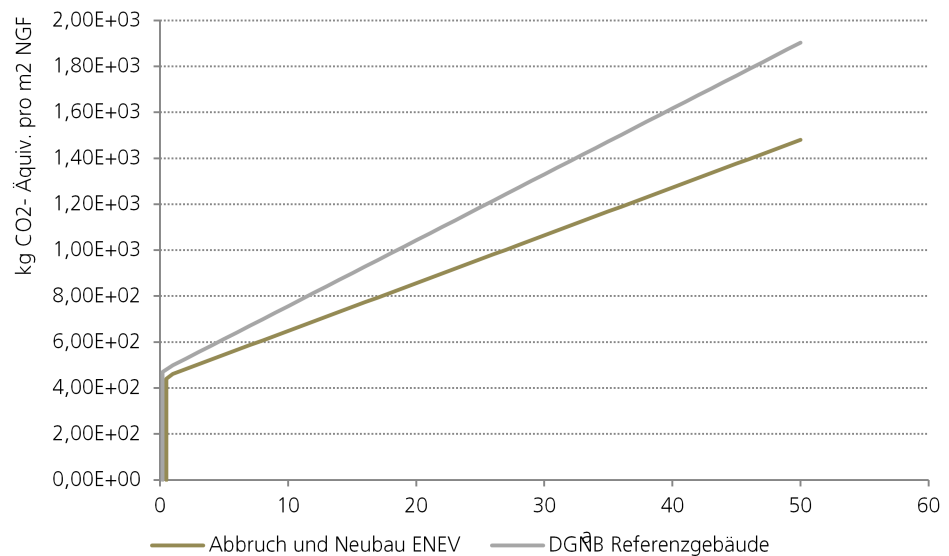
Abbildung 3.20: Vergleich der Gesamtwirkungsabschätzung des Primärenergiebedarfs von Abbruch und Neubau EnEV mit dem DGNB Referenzgebäude

3.4.3 Auswertung der Variante „Abbruch und Neubau nach EnEV“

Ähnlich wie bei der Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ in Kapitel 3.3 wird auch bei der Variante Abbruch und Neubau nach EnEV die bestehende Baustuktur als neu zu errichtende Baumasse mit in die Bilanzierung eingerechnet. Zudem wurden die Umweltwirkungen, welche aus dem Abbruch des bestehenden Gebäudes entstehen mit berücksichtigt. Dadurch sind die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion höher als bei den beiden Sanierungsvarianten.

Im EnEV-Standard ist keine Photovoltaik-Anlage vorgesehen, daher beseht bei dieser Variante auch nicht die Möglichkeit der Gutschrift durch ins Netz eingespeisten Strom. Die Umweltwirkungen steigen während der Betriebsphase an. Beispielhaft dafür ist in Abbildung 3.21 das Treibhauspotential im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren dargestellt. Das DGNB-Referenzgebäude geht von einer Energieerzeugung aus 50% Gas und 50% Öl aus. Bei der untersuchten Variante wurde eine Wärmeerzeugung durch einen Gas-Brennwertkessel angenommen. Daher beträgt z.B. das Umweltwirkungspotential des Gebäudebetriebs nach 50 Jahren lediglich 78% des Referenzwertes.

Abbildung 3.21: Entwicklung des Treibhauspotentials von Abbruch und Neubau EnEV und des Referenzgebäudes im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren



3.5 Auswertung und vergleichende Betrachtung der Sanierungsvarianten

Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) hat im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden ein „vereinfachtes Verfahren“ zur Ökobilanzierung entwickelt, anhand dessen die Ökobilanz des energy+Home, sowie die zuvor beschriebenen Sanierungsvarianten berechnet wurden. Die verwendete Methode ist im Rahmen des Zertifizierungssystems weit verbreitet und als praxisnahe Methode allgemein zur Ermittlung der Umweltwirkungen von Gebäuden anerkannt.

Bei der Betrachtung wurden die Umweltwirkungen der beiden Sanierungsvarianten sowie die Neubauvarianten mit dem durch die DGNB definierten Referenzwert verglichen.³ Dieser Referenzwert ist das Ergebnis eines Forschungsprojekts, bei dem die Ökobilanzen verschiedener Gebäude ausgewertet wurden und der somit einen durchschnittlichen Wert für ein in Deutschland errichtetes Gebäude darstellt.⁴ Die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion des Referenzgebäudes basieren auf einer wissenschaftlichen Untersuchung und stellen die durchschnittlichen Umweltwirkungen der Konstruktion eines in Deutschland errichteten Gebäudes dar. Der Energieverbrauch des Referenzgebäudes entspricht dem des EnEV-Referenzgebäudes für das jeweilige untersuchte Objekt und kann dem EnEV-Nachweis entnommen werden. Für das Referenzgebäude wird der Energieverbrauch mittels eines Heizkessels (50% Erdgas/50% Erdöl) gedeckt, eine gebäudetechnische Ausstattung mit einer Photovoltaik-Anlage ist nicht enthalten. Der Referenzwert ergibt sich aus der Summe der Umweltwirkungen von Gebäudekonstruktion und -betrieb.

Die Schwierigkeit bei der Bewertung der einzelnen Untersuchungsergebnisse liegt unter anderem in der Tatsache, dass die unterschiedlichen Wirkungskategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Ob die Auswirkungen des Treibhauspotentials auf die Erderwärmung schwerer zu gewichten sind als beispielsweise die Auswirkungen auf das Ozonloch liegt im Ermessen des Betrachters bzw. des Untersuchungsgegenstandes. Dementsprechend lässt sich auch kein gemeinsamer Indikator finden, welcher sämtliche Umweltwirkungen auf einen Wert reduzieren lässt. In den meisten Fällen liegt der Fokus der Betrachtung jedoch auf dem Treibhauspotential und der Primärenergie.

Gebäudekonstruktion

Bezogen auf das Treibhauspotential und den Primärenergiebedarf hat die Variante „Sanierung nach EnEV“ die geringste Umweltwirkung. Das energy+Home hat demgegenüber ein drei mal höheres Treibhauspotential, vor allem aufgrund des Treibhauspotentials der PV-Anlage in der Herstellung, welche im folgenden Vergleich mit berücksichtigt wird.⁵ Die Variante „Abbruch und Neubau nach EnEV“ hat ein 37 % niedrigeres Treibhauspotential als das energy+Home. Das größte Treibhauspotential weist die Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ auf.

Der Grund für das niedrige Treibhauspotential der beiden Sanierungsvarianten gegenüber den jeweiligen Neubauvarianten liegt in der Nutzung der vorhandenen Gebäudestruktur, welche nicht neu errichtet werden muß und somit auch nicht in die Bilanzierung eingerechnet wird. Die EnEV-Sanierung hat aufgrund geringerer verbauter Baumassen (z.B. weniger Dämmstoffe) und anderer gebäudetechnischer Anlagen (z.B. Brennwertkessel anstelle Wärmepumpe, keine PV-Anlage) geringere Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion als das energy+Home.

3 Vgl. DGNB Kriterium ENV 1.1, 2013.

4 Vgl. König, 2007 Orientierungswerte für die Bewertung von Hochbauten BBR-Aktenzeichen 10.8.17.7.

5 Siehe Kapitel 2.9.

Die beiden Abbruch und Neubau Varianten haben erwartungsgemäß ein höheres Umweltwirkungspotential, da bei diesen beiden Varianten sowohl die Umweltwirkungen des Abbruchs, als auch der gesamten Gebäudekonstruktion in die Bilanzierung einfließen. Auch bei diesen beiden Varianten hat die EnEV-Ausführung geringere Umweltwirkungen als das Plusenergiegebäude.

Gebäudebetrieb

Die Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs werden durch die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser sowie den Stromverbrauch der Lüftungsanlage sowie den Haushaltsstromverbrauch erzeugt. Die Varianten „Sanierung zum energy+Home“ und „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ verwenden zur Wärmeerzeugung eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und erzeugen darüber hinaus jährlich 9.880 kWh Strom mittels einer Photovoltaik-Anlage. Ein Teil des dadurch erzeugten Stroms wird selber verbraucht, der überschüssige Strom wird in das Stromnetz eingespeist und kann dem Gebäude in der Bilanzierung als Gutschrift angerechnet werden. Dadurch entsteht ein negativer CO₂-Verbrauch im Gebäudebetrieb, welcher die Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren wieder reduziert. Der Stromertrag ist jedoch nicht groß genug um die Gesamtwirkungsbilanz während dieses Zeitraums auszugleichen. Um dies zu erreichen müsste entweder der Stromertrag aus der PV-Anlage jährlich 4.000 kWh höher sein, oder das Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion um 75% reduziert werden.

Gegenüber den beiden betrachteten EnEV-Varianten wirkt sich die Stromerzeugung mittels PV-Anlage positiv aus, da die höheren Umweltwirkungen der Gebäudekonstruktion wieder ausgeglichen werden. Beim energy+Home gegenüber der Sanierung nach EnEV geschieht dies beim Treibhauspotential nach 17 Jahren, beim Vergleich von „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ gegenüber der EnEV-Sanierung nach 26 Jahren.

3.5.1 Vergleichende Betrachtung Treibhauspotential GWP

Die Sanierung zum energy+Home hat von allen betrachteten Varianten das niedrigste Treibhauspotential. Der Mehraufwand im Bereich der Konstruktion gegenüber der Sanierung nach EnEV amortisiert sich nach 17 Jahren. Bricht man das bestehende Gebäude ab und errichtet stattdessen ein Plusenergiegebäude mit der selben Kubatur und Ausstattung wie das energy+Home, so amortisiert sich der Mehraufwand für die Konstruktion gegenüber einem Abbruch und Neubau nach EnEV ebenfalls nach 17 Jahren und gegenüber der Sanierung nach EnEV nach 26 Jahren.

Über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren beträgt das Treibhauspotential des energy+Home lediglich 33% des Wertes von Abbruch und Neubau nach EnEV. Absolut betrachtet lassen sich dadurch ca. 230.000 kg CO₂ einsparen.

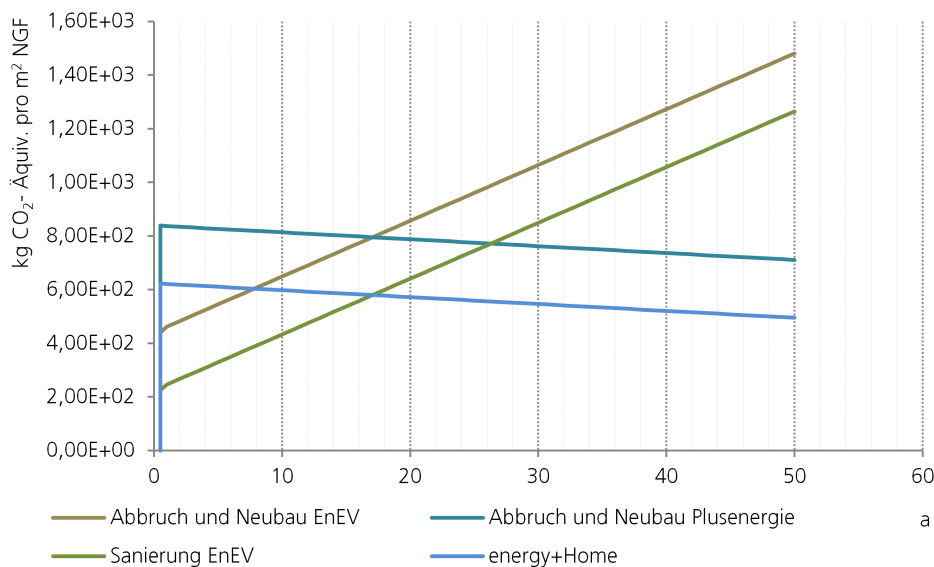


Abbildung 3.22: Entwicklung des Treibhauspotentials von energy+Home, Sanierung EnEV, Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude und Abbruch und Neubau nach EnEV im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

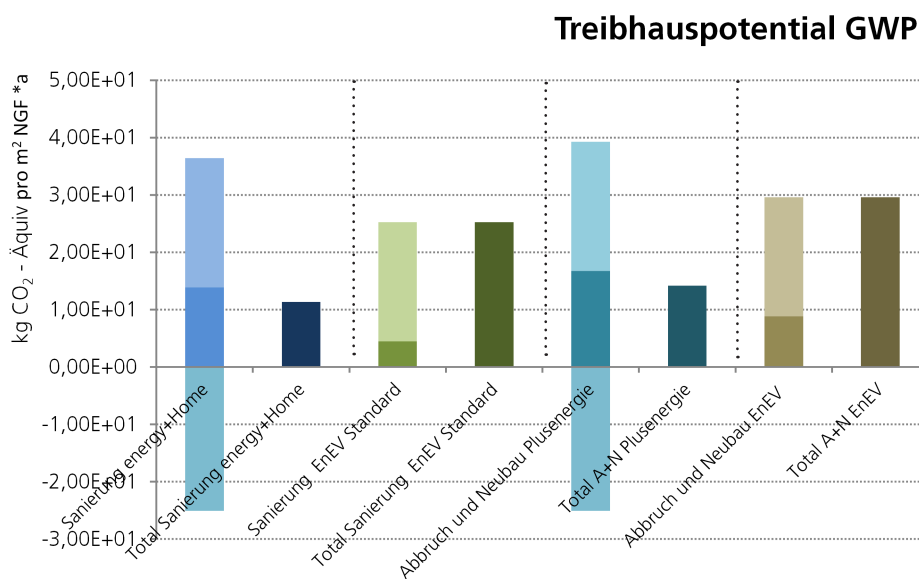


Abbildung 3.23: Gegenüberstellung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten

3.5.2 Vergleichende Betrachtung Gesamtprimärenergiebedarf PEI

Auch im Bereich Primärenergie lässt sich der bereits beobachtete Effekt feststellen. Gegenüber der Sanierung nach EnEV hat das energy+Home einen 80 % geringeren Primärenergiebedarf, gegenüber dem Neubau nach EnEV sogar einen 82 % geringeren Wert.

Die Plusenergie-Varianten amortisieren sich gegenüber den EnEV-Varianten nach 7 Jahren, die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiehauses gegenüber der Sanierung nach EnEV nach 14 Jahren.

Absolut gesehen lassen sich mit der energy+Home Variante ca. 100.000 MJ im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gegenüber der Neubau nach EnEV Variante einsparen.

Abbildung 3.24: Entwicklung des Gesamtprimärenergiebedarfs von energy+Home, Sanierung EnEV, Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude und Abbruch und Neubau nach EnEV im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

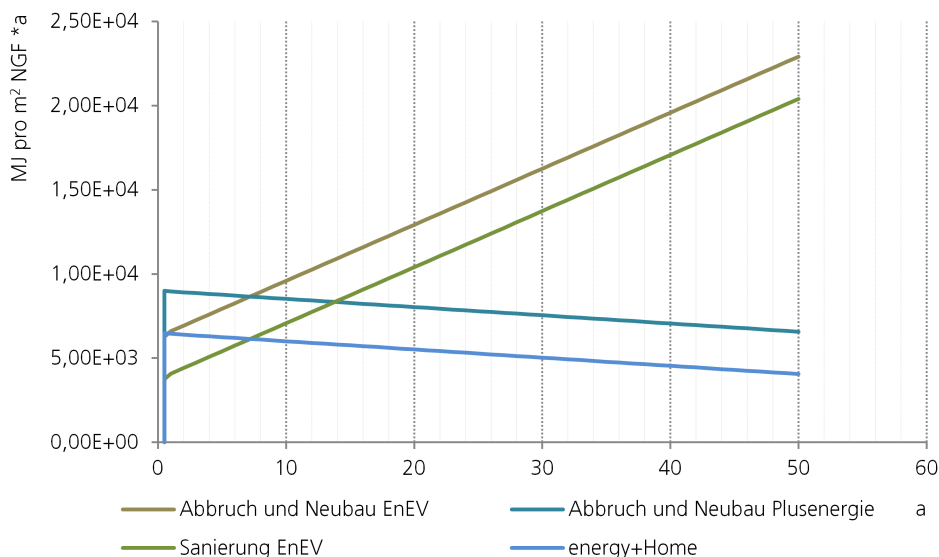
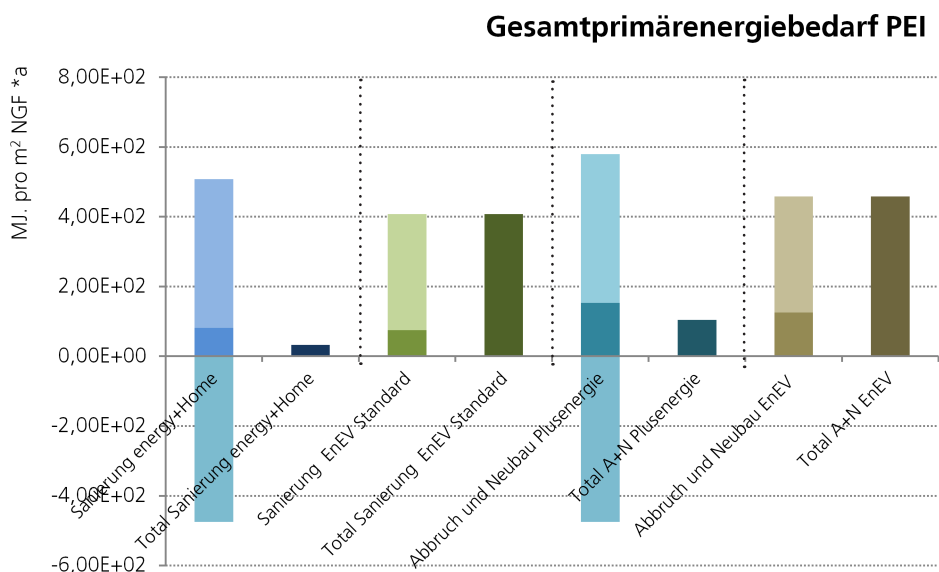


Abbildung 3.25: Gegenüberstellung des Gesamtprimärenergiebedarfs der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten



3.6 Gegenüberstellung der Umweltwirkungspotentiale der betrachteten Sanierungsvarianten

Abbildung 3.26 zeigt den Vergleich der in der Ökobilanzierung untersuchten Wirkungskategorien der vier untersuchten Varianten im Gegenüberstellung mit dem DGNB-Referenzgebäude. Dieser Referenzwert ergibt sich aus der Summe der Umweltwirkungen von Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb für ein durchschnittliches Gebäude, welches mittels eines Heizkessels (50% Erdgas / 50% Erdöl) beheizt wird. Die ermittelten Werte werden prozentual auf diesen Referenzwert bezogen. Da es sich beim Referenzwert um ein durchschnittliches Gebäude in Deutschland handelt und ein Großteil des Gebäudebestandes vor 1978, also vor der ersten Wärmeschutzverordnung, erstellt wurde, sind die Umweltwirkungen erwartungsgemäß höher als bei den vier betrachteten Varianten.

Die Grafik zeigt deutlich, dass die Gesamtwirkungsabschätzung für die Sanierung zum energy+Home und den Abbruch und Neubau eines Plusenergiehauses gegenüber den anderen untersuchten Varianten in allen Wirkungskategorien deutlich geringere Umweltwirkungen aufweist. Es zeigt auch, daß die Vorteile des energy+Home in der CO₂-Bilanz nicht auf Kosten anderer Wirkungskategorien erkaufte sind.

Auch lässt sich feststellen, daß Sanierungen aufgrund der Nutzung der bereits vorhandenen Bausubstanz gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes grundsätzlich geringere Umweltwirkungen aufweisen. Dieser als positiv zu bewertende Effekt lässt sich durch die Entscheidung zur Sanierung zu einem Plusenergiehauses nochmals deutlich steigern. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln festgestellt wurde amortisiert sich der Mehraufwand im Bereich der Gebäudekonstruktion im Laufe des Lebenszyklus. Auch wenn das energy+Home nicht als CO₂-neutral bezeichnet werden kann spart es gegenüber einem konventionellen Gebäude deutlich Treibhausgas-Emissionen ein. Aufgrund der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen großen Bestand an ölbefeuerten Einfamilienhäusern in Deutschland lässt sich aus ökologischer Sicht ein immenses Potential zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands feststellen, wenn noch mehr Gebäude nach dem Beispiel des energy+Home saniert werden.

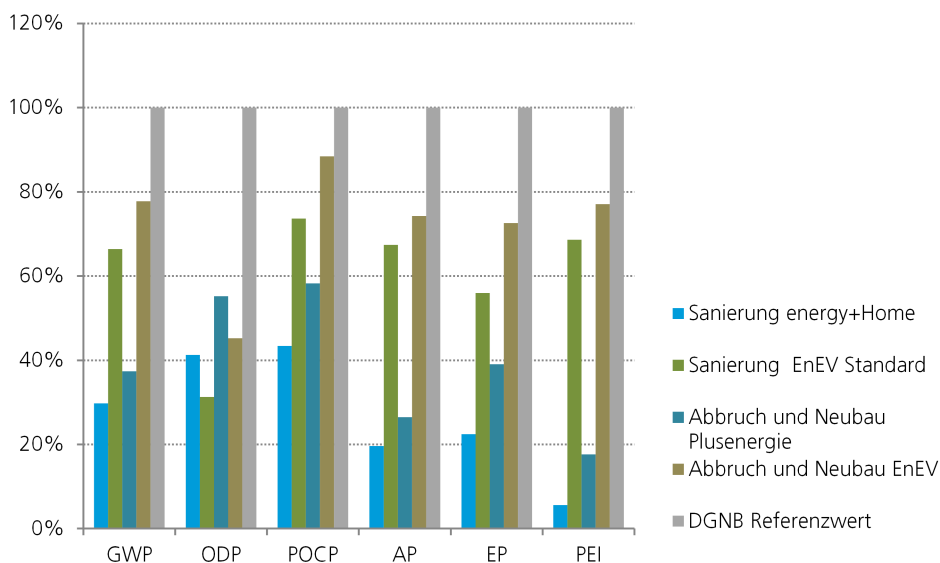


Abbildung 3.26: Gegenüberstellung der Umweltwirkungspotentiale der betrachteten Sanierungsvarianten in Prozent, bezogen auf den DGNB Referenzwert

Abbildung 3.27: potentielle Entwicklung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten von der Erstellung 1969 bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2061

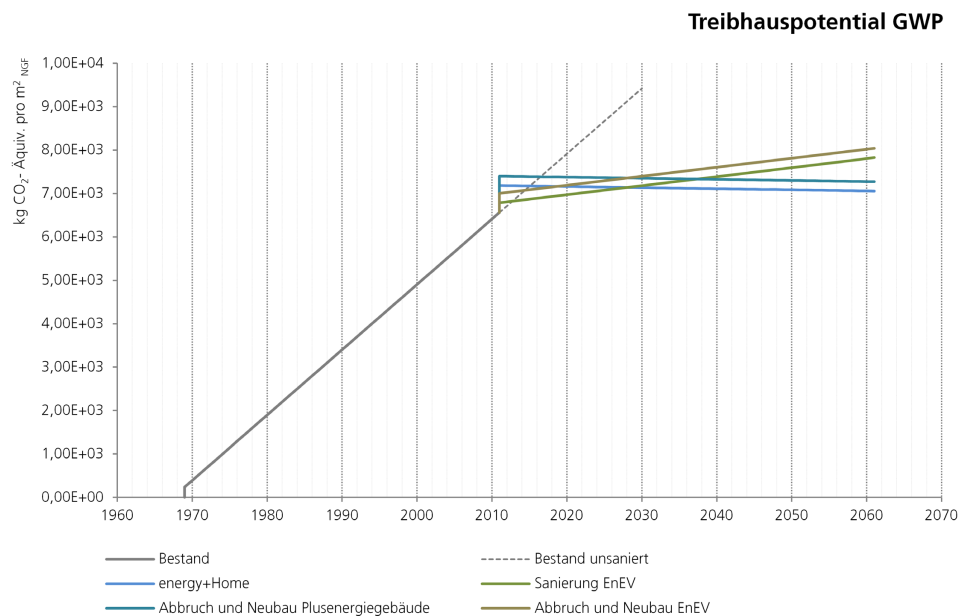


Abbildung 3.27 und 3.28 zeigen die Entwicklung des Treibhauspotentials ab dem Bau des Gebäudes im Jahr 1969 bis zum Zeitpunkt der Sanierung 2011. Ab diesem Zeitpunkt werden die vier untersuchten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gegenübergestellt. Wie man sehen kann wirkt sich die Umweltbelastung der Gebäudekonstruktion des bestehenden Gebäudes, welche zum Zeitpunkt des Baus kumuliert dargestellt wird, gegenüber der Umweltwirkung des Gebäudebetriebs nur geringfügig aus.

Wie man Abbildung 3.28 entnehmen kann amortisiert sich der CO₂-Ausstoß durch die Sanierung zum EnEV-Standard Gebäude bereits nach 2 Jahren gegenüber dem unsanierten Bestandsgebäude. Der Mehraufwand hin zum Plusenergiegebäude (energy+Home) fällt kaum ins Gewicht. Gegenüber dem unsanierten Bestandsgebäude amortisieren sich die Mehraufwendungen bereits nach 4 Jahren, gegenüber der Sanierung zum EnEV-Standard nach 17 Jahren. Dies ist auch die Zeitspanne, nach der sich der erhöhte CO₂-Ausstoß von Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes gegenüber dem Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard-Hauses amortisiert. Nach 26 Jahren wird sogar der erhöhte CO₂-Ausstoß der Gebäudekonstruktion eines Plusenergie-Neubaus gegenüber einer EnEV-Sanierung amortisiert.

Nicht amortisiert wird der erhöhte CO₂-Ausstoß der Varianten Abbruch und Neubau gegenüber den entsprechenden Sanierungsvarianten, da das Treibhauspotential der Nutzungsphasen in diesen Fällen identisch sind.

Gegenüber dem unsanierten Bestand spart die Sanierung zum energy+Home über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ca. 7.000 kg CO₂/m².

Der Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes spart gegenüber dem unsanierten Bestand über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ca. 6.800 kg CO₂/m².

Die Sanierung zum EnEV-Standard Haus spart demgegenüber gerade einmal ca. 6.250 kg CO₂/m² und der Abbruch und Neubau EnEV ca. 6.050 kg CO₂/m².

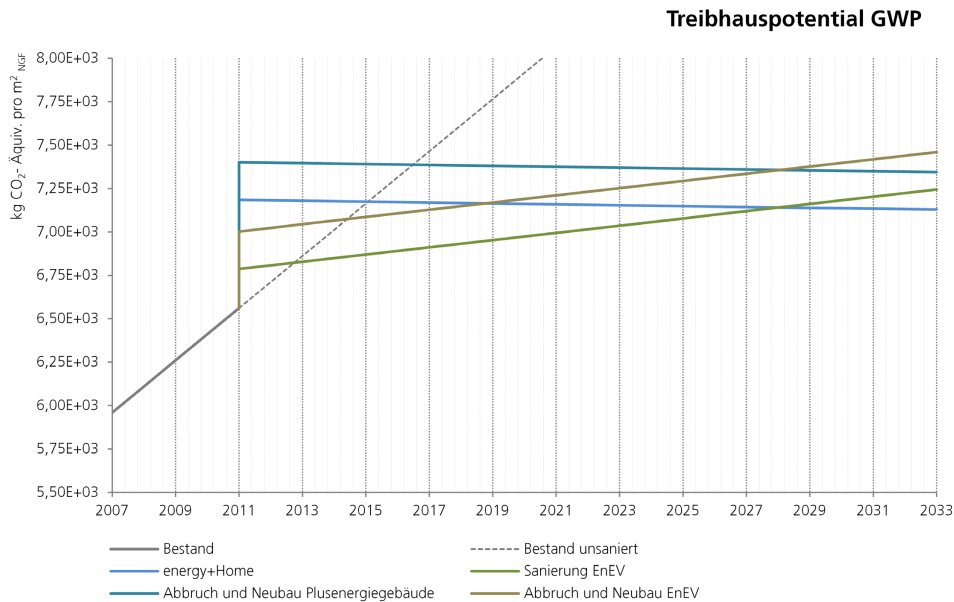


Abbildung 3.28: potentielle Entwicklung des Treibhauspotentials der betrachteten Sanierungs- bzw. Neubauvarianten von der Sanierung im Jahr 2011 bis 2030

Fazit

- Die Nutzung bereits vorhandener Gebäudesubstanz führt in allen betrachteten Wirkungskategorien zu geringeren Umweltwirkungen gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes.
- Die Sanierung zum energy+Home weist im Vergleich mit den drei weiteren betrachteten Varianten die geringsten Umweltwirkungen im Lebenszyklus von 50 Jahren auf.
- Der Mehraufwand des Treibhauspotentials in der Konstruktion amortisiert sich während des Betriebs gegenüber der EnEV-Variante bereits nach 17 Jahren.
- Gegenüber dem unsanierten Bestand spart das energy+Home im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ca. $7.000 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ ein.

4 Ökonomische Lebenszyklusanalyse und Wirtschaftlichkeitsbewertung

4.1 Ermittlung und Analyse der Investitionskosten

In diesem Kapitel werden die Lebenszykluskosten (LCC) des energy+Home über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren untersucht, um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen treffen zu können. Dabei werden sowohl die Herstellungskosten, als auch die Nutzungskosten, unterteilt in Betriebskosten und Instandsetzungskosten, analysiert. Die normativen Grundlagen zur Ermittlung der Lebenszykluskosten des Gebäudes sind für die Herstellungskosten DIN 276-1:2008-12 und für die Nutzungskosten DIN 18960:2008-02. Das methodische Vorgehen zur Ermittlung der Lebenszykluskosten orientiert sich darüber hinaus am DGNB Kriterium „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“.¹

Die Herstellungskosten für die Maßnahmen zur Sanierung und Modernisierung auf einen gehobenen Wohnstandard mit Plusenergie-Niveau werden anhand der tatsächlich angefallenen Kosten für die erbrachten Bauleistungen zusammengestellt. Dabei werden die Kosten getrennt für die Kostengruppen 300-Baukonstruktion und 400-Technische Anlagen nach DIN 276-1:2008-12 dargestellt. Anschliessend werden die Nutzungskosten für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt und diese Untersuchung im Sinne einer erweiterten Lebenszykluskostenbetrachtung um eine Analyse der Erträge und sonstiger, nicht direkt gebäudebezogener Kosten (z.B. KG 730 Honorare) erweitert.

4.2 Ermittlung der Herstellungskosten

Im Folgenden werden die Herstellungskosten für die Kostengruppen 300 und 400 gemäss DIN 276-1:2008-12 dargestellt. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Herstellungskosten findet sich im Anhang A.3. Die abgerechneten Herstellungskosten der Sanierung inklusive 19% Mehrwertsteuer betragen:

300 - Baukonstruktion	286.607 €
400 - Technische Anlagen	100.918 €
Herstellungskosten KG 300+400	387.525 €
Brutto-Geschossfläche BGF	299 m ²
Herstellungskosten KG 300+400 pro m ² BGF	1.296 €/m ² BGF

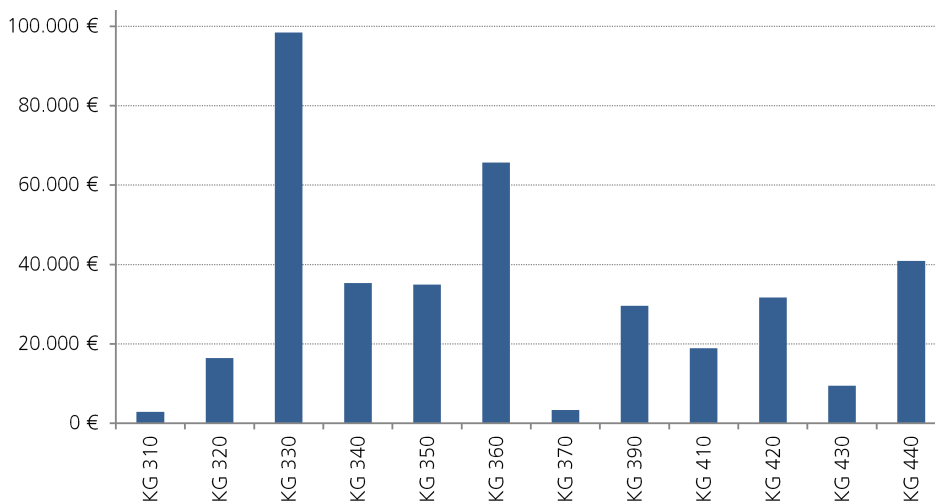


Abbildung 4.1: Aufteilung der Herstellungskosten des energy+Home auf die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276-1

1 Vgl. DGNB Kriteriensteckbrief Eco 1.1, S.7.

Die tatsächlich angefallenen Kosten beruhen auf einem sehr hohen Ausbaustandard und spiegeln nur in einem begrenzten Maße die Kosten wider, welche für eine Sanierung zu einem Plusenergiegebäude im Normalfall notwendig sind. Arbeiten, welche der reinen Wohnwertverbesserung geschuldet sind, wie beispielsweise das Vordach beim Eingang, das neue Geländer der Terrasse oder die Sanierung der Innentreppe können bei Nichtausführung die Kosten nochmals erheblich senken. Eine differenzierte Kostenbetrachtung in diesem Sinne wird in Kapitel 4.6 vorgenommen.

4.3 Ermittlung der Nutzungskosten

Die Nutzungskosten werden nach DIN 18960:2008-02 in Betriebs- und Instandsetzungskosten unterteilt. Berücksichtigt werden im Rahmen dieser Untersuchung die Kostengruppen 410-Baukonstruktion und 420-Technische Anlagen.

Zukünftige Zahlungen werden dabei durch eine Diskontierung auf den Betrachtungszeitpunkt abgezinst und der Kapitalwert der Zahlungen als Barwert ermittelt. Durch die Abzinsung verlieren weit in der Zukunft liegende Zahlungen immer mehr an Bedeutung und der Anteil der Nutzungskosten an den Lebenszykluskosten sinkt, je höher der Diskontierungszinssatz und je länger der Betrachtungszeitraum gewählt ist. Die Wahl eines hohen Diskontierungszinssatz wirkt sich auf Maßnahmen mit relativ hohen Baukosten im Verhältnis zu den Nutzungskosten (z.B. bei einer Sanierung zu einem Plusenergiegebäude) im Gegensatz zu Maßnahmen mit relativ geringen Baukosten im Vergleich zu den Nutzungskosten (z.B. bei einer Sanierung nach EnEV) eher nachteilig aus. In Anlehnung an das DGNB-Kriterium Eco 1.1 wird der Diskontierungszinssatz mit 5,5 % gewählt.²

Für die allgemeine Preissteigerung wird ein Wert von 2 % angenommen. Die Preissteigerung für Heiz- und Elektroenergie wird mit 4 % angenommen.³ Pfnür / Müller geben in ihrer Studie „Energetische Gebäudesanierung in Deutschland - Prognose der Kosten alternativer Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastung für Eigentümer und Mieter bis 2050“⁴ eine Preissteigerungsrate für Energie von 1,43% über Inflation an. Dieser Wert bezieht sich jedoch auf Energieträger allgemein, und nicht allein auf Elektroenergie. Geht man davon aus, dass die Inflationsrate in Deutschland in den vergangenen Jahren ca. 1,5 % betrug⁵, so erscheint die Annahme der Preissteigerungsrate von 4% eher konservativ bzw. auf der sicheren Seite liegend.

Die Einheitspreise für die Energieversorgung richten sich nach dem real zu zahlenden Strompreis von 24,25 cent/kWh bzw. der Einspeisevergütung nach EEG von 15,47 cent/kWh. Die Kosten für Schmutz- und Niederschlagswasser entsprechen den ortsüblichen Tarifen, ebenso die Kosten für die Abfallentsorgung.

² Im „Leitfaden Nachhaltiges Bauen und Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen in den Bundesverwaltungen“ des BNB wird ein Diskontierungszinssatz von 5% gewählt, in der dena-Sanierungsstudie „Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand“ ein Zinssatz von 4,6% bei einem Betrachtungszeitraum von 25 Jahren, und in der VDI-Richtlinie 2067 ein Zinssatz von 7% bei 35 Jahren Betrachtungszeitraum. C. Gromer wählt in „Die Bewertung nachhaltiger Immobilien“ S.262 einen Diskontierungsfaktor von 5,6%. Der gewählte Diskontierungszinssatz von 5,5% ist als eher konservativ einzuschätzen, da der Einfluß der Nutzungskosten durch die Wahl vergleichsweise gering ausfällt.

³ Vgl. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, Kriterium 2.1.1 Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus, S. 12.

⁴ Vgl. Pfnür, A, Müller, N., 2013.

⁵ Vgl. Statistisches Bundesamt: Inflationsrate in Deutschland 2013

4.3.1 KG 300 nach DIN 18960: Betriebskosten

KG 310 und KG 320: Ver- und Entsorgung

Die Ermittlung der Kosten für ausgewählte Kostenarten der Ver- und Entsorgung erfolgt unter Verwendung vorgegebener Kostenkennwerte für die Bereitstellung der Endenergie sowie für die Ver- und Entsorgung mit Wasser. Jährliche Preissteigerungen werden auf der Basis der in Kapitel 4.3 genannten Preissteigerungsraten berücksichtigt. Für die Ermittlung des Barwertes werden der vorgegebene einheitliche Diskontierungszinssatz und ein einheitlicher Betrachtungszeitraum von 50 Jahren verwendet. Die Kosten für Ver- und Entsorgung werden als regelmäßige Zahlungen betrachtet, die im Betrachtungszeitraum jährlich anfallen. In Summe ergibt sich ein Barwert der Ver- und Entsorgungskosten von 57.114 €.

KG 310: Ausgewählte Versorgungskosten (Wasser und Strom)

- **KG 311 Wasser**

Grundlage der Ermittlung des Frischwasserverbrauchs bildet die Betriebskostenabrechnung des Jahres 2013. Hierin wird ein Bedarf von 175 m³ angegeben. Bei einem Ansatz von 2,01€ pro m³ und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, sowie einer Preissteigerung von 2% p.a. ergibt sich ein Barwert der Betriebskosten für die Wasserversorgung von 8.354 €.

- **KG 316 Strom**

Grundlage für die Ermittlung der Kosten für Versorgung mit Strom bilden die Berechnungsergebnisse zum Bedarf an Endenergieträgern für Raumheizung, Warmwasser, Lüftung, Beleuchtung und Hilfsenergie nach DIN 18599. Der jährliche Endenergiebedarf für Heizwärme wird darin mit 3.410 kWh angegeben und mit einem Preis von 24,25 cent pro kWh berechnet. Für die Erzeugung von Warmwasser wird von einem Endenergiebedarf von 1.883 kWh und einem Preis von ebenfalls 24,25 cent ausgegangen. Daraus ergibt sich ein Barwert der Betriebskosten für die Bereitstellung von Heizwärme von 29.314 € und ein Barwert für die Erzeugung von Warmwasser von 16.187 €. Hinzu kommen Kosten für den Betrieb der Lüftungsanlage, welche ebenfalls mit 24,25 cent pro kWh und einem Bedarf von 682 kWh/a angesetzt werden. Die Kosten für den Betrieb der Lüftungsanlage belaufen sich damit auf 5.863 €. Als regelmäßige Zahlungen werden zudem die Kosten für Beleuchtung bzw. Haushaltsstrom mit einem Bedarf von 2.500 kWh und einem Preis von 24,25 cent bilanziert. Der Barwert für eine Betrachtungszeit von 50 Jahren beträgt dafür 21.492 €.

Der Betrieb der Wärmepumpe benötigt jährlich 391 kWh, welche ebenfalls mit 24,25 cent angesetzt werden. Der Barwert der Betriebskosten für Hilfsenergie beträgt demnach 3.361 €.

Dem gegenüber stehen Erträge aus der Netzeinspeisung von 20.025 €. Dieser Wert basiert auf Basis der PV-Anlagenleistung von 12,58 kWp sowie dem Inbetriebnahmedatum 06.05.2013. Daraus folgt eine Einspeisevergütung nach EEG von 15,47 Cent pro kWh, welche für die kommenden 20 Jahre garantiert sind. Die eingespeiste Energiemenge pro Jahr wurde mit 7.567 kWh angenommen. Da es zum jetzigen Zeitpunkt ungewiss ist, inwiefern die Netzeinspeisung vergütet wird, wenn erst einmal die PV-Ausbauleistung von 52 Gigawatt in Deutschland erreicht sind wurde untersucht, wie sich der Strompreis an der Leipziger Strombörse seit dem Jahr 2000 entwickelt hat, um eine Prognose für den Ertrag in den 30 Jahren nach Ende der Einspeisevergütung zu erstellen. Demzufolge stieg der Strompreis in den vergangenen 13 Jahren um durchschnittlich jährlich 4,6% bei einem mittleren Preis von 3,91 cent pro kWh. Hochgerechnet auf die kommenden 20 Jahre beträgt der Preis für eine Kilowattstunde im Jahr 2032 9,61 cent/kWh. Ausgehend von diesem Preis wurde der Verkaufspreis für die nächsten 30 Jahre mit einer Preissteigerung von 4% hochgerechnet.

Der Eigennutzungsanteil von 2.314 kWh wurde vom restlichen Strombedarf abgezogen und als Gutschrift mit 24,25 cent/kWh angerechnet. Den regelmäßigen Zahlungen für Energie in Höhe von 84.571 € stehen demnach Erträge aus dem Betrieb der PV-Anlage in Höhe von insgesamt 39.918 € gegenüber.

KG 320: Ausgewählte Entsorgungskosten (Abwasser und Abfall)

- KG 321 Abwasser**

Schmutzwasser: Ausgehend von einer Schmutzwassermenge von 130m³ pro Jahr und Haushalt (4 Personen), ergibt sich ein Barwert der Betriebskosten für die Schmutzwasserentsorgung von 7.008 €.

Niederschlagswasser: Die Betriebskosten für die Entsorgung des Niederschlagswassers ist abhängig von der Größe der versiegelten Fläche. Beim energy+Home beträgt diese 159m² und die Kosten pro m² versiegelter Fläche pro Jahr 0,84€. Daraus resultiert ein Barwert von 3.172 € bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

- KG 322 Abfall**

Die Abfallgebühren richten sich nach der Größe der Abfalltonne und dem Intervall der Leerung der Tonne. Mit der Annahme, daß die durchschnittliche Abfallmenge 455 Kilogramm je Einwohner beträgt⁶ lässt sich von der kleinsten verfügbaren Mülltonne (Füllmenge 50 l) ausgehen. Die Gebühren hierfür betragen 96€ pro Jahr, was bei dem angenommenen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zu einem Barwert der Betriebskosten von 2.280 € führt.

Tabelle 4.5: Ver- und Entsorgungskosten des energy+Home im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

Medium	Menge	Einheit	Preis pro Einheit	Preis pro Jahr	Barwertberechnung				Summe Barwert
					1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	50. Jahr	
311 Wasser	175	m ³	2,01 €	351,75 €	359 €	366 €	373 €	947 €	8.354 €
					340 €	329 €	318 €	65 €	
316 Endenergie Heizwärme	3410	kWh	0,24 €	826,93 €	860 €	894 €	930 €	5.877 €	29.314 €
					815 €	804 €	792 €	404 €	
316 Endenergie Warmwasser	1883	kWh	0,24 €	456,63 €	475 €	494 €	514 €	3.245 €	16.187 €
					450 €	444 €	437 €	223 €	
316 Endenergie Lüftung	682	kWh	0,24 €	165,39 €	172 €	179 €	186 €	1.175 €	5.863 €
					163 €	161 €	158 €	81 €	
316 Endenergie Beleuchtung	2500	kWh	0,24 €	606,25 €	631 €	656 €	682 €	4.308 €	21.492 €
					598 €	589 €	581 €	296 €	
316 Endenergie Hilfsenergie	391	kWh	0,24 €	94,82 €	99 €	103 €	107 €	674 €	3.361 €
					93 €	92 €	91 €	46 €	
316 Einspeise- vergütung	7567	kWh	0,1547 €	-1.170,61 €	-1.217 €	-1.266 €	-1.317 €	-8.319 €	-20.025 €
					-1.154 €	-1.138 €	-1.121 €	-572 €	
316 Eigennutzung PV-Anlage	2314	kWh	0,24 €	-561,15 €	-584 €	-607 €	-631 €	-3.988 €	-19.893 €
					-553 €	-545 €	-538 €	-274 €	
321 Schmutzwasser	130	m ³	2,27 €	295,10 €	301 €	307 €	313 €	794 €	7.008 €
					285 €	276 €	267 €	55 €	
321 Nieder-schlagswasser	159	m ²	0,84 €	133,56 €	136 €	139 €	142 €	359 €	3.172 €
					129 €	132 €	134 €	341 €	
322 Abfall	1	Stk.	96,00 €	96,00 €	98 €	100 €	102 €	258 €	2.280 €
					93 €	90 €	87 €	18 €	
Summe pro Jahr				1.294,66 €	Summe Barwert				57.114 €

KG 330 und 340: Reinigung und Pflege von Gebäuden und Außenanlagen

Im Rahmen der Lebenszykluskosten-Bewertung von Mehrfamilienhäusern werden üblicherweise Reinigungskosten von Gemeinschaftsbereichen wie z.B. Treppenhäusern oder Flure für Abstellräume im Keller einbezogen. Reinigungskosten innerhalb der Wohneinheiten werden normalerweise vom Mieter übernommen. Da es sich beim energy+Home um ein Einfamilienhaus mit nur einer Wohneinheit handelt, werden die Reinigungskosten in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

KG 350: Bedienung, Inspektion und Wartung

- **KG 351 Bedienung der Technischen Anlagen**

Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten im Rahmen der Bewertung werden keine Kosten für die Bedienung von technischen Anlagen (KG 351 der DIN 18960) berücksichtigt, da es sich beim energy+Home um ein Einfamilienhaus handelt, bei dem die Bedienung der technischen Anlagen vom Eigentümer übernommen wird.

- **KG 352 Inspektion und Wartung der Baukonstruktion**

Die jährlichen Kosten für die Inspektion und Wartung der Baukonstruktion werden als Prozentsatz der Herstellungskosten für die Komponenten der Baukonstruktion nach KG 300 der DIN 276-1:2008-12 ermittelt.

Dieser mittlere jährliche Aufwand für Wartung und Inspektion beträgt 0,1 % bezogen auf Netto-Baukosten der Kostengruppe 300 von 240.846 €.

Dadurch ergeben sich über einen Lebenszyklus von 50 Jahren ein Barwert der Inspektions- und Wartungskosten der Baukonstruktion in Höhe von 5.608 €.

- **KG 353 Inspektion und Wartung der Technischen Anlagen**

Die jährlichen Kosten für die Inspektion und Wartung der technischen Anlagen werden als Prozentsatz der Herstellungskosten gemäss VDI 2067 für die Komponenten der TGA nach KG 400 der DIN 276-1:2008-12 sowie einer Preissteigerung von 2% p.a. ermittelt. Damit ergeben sich ein Barwert der Inspektions- und Wartungskosten der technischen Anlagen in Höhe von 32.986 €.

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Betriebskosten für Inspektion und Wartung findet sich im Anhang A.4.1.

4.3.2 KG 400 nach DIN 18960: Instandsetzungskosten

Die Instandsetzungskosten werden nach DIN 18960:2008-02 in Kosten für die Instandsetzung der Baukonstruktion und Kosten für die Instandsetzung der technischen Anlagen unterteilt. Dabei wird zwischen regelmäßigen, jährlich anfallenden und unregelmäßigen Zahlungen für Ersatzinvestitionen unterschieden. Diese Ersatzinvestitionen sind abhängig von der Nutzungsdauer der Bauteile, welche in der folgenden Betrachtung für die Baukonstruktion der Tabelle „Nutzungsdauer von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB“ entnommen wurden.⁷ Anhaltswerte für die Nutzungsdauer technischer Anlagen wurden der VDI Richtlinie 2067 entnommen.⁸ Der Betrachtungszeitraum beträgt auch für die Instandsetzungskosten 50 Jahre. Die ermittelten Kosten werden über einen Preissteigerungsfaktor von 2 % an die angenommene jährliche Preisentwicklung angepasst und über einen Diskontinuierungszinssatz von 5,5 % auf den Barwert abgezinst.

Für die Erneuerung wird davon ausgegangen, daß eine Erneuerung immer nur nach Ablauf der rechnerischen Nutzungsdauer erfolgt.⁹

Die jährlichen Instandsetzungskosten werden als Prozentsatz der Investitionskosten angenommen. Dabei wird in Kauf genommen, daß die Vorteile von Investition in höherwertige (und damit teurere) Bauteile, welche niedrigere Instandhaltungskosten verursachen nicht zum Ausdruck gebracht werden können.

KG 410 nach DIN 18960: Instandsetzung der Baukonstruktionen

Unregelmäßigen Instandsetzungskosten für alle Bauteile der Kostengruppe 300 nach DIN 276 in Form der Kostengruppe 410 nach DIN 18960:2008-02 werden im Rahmen eines vereinfachten Verfahrens mit 1,2 % der Herstellungskosten pro Jahr abgebildet.

Der Barwert der Instandsetzungskosten für die Baukonstruktion beträgt 67.292 €.

KG 420 nach DIN 18960: Instandsetzung der TGA

VDI 2067 enthält neben den Angaben zur rechnerischen Nutzungsdauer technischer Anlagen Angaben zum Aufwand zur Instandsetzung. Dieser wird wie bei den Instandsetzungskosten der Baukonstruktion auch über einen prozentualen Anteil an den Investitionskosten bilanziert.

Der Barwert der Instandsetzungskosten für die Technische Anlagen beträgt 54.966 €.

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Instandsetzungskosten der Baukonstruktion und technischen Anlagen findet sich im Anhang A.4.2.

⁷ Vgl. BBSR, 2011.

⁸ Vgl. VDI 2067, S.21 ff.

⁹ Vgl. Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau, Steckbrief 4.1.1 Ökonomische Qualität - Lebenszykluskosten, Ausgewählte Kosten im Lebenszyklus.

4.4 Aufteilung der LCC-Kosten nach DIN 276 und DIN 18960

Die Lebenszykluskosten lassen sich aufteilen in Herstellungskosten und Nutzungskosten, wobei die Herstellungskosten mit 62% fast zwei Drittel der Kosten verursachen, welche über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren anfallen. Auf die Instandsetzungskosten entfallen 20% der Lebenszykluskosten, 6% auf Inspektion und Wartung und lediglich 10% auf die Betriebskosten.

Herstellungskosten		
KG 300	Herstellungskosten Baukonstruktion	286.607 €
KG 400	Herstellungskosten Technische Anlagen	100.918 €
		387.525 €
Nutzungskosten		
KG 311/321	Betriebskosten Wasser	18.534 €
KG 316	Betriebskosten Heizwärme und Warmwasser	45.502 €
KG 316	Betriebskosten Strom	-9.202 €
KG 352	Inspektion und Wartung Baukonstruktion	5.608 €
KG 353	Inspektion und Wartung Technische Anlagen	32.986 €
KG 410	Instandsetzung Baukonstruktion	67.292 €
KG 420	Instandsetzung Technische Anlagen	54.966 €
		215.686 €
TOTAL	Herstellung+Nutzung	603.211 €

Tabelle 4.6: Lebenszykluskosten des energy'Home über 50 Jahre

Gebäudebezogene LCC über 50 a

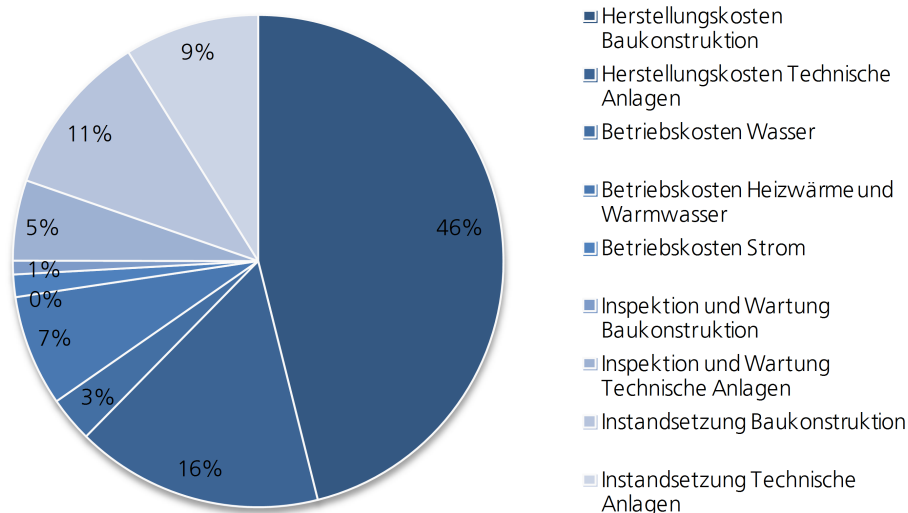
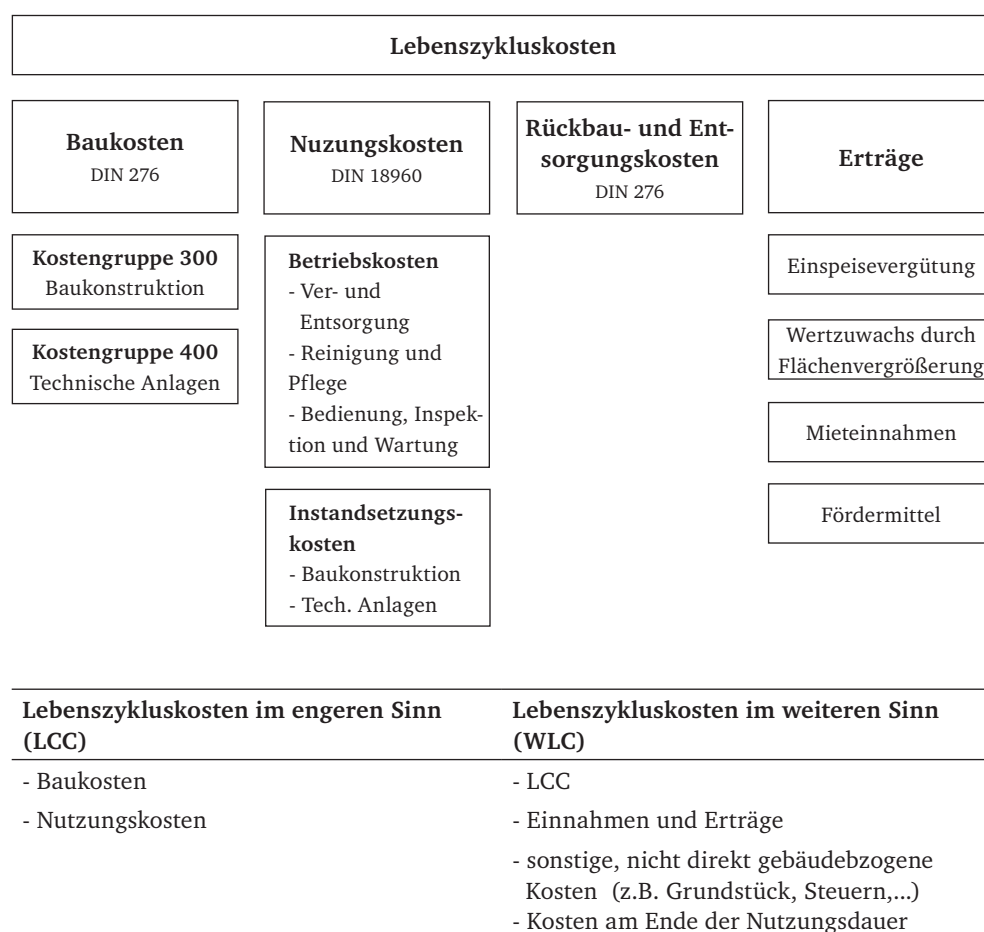


Abbildung 4.2: Prozentuale Aufteilung der gebäudebezogenen Lebenszykluskosten des energy'Home über 50 Jahre

4.5 Lebenszykluskosten im weiteren Sinne (WLC)

Der Begriff Lebenszykluskostenrechnung (life cycle costing, LCC) bezeichnet eine Methode zur systematischen Berechnung und Bewertung von Kosten im vollständigen Lebenszyklus einer Immobilie bzw. in einem definierten Betrachtungszeitraum. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der Lebenszykluskostenrechnung im engeren Sinn (LCC), wie sie im vorhergehenden Kapitel durchgeführt wurde, und einer Lebenszykluskostenrechnung im weiteren Sinn (WLC), die zusätzlich zu den Kosten den monetären Nutzen (Einzahlungen) berücksichtigt und neben den Baukosten und den Nutzungskosten auch die Kosten für Rückbau und Entsorgung erfasst.¹⁰

Abbildung 4.3: Systematische Unterteilung der Lebenszykluskosten nach Kostenkategorien



Im vorherigen Kapitel wurden die Bau- bzw. Herstellungskosten nach DIN 276 ermittelt, sowie die Nutzungskosten, aufgeteilt in Betriebs- und Instandsetzungskosten, analysiert. Im Folgenden wird diese Betrachtung um eine Analyse der Kosten am Ende der Nutzungsdauer sowie der Erträge und sonstiger, nicht direkt gebäudebezogene Kosten erweitert. Darüber hinaus wird untersucht, welche Kosten der Verbesserung der Energieeffizienz geschuldet sind, welche Kosten der Instandsetzung zuzurechnen sind und welche Kosten der reinen Wohnwertverbesserung dienen. Es liegt damit eine Lebenszykluskostenberechnung im weiteren Sinne vor, welche als Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dient.

¹⁰ Vgl. König, 2009, S.59.

4.5.1 WLC - Rahmenbedingungen

Betrachtungszeitraum	50 Jahre
Diskontierungszinssatz:	5,5 %
jährliche Preissteigerung	2 %
Preissteigerung Energie	4 %
jährlicher Aufwand für Wartung und Inspektion Baukonstruktion	0,1 %
jährlicher Aufwand für Wartung und Inspektion Technische Anlagen	nach VDI 2067
jährlicher Aufwand für Instandsetzung Baukonstruktion	1,2 %
jährlicher Aufwand für Instandsetzung Technische Anlagen	nach VDI 2067
Preisstand der Bau- und Nutzungskosten:	2011 / 2013
Mehrwertsteuer:	inkl. 19 % MwSt.
Wohnfläche	199,30 m ²

4.5.2 WLC - Baukosten

Kostengruppe 300 Baukonstruktion	286.618 €
Kostengruppe 400 Technische Anlagen	100.918 €
	387.536 €

4.5.3 WLC - Nutzungskosten

Ver- und Entsorgung	
Wasserver- und Entsorgung	18.533 €
Betriebskosten Heizung und Warmwasser	45.502 €
Betriebskosten Strom	-9.202 €
Inspektion und Wartung KG 300	5.608 €
Inspektion und Wartung KG 400	32.986 €
Instandsetzung KG 300	67.292 €
Instandsetzung KG 400	54.966 €
	215.686 €

4.5.4 WLC - Rückbau- und Entsorgungskosten

Die Rückbau- und Entsorgungskosten wurden auf Grundlage der Baukostenkennwerte BKI 2013 mit 22,45€/m³ und einem Brutto-Rauminhalt von 958 m³ geschätzt. Daraus resultieren Rückbau- und Entsorgungskosten von 21.500 €.

4.5.5 WLC - Erträge

Einspeisevergütung

Die Ermittlung der Erträge aus der Netzeinspeisung und der Vermeidung von Stromkosten durch den Anteil an selbst genutztem Strom wurde in Kapitel 4.3.1 ausführlich beschrieben. Die Erträge aus der Einspeisevergütung belaufen sich auf einen Barwert von 20.025 €.¹¹

Wertsteigerung durch Flächengewinn

Durch die Umwandlung des ehemaligen Heizöltanks und den Bau des Arbeitszimmers im

11 Die Einspeisevergütung wurde bereits in den Nutzungskosten (Betriebskosten Strom) berücksichtigt

Untergeschoss wurde die vermietbare Wohnfläche um 23,7m² vergrößert. Da der ehemalige Tankraum bereits in der Brutto-Geschossfläche enthalten war, jedoch von einer technischen Funktionsfläche in eine (Neben-) Nutzfläche umgewandelt wurde wird diese Fläche lediglich zu 50% auf die Wertsteigerung angerechnet. Mit der Annahme eines durchschnittlichen Kaufpreises von 2.485 €/m² ergibt sich dadurch eine Wertsteigerung des energy+Home von 45.475 €. ¹²

Mieteinnahmen

Aufgrund der Tatsache, daß der zum Verkauf stehende Immobilienbestand in Nieder-Ramstadt weder aus baulicher, noch aus energetischer Sicht den Standard des energy+Home erreicht, kann keine Vergleichsmiete aus den aktuell zur Vermietung stehenden Objekten ermittelt werden. Statt dessen wurde zur Berechnung der ortsüblichen Vergleichsmiete der Mietspiegel Darmstadt 2010¹³ herangezogen. Die räumliche Nähe des Standorts zu Darmstadt sowie die ortsüblichen Mietpreise, welche sich nicht grundsätzlich unterscheiden rechtfertigen dieses Vorgehen. Hierbei werden zunächst die nicht umgelegten, aber zutreffenden Betriebskosten ermittelt und auf dieser Grundlage die durchschnittliche Basis-Nettomiete in Abhängigkeit von Wohnfläche und Baualter ermittelt. Dieser Wert wird anschließend mit Zu- und Abschlägen je nach Wohnungstyp, Grundrissgestaltung, Ausstattung, energetischer Qualität, Wohnlage, Ausstattung, etc. behaftet. Nach Auswertung dieser Daten ergibt sich für das energy+Home eine ortsübliche Vergleichsmiete von ca. 10-12 €/m² Wohnfläche und Monat bzw. 1.990 - 2.390 € gesamt pro Monat.

Fördermittel

Das energy+Home wurde mit einem Kredit der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) in Höhe von 75.000 € gefördert. Dabei wurde das Programm 151 „Sanierung zum KfW-Effizienzhaus 85“ gewählt. Dieses Förderprogramm dient der zinsgünstigen langfristigen Kreditfinanzierung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Minderung des CO₂-Ausstoßes bei bestehenden Wohngebäuden. Die Förderung soll darüber hinaus die finanzielle Belastung durch die Investitions- und Heizkosten reduzieren und diese für den Nutzer langfristig kalkulierbarer machen.¹⁴ Dabei werden die energetische Sanierung von Wohngebäuden gefördert, deren Bauantrag vor dem 01.01.1995 gestellt wurde, sowie Umwidmungen von Nichtwohnflächen in Wohnflächen, sofern es sich nicht um eine Neubaumaßnahme handelt und die bauordnungsrechtlichen Voraussetzungen zur Nutzungsänderung eingehalten werden. Wohnflächenerweiterungen können ebenfalls gefördert werden, sofern die Wohnfläche um nicht mehr als 50 m² vergrößert wird. All diese Voraussetzungen wurden vom energy+Home erfüllt.

Von der KfW-Bank werden Maßnahmen gefördert, die dazu beitragen, das energetische Niveau eines KfW-Effizienzhauses zu erreichen. Auf Grundlage der geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) werden die Niveaus KfW-Effizienzhaus 115, KfW-Effizienzhaus 100, KfW-Effizienzhaus 85, KfW-Effizienzhaus 70, und KfW-Effizienzhaus 55 gefördert. Da zum Zeitpunkt der Antragstellung (Mai 2010) lediglich die Standards KfW-Effizienzhaus 130, KfW-Effizienzhaus 115, KfW-Effizienzhaus 100 und KfW-Effizienzhaus 85 förderfähig waren, wurde lediglich eine Förderung für ein KfW-Effizienzhaus 85 Niveau beantragt, obwohl das energetische Niveau des energy+Home diesen Standard weit überschreitet. Mit dem Förderprogramm können bis zu 100% der förderfähigen Investitionskosten einschließlich Nebenkosten finanziert werden, wobei der maximale Kreditbetrag 75.000€ pro Wohneinheit bei einer Sanierung zum KfW-Effizienzhaus beträgt. Bei einer Laufzeit von

¹² Der angenommene, durchschnittliche Kaufpreis von 2.485 €/m² wurde anhand aktueller Immobilienpreise in Nieder-Ramstadt, angeboten auf immscout24.de ermittelt. Dieser spiegelt aufgrund der baulichen und energetischen Qualität des energy+Home nicht dessen realen Wert wider und wurde in der vorliegenden Untersuchung als konservative Annahme geschätzt.

¹³ Vgl. Magistrat der Wissenschaftsstadt Darmstadt, 2010.

¹⁴ Vgl. Merkblatt Bauen, Wohnen, Energie sparen ; KfW Bankengruppe, Frankfurt 2013.

30 Jahren beträgt der effektive Jahreszins (Sollzins plus Nebenkosten) 1% p.a. bei 5 Tilgungsfreijahren. Das bedeutet, dass nicht der gesamte Betrag zurückzuzahlen ist sondern durch einen Tilgungszuschuss reduziert wird. Die Höhe des Tilgungszuschusses hängt vom energetischen Niveau des Effizienzhauses ab, wobei ein höheres energetisches Niveau einhergeht mit einem höheren Tilgungszuschuss. Beim Effizienzhaus 85 beträgt die Höhe des Tilgungszuschusses 7,5% bzw. bis zu 5.625€ pro Wohneinheit.¹⁵

4.5.6 WLC - Sonstige Kosten

Grundsteuer

Die Grundsteuer ist eine Realsteuer und knüpft an das Eigentum, die Beschaffenheit sowie den Wert eines Grundstücks an. Sie wird von der Gemeinde erhoben, auf deren Gemeindegebiet der Grundbesitz liegt. Dem Finanzamt obliegt dabei die Bewertung der einzelnen Objekte. Eine allgemeingültige Aussage zur Höhe der Steuern ist aufgrund stark unterschiedlicher Eigentümerverhältnisse jedoch nicht möglich. Diese Kosten sind im Einzelfall individuell zu ermitteln und wurden daher auch nicht in der Wirtschaftlichkeitsbewertung berücksichtigt.

Honorare

Im Rahmen der Sanierung fallen für die Planung, Begleitung und Überwachung der Baumaßnahmen Baunebenkosten an, welche der Kostengruppe 700 nach DIN 276-1:2008 zugeordnet werden können. Zu diesen Baunebenkosten zählen die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Kostengruppe 730), deren Höhe abhängig ist von den anrechenbaren Baukosten nach § 4 und § 32 der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), der Honorarzone nach §5 und §34 HOAI sowie dem Prozentsatz der ausgeführten Leistungsphasen nach § 33 HOAI¹⁶. Bei Umbauten und Modernisierungen ist zudem mit einem Umbauszuschlag von bis zu 80 % zu rechnen, wobei ab der Honorarzone II beim Bauen im Bestand auch ohne schriftliche Vereinbarung ein Zuschlag von 20% anfällt.

Die **anrechenbaren Baukosten** nach § 4 und § 32 HOAI setzen sich für Leistungen bei Gebäuden und raumbildenden Ausbauten aus den Kosten der Baukonstruktion und den Kosten für Technische Anlagen, die der Auftragnehmer nicht fachlich plant oder deren Ausführung er nicht fachlich überwacht. Letztere können vollständig bis zu 25 % der sonstigen anrechenbaren Kosten und zur Hälfte mit dem 25 Prozent der sonstigen anrechenbaren Kosten übersteigenden Betrag angerechnet werden. Beim energy+Home betragen die anrechenbaren Kosten gemäss Kostenfeststellung (Vgl. Kapitel 4.2) **313.365 €**.¹⁷

Der Schwierigkeitsgrad der Baumaßnahmen wird durch die Zuordnung zu einer Honorarzone berücksichtigt. Dabei bedeutet die Honorarzone I: sehr geringe Planungsanforderungen, Honorarzone II: geringe Planungsanforderungen, Honorarzone III: durchschnittliche Planungsanforderungen, Honorarzone IV: überdurchschnittliche Planungsanforderungen, und Honorarzone V: sehr hohe Planungsanforderungen.

Das energy+Home wurde der **Honorarzone III** zugeordnet und ein Bestandszuschlag von 20% nach §35 HOAI vereinbart.

Dadurch ergibt sich nach §34 HOAI ein **Gesamthonorar für Architekten** für 100% der Grundleistungen aller Leistungsphasen von 51.473 € bei einem mittleren Honoraransatz.

15 Quelle: <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilien/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kredit-%28151-152-%29/#2>; [09.05.2014].

16 Als Grundlage der Berechnung dient die HOAI, welche zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses rechtskräftig ist, im Falle des energy+Home die HOAI 2009.

17 KG 300 Netto 240.855,29€ zu 100%anrechenbar, KG 400 Netto 84.804,93€ anrechenbar mit 72.509,38€.

Die prozentuale Verteilung des Honorars stellt sich nach §33 HOAI wie folgt dar: LP 1: 3%, LP 2: 7%, LP 3: 11%, LP 4: 6%, LP 5: 25%, LP 6: 10%, LP 7: 4%, LP 8: 31% und LP 9: 3%. Beim energy+Home wurden die Leistungsphasen 1-3 und 5-8 beauftragt, so dass sich das Honorar für Grundleistungen auf 91% des Gesamthonorars bzw. 46.840 € beläuft. Hinzu kommen nochmals 5% Nebenkosten auf das Gesamthonorar, so dass sich die Planungskosten für Architekturleistungen insgesamt auf ca. 41.000 € netto bzw. 55.740 € brutto beläuft.

Die Fachingenieurleistungen wurden im Falle des energy+Home vom Bauherren übernommen, können jedoch mit ca. 8.000€ angenommen werden.

4.6 Differenzierte Kostenbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit der energiesparenden Maßnahmen der Umwandlung hin zum energy+Home soll im vorliegenden Kapitel durch eine differenzierte Kostenbetrachtung untersucht werden. Dazu werden die Investitionskosten aufgeteilt in Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungskosten, welche bei einer Sanierung ohnehin anfallen, Kosten für energieeffizienzbedingte Maßnahmen sowie Modernisierungskosten, welche rein der Wohnwertverbesserung geschuldet sind.

Den energieeffizienzbedingten Kosten werden anschließend die Energiekosteneinsparung, welche durch die Reduzierung des Energiebedarfs entsteht, gegenübergestellt. Dadurch lässt sich eine Aussage über die Sanierungskosten pro m² Wohnfläche und die Kosten für eine eingesparte kWh Endenergie treffen. Ebenso lässt sich dadurch feststellen, bis zu welchem Investitionsbetrag eine Sanierung für einen Investor gerade noch wirtschaftlich ist (Break-Even).

Dieses Vorgehen orientiert sich am Vorgehen der dena-Studie „Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden“¹⁸, welche die Wirtschaftlichkeit von Sanierungen von Wohngebäuden mit unterschiedlichem energetischem Standard untersucht. Die darin enthaltenen Kostenangaben dienen als Vergleich zur Bewertung der ökonomischen Qualität der energy+Home Sanierung.

4.6.1 Kostenkategorien

Modernisierungskosten

Bei einer Sanierung werden in den meisten Fällen Arbeiten durchgeführt, welche den Wohnwert einer Immobilie verbessern sowie den Komfortansprüchen der heutigen Zeit Rechnung tragen, jedoch nicht einer energetischen Ertüchtigung geschuldet sind.

Dies kann eine Wohnflächenvergrößerung sein, eine Anpassung der Grundrisse an zeitgemäße Vorstellung modernen Wohnens, die Anpassung der sanitären Einrichtung an gehobene Ansprüche der Nutzer oder die Gestaltung von Außenanlagen. Beim energy+Home fallen darunter zum Beispiel die Gestaltung der Terrasse im Untergeschoss, der Einbau des Arbeitszimmers, die Grundrissanpassungen zur Vergrößerung der Zimmer sowie die neue Küche. Da diese Arbeiten zwar mit der energetischen Sanierung zusammen ausgeführt wurden, jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf die Energieeffizienz des Gebäudes haben, sind sie separat von den Sanierungskosten zu beurteilen.

18 Vgl. dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012.

Instandsetzungskosten

Unter Instandsetzungskosten werden Kosten zur Aufrechterhaltung oder Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Gebäudes verstanden.¹⁹

Dazu zählen zum Beispiel der Ersatz technischer Anlagen, deren Nutzungsdauer überschritten ist und die im Rahmen der Sanierung ausgetauscht werden sowie sämtliche Vor- und Nebenarbeiten, welche bei der energetischen Ertüchtigung der Außenwände anfallen. Die Baustelleneinrichtung, Demontage von Fenstern und Fensterbänken, das Versetzen von Fallleitungen, Spenglerarbeiten, die Anpassung von Geländern, Steckdosen, Klingelanlagen und Briefkästen sowie das Aufbringen eines Putzsystems zählen beispielsweise zu den Instandsetzungskosten, welche bei der Dämmung einer Außenwand anfallen.

Der Dämmstoff inklusive Sockelschiene, Verdübelung und Anpassung der Dachüberstände zählt jedoch zu den energieeffizienzbedingten Mehrkosten.

Darüber hinaus werden Kosten, welche sich aus der Vermeidung von Wärmebrücken ergeben berücksichtigt. Diese können durch den Abbruch von Gartenmauern, welche direkt an das Haus anschließen, oder das Versetzen von Hoftoren entstehen.

Energieeffizienzbedingte Mehrkosten

Sämtliche Kosten, die zur energetischen Verbesserung des Gebäudebestandes beitragen und über eine ohnehin anstehende bauliche und anlagentechnische Instandsetzungsmaßnahme bzw. Modernisierung hinausgehen zählen zu den energieeffizienzbedingten Mehrkosten.

Der Austausch von veralteten Fenstern durch Fenster mit einer 2-Scheiben-Isolierverglasung trägt zwar auch zu einer Verringerung von Transmissionswärmeverlusten bei, die Kosten zählen jedoch zu den Instandsetzungskosten, da es sich hierbei um eine Maßnahme handelt, welche im Zuge einer Sanierung ohnehin durchgeführt werden muss. Der Einbau von Fenstern mit einer 3-Scheiben-Isolierverglasung geht jedoch über eine reine Instandsetzungsmaßnahme hinaus, so dass die Mehrkosten gegenüber Fenstern mit einer 2-Scheiben-Isolierverglasung zu den energieeffizienzbedingten Mehrkosten gezählt werden.

Genauso zählt der Ersatz eines veralteten Öl-Brennwertkessels zu den Instandsetzungskosten, wohingegen der Einbau anlagentechnischer Geräte, deren Qualität über eine reine Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit hinausgehen den energieeffizienzbedingten Mehrkosten zuzurechnen sind. Die PV-Anlage beispielsweise wurde in den energieeffizienzbedingten Mehrkosten erfasst.

Eine Lüftungsanlage dient in erster Linie der Aufrechterhaltung der Raumluftqualität und zählt damit zu den Instandsetzungskosten. Verfügt die Lüftungsanlage jedoch über eine Wärmerückgewinnung, so sind die Mehrkosten bei den energieeffizienzbedingten Mehrkosten zu berücksichtigen.

¹⁹ Vgl. dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012, S.11.

Tabelle 4.7: Differenzierung der Kostenkategorien

Investitionskosten	Sanierungskosten	Energieeffizienz energieeffizienzbedingte Mehrkosten, z.B. energetisch wirksame Bauteile und Anlagen
		Instandsetzung Instandsetzungskosten, z.B. Behebung und Vermeidung von Schäden, Aufrechterhaltung der Vermietbarkeit
	Modernisierungskosten	Modernisierung Wohnwertverbessernde Maßnahmen, z.B. Wohnraumerweiterung, Modernisierung des Innenausbau

Die dena-Sanierungsstudie kommt zu dem Fazit, dass sich Sanierungen von selbst genutzten Einfamilienhäusern bis zu einer energetischen Qualität eines KfW Effizienzhaus 70 über die eingesparten Energiekosten finanzieren lassen., vorausgesetzt, dass die Sanierungsmaßnahmen mit ohnehin anstehenden Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen gekoppelt werden.²⁰ Der energetische Standard Effizienzhaus 55 steht nach Aussage der Deutschen Energie Agentur an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit. Inwiefern sich die Wirtschaftlichkeit des energy+Home demgegenüber darstellt soll im Folgenden untersucht werden. Eine Auflistung der auf die Wohnfläche bezogenen Kosten nach den zuvor beschriebenen Kostenkategorien ist in Tabelle 4.12 dargestellt.

4.6.2 Ermittlung der Vollkosten der Sanierung

Die auf Basis der in Kapitel 4.2 dokumentierten Investitionskosten ermittelten Sanierungskosten betragen 1.220 €/m²_{Wohnfläche}. Wie zuvor beschrieben wurden dabei die wohnwertverbessernden Modernisierungsmaßnahmen außer Acht gelassen und lediglich die Instandsetzungsmaßnahmen sowie die energieeffizienzbedingten Mehrkosten berücksichtigt. Der Anteil der energieeffizienzbedingten Mehrkosten an den Investitionskosten beträgt 34%.

Tabelle 4.8: Sanierungskosten des energy+Home, nach Kostenkategorien getrennt

KG	Beschreibung	Modernisierung	Instandsetzung	Energieeffizienz
300	Baukonstruktion			
310	Baugrube	0 €	2.415 €	0 €
320	Gründung	1.331 €	11.551 €	928 €
330	Außenwände	24.828 €	35.662 €	22.272 €
340	Innenwände	22.626 €	7.012 €	60 €
350	Decken	20.427 €	4.844 €	4.050 €
360	Dächer	7.885 €	31.681 €	15.616 €
370	Kon. Einbauten	2.807 €	0 €	0 €
390	Sonstiges	11.265 €	13.597 €	0 €
300	Total Netto	95.218 €	106.762 €	38.875 €
	MwSt 19%	18.091 €	20.285 €	7.386 €
	Total KG 300 Brutto	109.260 €	127.047 €	50.311 €

²⁰ Vgl. dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012, S.13.

400	Technische Anlagen			
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	13.082€	2.817 €	0 €
420	Wärmeversorgungsanlagen	3.062 €	15.914 €	7.630 €
430	Lufttech. Anlagen	0 €	4.771 €	3.181 €
440	Starkstromanlagen	13.355 €	1.494 €	19.500 €
400	Total Netto	29.498 €	24.995 €	30.311 €
	MwSt 19%	5.605 €	4.749 €	5.759 €
	Total KG 400 Brutto	35.103 €	29.744 €	36.070 €
Total KG 300+400 pro m² Wohnfläche		725 €	787 €	433 €

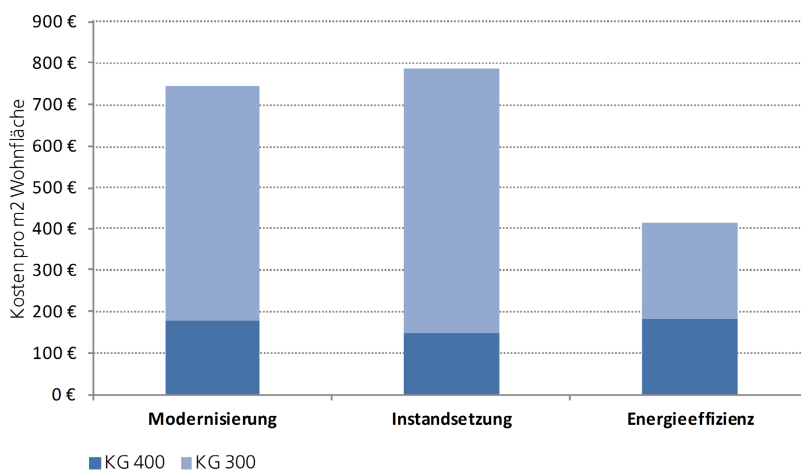


Abbildung 4.4: Aufteilung der Investitionskosten des energy+Home nach Kostenkategorien

In der dena-Sanierungsstudie werden für die Vollkosten der in der Studie beschriebenen Modellgebäude auf Effizienzhaus-100 Standard im Mittel $400 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ angegeben, auf Effizienzhaus-85 Niveau $430 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$, auf Effizienzhaus-70 Niveau $470 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ und auf Effizienzhaus-55 Niveau $540 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$.²¹

Nach Angabe der dena wurden die Kosten durch die Projektteilnehmer jedoch mit im Mittel $1.400 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ angegeben und die energieeffizienzbedingten Mehrkosten mit $800 \text{ €/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ für ein Effizienzhaus-55. Die Diskrepanz zwischen diesen Zahlen führt die dena auf mehrere Ursachen zurück. Zum Einen wird vermutet, dass die Flächenvergrößerung und andere wohnwertverbessernde Maßnahmen der untersuchten Projekte voll auf die Sanierungskosten angerechnet wurden, anstelle diese den wohnwertverbessernden Maßnahmen zuzurechnen. Zum Anderen wird darauf verwiesen, dass bei den Projekten innovative Systeme und Technologien, welche noch an der Schwelle der Markteinführung stehen, verwendet wurden und mit hohem Aufwand in Planung und Ausführung verbunden waren. Dies schlägt sich durch hohe Kosten in den Projekten nieder.

21 Vgl. dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012, S. 34.

Letzteres trifft sicherlich auch auf das energy+Home zu, welches beispielsweise durch die Verwendung von flächenbündig integrierten PV-Modulen und einer Fassadenbekleidung aus Faserzementplatten nicht immer auf die günstigsten am Markt verfügbare Produkte und Technologien zurückgreift.

Zur Ermittlung der energieeffizienzbedingten Mehrkosten berücksichtigt die Deutsche Energie Agentur Lüftungsanlagen bei den Vollkosten, jedoch nicht bei den energieeffizienten Mehrkosten, mit dem Argument, dass die Anlage primär zur Gewährleistung der Raumluftqualität dient, jedoch nicht zur Steigerung der Energieeffizienz. Dadurch, dass beim energy+Home eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut wurde, wurden die Kosten zu 40% als energieeffiziente Maßnahme gerechnet und zu 60% als Instandsetzungskosten. Dies betrifft auch die Fenster, welche mit ihrer 3-Scheiben-Isolierverglasung über das Mindestmaß einer reinen Instandsetzung hinausgehen. In den von der dena angegebenen Werten werden lediglich 2-Scheiben-Isolierverglasungen berücksichtigt, und diese lediglich auf die Instandsetzungskosten angerechnet, mit dem Argument, dass nennenswert schlechtere Fenster auf dem Markt gar nicht mehr angeboten werden und daher keine energieeffizienzbedingten Kosten entstehen. Grundsätzlich basieren die Maßnahmenpakete der dena-Projekte auf weitestgehend erprobten Techniken, welche zu verhältnismäßig moderaten Kosten führen. Dazu werden Abluftanlagen, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Brennwertkessel und Solaranlagen zur Unterstützung der Warmwasserbereitung gezählt. Eine PV-Anlage oder eine Wärmepumpe ist im Gegensatz zum energy+Home in den dena-Projekten nicht berücksichtigt.

4.6.3 Erweiterte Lebenszykluskostenbetrachtung auf Grundlage der Sanierungskosten

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Kostenfeststellung werden in Tabelle 4.13 die erweiterten Lebenszykluskosten dargestellt. Ausgehend von einer Betrachtung der Sanierungskosten (Kosten der energieeffizienzbedingten Maßnahmen plus Instandsetzungskosten) und der Nutzungskosten über einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wird hierbei die Lebenszykluskostenbetrachtung um die Planungskosten, die Rückbaukosten, die Wertsteigerung durch den Flächenzuwachs sowie die Mieteinnahmen ergänzt.²²

WLC		energy+Home
	Herstellungskosten	243.173 €
KG 300	Herstellungskosten Baukonstruktion	177.358 €
KG 400	Herstellungskosten Technische Anlagen	65.815 €
	Nutzungskosten	145.484 €
KG 311/321	Betriebskosten Wasser	18.534 €
KG 316	Betriebskosten Heizwärme und Warmwasser	45.502 €
KG 316	Betriebskosten Strom	-9.202 €
KG 352	Inspektion und Wartung Baukonstruktion	3.335 €
KG 353	Inspektion und Wartung Technische Anlagen	26.830 €
KG 410	Instandsetzung Baukonstruktion	40.016 €
KG 420	Instandsetzung Technische Anlagen	20.469 €
TOTAL LCC	Herstellung+Nutzung	388.657 €
	Planungsleistungen	63.740 €
	Rückbau und Entsorgung	21.500 €
	Wertsteigerung	-45.475 €
	Mieteinnahmen (8 €/m ² _{WF})	-434.308 €
Total WLC		-5.886 €

Tabelle 4.9: Erweiterte Lebenszykluskostenanalyse

Das negative Ergebnis zeigt, daß die Einnahmen aus der Miete (bzw. die Mietkostensparnis bei selbst bewohntem Eigentum) zusammen mit der Wertsteigerung durch den Flächenzuwachs die Herstellungs- und Nutzungskosten übersteigen und die Sanierung damit unter dem Blickwinkel einer erweiterten Lebenszykluskostenbetrachtung als wirtschaftlich zu beurteilen ist.

²² Aufgrund des Verzichtes auf Modernisierungsmaßnahmen wurden die Mieteinnahmen mit 8 €/m² angenommen und befinden sich damit im unteren Bereich der in Kapitel 4.5.5 angenommenen möglichen Mieteinnahmen.

4.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Maßgebender Faktor zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der energetischen Sanierung ist die Energiekostensparnis. Um diese ermitteln zu können, bedarf es zunächst einer Untersuchung der Energiekosten vor der Sanierung. Dazu muss der Heizenergieverbrauch eines Jahres je m² Wohnfläche mit dem durchschnittlichen Brennstoffpreis des betreffenden Jahres multipliziert werden. Die so ermittelten Brennstoffkosten müssen anschließend um die Heiznebenkosten ergänzt werden. Heizenergiekosten und Stromkosten ergeben zusammen die Energiekosten des jeweiligen Jahres pro m² Wohnfläche.

Energiekosten vor der Sanierung

Das energy+Home weist einen dokumentierten mittleren Heizölverbrauch vor der Sanierung von 5.680 l Heizöl pro Jahr auf. Das entspricht einem Endenergieverbrauch von 279 kWh/(m²_{WF} a) für Heizung und Warmwasser.²³ Dazu kommt ein Strombedarf für Haushaltsstrom von 4.000 kWh bzw. 20 kWh/(m²_{WF} a), welcher mit 24,25 cent/kWh angerechnet wird. Der durchschnittliche Heizölpreis wird in dieser Untersuchung mit 9 cent/kWh angenommen, woraus sich Heizkosten in Höhe von 25,12 €/ (m²_{WF} a) bzw. Energiekosten von 29,97 €/ (m²_{WF} a) ergeben.

Um die Verbrauchswerte auf einer allgemeinen Basis vergleichen zu können wird dieses Ergebnis mit den statistischen Daten des Heizspiegels²⁴ gegenübergestellt. Dieser enthält eine systematische Auswertung gemessener Energieverbrauchswerte auf kommunaler und bundesweiter Ebene und beruht auf den Heizdaten von über einer Millionen zentral beheizter Ein- und Mehrfamilienhäusern. Die Auswertung dieser Daten ergibt einen durchschnittlichen Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser von 239 kWh/(m²_{WF} a) für zentral beheizte kleine Wohngebäude bis 250 m² Wohnfläche, die mit einer Öl- bzw. Gasheizung ausgestattet sind. Die Gebäude werden darüber hinaus in Gebäude mit niedrigem, mittlerem, erhöhtem und zu hohem Heizenergieverbrauch eingeteilt. Für Gebäude mit einer Wohnfläche bis 250 m² wird ein Verbrauch von mehr als 229 kWh/(m²_{WF} a) als zu hoch eingeschätzt. Das energy+Home liegt damit vor der Sanierung im Bereich der im Heizspiegel als Gebäude mit zu hohem Verbrauch dokumentierten Bestandsgebäude und stellt daher ein gutes Beispiel für eine repräsentative Sanierung mit großer Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere zu sanierende Gebäude und mit einem großen Einsparpotential dar. Die von der dena verwendeten Modellgebäude befinden sich im Übergangsbereich vom „erhöhten“ zum „zu hohen“ Endenergieverbrauch und weisen damit vor der Sanierung einen besseren energetischen Standard auf. Nach der Sanierung erreichen sie im besten Fall KfW-Effizienzhaus-55-Niveau und damit einen niedrigeren energetischen Standard als das energy+Home. Die daraus resultierenden Sanierungskosten liegen verständlicherweise unter denen des energy+Home und sind nur bedingt vergleichbar.

Energiekosten nach der Sanierung

Im nächsten Schritt wird der Energieverbrauch nach der Sanierung mit den Energiekosten multipliziert, um in Gegenüberstellung mit den Energiekosten vor der Sanierung die Energiekostensparnis zu ermitteln.

Der Heizwärmebedarf wurde anhand DIN 18599 mit 3.410 kWh für die Bereitstellung von Heizwärme und mit 1.883 kWh für Warmwasser berechnet. Hinzu kommen noch 2.500 kWh für den Haushaltsstrom und 1.073 kWh für Hilfenenergie und den Betrieb der Lüftungsanlage. In der Summe ergibt sich ein Endenergiebedarf von 44,5 kWh/(m²_{WF} a) und

23 Berechnungsgrundlage: Heizwert 11,8 kWh/kg, Rohdichte 0,83kg/l, Wohnfläche 199,3 m²
24 Vgl. CO2online Gemeinnützige GmbH, 2013.

damit Kosten in Höhe von $10,79\text{€}/(\text{m}^2_{\text{WF}} \text{ a})$.²⁵

Demgegenüber stehen Erträge aus der Photovoltaik-Anlage von 9.980 kWh/a, von denen 2.314 kWh direkt selber genutzt werden und 7.567 kWh in das Stromnetz eingespeist werden. Aufgrund der Einspeisevergütung, welche über das EEG in Abhängigkeit von der Leistung der PV-Anlage und dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme geregelt ist, ergibt sich ein Ertrag von $8,69\text{€}/(\text{m}^2_{\text{WF}} \text{ a})$.

Die Energiekosten nach der Sanierung belaufen sich demnach auf gerade einmal $2,10\text{€}/(\text{m}^2_{\text{WF}} \text{ a})$. Das entspricht einer Energiekostensparnis von $27,87\text{€}/(\text{m}^2_{\text{WF}} \text{ a})$ bzw. $2,32\text{€}/(\text{m}^2_{\text{WF}} \text{ Mon.})$.

4.7.1 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Der wirtschaftliche Nutzen aus Investorensicht besteht bei selbst genutzten Wohngebäuden aus dem Mehrertrag, welcher aus der Energiekostensparnis nach der Sanierung gegenüber dem nicht modernisierten Gebäude entsteht. Daher wurde in der vorliegenden Untersuchung der Mehrertragsansatz als Grundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung unter Verwendung der Kapitalwert- und Annuitätenmethode zur Berücksichtigung der zeitlichen Struktur der Zahlungen, angewendet. Bei diesen dynamischen Verfahren werden die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungen mit Hilfe der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Zeitpunkt diskontiert. Statische Verfahren wie die Kostenvergleichsrechnung oder die Rentabilitätsvergleichsrechnung scheiden aufgrund ihrer Schwäche, wirtschaftliche Effekte über die gesamte Nutzungsdauer abbilden zu können, aus.²⁶

Kapitalwertmethode

Bei der Kapitalwertmethode werden alle Zahlungen, die nach dem Investitionszeitpunkt anfallen, mit dem Kalkulationszinssatz abgezinst und damit der Barwert der Aus- und Einzahlungen ermittelt, von dem die Anfangsinvestition subtrahiert wird. Ist der Kapitalwert größer 0 bedeutet dies, dass die Investition (zumindest unter Annahme des gewählten Kalkulationszinssatz) rentabel ist.²⁷

Bei einem Kapitalwert von 0 werden die Investitionskosten und Nutzungskosten gerade so erwirtschaftet. Dieser als „Break-Even“ bezeichnete Wert stellt den ökonomischen Wendepunkt einer Investition von einer unrentablen zu einer wirtschaftlichen Investition dar. Sobald die Energiekostensparnis größer ist als der Break-Even rechnen sich die Sanierung, da der Mehrertrag einer Immobilie aus der Sicht eines Selbstnutzers aus der Energiekostensparnis durch die energetische Modernisierung besteht.

Kapitalwert = Barwert der Einzahlungen - Barwert der Auszahlungen - Investitionskosten > 0

Die Investitionskosten wurden detailliert in Kapitel 4.2 dargestellt und dokumentiert. In Kapitel 4.3 wurden die Nutzungskosten (Barwerte der Auszahlungen) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt und dabei auch die Instandsetzungskosten für Bauteile mit einer kürzeren Nutzungsdauer berücksichtigt sowie der gewählte Kalkulationszinssatz, die erwartete Preissteigerung und die jeweiligen Nutzungsdauern der Bauteile dargestellt.²⁸ Eine Gegenüberstellung der Barwerte der Auszahlungen findet sich in Kapi-

25 Aufgrund der Umstellung auf Strom als alleinige Energiequelle sind die Kosten nicht mehr vom Ölpreis, sondern vom Strompreis abhängig, welcher zum Zeitpunkt der Untersuchung 24,25 cent/kWh beträgt.

26 Vgl. König, 2009, S. 72 ff

27 Vgl. dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012, S. 40.

28 In der dena-Studie werden Ersatzinvestitionen vereinfachend nicht berücksichtigt. Diese Kosten sind jedoch über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren nicht unerheblich. Die dena geht darüber hinaus lediglich von einem

Tabelle 4.10: Kapitalgebundene Kosten der energieeffizienzbedingten Kosten

Kapitalgebundene Kosten Energieeffizienz	Barwert [€]
Baukonstruktion	50.311
Technische Anlagen	36.070
Ver- und Entsorgung	57.114
Inspektion und Wartung	14.200
Instandsetzung Baukonstruktion	10.862
Instandsetzung Technische Anlagen	10.047
Barwert der Kapitalgebundenen Kosten	178.604

Der Break-Even zur Refinanzierung der Maßnahmen beträgt bei einem angenommenen Kalkulationszinssatz von 5,5% damit $2,06 \text{ €/ (m}^2_{\text{WF}} \text{ Mon.)}$. Wie in Kapitel 4.7 beschrieben beträgt die Energiekostensparnis bei einem heutigen Heizölpreis von 9 cent/kWh bereits $2,32 \text{ €/ (m}^2_{\text{WF}} \text{ Mon.)}$. Die Sanierung des energy+Home befindet sich somit im wirtschaftlichen Bereich.

In dieser Betrachtung zeigt sich bereits, dass eine Wirtschaftlichkeitsberechnung nur unter Annahme bestimmter Werte für den Kalkulationszinssatz, Energiepreis, Energiepreiserhöhung, etc. durchgeführt werden kann. Diese Annahmen beinhalten gewisse Unsicherheiten, welche sich nicht gänzlich vermeiden lassen und somit keine exakten Werte für die zukünftigen Kosten liefert. Die Annahme des Kalkulationszinssatzes wurde beispielsweise in Anlehnung an das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen mit 5,5% gewählt. Aufgrund der aktuellen Finanzmarktlage wäre eine Annahme des Kalkulationszinssatzes von 3% realistischer, was zu einem Break-Even von 1,13€ führt. Unter dieser Annahme sind die energieeffizienzbedingten Maßnahmen des energy+Home bereits heute als äußerst wirtschaftlich zu bewerten. Auch können durch verschiedene Methoden und Verfahren der Berechnung Differenzen in den Kosten entstehen.

Neben den Kosten für energieeffizienzsteigernde Maßnahmen muss der Gebäudeeigentümer zusätzlich die Kosten für die Instandhaltung und wohnwertverbessernde Maßnahmen finanzieren. Die Koppelung dieser Maßnahmen an sowieso anstehende Modernisierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen wird als Grundlage der Wirtschaftlichkeit vorausgesetzt.

Subjektive Kriterien wie Komfort- und Repräsentationsansprüche, ästhetische Gesichtspunkte, der Wunsch nach Versorgungssicherheit durch Nutzung eigener, regenerativer Energiequellen, der Wunsch nach geringeren Emissionen und Schutz der Gesundheit durch Verwendung ökologischer Baustoffe, Wertsteigerung der Immobilie und dergleichen mehr bilden oftmals die Grundlage für Investitionsentscheidungen, welche sich nicht anhand einer Wirtschaftlichkeitsrechnung abbilden lassen. Die Kostenrechnung ist daher lediglich

Betrachtungszeitraum von 25 Jahren aus.

als ein Kriterium für eine energetische Modernisierung zu sehen, welche durch weitere Entscheidungsfaktoren zu ergänzen ist.

Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode eignet sich insbesondere zur Bewertung von Investitionen, bei denen einer Auszahlung zu Beginn regelmäßige Erträge gegenüberstehen.²⁹ Handelt es sich bei dem Gebäude um ein vermietetes Objekt, so bestehen die Erträge aus der Sicht der Vermieter aus der realisierbaren Mieterhöhung. Bei einer energetischen Sanierung eines selbst genutzten Wohnhauses, wovon im Folgenden ausgegangen wird, bestehen die Erträge aus den eingesparten Energiekosten.

Als Beurteilungskriterium werden im Folgenden die Kosten der eingesparten kWh Endenergie (P_{ein}) verwendet. Diese erhält man, indem man die Annuität der Sanierungskosten³⁰ durch die jährliche Endenergieeinsparung dividiert.

$$P_{\text{ein}} = K / (E_{\text{Endenergieverbrauch vor Sanierung}} - E_{\text{Endenergieverbrauch nach Sanierung}})^{31}$$

Zur Berechnung der Annuität werden die Zahlungen (Investition zu Beginn der Sanierung sowie die Instandsetzungs- und Instandhaltungskosten) in regelmäßige Zahlungen über den Betrachtungszeitraum umgerechnet. Dazu werden die Barwerte der Zahlungen mit dem Kehrwert des Rentenbarwertfaktors (Annuitätenfaktor) multipliziert. Dieser ist abhängig vom Betrachtungszeitraum (50 Jahre) und dem gewählten Kalkulationszinssatz (5,5%). Um eine Beurteilung der Rentabilität der Sanierungsmaßnahmen treffen zu können werden die Kosten der eingesparten kWh Endenergie mit dem mittleren zukünftigen Preis für den Bezug einer kWh Endenergie verglichen. Sind die Kosten für die eingesparte kWh geringer als der zukünftig zu erwartende Preis für eine kWh Endenergie, kann die Sanierung als wirtschaftlich angesehen werden.

Der Vorteil dieser Betrachtungsweise liegt in der unmittelbaren Vergleichbarkeit der Kosten für die eingesparte kWh Endenergie mit dem tatsächlichen Energiepreis. Unsicherheiten ergeben sich dabei aus der Annahme eines Kalkulationszinssatzes und eventueller Preissteigerungen von Zusatzkosten sowie aus der Annahme der zukünftigen Strompreisentwicklung.

In Tabelle 4.15 sind die Kosten einer eingesparten kWh Endenergie dokumentiert. Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten ergeben sich aus dem Barwert der Lebenszykluskosten der Sanierung unter Berücksichtigung der Sanierungskosten, wie sie in Kapitel 4.6 beschrieben wurden. Die Kosten für die Einsparung einer kWh Endenergie betragen demnach 49,12 cent. Bei einem aktuellen Strompreis von 24,25 cent erscheinen diese Kosten auf den ersten Blick als zu hoch. Berücksichtigt man jedoch die Preissteigerung der Energiepreise, so wird die Sanierung bereits ab einer Steigerung von 2,6 % pro Jahr wirtschaftlich. Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben stieg der Strompreis in den letzten 13 Jahren um durchschnittlich 4,6 %. Unter der Annahme, dass die Strompreisentwicklung in den kommenden Jahren weiterhin über 2,5 % liegt ist die Sanierung des energy+Home damit als wirtschaftlich zu bezeichnen.

In der dena-Studie werden die Kosten der eingesparten kWh Endenergie allein anhand der Kosten für energieeffizienzbedingte Maßnahmen berechnet. Dieses Vorgehen ignoriert die Tatsache, dass die Kosten für die Instandsetzung des Gebäudes bei einer Sanierung per se anfallen und vom Eigentümer getragen werden müssen. Das Vorgehen der dena liefert daher lediglich eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der energieeffizienzbedingten

29 Vgl. König, 2009, S.74.

30 Annuität der Instandsetzungskosten plus energieeffizienzbedingte Mehrkosten.

31 Vgl.: dena-Sanierungsstudie. Teil 2, 2012, S 41.

Tabelle 4.11: Kosten der eingesparten kWh Endenergie

Maßnahmen, jedoch nicht über die Sanierung im Allgemeinen. Überträgt man diese Betrachtungsweise auf das energy+Home, so ergeben sich Kosten der eingesparten kWh von 21,77 cent/kWh. Dieser Wert liegt zwar weit über den von der dena angegebenen Werten für ein KfW-Effizienzhaus³², jedoch noch unter dem Preis für eine kWh Strom. Die Sanierung kann also auch unter dieser Betrachtungsweise als wirtschaftlich angesehen werden, und zwar bereits bei heutigen Stromkosten ohne Berücksichtigung einer zukünftigen Energiepreissteigerung.

Kapitalgebundene Kosten Sanierung (Instandsetzung + Energieeffizienz) und Energieeffizienz	Barwert [€] Sanierung	Annuität [€] Sanierung	Annuität [€] Kosten energieeffizienter Maßnahmen
Baukonstruktion	177.358	10.475	2.732
Technische Anlagen	65.815	3.887	2.130
Ver- und Entsorgung	54.834	3.239	3.239
Inspektion und Wartung	30.165	1.782	839
Instandsetzung Baukonstruktion	40.016	2.363	641
Instandsetzung Technische Anlagen	20.469	1.209	593
Annuität der Kapitalgebundenen Kosten		22.955	10.175
Endenergieverbrauch vor der Sanierung	[kWh]	55.605	55.605
Endenergieverbrauch nach der Sanierung	[kWh]	8.869	8.869
Aufzinsungsfaktor	%	5,50	5,50
Annuitätsfaktor		0,06	0,06
Kosten der eingesparten kWh	[cent]	49,12	21,77
Strompreis Stand 2014	[cent]	24,25	24,25
mittlerer Strompreis über 50 Jahre bei einer Preissteigerung von	2%	41,84	
mittlerer Strompreis über 50 Jahre bei einer Preissteigerung von	3%	56,35	
mittlerer Strompreis über 50 Jahre bei einer Preissteigerung von	4%	77,01	

32 KfW-Effizienzhaus 100: 5,5 cent/kWh; KfW-Effizienzhaus 85: 6,0 cent/kWh; KfW-Effizienzhaus 70: 7,1 cent/kWh; KfW-Effizienzhaus 55: 8,9 cent/kWh; mittlerer Energiepreis (Gas und Öl) 6,6 cent/kWh.

5 Ökonomische Untersuchung alternativer Sanierungsstrategien und erweiterte Wertschöpfungsbetrachtungen

5.1 Kostenvergleich Sanierung - Neubau

Analog zur ökologischen Betrachtung werden im Folgenden die Sanierungskosten des energy+Home mit den Investitionskosten eine Sanierung nach EnEV und den Investitionskosten für den Abbruch und Neubau des Gebäudes mit identischer Volumetrie nach EnEV bzw. dem Plusenergie-Standard gegenübergestellt, um die im vorherigen Kapitel ermittelten Kennzahlen bewerten zu können.

Die Kostenschätzung der Sanierung nach EnEV beruht auf der BMVBS Studie „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden“.¹ Bei dieser Untersuchung wurden 399 Ein- und Zweifamilienhäuser auf Grundlage deren Kostenfeststellung ausgewertet. Dabei wurden sowohl die Vollkosten, als auch die energiebedingten Mehrkosten für Außenwände, Dächer, oberste Geschossdecken, Kellerdecken, Fenster, Solaranlagen, Heizungs- und Lüftungsanlagen sowie Gerüste ermittelt. Die dort gewählten Kostenansätze beinhalten jeweils die gesamte Leistung einschließlich der Lohnkosten und Nebenarbeiten. Mittels der BKI-Baupreisindexreihe² und dem BKI-Regionalfaktor³ wurden die durchschnittlichen Bauteilkosten auf den Zeitpunkt der Sanierung und den Ort des energy+Home umgerechnet.

Grundlage für die Kostenschätzung der „Abbruch und Neubau“ Varianten sind die BKI-Kostenkennwerte 2013 für „Ein- und Zweifamilienhäuser, unterkellert, mittlerer Standard“ sowie „Ein- und Zweifamilienhäuser Passivhausstandard, Massivbau“. Aufgrund fehlender Angaben im BKI-Handbuch für Plusenergiegebäude wird davon ausgegangen, daß die Kosten für die Baukonstruktion eines Plusenergiegebäudes in etwa denen eines Passivhauses zuzüglich der anlagentechnischen Komponenten eines Plusenergiegebäudes entsprechen. Bei der Schätzung der Kosten der technischen Anlagen wurde von einer mit dem energy+Home vergleichbaren Ausstattung ausgegangen, so daß zumindest eine qualitative Aussage über das Kostenverhältnis Sanierung gegenüber einem Abbruch und Neubau möglich ist.

Im Folgenden werden die Kostengruppen für die beiden Abbruch und Neubau Varianten nach der 2. Ebene der DIN 276-1:2008-12 aufgeteilt dargestellt. Eine ausführlichere Dokumentation der Kostenschätzung findet sich im Anhang A.5.

1 Vgl. BMVBS-Online-Publikation Nr.07, 2012.

2 Vgl. <http://bki.de/baupreisindex.html>, [22.05.2014].

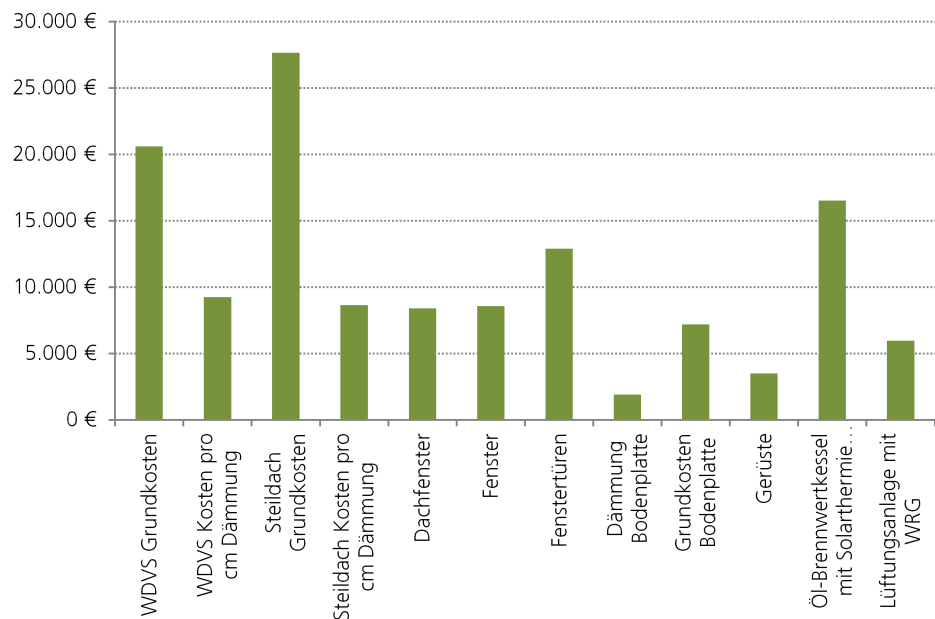
3 Vgl. BKI Baukosteninformationszentrum, 2013.

5.1.1 Kostenschätzung `Sanierung nach EnEV`

Tabelle 5.1: Kostenschätzung einer Sanierung des bestehenden Referenzgebäudes nach EnEV

KG Nr.	Beschreibung	Kosten [€]	Stärke [cm]	Fläche [m ²]	Anzahl	Baukosten [€]
300	Baukonstruktion					
1	WDVS Grundkosten	87,35		236,00		20.615 €
2	WDVS Kosten pro cm WD	2,45	16,00	236,00		9.251 €
3	Steildach Grundkosten	172,80		160,00		27.648 €
4	Steildach Kosten pro cm WD	2,70	20,00	160,00		8.640 €
5	Dachfenster	1.050,00			8,00	8.400 €
6	Fenster	390,00		22,00		8.580 €
7	Fenstertüren	335,00		38,50		12.898 €
8	Dämmung Bodenplatte	2,00	8,00	120,00		1.920 €
9	Grundkosten Bodenplatte	60,00		120,00		7.200 €
10	Gerüste	20,00		175,00		3.500 €
	Total Brutto KG 300					108.651 €
400	Technische Anlagen					
1	Öl-Brennwertkessel mit Solarthermie (WW)	83,00		199,00		16.517 €
2	Heizöltank	1.000,00		psch.		16.517 €
3	Lüftungsanlage mit WRG	30,00		199,00		1.000 €
	Total Brutto KG 400					5.970 €
	Total Brutto KG 300+400 Sanierung EnEV					132.138 €
	Total inkl. Regionalfaktor Preisstand 01/2009					137.424 €
	Total Brutto Preisstand 01/2012					149.032 €

Abbildung 5.1: Verteilung der Sanierungskosten auf die Kosten-
gruppen nach DIN 276 für die
Variante `Sanierung nach EnEV`



5.1.2 Kostenschätzung `Abbruch und Neubau EnEV-Standard`

KG	Beschreibung	Baukosten
300	Baukonstruktion	
310	Baugrube	14.984 €
320	Gründung	29.921 €
330	Außenwände	94.817 €
340	Innenwände	30.806 €
350	Decken	36.175 €
360	Dächer	49.572 €
370	Baukonstruktive Einbauten	3.328 €
390	Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen	33.474 €
	Total Brutto KG 300	293.076 €
400	Technische Anlagen	
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	18.928 €
420	Wärmeversorgungsanlagen	32.905 €
430	Lufttechnische Anlagen	8.979 €
440	Starkstromanlagen	9.159 €
450	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen	2.106 €
	Total Brutto KG 400	72.077 €
	Total Brutto KG 300+400 Abbruch und Neubau EnEV	365.153 €

Tabelle 5.2: Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des bestehenden Referenzgebäudes im EnEV-Standard

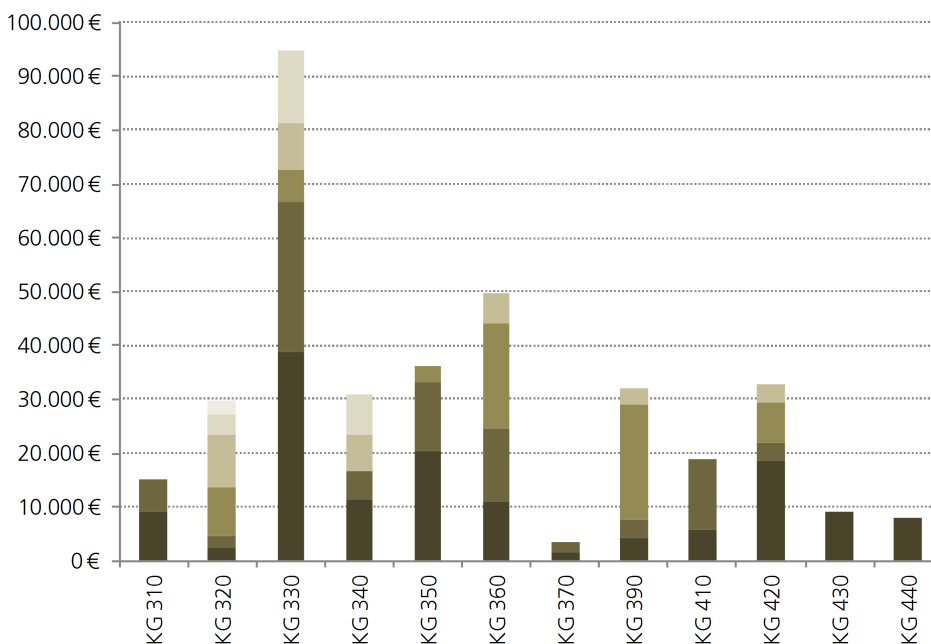


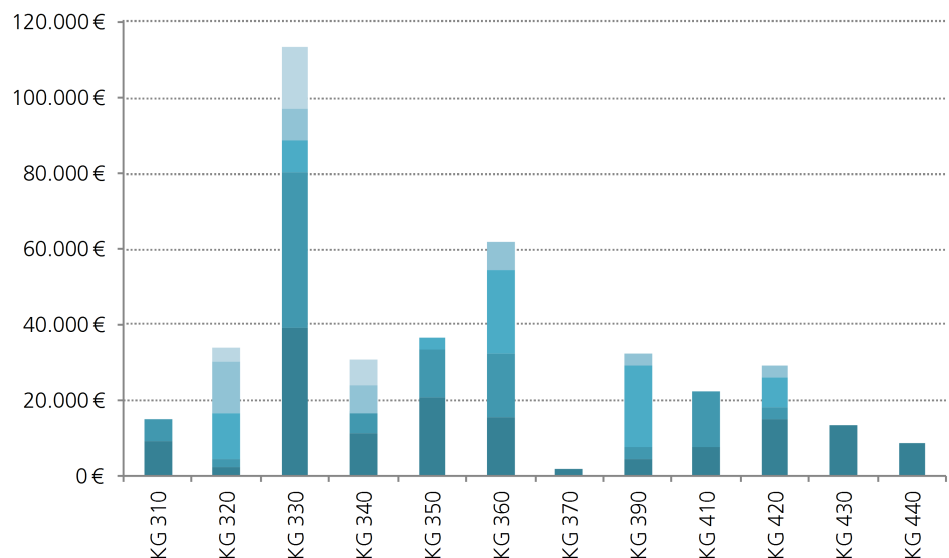
Abbildung 5.2: Verteilung der Kosten auf die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 für die Variante `Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes`

5.1.3 Kostenschätzung `Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude`

Tabelle 5.3: Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des bestehenden Referenzgebäudes im Plusenergie-Standard

KG	Beschreibung	Baukosten
300	Baukonstruktion	
310	Baugrube	14.984 €
320	Gründung	36.809 €
330	Außenwände	113.383 €
340	Innenwände	30.806 €
350	Decken	36.175 €
360	Dächer	62.176 €
370	Baukonstruktive Einbauten	3.325 €
390	Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen	33.473 €
	Total Brutto KG 300	331.130 €
400	Technische Anlagen	
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	22.286 €
420	Wärmeversorgungsanlagen	29.002 €
430	Lufttechnische Anlagen	13.469 €
440	Starkstromanlagen	30.460 €
450	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen	2.045 €
	Total Brutto KG 400	97.262 €
	Total Brutto KG 300+400 Abbruch und Neubau Plusenergiehaus	428.392 €

Abbildung 5.3: Verteilung der Kosten auf die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 für die Variante `Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes`



5.1.4 Vergleich der Herstellungskosten

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die real angefallenen Sanierungskosten (Instandsetzungskosten plus energieeffizienzbedingte Mehrkosten) des energy+Home für die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276-1:2008-12 ermittelt⁴ und die Kosten für eine Sanierung nach EnEV sowie den Abbruch und Neubau des Gebäudes mit identischer Volumetrie abgeschätzt.

Die Gegenüberstellung der Kosten in Tabelle 5.4 zeigt, dass die Sanierung des energy+Homes zwar 63 % teurer ist als die Sanierung nach EnEV, jedoch wesentlich günstiger als ein Abbruch und Neubau des Gebäudes. Das oftmals vorgebrachte Argument, ein Abbruch und Neubau sei aufgrund der geringeren Anpassungsarbeiten wesentlich günstiger als eine Sanierung trifft im vorliegenden Fall nicht zu. Die Gegenüberstellung zeigt, ähnlich wie das Ergebnis der vergleichenden Ökobilanzierung, daß die Sanierungsvarianten gegenüber den Varianten „Abbruch und Neubau“ grundsätzlich im Vorteil sind. Die Sanierung zum energy+Home ist 44 % günstiger als die Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ und die Variante Sanierung nach EnEV sogar 60 % günstiger als der Abbruch und Neubau eines Gebäudes mit EnEV Standard.

	Sanierung energy+Home	Sanierung nach EnEV	Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude	Abbruch und Neubau EnEV-Standard
KG 300 Baukonstruktion	177.358 €	122.543 €	331.130 €	293.076 €
KG 400 Technische Anlagen	65.815 €	26.490 €	97.262 €	72.077 €
Total Brutto (inkl. 19% MwSt.)	243.173 €	149.032 €	428.392 €	365.153 €

Tabelle 5.4: Vergleich der Herstellungskosten alternativer Sanierungs- bzw. Neubaustrategien

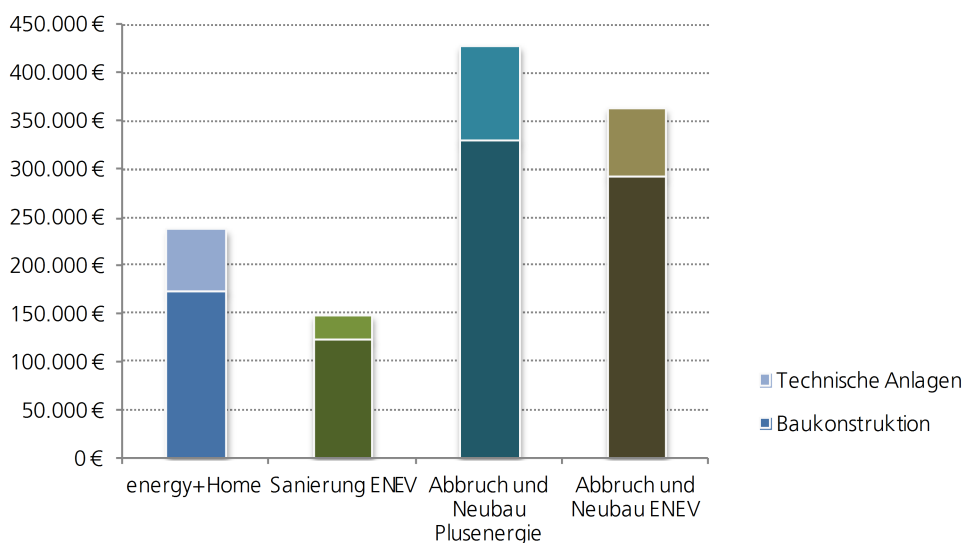


Abbildung 5.4: Vergleich der Herstellungskosten alternativer Sanierungs- bzw. Neubaustrategien aufgeteilt nach den Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 in €

⁴ Siehe Kapitel 4.

5.2 Vergleichende Betrachtung der Kostenvarianten im Lebenszyklus

Die im vorherigen Kapitel ermittelten Herstellungskosten der verschiedenen Sanierungsstrategien zeigen, daß die Sanierung zum energy+Home zwar ökonomisch im Sinne der in Kapitel 4 beschriebenen Wirtschaftlichkeitsberechnung ist, jedoch nicht die günstigste Alternative hinsichtlich der Herstellungskosten darstellt. Um zu untersuchen, ob sich die Mehrkosten für die Sanierung zum energy+Home im Laufe der Nutzungsdauer durch geringere Nutzungskosten wieder amortisieren, werden im Folgenden die Lebenszykluskosten für die untersuchten Sanierungsvarianten dargestellt.

Bei den EnEV-Varianten wurde bei der Ermittlung der Betriebskosten für Heizwärme und Warmwasser von einer Beheizung mit Heizöl mit einem Heizwert von 11,8 kWh/kg bzw. 9,8 kWh/l ausgegangen. Bei einem Wirkungsgrad des Heizkessels von 90% ergibt sich ein Brennwert von 8,8 kWh/l. Der durchschnittliche Ölpreis wurde mit 80 cent/l angenommen und mit einer Preissteigerung von 4% behaftet.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Nutzungskosten entspricht dem Vorgehen bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten des energy+Home. Bei der Ermittlung der Inspektions- und Wartungskosten bzw. der Instandsetzungskosten wurde ein Prozentsatz der Herstellungskosten angenommen, beruhend auf der im vorherigen Kapitel beschriebenen Kostenschätzungen. Die qualitative Verteilung der Lebenszykluskosten entspricht der Verteilung der Investitionskosten, wie sie im vorherigen Kapitel dargestellt wurde. Die Sanierungsvarianten sind auch im Bezug auf die Lebenszykluskosten erwartungsgemäß günstiger als die Varianten Abbruch und Neubau.

Unter Berücksichtigung der Wertsteigerung durch den Flächengewinn im UG bei der energy+Home Sanierung amortisieren sich die höheren Herstellungskosten gegenüber der EnEV-Sanierung nach 50 Jahren aufgrund der niedrigeren Betriebskosten und den Erträgen der Eigenstromproduktion nahezu. Gegenüber dem unsanierten Bestand sind die Lebenszykluskosten des energy+Home nach 40 Jahren geringer.

Der Verlauf der Lebenszykluskosten bei den beiden Abbruch und Neubau-Varianten verhält sich ähnlich. Auch hierbei erfolgt eine Amortisation der höheren Herstellungskosten der Plusenergie-Variante frühestens nach 50 Jahren. Eine Amortisation gegenüber dem unsanierten Bestand findet im Betrachtungszeitraum nicht statt.

Abbildung 5.5 zeigt den prozentualen Verlauf der Lebenszykluskosten der betrachteten Varianten. Dabei beziehen sich die Kosten der einzelnen Varianten auf die Werte des energy+Home. Da methodisch davon ausgegangen wird, dass die Inspektions- Wartungs- und Instandsetzungskosten prozentual abhängig von den Investitionskosten sind, verlaufen die Kurven der Abbruch und Neubau-Varianten steiler als bei den beiden Sanierungsvarianten. Aufgrund der verwendeten Methode führen höhere Investitionen automatisch zu höheren Nutzungskosten, was in Realität nicht zwangsweise der Fall ist. Insofern lassen sich die Neubauvarianten nur bedingt mit den Sanierungsvarianten vergleichen. Nichts desto trotz zeigt der Vergleich, dass der Plusenergiestandard gegenüber dem EnEV-Standard auch aus ökonomischer Sicht nicht nachteilhaft ist und dass die Investition in eine Sanierung langfristig gegenüber einem unsanierten Bestandsgebäude rentabel ist.

		energy+Home	Sanierung ENEV	Abbruch und Neubau Plusenergie	Abbruch und Neubau EnEV
Herstellungskosten					
KG 300	Baukonstruktion	177.358 €	122.543 €	331.130 €	293.076 €
KG 400	Technische Anlagen	65.815 €	26.490 €	97.262 €	72.077 €
	Wertsteigerung durch Flächengewinn	-45.475 €		-45.475 €	
		197.698 €	149.032 €	382.917 €	365.153 €
Nutzungskosten					
KG 311	Betriebskosten Wasser	8.354 €	8.354 €	8.354 €	8.354 €
KG 316	Betriebskosten Heizwärme	29.314 €	39.297 €	29.314 €	39.297 €
KG 316	Betriebskosten Warmwasser	16.187 €	8.503 €	16.187 €	8.503 €
KG 316	Betriebskosten Lüftung	5.863 €	2.768 €	5.863 €	2.768 €
KG 316	Betriebskosten Beleuchtung	21.492 €	25.790 €	21.492 €	25.790 €
KG 316	Betriebskosten Hilfsenergie	3.361 €	5.493 €	3.361 €	5.493 €
KG 321	BK Schmutzwasser	7.008 €	7.008 €	7.008 €	7.008 €
KG 321	BK Niederschlagswasser	3.172 €	3.172 €	3.172 €	3.172 €
KG 322	Betriebskosten Abfall	2.280 €	2.280 €	2.280 €	2.280 €
KG 316	Einspeisevergütung und Eigennutzung Strom	-39.918 €	0 €	-39.918 €	0 €
KG 352/353	Inspektion und Wartung	18.643 €	19.118 €	31.823 €	22.941 €
KG 410/420	Instandsetzung	50.751 €	50.324 €	96.301 €	82.883 €
	Ersatzinvestitionen	40.022 €	39.650 €	56.095 €	51.825 €
		166.529 €	211.757 €	241.333 €	260.315 €
TOTAL LCC	Herstellung+Nutzung	364.227 €	360.789 €	624.250 €	625.467 €

Tabelle 5.5: Lebenszykluskosten der Sanierungs- bzw. Neubauvarianten im Vergleich

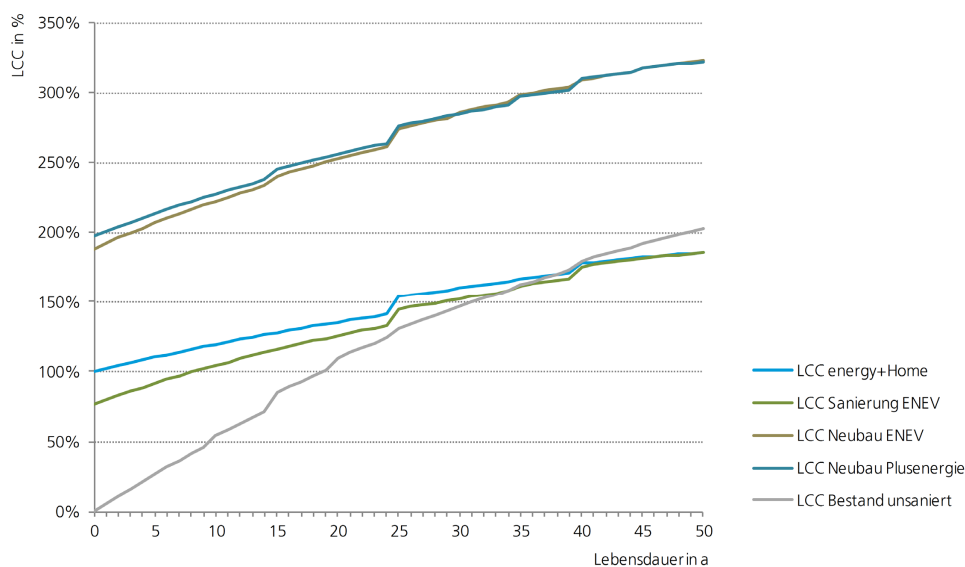


Abbildung 5.5: prozentualer Vergleich der Lebenszykluskostenentwicklung der Sanierungs- bzw. Neubauvarianten über einen Zeitraum von 50 Jahren

5.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Elektromobilität im Zusammenhang mit selbsterzeugtem Strom aus Photovoltaik

In der vorangegangenen Lebenszykluskostenberechnung wurden die ökonomischen Chancen der Nutzung des regenerativ erzeugten PV-Stroms zum Betrieb eines Elektromobils bisher nicht berücksichtigt. Die folgende Betrachtung untersucht diesen Aspekt der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung separat von den übrigen Lebenszykluskosten.

Rund 14 % der CO₂-Emissionen in Deutschland sind auf die Nutzung von Kraftfahrzeugen zurückzuführen, so dass hier ein großes Einsparpotenzial für die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesrepublik liegt.⁵ Um die europaweit geltende Limitierung der CO₂-Emissionen bei Neuwagen einzuhalten ist der vermehrte Einsatz von Elektrofahrzeugen ein wichtiger Baustein,⁶ da Elektrofahrzeuge, die mit Strom aus regenerativen Energiequellen betrieben werden als Null-Emissions-Fahrzeuge gelten.

Die durchschnittliche Fahrstrecke privater PKW beträgt lediglich 29 km pro Tag⁷. Wenn man davon ausgeht, dass ein Elektrofahrzeug eine durchschnittliche Reichweite von 100 km hat, so könnten bereits heute viele Fahrten rein elektrisch erfolgen und die Fahrzeuge könnten auch hauptsächlich vor der eigenen Haustür über den Hausstrom geladen werden. Das Konzept des energy+Home sieht vor, dass von der Photovoltaik-Anlage erzeugter Strom genutzt werden kann, um die Batterie eines Elektrofahrzeugs zu laden. Aus diesem Grund soll hier auf die Chancen von Elektrofahrzeugen eingegangen werden und deren Nutzung dem konventionellen PKW mit Verbrennungsmotor gegenübergestellt werden.

Für den Nutzer stellt sich zunächst die Fragen nach der Wirtschaftlichkeit, d.h. wie sich die Kosten für ein Elektrofahrzeug in der Anschaffung und Wartung und die Verbrauchskosten je Kilometer gegenüber den Kosten für ein konventionelles Fahrzeug verhalten. Um diese Frage zu beantworten stellen Bertram und Bongard⁸ den Mitsubishi i-MieV in einem Vergleich einem konventionellen VW-Polo gegenüber. Legt man ihre Zahlen für den Betrieb sowie den aktuellen Anschaffungspreis beider Fahrzeuge zugrunde und veranschlagt eine jährliche Fahrleistung von 10.000 Kilometern, so ergibt sich über einen Zeitraum von 10 Jahren auf den Zahlen von 2011 basierend (inkl. jährlicher Preissteigerung von 2% allgemein und 4% für Strom und Benzin) folgendes:⁹

Tabelle 5.6: Kostenvergleich I-MieV versus VW Polo über 10 Jahre

	I-MieV	Polo
Anschaffungskosten [Euro]	23.800	15.355
Strompreis je kWh [Euro]	0,154/0,25	
Benzinpreis [Euro]		1,51
Versicherungskosten jährlich [Euro]	568	449
Steuer jährlich [Euro]	-	24
Anschaffung und Verbrauchskosten, Summe über 10 Jahre [Euro]	36.440	34.724
Anschaffung und Verbrauchskosten, Summe über 15 Jahre [Euro]	44.050	46.800

5 Vgl. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energiebedingte-emissionen-ihre-auswirkungen> [10.6.2014].

6 Vgl. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm [10.6.014].

7 Vgl.: Bertram, 2014, Seite 14.

8 Vgl.: Bertram, 2014, Seite 115 ff.

9 Für die Monate März bis September entgangene Einspeisevergütung 15, 4 Ct/kWh, für die übrigen Monate 25 Ct/kWh Strompreis bei Netzbezug.

Hierbei wird deutlich, dass der Betrieb eines Elektrofahrzeugs unter Berücksichtigung der Verwendung selbst erzeugten Stroms schon jetzt günstiger sein kann als der Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs.

Die folgende Grafik zeigt die Aufsummierung aller Verbrauchskosten über einen Zeitraum von 15 Jahren inklusive dem Kauf bei einer jährlichen Fahrleistung von 10.000 km bzw. 15.000 km. Dabei wird deutlich, dass sich die höheren Anschaffungskosten für ein Elektrofahrzeug umso schneller amortisieren, je größer die im Jahr zurückgelegte Fahrstrecke ist.

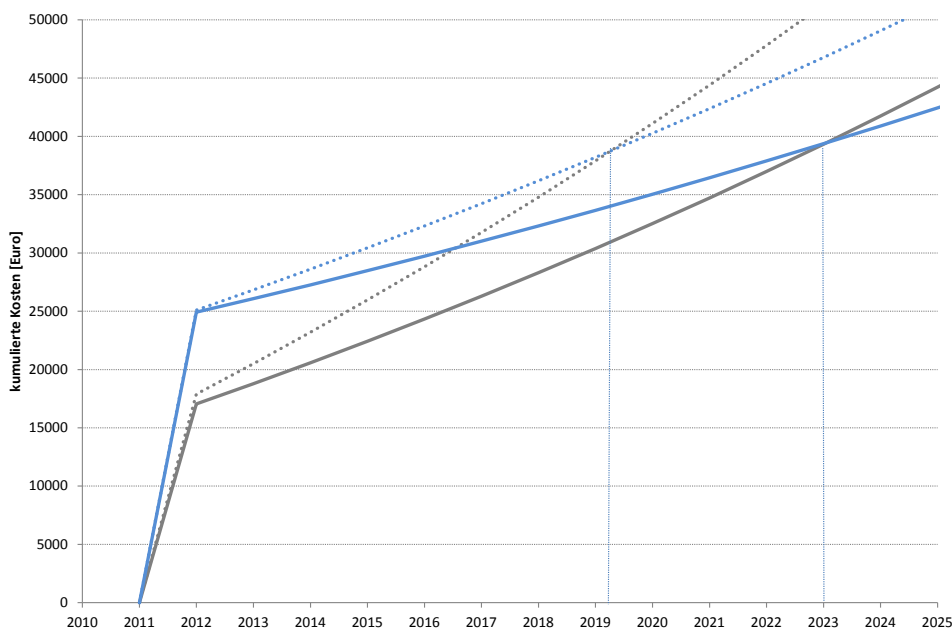


Abbildung 5.6: Aufsummierung der Anschaffungs- und Verbrauchskosten für I-MieV und VW Polo über einen Zeitraum von 15 Jahren

— VW Polo 10 000 km Fahrleistung
 VW Polo 15 000 km Fahrleistung
 — I-MieV 10 000 km Fahrleistung
 I-MieV 15 000 km Fahrleistung

Die Verbreitung und die Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität bedingen sich gegenseitig und werden durch die Nutzung von selbst erzeugtem Strom begünstigt.

Folgendes Beispiel soll den ökonomischen Anreiz der Elektromobilität nochmals verdeutlichen:

Ein PKW mit Kraftstoffmotor verbraucht 7 Liter je 100 Kilometer bei einem Bezinpreis von 1,50 EUR/Liter. Je 100 Kilometer gefahrener Laufleistung ergeben sich dadurch Kosten von 10,50 EUR bzw. bei einer jährlichen Laufleistung von 10.000 km Kosten in Höhe von 1.050 EUR. Das Plusenergiegebäude erwirtschaftet in den Monaten März bis September einen Stromüberschuss der zum Betrieb eines Elektromobils genutzt werden kann. Anteilig fährt das Auto in diesem Zeitraum ca. 6.000 km, wodurch sich bei einem Verbrauch von 15 kWh pro 100 km und Kosten in Höhe von 0,15 EUR/kWh (Kosten der nicht eingespeisten kWh) Kosten in Höhe von 135 EUR ergeben. Für die restlichen Monate wird eine Laufleistung von 4.000 km und Stromkosten von 0,25 EUR angenommen, da in diesem Zeitraum kein Stromüberschuss erwirtschaftet wird und das Auto mit Netzstrom geladen werden muss. Dadurch ergeben sich nochmals Kosten in Höhe von 150 EUR. Der Anteil der Herstellungs- und Instandhaltungskosten für die PV-Anlage wird in Abhängigkeit der für das Elektroauto genutzten Strommenge mit 10 % der auf das Jahr bezogenen Herstellungskosten angenommen. Dadurch entstehen nochmals Kosten in Höhe von ca. 100 EUR, so dass sich die Betriebskosten des Elektroautos im Jahr auf 385 EUR belaufen. Gegenüber dem benzinbetriebenen Auto lassen sich somit jährlich 665 EUR einsparen, unter der Annahme konstanter

Energiepreise für Benzin und Strom. Tendenziell ist eher davon auszugehen, dass sich die Benzinpreise/Ölpreise schneller verteuern als möglicherweise die Strompreise.

Neben der reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Vergleich der CO₂ Bilanz für Elektrofahrzeuge und Verbrennungsmotoren von Interesse.

Der Polo aus dem Vergleich emittiert 119 g CO₂ pro gefahrenen Kilometer, bei 10.000 Kilometern jährlich ergibt sich ein Ausstoß von rund 1,2 Tonnen CO₂. Elektrofahrzeuge, deren Strom aus regenerativen Stromquellen stammt, emittieren kein CO₂.

Eine Verminderung der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Flottenwerte auf 95 g CO₂/km bis 2020, wie von der EU gefordert, wäre in Deutschland nicht ausschließlich mittels Verbrauchsoptimierung bei konventionellen Benzin- und Dieselmotoren zu erreichen, der Ausbau der Elektromobilität ist dabei ein wichtiger Baustein.

Um die Elektromobilität zu fördern, verabschiedete die Bundesregierung im Jahr 2011 das Regierungsprogramm Elektromobilität. Die darin enthaltene Strategie sieht die Förderung der Forschung und Entwicklung sowie der Markteinführung der Elektromobilität vor und soll Deutschland dazu verhelfen, auf dem Gebiet der Elektromobilität weltweit eine Führungsrolle einzunehmen. Bis zum Jahr 2020 sollen eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen unterwegs sein.¹⁰

Der Fokus bei den Diskussionen zum Thema Elektromobilität liegt auf den technologischen, wirtschaftlichen und politischen Aspekten, es ist aber letztendlich der Kunde, der über den Erfolg von Elektrofahrzeugen entscheidet. Neben einem angepassten Mobilitätsverhalten hat er auch die höheren Investitionskosten zu tragen. Der Einsatz von selbsterzeugtem Strom kann hier einen nicht unerheblichen Anreiz setzen und zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen beitragen.

Gemäß dem Bericht der nationalen Plattform Elektromobilität¹¹, wird ein beginnender Massenmarkt bis 2020 die nächste Generation von Fahrzeugen und Infrastruktur hervorbringen und auf eine zunehmend selbsttragende Nachfrage treffen. Die im Markt befindliche Stückzahl von Elektrofahrzeugen ermöglicht mehr und mehr tragfähige Geschäftsmodelle, die auch die Berücksichtigung von regenerativ erzeugtem Strom mit einschließen.

10 Vgl. NEP, 2011, S. 7.

11 Vgl. NEP, 2011, S.12.

5.4 Wertsteigerung durch die Sanierung zum energy+Home

Die Investition in die Realisierung einer nachhaltigen Immobilie kann durch unterschiedliche Anreize ausgelöst werden. Als solche sind geringere Energiekosten, beantragbare Fördermittel, höhere Mieteinnahmen, Einnahmen aus der Einspeisevergütung und ein wachsender gesellschaftlicher Druck auf private Haushalte, institutionellen Anleger, die Politik und Unternehmen durch eine steigende Sensibilisierung der Bevölkerung für das Thema des nachhaltigen Bauens zu nennen. Für private Haushalte entstehen die Anreize im Wesentlichen durch ein gesteigertes Umweltbewusstsein, der Erhöhung der Energiepreise aufgrund der absehbaren Rohstoffverknappung sowie im Substanzerhalt und damit auch dem Vermögenserhalt von Immobilieneigentum. Eine Steigerung der Wohnqualität sowie eine Steigerung des Verkaufswertes können weitere Gründe für eine Sanierung sein. Dabei spielt ein höherer Verkehrswert durch Nachhaltigkeitsaspekte eine immer größere Rolle im Immobilienmarkt. Eine alleinige Betrachtung der Lebenszykluskosten sind für eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Sanierung daher nicht ausreichend. Im Folgenden wird daher der Wertzuwachs der Sanierung zum energy+Home mithilfe einer Verkehrswertermittlung abgeschätzt.

Ziel der Untersuchung

Eine Immobilienbewertung hat im Allgemeinen die Zielsetzung, die Vermögensposition eines Eigentümers als Grundlage für Preisverhandlungen, Bilanzierungen o.ä. zu ermitteln und kann entweder freiwillig erfolgen (z.B. bei Kauf und Verkauf) oder unfreiwillige Gründe haben (Erbfälle, Scheidungen, Enteignungen). Dabei darf jedoch der Wert einer Immobilie nicht mit dem Preis einer Immobilie verwechselt werden, welcher durch Angebot und Nachfrage am Markt gebildet wird. Als Wert in diesem Sinne wird nicht der Kaufpreis angesehen, sondern der Verkehrswert, welcher im Baugesetzbuch §194 wie folgt definiert wird:

Der Verkehrswert (Marktwert) wird durch den Preis bestimmt, der in dem Zeitpunkt, auf den sich die Ermittlung bezieht, im gewöhnlichen Geschäftsverkehr nach den rechtlichen Gegebenheiten und tatsächlichen Eigenschaften, der sonstigen Beschaffenheit und der Lage des Grundstücks oder des sonstigen Gegenstand der Wertermittlung ohne Rücksicht auf ungewöhnliche oder persönliche Verhältnisse zu erzielen wäre.¹²

Es handelt sich dabei also um einen Wert, welcher bei einer fiktiven Transaktion unter marktüblichen Rahmenbedingungen am Wertermittlungstichtag zu erzielen wäre. Ungewöhnliche oder persönliche Verhältnisse in diesem Sinne wären z.B. Spekulation, Zwang oder Zeitdruck. Diese werden bei der Ermittlung nicht berücksichtigt, so daß es sich beim Verkehrswert um einen verobjektivierten Preis auf Basis der objektiven Werttheorie handelt.¹³

Mit dieser Betrachtung soll die ökonomische Nachhaltigkeit der Umwandlung untermauert werden, indem der Verkehrswert vor und nach der Sanierung ins Verhältnis gesetzt wird. Dazu wird der Wert vor der Sanierung mit dem Wert nach der Sanierung verglichen und die Differenz als Wertzuwachs definiert. Als Wertermittlungstichtag vor der Sanierung wird der 01.01.2011 angenommen, für den Wertermittlungstichtag des energy+Home nach der Sanierung der 01.01.2013.

Untersuchungsmethode

Zur Ermittlung des Verkehrswertes stehen im Wesentlichen drei Verfahren zur Verfügung

12 o.V., 2007, §194.

13 Vgl. Gromer, 2012, S.115 ff.

welche in der Immobilienwertermittlungsverordnung (ImmoWertV) beschrieben sind.¹⁴ Diese sind das Vergleichswertverfahren, das Ertragswertverfahren und das Sachwertverfahren.

Das Vergleichswertverfahren wird beispielsweise dann verwendet, wenn eine ausreichend große Anzahl vergleichbarer Objekte vorhanden ist (z.B. Eigentumswohnungen oder Reihenhäuser). Dazu muss eine hinreichende Übereinstimmung der wertbeeinflussenden Faktoren vorhanden sein. Ist dies nicht der Fall, so werden Auf- und Abschläge mittels Umrechnungskoeffizienten berücksichtigt (z.B. bei unterschiedlicher GFZ von Grundstücken). Beziehen sich die Vergleichswerte auf reale Kaufpreise, so spricht man vom unmittelbaren Vergleichswertverfahren. Beim mittelbaren Vergleichswertverfahren wird ein Mangel an Vergleichsobjekten durch aggregierte Vergleichsfaktoren ausgeglichen.

Das Ertragswertverfahren wird bei Investitionsobjekten verwendet, bei denen hauptsächlich die Mieterträge im Vordergrund stehen (Mietwohnungen, Gewerbe, Büros, etc.). Das Verfahren orientiert sich dabei an den zukünftigen, marktüblich realisierbaren Erträgen. Dabei wird der Reinertrag aus dem Rohertrag abzüglich der Bewirtschaftungskosten ermittelt und mit einem Vervielfältiger (abhängig von der Restnutzungsdauer und dem Liegenschaftszinssatz) multipliziert.

Beim Sachwertverfahren ist der Sachwert maßgeblich von den Herstellungskosten unter Berücksichtigung der Alterswertminderung des Gebäudes abhängig. Die Herstellungskosten sind dabei nicht die real angefallenen Kosten, sondern marktübliche, durchschnittliche Herstellungskosten, welche anhand des Normalherstellungskostenkataloges ermittelt werden. Dabei wird der Ausstattungsstandard, das Herstellungsjahr und regionale Unterschiede berücksichtigt und der ermittelte Wert anhand des Baupreisindex auf den Wertermittlungstichtag bezogen.

Im Rahmen der Verkehrswertermittlung des Gebäudes vor der Sanierung wurde das auf den Herstellungskosten basierende Sachwertverfahren gewählt und das Ergebnis mit dem Vergleichswertverfahren verifiziert. Um den Wert nach der Sanierung zu ermitteln wurde beim Sachwertverfahren neben dem Wertermittlungstichtag die Ausstattungsstandards modifiziert und die Restnutzungsdauer um 50 Jahre verlängert und auch hierbei das Ergebnis mithilfe des Vergleichswertverfahrens verifiziert.

Einschränkung der Methodik

¹⁵ Die Schwäche des Sachwertverfahrens liegt nach Gromer darin, dass kein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen den Herstellungskosten und den Vorteilen einer nachhaltigen Immobilie besteht und das Verfahren durch Zu- oder Abschläge modifiziert werden müsste, um Nachhaltigkeitsaspekte korrekt berücksichtigen zu können. Auch wenn die Herstellungskosten bei nachhaltigen Immobilien in der Regel höher ausfallen als bei konventionellen Gebäuden und somit der Verkehrswert höher ausfällt, sind die Vorteile ungleich bedeutender. Trotzdem wird dieses Verfahren im vorliegenden Fall als das geeignetste Verfahren zur Ermittlung der Wertsteigerung des energy+Home angesehen, da es sich beim energy+Home nicht um ein Investitionsobjekt handelt bei dem die Erträge im Vordergrund der Betrachtung stehen und dadurch das Ertragswertverfahren anzuwenden wäre.

Es handelt es sich beim Untersuchungsobjekt zwar um ein Reihenendhaus, welches in seiner Art in großer Zahl im Rhein-Main Gebiet gebaut wurde, womit auch eine Verkehrswertermittlung nach dem Vergleichswertverfahren denkbar ist, jedoch hat dieses Verfahren aufgrund geringer vergleichbarer Transaktionsdaten für Gebäude mit vergleichbarer energetischer Qualität und der geringen Anzahl zertifizierter Gebäude in Deutschland seine

14 Vgl. ImmoWertV, §8.

15 Vgl.: Gromer, 2012, S.169 ff.

Schwachstelle. Vergleiche auf Grundlage des Energieausweises wären zwar grundsätzlich denkbar, allerdings werden diese nicht zentral verwaltet, so dass eine ausreichend transparente Datengrundlage nicht vorhanden ist. Um die Ergebnisse des Sachwertverfahrens dennoch verifizieren zu können wurde als Basis der Wertermittlung nach der Sanierung das Vergleichswertverfahren auf Grundlage eines Neubaus mit gehobener energetischer Qualität angewendet.

Das Ertragswertverfahren eignet sich zwar prinzipiell zur Bewertung nachhaltiger Immobilien, allerdings ist die Datengrundlage zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend. Der Reinertrag dürfte zwar aufgrund niedriger Betriebskosten und steigender Mietkosten wachsen, allerdings fehlt zum jetzigen Zeitpunkt der empirische Nachweis dieser Annahmen, was in gleichem Maße auch auf den Liegenschaftszinssatz zutrifft. Darüber hinaus eignet sich das Ertragswertverfahren vor allem für Gebäude, bei denen der Ertrag im Vordergrund steht. Bei Wohnimmobilien also vor allem bei Mehrfamilienhäusern, bei denen das Verhältnis von Boden- und Gebäudewert wesentlich anders ist als bei Einfamilienhäusern.

5.4.1 Sachwert Gebäudebestand

Der Grundstückssachwert der Immobilie ergibt sich aus der Summe von Bodenwert und dem Sachwert der baulichen Anlagen inklusive dem Wert der Außenanlagen.

Bodenwert

Zur Bestimmung des Bodenwertes wird ein Bodenrichtwert von 345 €/m², eine GFZ von 0,4, ein Bodenpreisindex von 0,94 sowie eine Wohnbau-Grundstücksfläche von 516 m² zugrunde gelegt. Der Bodenwert als Produkt aus Bodenrichtwert, Grundstücksfläche und Bodenpreisindex beträgt demnach 167.339 €.

Sachwert der baulichen Anlagen

Zur Bestimmung des Sachwertes der baulichen Anlagen wird ein freistehendes Einfamilienhaus gemäss Normalherstellungskostenkatalog NHK 2000 mit Erdgeschoss, Obergeschoss und nicht ausgebautem Dachgeschoss zugrunde gelegt (Gebäude 1.32). Die Gesamtnutzungsdauer wird mit 70 Jahren angenommen, das Alter des Gebäudes vor der Sanierung mit 42 Jahren und einer dementsprechenden Restnutzungsdauer von 28 Jahren. Die Alterswertminderung beträgt demnach 60%. Die Normalherstellungskosten nach NHK 2000 sowie die Anteile einzelner Bauteile an den Gesamtkosten sind Tabelle 5.7 zu entnehmen.

Bauteil	Anteil	Standard	NHK min	NHK max	NHK 2000	
Fassade	11%	einfach	480	505	585	
Fenster	14%	einfach	480	505	585	
Dach	15%	mittel	555	585	675	
Sanitär	13%	mittel	555	585	675	
Innenwände	6%	mittel	555	585	675	
Böden	8%	mittel	555	585	675	
Innentüren	11%	mittel	555	585	675	
Heizung	15%	mittel	555	585	675	inkl. 16%
Elektro	7%	mittel	555	585	675	Baunebenkosten
Total €/m ² _{BGF}			536	565	653	757
Total € NHK ₂₀₀₀			160.875	169.500	195.750	227.070
Total € NHK ₂₀₁₁	SACHWERT					272.446

Tabelle 5.7: Normalherstellungskosten zur Bestimmung des Sachwertes der baulichen Anlagen des Gebäudebestandes

Der Sachwert der baulichen Anlagen, indiziert auf den Wertermittlungsstichtag 01.01.2011 beträgt unter Berücksichtigung der Alterswertminderung 108.978 €. Der Wert der Außenanlagen wird mit 5% des Gebäudesachwertes angenommen und beträgt 5.449 €.

Grundstückssachwert

Der Grundstückssachwert der Immobilie vor der Sanierung beträgt 281.766 €.

5.4.2 Vergleichswert Gebäudebestand

Um den im vorherigen Kapitel ermittelten Wert zu verifizieren wird ein Vergleichswertverfahren auf Grundlage einer Wertermittlung in Anlehnung an §15 ImmoWertV verwendet, welche auf dem Datenbestand der Internetplattform Immobilienscout24 beruht. Bei den dabei verwendeten Preis- und Objektinformationen handelt es sich um Angebotspreise, auf die ein statistisch berechneter Abschlag vorgenommen wird, welcher auf dem Verhältnis von Angebot und Nachfrage beruht sowie durch Zu- und Abschläge für besondere Gebäudemerkmale modifiziert wird. Die Auswahl der Vergleichspreise beruht auf übereinstimmenden Zustandskriterien, so dass eine Bewertung nur dann erfolgt, wenn eine ausreichende Anzahl von Vergleichsobjekten mit hinreichend übereinstimmenden Zustandskriterien gefunden wurde.

Allgemeine Angaben

Als Grundlage der Vergleichswertermittlung wird von einem nicht unterkellertem, nicht modernisiertem Gebäude mit Einzelgarage und Baujahr 1969 sowie einer Wohnfläche von 175,6 m² ausgegangen.

Ausstattung

Mauerwerk & Dach	einfach	Massivbau, verputzt, Betondachziegel ungedämmtes Dach, einfaches MW einfache Fenster, Standardverglasung Standard-Türen, Holzzarge, tlw. Glas in Bad/WC nicht bis unter Decke gefliest, Wohnräume Tapete
Dämmung	sehr einfach	
Fenster & Außentüren	einfach	
Innentüren	durchschnittlich	
Wände & Fliesen	durchschnittlich	
Bodenbeläge	durchschnittlich	
Sanitärinstallationen	durchschnittlich	Fliesen und Teppich
Heizungsinstallationen	einfach	zweckmässige Standardausführung
Elektroinstallationen	durchschnittlich	einfache Ölheizung, Stahlradiatoren
		Leitungen unterputz, Standard-Steckdosen und Lichtschalter

Nutzwert und Wohnqualität

Insgesamt	gut		
Raumaufteilung/-zuschnitt	durchschnittlich	Aussicht	attraktiv
Besonnung / Belichtung	durchschnittlich	Lage	ruhig

ermittelter durchschnittlicher Marktwert	276.000 €
Durchschnittlicher Wert pro m ² Wohnfläche	1.550 €
Ermittelte Schwankung des Wertes	9%
Ermittelte Wertspanne pro m ² Wohnfläche	1.450 - 1.700 €
Resultierende Wertspanne	251.000 - 301.000 €

5.4.3 Verkehrswert Gebäudebestand

Die Differenz zwischen dem Sachwert und dem Vergleichswert beträgt lediglich 2 % und liegt damit im Bereich der Wertschwankung, welche auf dem Immobilienmarkt existiert. Der Verkehrswert des Gebäudes im Bestand lässt sich als Mittelwert aus dem Sachwert und dem Vergleichswert beschreiben und beträgt ca. 279.000 €.

5.4.4 Sachwert energy+Home

Zur Bestimmung des Grundstückssachwertes der Immobilie wurde die Gesamtnutzungsdauer von 70 auf 120 Jahre modifiziert, das Alter des Gebäudes von 42 auf 44 Jahre erhöht und damit die Restnutzungsdauer auf 76 Jahre erhöht bzw. die Alterswertminderung auf 37% reduziert.

Bodenwert

Der Bodenwertes der Immobilie nach der Sanierung entspricht dem Wert vor der Sanierung und beträgt demnach 167.339 €.

Sachwert der baulichen Anlagen

Analog zum Vorgehen zur Ermittlung des Sachwertes des Gebäudebestandes werden die Normalherstellungskosten nach NHK 200 ermittelt, jedoch unter Zugrundelegung eines gehobenen Ausbaustandards nach Tabelle 5.8 und dem Wertermittlungsstichtag 01.01.2013.

BAUTEIL	ANTEIL	STANDARD	NHK min	NHK max	NHK 2000	
Fassade	11%	gehoben	665	700	810	
Fenster	14%	stark gehoben	840	890	1025	
Dach	15%	stark gehoben	840	890	1025	
Sanitär	13%	gehoben	665	700	810	
Innenwände	6%	gehoben	665	700	810	
Böden	8%	gehoben	665	700	810	
Innentüren	11%	mittel	555	585	675	
Heizung	15%	stark gehoben	840	890	1025	inkl. 16%
Elektro	7%	gehoben	665	700	810	Baunebenkosten
Total €/m ² _{BGF}			730	771	890	1.032
Total € NHK ₂₀₀₀			218.970	231.285	266.925	309.633
Total € NHK ₂₀₁₃ SACHWERT						384.020

Tabelle 5.8: Normalherstellungskosten zur Bestimmung des Sachwertes der baulichen Anlagen des energy+Home

Der Sachwert der baulichen Anlagen, indiziert auf den Wertermittlungsstichtag 01.01.2013 beträgt unter Berücksichtigung der Alterswertminderung 243.213 €. Der Wert der Außenanlagen wird mit 5% des Gebäudesachwertes angenommen und beträgt 12.161 €.

Grundstückssachwert

Der Grundstückssachwert der Immobilie nach der Sanierung beträgt 422.712 €.

5.4.5 Vergleichswert energy+Home

Analog zum Vorgehen bei der Wertermittlung vor der Sanierung wird auch der Wert des Gebäudes nach der Sanierung mithilfe des Vergleichswertverfahrens verifiziert. Da es keine Bestandsgebäude mit einer vergleichbaren energetischen Qualität in der Region und auch generell gibt, ist es nicht möglich, mithilfe der immobilenscout24-Datenbank den Marktwert auf Grundlage eines modernisierten Bestandsgebäudes zu berechnen. Stattdessen wurde bei der Wertermittlung von einem Neubau ausgegangen, da hierbei die Möglichkeit besteht, moderne Anlagentechnik mit alternativer Energieversorgung oder sehr hochwertige Elektroinstallationen zu berücksichtigen.

Allgemeine Angaben

Als Grundlage der Vergleichswertermittlung wird von einem nicht unterkellertem Neubau mit Einzelgarage und Baujahr 2011 sowie einer Wohnfläche von 199,3 m² ausgegangen.

Ausstattung

Mauerwerk & Dach	sehr hochwertig
Dämmung	sehr hochwertig
Fenster & Außentüren	sehr hochwertig
Innentüren	hochwertig
Wände & Fliesen	hochwertig
Bodenbeläge	hochwertig
Sanitärinstallationen	sehr hochwertig
Heizungsinstallationen	sehr hochwertig
Elektroinstallationen	sehr hochwertig

Nutzwert und Wohnqualität

Insgesamt	gut		
Raumaufteilung/-zuschnitt	gut	Aussicht	attraktiv
Besonnung / Belichtung	sehr gut	Lage	ruhig

ermittelter durchschnittlicher Marktwert	377.000 €
Durchschnittlicher Wert pro m ² Wohnfläche	1.900 €
Ermittelte Schwankung des Wertes	12%
Ermittelte Wertspanne pro m ² Wohnfläche	1.650 - 2.100 €
Resultierende Wertspanne	332.000 - 422.000 €

5.4.6 Verkehrswert energy+Home

Je spezieller eine Immobilie ist, desto höher fällt im Allgemeinen die Wertspanne aus, sprich die Werte der verwendeten Vergleichsobjekte weichen im Durchschnitt stärker vom Mittelwert der bewerteten Immobilien ab. Dieser Effekt wird auch bei der vorliegenden Betrachtung deutlich. Der Markt für Einfamilienhäuser mit gehobenen Ausstattungsstandard und gleichzeitig stark gehobener energetischer Qualität ist verhältnismäßig klein. Dies wird durch die Wertschwankung von 12% deutlich. Der mit dem Sachwertverfahren ermittelte Wert liegt am obersten Ende des mit dem Vergleichswertverfahren bestimmten Wertspanne. Der Verkehrswert als Mittel aus den beiden ermittelten Werten beträgt ca. 400.000 €.

5.4.7 Vergleichende Gegenüberstellung des Verkehrswertes von Gebäudebestand und energy+Home

Der tatsächliche Kaufpreis des Bestandsgebäudes im Jahr 2011 betrug 275.000 € und damit lediglich 4.000€ unter dem ermittelten Verkehrswert von 279.000€. Der Verkehrswert des sanierten Gebäudes lässt sich als Mittelwert aus dem Sachwert und dem Vergleichswert des Gebäudes nach der Sanierung beschreiben und beträgt ca. 400.000 €. Die Wertsteigerung durch die Sanierung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Verkehrswert vor und nach der Sanierung und lässt sich demnach mit 121.000 € abschätzen.

5.5 Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Unter Berücksichtigung des Kopplungseffektes und der Wertsteigerung durch die Wohnflächenvergrößerung ist eine Sanierung zum Plusenergiegebäude bereits heute wirtschaftlich durchführbar, wenn auch nicht auf einen stark gehobenen Ausbaustandard wie er beim energy+Home durchgeführt wurde.

Die Kosten der Sanierung zum energy+Home lassen sich dabei in wohnwertverbessernde Maßnahmen, Instandsetzungskosten und Kosten für energieeffizienzbedingte Maßnahmen unterteilen, wobei der Anteil der wohnwertverbessernden Maßnahmen an den Gesamtsanierungskosten beim energy+Home 38 % beträgt, auf die Instandsetzung 40 % der Kosten entfallen und der Anteil der energieeffizienzbedingten Maßnahmen 22 % beträgt. Insgesamt amortisieren sich die Sanierungskosten gegenüber dem unsanierten Bestand nach ca. 40 Jahren und gegenüber einer Sanierung nach EnEV nach ca. 50 Jahren.

Die Energiekostensparnis des energy+Home beträgt im Vergleich mit dem unsanierten Bestand 2,32 €/m²_{WF} Mon.) und deckt damit den Anteil der energieeffizienzbedingten Sanierungskosten.

Darüber hinaus kann mit dem Plus an Energie des energy+Home ein Elektroauto jährlich 12.000 km weit fahren und dadurch ca. 665 € pro Jahr gegenüber dem Betrieb eines benzingetriebenen PKW einsparen.

Auch wenn die Sanierung zum energy+Home im Bereich der Herstellungskosten nicht günstiger als eine Sanierung nach EnEV ist, zeigt die vorliegende Untersuchung, dass die durchgeführten Maßnahmen bei ohnehin anstehenden Instandsetzungsmaßnahmen wirtschaftlich vertretbar sind, langfristig die Lebenszykluskosten nachhaltig senken können und gegenüber dem Abriss und Neubau des Gebäudes klar im Vorteil sind.

6. Gegenüberstellung und Bewertung von ökologischen und ökonomischen Kennwerten

6.1 Kennwertgegenüberstellung LCA / LCC

Die Gegenüberstellung der ökologischen und ökonomischen Aspekte für verschiedene Sanierungsvarianten soll aufzeigen, welche Wechselwirkungen zwischen Umweltwirkungen und Kosten bei der Auswahl der Sanierungsstrategie bestehen.

In Kapitel 2 wurden die möglichen Umweltwirkungen der Sanierung zum energy+Home im Lebenszyklus dargestellt. Diese wurden in Umweltwirkungen, resultierend aus der Gebäudekonstruktion, und Umweltwirkungen, resultierend aus einem Betrieb des Gebäudes über 50 Jahre aufgeschlüsselt und einem Referenzwert gegenübergestellt, welcher ein durchschnittliches Einfamilienhaus in Deutschland repräsentiert. Dabei hat sich gezeigt, dass das Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion¹ des energy+Home 33 % größer ist der Referenzwert, das Treibhauspotential insgesamt über einen Zeitraum von 50 Jahren jedoch nur 26 % des Referenzwert entspricht. Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich auch für die übrigen betrachteten Wirkungskategorien.

In Kapitel 3 wurde untersucht, in welchem Verhältnis die Ökobilanz der Sanierung des energy+Home zu einer Sanierung nach EnEV und zu einem Abbruch und Neubau des Gebäudes (Neubau Plusenergiegebäude bzw. Neubau nach EnEV) steht. Abbildung 6.1 zeigt, dass das Treibhauspotential der Gebäudekonstruktion beim Abbruch und Neubau des Gebäudes 21 % höher liegt als bei der Sanierungsvariante des energy+Home. Der Mehraufwand zur Erzeugung des Plusenergiestandards gegenüber der EnEV Sanierung beträgt 68 %. Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, so erzeugen die Neubauvarianten nach wie vor mehr CO₂ als die Sanierungsvarianten. Es wird zudem deutlich, dass die EnEV-Varianten sehr viel mehr CO₂ erzeugen als die Plusenergievarianten. Die Amortisation der erhöhten Treibhauspotentials der Baukonstruktion erfolgt bereits nach 17 Jahren.

GWP Baukonstruktion			GWP Baukonstruktion und Betrieb		
[%]	Sanierung	Neubau	[%]	Sanierung	Neubau
energy+ Home	100 %	121 %	energy+ Home	100 %	144 %
	↑	↑		↓	↓
EnEV-Standard	32 %	63 %	EnEV-Standard	254 %	299 %

Abbildung 6.1: Vergleich des Treibhauspotentials der Sanierungs- und Neubauvarianten in Prozent

Die ökonomischen Aspekte der Sanierung wurden in Kapitel 4 und 5 erläutert. Dabei wurden sowohl die Herstellungskosten, als auch die Nutzungskosten für die Varianten Sanierung zum energy+Home, Sanierung nach EnEV und Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes und eines EnEV-Standard Hauses ermittelt.

Während die Herstellungskosten der Plusenergie-Varianten im Schnitt ca. 15 % höher als die Herstellungskosten der EnEV-Varianten liegen, amortisieren sich die Mehrkosten über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren aufgrund der niedrigeren Betriebskosten nahezu.

Da die Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungskosten in der Berechnung als Prozentsatz der Investitionskosten gerechnet wurden, liegen diese bei den Plusenergievarianten höher als bei den EnEV-Varianten. Dies wird jedoch durch die niedrigeren Betriebskosten für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom sowie durch die Erträge aus der Netzeinspeisung des regenerativ erzeugten Stroms wieder ausgeglichen. Bei dieser Betrachtung wurde

¹ Inkl. PV-Anlage.

auch die Wertsteigerung des Gebäudes durch Vergrößerung der vermietbaren Fläche bei der Plusenergievariante berücksichtigt.

Abbildung 6.2: Vergleich der Herstellungs- und Lebenszykluskosten der Sanierungs- und Neubauvarianten in Prozent

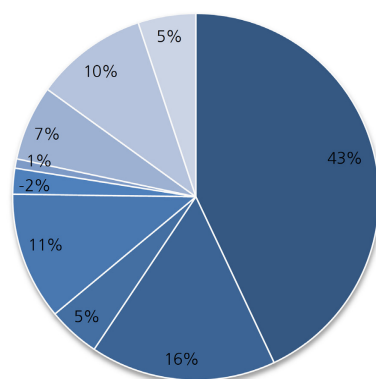
Herstellkosten			Lebenszykluskosten		
[%]	Sanierung	Neubau	[%]	Sanierung	Neubau
energy+ Home	100 %	198 %	energy+ Home	100 %	173 %
EnEV-Standard	77 %	188 %	EnEV-Standard	100 %	173 %

Prozentuale Gegenüberstellung der anteiligen Kosten über den Lebenszyklus an den Gesamtkosten

Den größten Anteil der Gesamtkosten machen die Herstellungskosten aus. Beim der Sanierung zum energy+Home liegt der Anteil bei 59 % der Gesamtkosten. Mit 16 % entfällt ein verhältnismäßig hoher Anteil auf die Kostengruppe 400, also die technischen Anlagen, wie PV-Anlage, Lüftungsanlage mit WRG und die Gebäudeautomation. Die Herstellungskosten der Sanierung nach EnEV machen hingegen nur 46 % der Gesamtkosten aus.

- Herstellungskosten Baukonstruktion
- Herstellungskosten Technische Anlagen
- Betriebskosten Wasser
- Betriebskosten Heizwärme und Warmwasser
- Betriebskosten Strom
- Inspektion und Wartung Baukonstruktion
- Inspektion und Wartung Technische Anlagen
- Instandsetzung Baukonstruktion
- Instandsetzung Technische Anlagen

LCC Sanierung energy+Home



LCC Sanierung ENEV

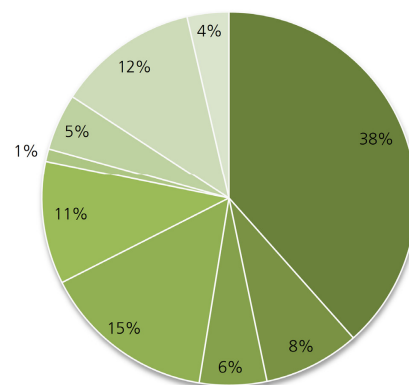


Abbildung 6.3: prozentuale Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten (LCC) der Sanierungsvarianten energy+Home und EnEV

Der Anteil der Erneuerungskosten (Instandsetzungs- und Instandhaltungskosten sowie Inspektion und Wartung) des energy+Home beträgt 23 % gegenüber 22 % bei einer Sanierung nach EnEV und ist damit vergleichbar.

Auf die Betriebskosten entfallen beim energy+Home jedoch lediglich 14 % der Gesamtkosten. Darin enthalten sind die Betriebskosten für Wasser, Heizwärme, Warmwasser und Strom. Bei der Sanierung nach EnEV beträgt der Anteil der Betriebskosten 32% der Gesamtkosten und liegt damit weit über dem Wert des energy+Home.

Prozentuale Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten und des Treibhauspotentials über 50 Jahre

In Abbildung 6.4 wird der Verlauf der Lebenszykluskosten der Sanierung zum energy+Home einer Sanierung nach EnEV und dem unsanierten Bestand gegenübergestellt. Die Kosten sind dabei in Prozent angegeben, wobei das energy+Home den Bezugswert mit 100% bildet.

Die Lebenszykluskosten des energy+Home liegen im Bezug zur EnEV-Variante nach 50 Jahren nahezu gleichauf, sind jedoch ca. 9 % niedriger als diejenigen des unsanierten Bestandes. Aufgrund der Erträge aus der PV-Anlage und niedrigerer Betriebskosten amortisieren sich die erhöhten Investitionskosten im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gegenüber der EnEV-Variante. Die leicht erhöhten Kosten für Wartung, Instandsetzung, Instandhaltung, welche als Prozentsatz der Investitionskosten berechnet werden und daher höher ausfallen als bei der EnEV-Variante, werden wieder ausgeglichen. Dies gilt auch für die Ersatzinvestitionen, also für die Neuanschaffung von Gebäudeteilen, deren Nutzungsdauer kleiner als 50 Jahre ist und daher im Betrachtungszeitraum ausgetauscht werden müssen.

Demgegenüber weist das energy+Home einen klaren ökologischen Vorteil auf. Während die Kostenkennwerte noch relativ nahe beieinander liegen, zeigt sich eine deutliche Differenz beim Emissionsverlauf der beiden betrachteten Sanierungsvarianten. In der Herstellungsphase weist das energy+Home ein dreifach größeres Treibhauspotential auf als die Sanierung nach EnEV², jedoch amortisieren sich diese Mehraufwendungen nach 17 Jahren. Am Ende des Betrachtungszeitraums übersteigen die Emissionen der EnEV Variante die des energy+Home um ca. 300 % bzw. 765 kg CO₂/m². Wie der Abbildung ebenfalls zu entnehmen ist amortisieren sich die Emissionen aus der Sanierung der EnEV Variante gegenüber dem unsanierten Bestand bereits nach 4 Jahren und diejenigen des energy+Home bereits nach 7 Jahren.

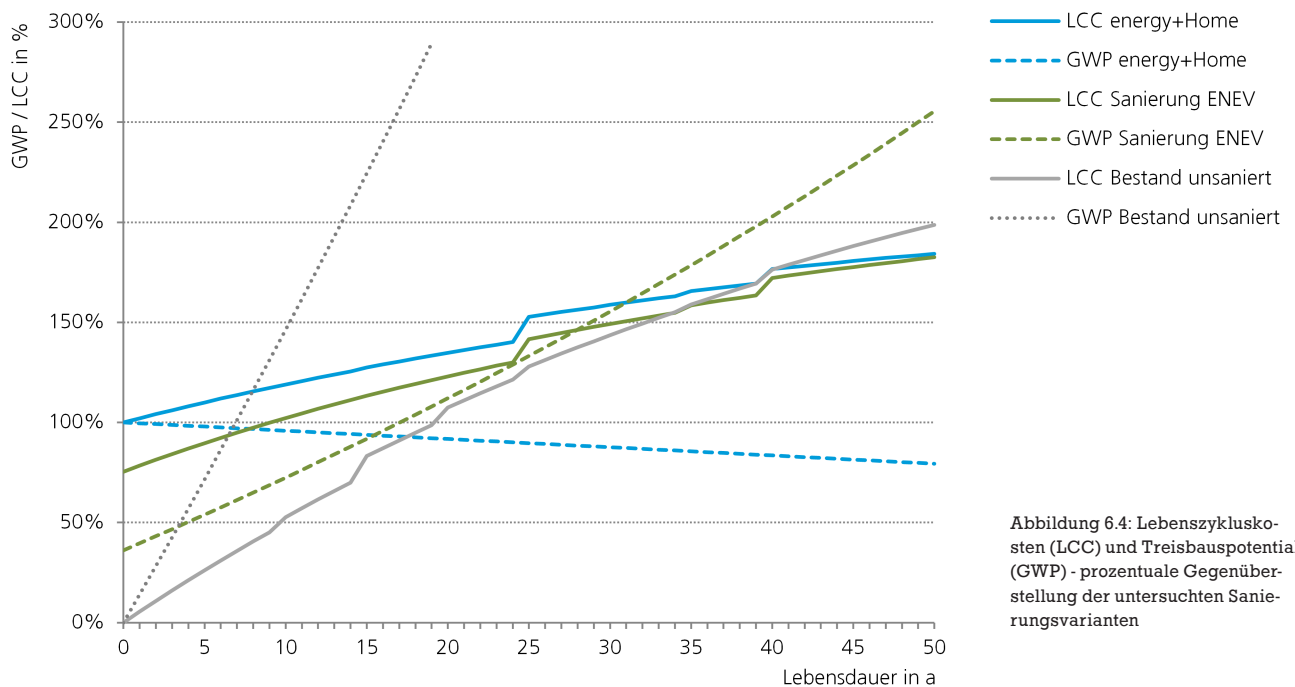


Abbildung 6.4: Lebenszykluskosten (LCC) und Treibhauspotential (GWP) - prozentuale Gegenüberstellung der untersuchten Sanierungsvarianten

2 Berechnung inkl. PV-Anlage.

Auch wenn sich die Sanierung zum energy+Home unter Berücksichtigung des Kopplungseffektes³ bereits heute als wirtschaftlich erweist ist sie dennoch teurer als eine Sanierung nach EnEV. Zukünftig dürfte sich das Ergebnis jedoch voraussichtlich zugunsten des energy+Home verbessern, wenn es gelingt den Eigennutzungsanteil der PV-Anlage zu erhöhen und wenn die eingesetzten innovativen Technologien im Preis sinken und deren Nutzungsdauer steigt. Der grosse Vorteil des energy+Home liegt in den CO₂-Einsparungen in der Nutzungsphase.

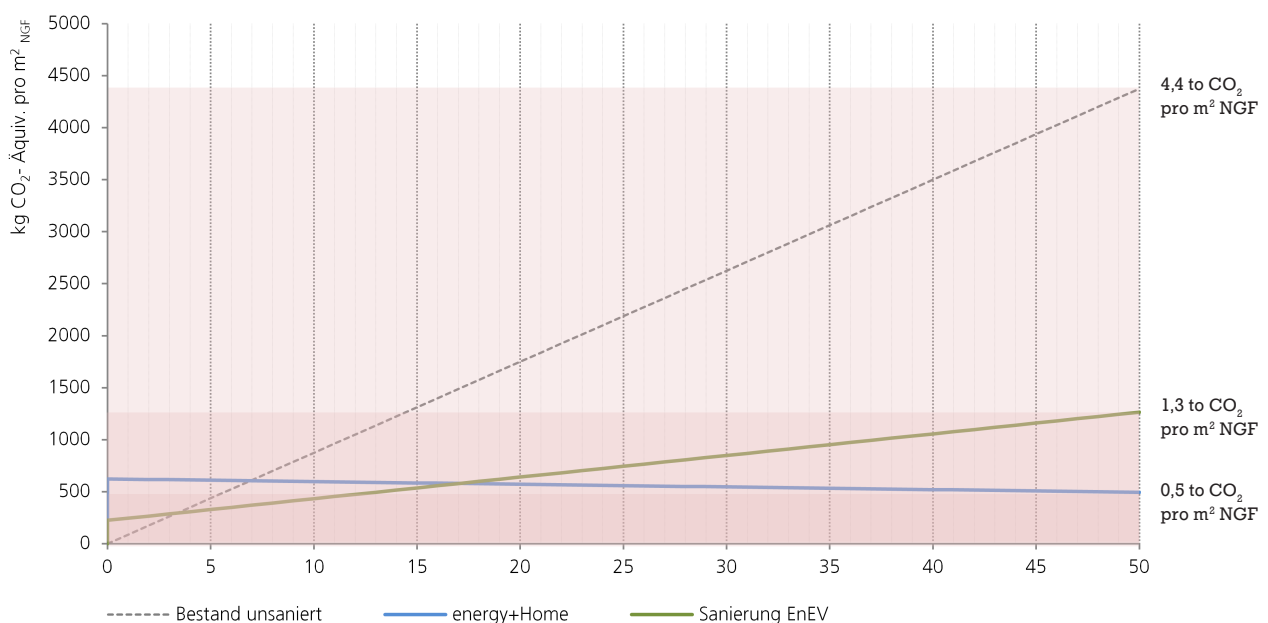
Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung sollte daher immer sowohl ökonomische wie ökologische Gesichtspunkte berücksichtigen und diese als Entscheidungsgrundlage ansetzen.

Absolute Gegenüberstellung des Treibhauspotentials über 50 Jahre

Abbildung 6.5 zeigt die CO₂ Emissionen des unsanierten Bestandes, der Sanierungsvariante EnEV und des energy+Home über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Aufgrund des regenerativ erzeugten Stroms der PV-Anlage, welcher in der Betrachtung als Gutschrift angerechnet wird, sinkt der CO₂-Ausstoß des energy+Home über den Betrachtungszeitraum. Der Ertrag ist jedoch nicht so groß, das die durch die Herstellung erzeugten Treibhausgase komplett abgebaut werden können. Man kann daher zwar von einem CO₂-neutralen Gebäude im Betrieb sprechen, auf den gesamten Lebenszyklus betrachtet emittiert es jedoch ca. 495 kg CO₂/m²_{NGF}. Die erhöhten Treibhausgasemissionen im Herstellungsprozess werden gegenüber der EnEV-Variante nach 17 Jahren amortisiert. Diese Variante hat aufgrund des größeren Heizenergieverbrauchs eine steigende Emissionskurve, welche nach 50 Jahren ca. 1.300 kg CO₂/m²_{NGF} aufweist. Den weitaus größeren Verbrauch hat jedoch der unsanierte Bestand, welcher im Laufe von 50 Jahren ca. 4.400 kg CO₂/m²_{NGF} verbraucht.

Abbildung 6.5: Treibhauspotential (GWP) - absolute Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten energy+Home und EnEV



3 Energetische Sanierung bei sowieso anstehenden Instandsetzungsmaßnahmen.

Bereits nach 4 bzw. 7 Jahren amortisieren sich die Emissionen, welche durch die Sanierung des Gebäudes erzeugt werden. Geht man von ca. 3,5 Mio ölbeheizten Einfamilienhäusern aus, welche eine vergleichbare Qualität wie das energy+Home vor der Sanierung aufweisen, und einer Sanierungsquote von 2 %, so ergibt sich ein jährliches Einsparungspotential von 273.000 t CO₂ pro Jahr.

Bei der Auseinandersetzung mit dem Gebäudebestand muss man sich kritisch mit der Frage auseinandersetzen, ob denn nicht Abriss und Neubau die ökonomisch und ökologisch richtigere Entscheidung ist, mit einem Großteil der Altbaubestände umzugehen. Diese Frage muss auch das energy+Home für sich kritisch beantworten. Die Chance ist, dass das Wohngebäude nicht nur eine Funktion erfüllt, sondern für sich einen Wert darstellt und die Sanierung nicht nur ein Experiment als Selbstzweck darstellt, sondern auch eine Haltung und Idee repräsentiert. Die Verwertung vorhandener Bausubstanz und die Verwertung rückgebauter Baustoffe und Materialien kann ebenfalls ein Beitrag zur Nachhaltigkeit und Entlastung des Klimas sein. Energieeinsparungen im Gebäudebestand sind ökologisch und ökonomisch unverzichtbar und eine Grundvoraussetzung, aber kein ausreichender Indikator für Wohn- und Lebensqualität. Jede Sanierung und Modernisierung muss sich daher in der Architektur, der Behaglichkeit, der Energieeffizienz, der Funktionalität und dem Nutzerkomfort mit einem Neubau messen lassen können. Der sinnvolle Umgang mit der vorhandenen grauen Energie des Gebäudebestandes kann dabei zudem als Chance zur Ressourcenschonung genutzt werden.

7 Energetische Untersuchung und Monitoring

7.1 Einleitung

Das energy+Home wurde in das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (ehemals Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, BMVBS) geförderte Programm zur messtechnischen Begleitung von Plusenergiegebäuden im Rahmen des Programms ZukunftBau aufgenommen, welches sich mit der Messung der energetischen Effizienz der eingesetzten Techniken befasst.

Im energy+Home sind daher Messsensoren zur Erfassung der erzeugten und verbrauchten Energiemengen getrennt nach verschiedenen Anwendungen installiert. Die Sensoren erfassen das Innen- und Außenklima, die Energieströme zu und von den Geräten zur Wärmeerzeugung und -speicherung, den Stromverbrauch getrennt nach unterschiedlichen Nutzungen (Waschen, Kochen, Beleuchtung, etc.), sowie die selbst erzeugten Strommengen (Eigennutzung und Netzeinspeisung). Die Werte werden über einen Zeitraum von 2 Jahren gemessen und gespeichert. Das Monitoring orientiert sich dabei am „Leitfaden für das Monitoring“ gemäß Bekanntmachung des BMVBS über die Vergabe von Zuwendungen für Modellprojekte „Plus-Energie-Haus-Standard“. Überdies werden einige detailliertere Messungen durchgeführt, unter anderem die Belastung des Innenraumes durch flüchtige organische Verbindungen (VOC). Als Beleg der energetischen Wirksamkeit der Sanierung und zur Beurteilung der getroffenen Maßnahmen werden im Folgenden lediglich solche Messdaten aus dem Jahr 2014 ausgewertet, welche die energetische Qualität des Gebäudes belegen.

Die Messung und Dokumentation des realen Gebäudebetriebs soll die im Vorfeld getätigten Berechnungen und Prognosen der energetischen Verbesserung durch Modernisierungsmaßnahmen bestätigen.

7.2 Ermittelte Messdaten

Mithilfe der Messtechnik TeBIS werden seit dem 01.01.2014 über einen Zeitraum von 2 Jahren die folgenden Messdaten ermittelt:

Klimadaten/Wetterstation

- Globalstrahlung auf horizontale Fläche
- Globalstrahlung auf senkrecht ausgerichtete Fläche in Richtung Süd
- Außenlufttemperatur
- Relative Luftfeuchtigkeit

Klimakenngrößen im Gebäude

- Schadstoffbelastung VOC und CO₂
- Raumlufttemperaturen in Küche, Wohnzimmer, Schlafzimmer, WC, Bad, HWR

Stromverbrauch und Stromerzeugung

- Menge des erzeugten Stroms
- Menge des in das öffentliche Stromnetz eingespeisten Stroms
- Menge des selbst genutzten Stroms
- Menge des aus dem öffentlichen Stromnetz bezogenen Stroms

Wärmeerzeugung und Wärmespeicherung

- Stromverbrauch Wärmepumpe
- Wärmeabgabe der Wärmepumpe an den Warmwasserspeicher mittels zwei Ultraschall-Wärmemengenzählern (Je Rücklauf 1 Zähler)
- Elektrische Energie des Zusatzheizstabs

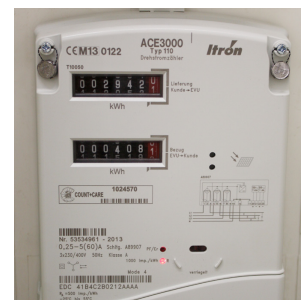


Abbildung 7.1: Messgerät zur Erfassung der Strommengen
Foto: TUD, FG twe

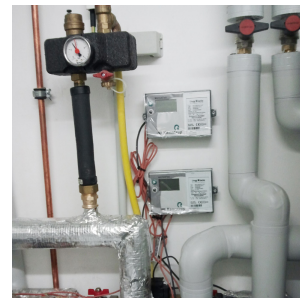


Abbildung 7.2: Messgerät zur Erfassung der Wärmeabgabe der Wärmepumpe an den Warmwasserspeicher
Foto: TUD, FG twe



Abbildung 7.3: Messgerät zur Erfassung des Trinkwasserverbrauchs und der Zirkulationswärmeverluste
Foto: TUD, FG twe

-
- Wärmeabgabe an Heizsystem (Fußbodenheizung) mittels Ultraschall-Wärmemengenzählers
 - Wärmeabgabe Trinkwarmwasser mittels Wasserzähler und zwei Temperatursensoren in Kaltwasserzulauf und Warmwasserabgabe

Hilfsenergien und Effizienz der Wärmerückgewinnung

- Stromverbrauch für Heizungspumpen
- Stromverbrauch der Lüftungsanlage
- Frischlufttemperatur
- Zulufttemperatur
- Ablufttemperatur
- Fortlufttemperatur

Sonstige Energieverbraucher

- Beleuchtungsstromverbrauch
- Küche: Spülmaschine, Backofen/Kochfeld, Kühlschrank, Wasserarmatur „Grohe Red“ (Erzeugt kochendes Wasser)
- Haushaltsraum: Trockner, Waschmaschine
- Stromverbrauch aller Steckdosen
- Stromverbrauch des BUS-Systems

7.3 Gegenüberstellung der prognostizierten und gemessenen Daten

7.3.1 Stromverbrauch und Stromerzeugung

Im Vorfeld der Sanierungsmaßnahmen wurde der Energiebedarf nach dem „Monatsbilanzverfahren“ der DIN V 4108-6:2003-06 und der Energiebedarf der Anlagentechnik nach DIN V 4701-10:2003-08 ermittelt. Um den Anforderungen des Programms ZukunftBau gerecht zu werden, wurde als Grundlage der Betrachtung zudem der Endenergiebedarf nach DIN V 18599:2007-02 ermittelt. Aus dieser Berechnung gehen die prognostizierten Energiebedarfskennwerte hervor.

Der gemessene Stromertrag der PV-Anlage übertrifft die Erwartungen, welche im Vorfeld der Sanierung an die Anlage gestellt wurden um 3 %. Dies geht mit der Tatsache einher, daß Photovoltaikanlagen generell in den ersten Jahren eine höhere Leistung erbringen als nach einigen Jahren Betriebszeit. Dies wurde im Berechnungsverfahren der DIN V 18599 bereits berücksichtigt, so dass die Prognosewerte in den ersten Betriebsjahren in der Regel unter den Messwerten liegen.

Der Eigenverbrauchsanteil des erzeugten Stroms liegt bei 22 % und entspricht damit in etwa dem prognostizierten Wert. Ursache für den niedrigen Eigenverbrauchsanteil ist die Erzeugung von Solarstrom zu Zeiten, an denen der Verbrauch relativ gering ist. So wird in den Sommermonaten der Großteil der Energie erzeugt, wohingegen der Energiebedarf im Winter am größten ist. Ein Stromspeicher zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs ist im Gebäude nicht integriert und im Betrachtungszeitraum wurde auch kein Elektromobil mit dem selbst erzeugten Strom betrieben.

Dem Stromertrag gegenüber steht ein Gesamtenergiebedarf, welcher ca. 14 % höher ist als die prognostizierten Werte. Hauptursache für den erhöhten Bedarf ist der Heizenergiebedarf, welcher ca. 22 % über dem prognostizierten Wert liegt und sich auch in erhöhten Raumtemperaturen niederschlägt (siehe Kapitel 7.3.5).

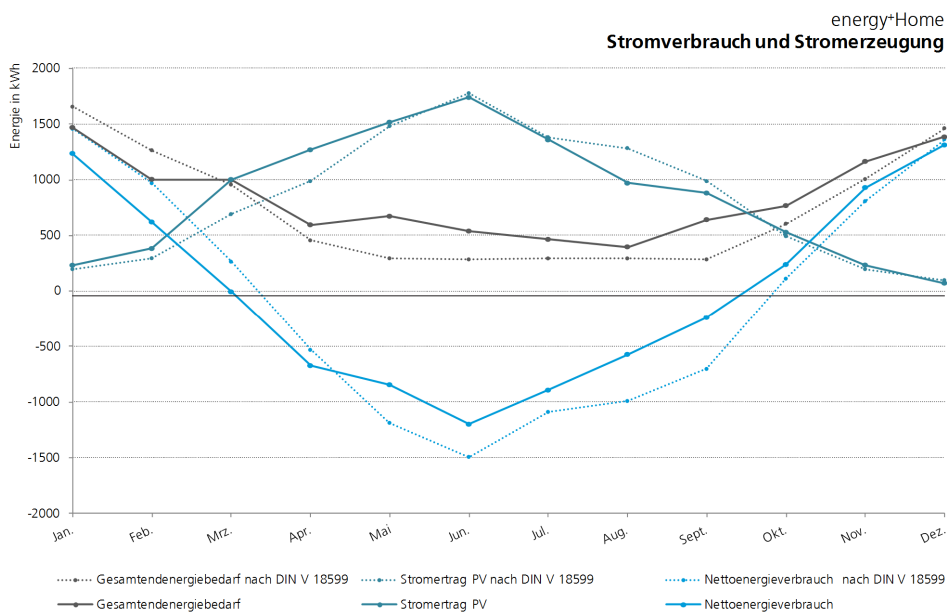


Abbildung 7.4: prognostizierter und gemessener Stromverbrauch und -ertrag des energy+Home im Jahr 2014

[kWh]		Total	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	
Stromertrag PV	Prognose	9.881	198,0	296,0	692,0	988,0	1.482,0	1.778,0	1.383,0	1.285,0	988,0	494,0	198,0	99,0	
	Messung	10.190	232,8	384,1	1.002,8	1.269,4	1.517,3	1.739,3	1.358,4	970,0	881,1	529,1	234,5	72,2	
Netzeinspeisung	Prognose	7.567	0,0	0,0	52,0	840,0	1.392,0	1.691,0	1.293,0	1.196,0	901,0	202,0	0,0	0,0	
	Messung	7.975	122,9	257,6	797,7	1.058,6	1.256,5	1.459,2	1.108,9	786,0	653,4	341,4	116,9	16,3	
Eigenverbrauch	Prognose	2.314	198,0	296,0	640,0	148,0	90,0	87,0	90,0	89,0	87,0	292,0	198,0	99,0	
	Anteil	Prognose	23%	100%	100%	92%	15%	6%	5%	7%	7%	9%	59%	100%	100%
	Messung	2.208	109,9	126,5	205,1	210,7	260,9	280,0	246,1	179,9	227,7	187,8	117,6	56,0	
	Anteil	Messung	22%	47%	33%	20%	17%	17%	16%	18%	19%	26%	35%	50%	77%
Netzstrombezug	Prognose	6.553	1.458,3	969,8	317,3	308,5	205,3	198,5	204,3	205,3	198,5	314,3	808,5	1.364,3	
	Messung	7.871	1.360,2	873,5	766,0	385,5	411,9	259,8	219,2	217,3	414,7	580,7	1.047,6	1.328,9	
Gesamtendenergiebedarf	Prognose	8.867	1.656,3	1.265,8	957,3	456,5	295,3	285,5	294,3	294,3	285,5	606,4	1.006,5	1.463,4	
	Messung	10.104	1.469,8	999,4	996,7	596,3	672,8	539,8	465,3	398,1	642,5	768,4	1.165,2	1.384,9	
Nettoenergieverbrauch	Prognose	-1.014	1.458,3	969,8	265,3	-531,5	-1.186,7	-1.492,5	-1.088,7	-990,7	-702,5	112,4	808,5	1.364,4	
	Messung	-86	1.237,0	615,3	-6,1	-673,1	-844,6	-1.199,5	-893,1	-571,9	-238,7	239,3	930,7	1.312,6	

Tabelle 7.7: Prognostizierte und gemessene Stromerzeugung und -verbrauch

Durch die Aufsummierung von Stromertrag und Gesamtenergiebedarf lässt sich der Nettoenergieverbrauch ermitteln, welcher in der Jahressumme trotz dem erhöhten Bedarf einen negativen Wert aufweist und damit den Plusenergiestandard des energy+Home belegt.

7.3.2 Wärmeerzeugung und Wärmespeicherung

Die im Rahmen des Monitorings gemessenen Werte für die Heizungsnutzwärme überschreiten im Jahresmittel den prognostizierten Wert um 22 %, aufgrund der Innenraum-Temperaturregelung der Nutzer. Demgegenüber unterschreitet der Endenergiebedarf für Warmwasser die Prognosewerte um 40 %. Der Grund hierfür liegt in der Annahme, das Haus würde von einer vierköpfigen Familie bewohnt werden. Da das Haus jedoch im Jahr 2014 nur von zwei Personen bewohnt wurde, die zudem sehr sparsam mit warmen Wasser umgehen, sind die Werte entsprechend geringer. In Summe entspricht der Stromverbrauch für Heizung und Warmwasser dem prognostizierten Bedarf.

[kWh]		Total	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Stromverbrauch Wärmeerzeuger	Prognose	5.293	1.243,11	910,08	596,55	152,76	82,78	79,67	81,96	81,91	79,88	272,22	649,12	1.063,05
	Messung	5.298	1.111,9	653,3	557,5	217,3	257,7	119,5	87,1	72,8	202,9	309,6	739,2	964,9
Wärmepumpe	Messung	4.976	1.025,6	618,8	526,8	208,5	248,8	114,0	82,4	68,3	196,6	300,7	708,3	873,6
Zusatzheizstab	Messung	321	86,3	34,4	30,7	8,8	8,9	5,5	4,7	4,5	6,3	8,9	30,9	91,3
Endenergie Heizung	Prognose	3.410	971,8	680,5	375,7	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	115,1	441,4	815,3
	Messung	4.148	829,6	616,7	458,8	140,0	169,0	28,7	0,0	10,7	126,3	221,2	664,4	882,6
Endenergie Warmwasser	Prognose	1.883	271,3	229,6	220,8	142,8	82,8	79,7	82,0	81,9	79,9	157,1	207,8	247,7
	Messung	1.145	251,3	67,3	98,7	77,3	88,7	90,9	87,1	62,1	76,6	88,4	74,8	82,2
Wärmeerzeugung Wärmepumpe	Messung	11.689	0,0	1.847,0	1.604,0	655,0	715,0	263,0	156,0	183,0	559,0	939,0	2.244,0	2.511,0
Heizungsnutz- wärme	Prognose	10.725	2.797,6	2.036,1	1.323,7	42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	478,7	1.563,6	2.483,5
	Nutzenergie	Prognose	9.024	2.368,4	1.717,4	1.103,7	33,5	0,0	0,0	0,0	0,0	386,0	1.313,5	2.101,4
	Verteilung	Prognose	909	221,3	167,9	123,1	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	58,7	134,8	197,5
	Übergabe	Prognose	792	208,0	150,8	96,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	33,9	115,3	184,5
Heizungsnutz- wärme	Messung	11.689	2.377,5	1.677,0	1.320,0	422,0	469,0	63,0	0,0	27,0	348,0	671,0	2.017,0	2.297,0
Brauchwasser- nutzwärme	Prognose	2.814	239,0	215,9	239,0	231,3	239,0	231,3	239,0	239,0	231,3	239,0	231,3	239,0
	Messung	364	48,8	42,8	35,2	21,2	25,0	18,7	17,9	7,5	23,5	82,2	18,1	23,4

Tabelle 7.8: Prognostizierte und gemessene Wärmeerzeugung und -speicherung des energy+Home im Jahr 2014

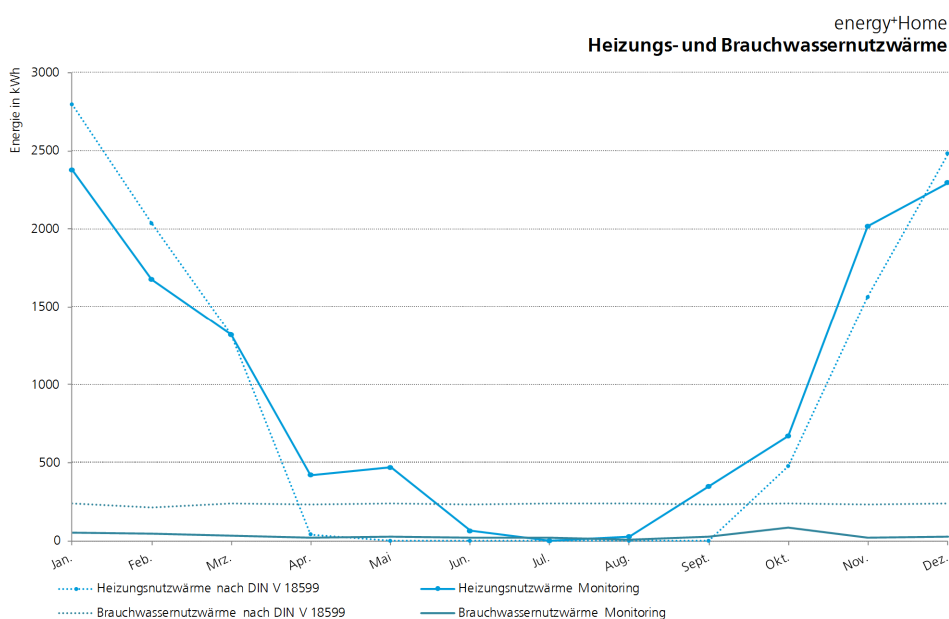


Abbildung 7.5: prognostizierter und gemessener Heiz- und Brauchwassernutzwärmeverbrauch des energy+Home im Jahr 2014

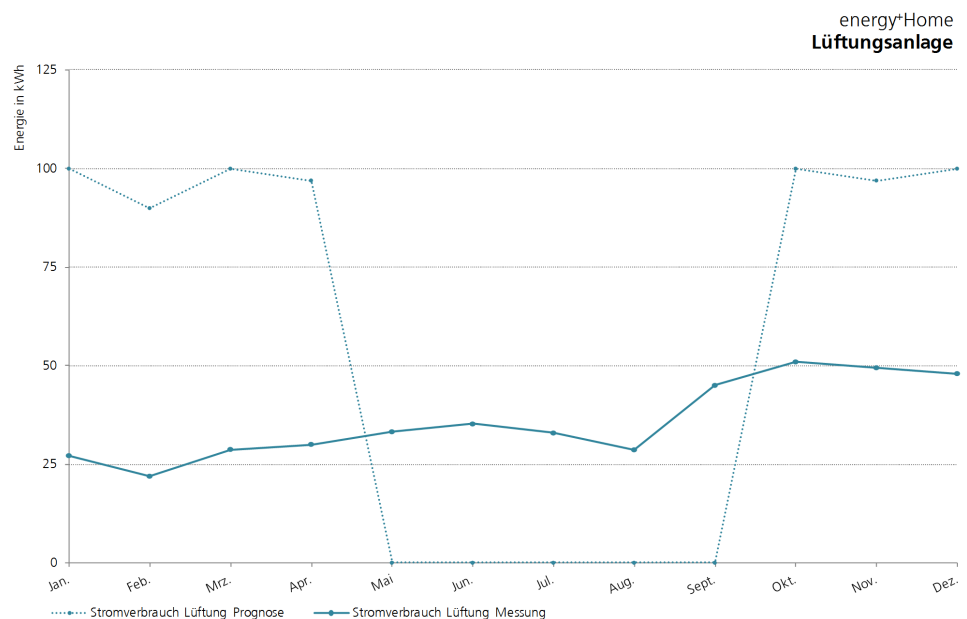
7.3.3 Hilfsenergien und Effizienz der Wärmerückgewinnung

[kWh]		Total	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Stromverbrauch Heizungspumpe	Prognose	391	101,2	73,4	48,8	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,3	55,4	88,1
	Erzeuger	Prognose	201	56,6	39,4	23,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	26,8	47,5
	Übergabe	Prognose	190	44,6	34,0	25,8	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	15,1	28,6	40,6
Stromverbrauch Lüftungsanlage	Prognose	684	100,0	90,0	100,0	97,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	97,0	100,0
	Messung	431	27,1	22,0	28,7	30,0	33,2	35,2	32,9	28,6	44,9	50,9	49,4	47,9
Volumenstrom	Messung		-	99.615	126.915	123.100	127.320	123.500	111.235	101.550,0	124.000,0	128.325,0	123.900,0	126.320,0
Temp. Frischluft	Messung		5,3	6,8	9,0	13,3	14,4	18,4	20,5	15,7	16,0	13,2	7,9	4,7
Temp. Zuluft [°C]	Messung		11,2	12,2	13,8	17,3	18,5	22,2	23,9	19,3	21,4	20,2	17,4	15,3
Temp. Abluft [°C]	Messung		18,7	19,0	19,8	21,8	23,0	25,7	26,8	22,8	23,7	22,5	21,5	20,3
Temp.Fortluft [°C]	Messung		9,1	10,5	12,6	16,6	17,7	21,7	23,7	18,7	18,5	15,5	10,9	8,2
Summe Hilfsenergie (Lüftung+WP)	Messung	681	27,1	37,9	52,2	53,4	58,7	60,1	55,1	48,4	70,3	75,6	71,4	71,2

Tabelle 7.9: Prognostizierte und gemessene Hilfsenergien

Die Lüftungsanlage arbeitet, auf den Jahresstromverbrauch bezogen effizienter als dies im Berechnungsprogramm prognostiziert wurde. Dies liegt nicht an der Belegungsdichte des Gebäudes, da der Stromverbrauch der Lüftungsanlage unabhängig von der Anzahl der Bewohner ist. Er ist nur vom Luftvolumenstrom, der Betriebsdauer und eventuell dem veränderlichen Widerstand der Luftfilter (dieser wird größer wenn er mit Staub zugesetzt ist) abhängig. Der eingestellte Luftvolumenstrom ist geringer als die Standardvorgabe im Berechnungsprogramm. Dieses sieht außerhalb der Heizperiode eine Abschaltung der Lüftungsanlage vor, allerdings steht dann im Haus auch keine gefilterte Luft zur Verfügung, und dies ist im Betrieb des energy+Home auch nicht durchgeführt. Üblicherweise sollte die Anlage im Sommer eine Bypass-Regelung fahren, so dass der Wärmetauscher überbrückt

Abbildung 7.6: prognostizierter und gemessener Stromverbrauch der Lüftungsanlage des energy+Home im Jahr 2014



wird. Damit wäre dann auch der Strombedarf noch etwas geringer. Ein verminderter CO₂ oder VOC-Gehalt der Innenraumluft konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch sind diese Werte in den frühen Morgen- und späten Abendstunden erhöht, was durch eine Feinjustierung der Einstellungen für Tag- und Nachtbetrieb korrigiert werden könnte. Auffällig ist ebenfalls, dass der Stromverbrauch im Betrachtungszeitraum ansteigt. Dies ist auf Verschmutzungen in den Filtern und Rohrleitungen zurückzuführen.

7.3.4 Sonstige Energieverbraucher

[kWh]		Total	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Energieverbrauch Strom	Prognose	2.500	212,3	191,8	212,3	205,5	212,3	205,5	212,3	212,3	205,5	212,3	205,5	212,3
	Messung	1.881	173,2	140,0	173,2	144,8	163,6	169,8	149,9	148,2	164,3	173,5	139,4	141,4
Beleuchtung	Messung	269	17,9	19,5	18,0	18,5	12,3	11,8	15,4	61,0	23,2	24,6	11,4	11,1
Küchen- und Haushaltsgeräte	Messung	1.299	122,1	87,6	115,2	99,6	117,5	139,5	108,8	71,3	110,0	121,7	103,3	105,5
Haushaltsstrom (Steckdosen)	Messung	313	33,2	21,6	31,3	22,5	28,0	27,6	24,7	16,0	31,1	27,2	24,6	24,8
BUS-System	Messung	591	0,0	44,4	57,1	55,5	57,2	55,4	49,9	45,9	55,4	57,3	55,5	57,3

Der gemessene Stromverbrauch für Beleuchtung, Küchen- und Haushaltsgeräten und Steckdosen liegt etwa 23 % unter der Prognose nach DIN V 18599 und ist mit der geringen Belegungsdichte des Gebäudes zu erklären. Das BUS-System wurde bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt, da es in erster Linie ein Mittel zur Erhöhung des Wohnkomforts und zu Forschungszwecken eingebaut und für die Funktionstüchtigkeit des energy*Home Konzeptes nicht zwingend notwendig ist.

Tabelle 7.10: Prognostizierte und gemessene Energieverbrauch sonstiger Verbraucher

Der größte Anteil (56%) am Gesamt-Haushaltsstromverbrauch wird durch Kochen (Herd, Backofen, Dampfgarer, Grohe Red, Steckdosen Küche) sowie Haushaltsgeräte (Spülmaschine, Waschmaschine, Trockner, Kühlschränke, Gefrierschränke) verursacht. Das BUS-System verbraucht 23% des Strombedarfs, die Steckdosen 13% und die Beleuchtung lediglich 8%.

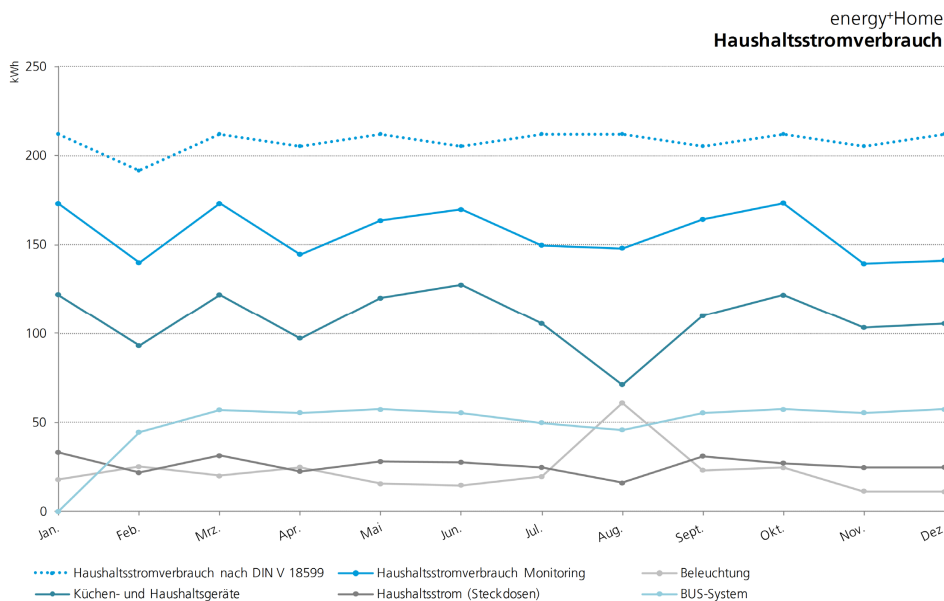


Abbildung 7.7: prognostizierter und gemessener Haushaltsstromverbrauch des energy*Home gesamt und getrennt nach Stromverbraucher

7.3.5 Heizverhalten

Die Innenraumtemperaturen wurden stündlich gemessen und raumweise auf einen Monatswert gemittelt. Dabei ist auffällig, daß sämtliche Monatswerte über der Raum-Solltemperatur von 20°C nach DIN V 18599-10:2011-12 liegen. Dies ist auf das persönliche Wärmeempfinden der Nutzer zurückzuführen und lässt vermuten, dass der Effekt eines niedrigeren Wärmebedarfs aufgrund des hohen Dämmstandards und der leicht überdurchschnittlichen Außentemperaturen im vorliegenden Messjahr durch das insuffiziente Nutzerverhalten wieder ausgeglichen wird.

Die im Obergeschoss gemessenen Innenraumtemperaturen sind im Durchschnitt 1-2 °C höher als die Temperaturen im Untergeschoss. Der Grund hierfür dürfte zum Einen in der unterschiedlichen Nutzung, zum Anderen an den solaren Gewinnen durch die Dachflächenfenster liegen. Diese sollten optimalerweise im Sommer nachts wieder über die Dachflächenfenster abgeführt werden, was im Betrieb jedoch nicht oder nur ungenügend durchgeführt wird.

Tabelle 7.11: Prognostizierte und gemessene monatliche Innenraumtemperaturen in °C im Jahr 2014

[°C]		Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Innenraumtemp.	Prognose	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
EG Wohnzimmer	Messung	24,4	23,5	23,9	23,6	24,7	26,4	27,3	24,7	24,7	27,3	24,3	23,1
EG Küche	Messung	24,2	23,9	23,6	23,5	24,4	26,1	27,1	24,5	24,6	27,1	23,9	22,8
EG WC	Messung	24,3	24,4	22,6	24,3	24,2	25,6	26,6	25,3	24,6	26,6	22,9	22,1
EG HWR	Messung	24,8	24,4	24,4	24,7	25,3	27,2	27,9	26,1	25,4	27,9	24,0	23,3
UG Eltern	Messung	21,2	21,5	21,1	21,5	22,1	24,2	24,9	23,5	23,0	24,9	22,3	21,9
UG Bad	Messung	24,2	24,1	24,3	23,6	23,2	24,2	25,0	24,4	24,4	25,0	24,8	24,0
UG Kind 1	Messung	22,2	22,6	23,3	23,3	24,0	24,5	25,3	23,5	23,6	25,3	23,3	22,5
UG Kind 2	Messung	20,9	21,3	20,6	20,7	21,7	23,5	24,0	22,7	22,9	24,0	21,0	21,8
UG Arbeitszimmer	Messung	21,6	21,3	21,9	23,0	23,6	25,1	26,0	24,3	23,7	26,0	20,9	19,6

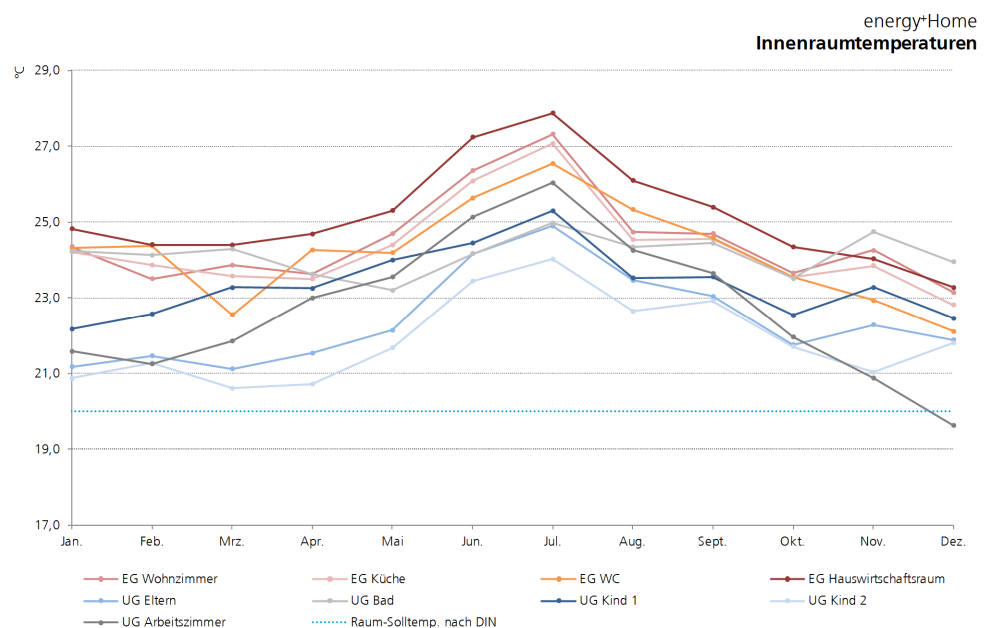


Abbildung 7.8: gemessene Innenraumtemperaturen im energy+Home in 2014

8 Prüfung der Übertragbarkeit auf einen exemplarischen Geschosswohnungsbau

8.1 Einleitung

Auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln durchgeführten analytischen Betrachtungen wird im Folgenden untersucht, wie sich das Konzept des energy+Home auch auf die Sanierung eines exemplarischen Geschosswohnungsbaus übertragen lässt und durch welche Parameter die Konzeption bzw. die Energiebilanz der Geschosswohnungsbausanierung gegenüber der Einfamilienhaussanierung beeinflusst wird. Da sich eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Energiebilanz eines Gebäudes auswirken, und je nach Gebäudetyp zu unterschiedlichen Ergebnissen führt, konzentriert sich die Untersuchung auf freistehende Zeilenbauten der 50er Jahre in Deutschland und wird anhand eines bestehenden Referenzgebäudes mit Baujahr 1956 durchgeführt.

Einige Faktoren, welche den Energiebedarf und -ertrag von Plusenergiegebäuden beeinflussen, lassen sich beim Bauen im Bestand nicht oder nur bedingt beeinflussen. So ist beispielsweise die energetische Qualität der Gebäudehülle oder der Fensterflächenanteil beeinflussbar, die Kubatur, Wohndichte oder Energiebezugsfläche jedoch nicht bzw. nur bedingt. Auf Seiten des Ertrages lässt sich der Wirkungsgrad der PV-Anlage steuern, die Dachneigung, solaraktiv nutzbare Hüllfläche und der Verschattungsgrad jedoch nur bedingt und die Ausrichtung des bestehenden Gebäudes und dessen Standort (und damit die solare Strahlungsstärke) nicht. Dies führt im Gegensatz zum Neubau eines Plusenergiegebäudes dazu, dass nicht jedes Gebäude gleichermaßen zum Plusenergiegebäude saniert werden kann. Beispielsweise wird ein Gebäude an einem Standort mit mäßigem solaren Strahlungsangebot größere solaraktive Hüllflächen benötigen oder seinen Energieertrag mit anderen Technologien erwirtschaften müssen, als ein Gebäude in einer sonnenreichen Gegend.

Dass eine solche Sanierung grundsätzlich möglich ist, wurde im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBau anhand eines Modellvorhabens in Neu-Ulm nachgewiesen. Bei diesem Projekt wurden zwei Gebäudezeilen aus den 50er Jahren in Plusenergiegebäude umgewandelt.¹

Im Folgenden wird zunächst das Referenzgebäude vorgestellt, anhand dessen die Übertragbarkeit des energy+Home Konzeptes auf Geschosswohnungsbau-Zeilen der 50er Jahre geprüft werden soll und im Anschluss der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Plusenergie-Bilanz geprüft, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob sich der untersuchte Gebäudetyp für die Übertragung des Konzeptes eignet.

1 Vgl. <http://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/modellvorhaben/wettbewerb/> [03.07.2015]

8.2 Die Fritz-Dächert-Siedlung in Darmstadt Eberstadt: Gebäudetypologisch repräsentative Bestandsgebäude

Als Referenzgebäude zur Übertragung des energy+Home Konzeptes dient ein Mehrfamilienhaus in der „Fritz-Dächert Siedlung“ in Darmstadt-Eberstadt. Die betrachteten Liegenschaft fügt sich in ein reines Wohngebiet am Rande des Stadtteils Darmstadt-Eberstadt ein. Das Wohnumfeld zeichnet sich durch seine ruhige Lage und ausreichendem Abstand zur Nachbarbebauung aus.

Das 1956 errichtete Wohngebäude beherbergt zwölf 1 bis 3-Zimmer Mietwohnungen, welche nicht barrierefrei bzw. barrierearm erschlossen sind. Der ursprüngliche Zustand der Wohnungen in der Aufteilung von jeweils 2 Zimmern wurde teilweise schon durchbrochen und die Aufteilung in 1-Zimmer und 3-Zimmerwohnungen realisiert.

Die „wärmetechnische Beschaffenheit“ mit einem im Energieausweis ausgewiesenen Primärenergiebedarf von 277 kWh/(m²a) des Gebäudes sind für die heutigen Erwartungen als unzureichend zu bewerten. Die Anlagentechnik wurde zuletzt im Jahre 1991 durch den Einbau eines Gas-Brennwertkessels modernisiert.

Das Gebäude bedarf der umfassenden Fassadensanierung, da diese deutliche Abnutzungsspuren und Schäden aufweist. Insgesamt ist die Fassade als nicht zeitgemäß und wenig attraktiv einzustufen. Die ungepflegten und teilweise defekten Fensterläden verstärken diesen Eindruck. Zudem sind die massiven Außenwände, ebenso wie die Kellerdecke, nicht gedämmt. Ein neuer Bodenbelag sowie neue Einbautüren sind für die adäquate Kellernutzung von Nöten. Keine der bestehenden Wohnungen verfügt über einen Balkon oder eine Terrasse. Die Kunststofffenster sind zweifach verglast und müssen zur Erreichung des EnEV-Standards nicht zwingend erneuert werden. Allerdings müssen im Falle einer Balkonergänzung einige Fenster zu Durchgangstüren erweitert bzw. zur Erhöhung des Fensterflächenanteils vergrößert und zur Erzielung des Plusenergieniveaus durch eine Dreifachverglasung ersetzt werden.

Die großzügigen Grünanlagen vor und hinter den Wohnbauten sind zwar ungepflegt, garantieren jedoch, dass die Fassaden nicht durch Nachbarbauten verschattet werden. Sie bergen



Abbildung 8.1: Fritz-Dächert-Weg,
Ostfassade Foto: TUD, FG twe

ein hohes Nutzungspotential für Mieterparkplätze, Kleingärten und Kinderspielplätze.

Die derzeitige Kaltmiete der vermieteten Einheiten liegt zwischen 4,97 €/m²/Mo und 6,82€/m² /Mo. Die aktuellen Mietpreise liegen somit deutlich unter der ortsüblichen Vergleichsmiete von ca. 7,50 €/m², ein wirtschaftlicher Anreiz zur Modernisierung ist damit gegeben. Aus wohnungswirtschaftlicher und energietechnischer Sicht besteht ein erhöhter Modernisierungs- und Sanierungsbedarf.

8.2.1 Bestandsaufnahme und Grundlagenermittlung

Anhand der bestehenden Siedlung im Fritz-Dächert-Weg werden zunächst die wesentlichen Merkmale typischer Geschoßwohnungsbauten der 50er Jahre ermittelt. Dazu werden im Folgenden zunächst die wichtigsten Gebäudekennwerte dargestellt, der bauliche Zustand des Gebäudes beschrieben sowie die Ergebnisse der durchgeführten Thermografieaufnahmen sowie U-Wert-Messung dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden anschliessend mit bekannten Angaben aus der Literatur zu Gebäuden der entsprechenden Baualtersklasse verglichen, um eine Aussage über die Repräsentationsfähigkeit des Fritz-Dächert-Weges 56-58 zu erhalten. Im Anschluss daran wird untersucht, inwiefern die typischen Gebäudekubaturen, Baukonstruktionen und technische Gebäudeausstattungen für die Überführung in ein Plusenergiegebäude geeignet sind.

8.2.2 Gebäudedaten und baulicher Zustand

Gebäudetyp	MFH	Vollgeschosse	3
Wohneinheiten	12	beheizte Wohnfläche	603,4 m ²
Gebäudenutzfläche nach EnEV ($A_N = 0,32 \cdot V_e$)	701,6 m ²	beheiztes Gebäudevolumen V_e	2.192,5 m ³
Wärmeübertragende Umfassungsfläche	1.295,3 m ²		



Abbildung 8.2: Fritz-Dächert-Weg, Westfassade Foto: TUD, FG twe

Gebäudevolumen	2.505 m ³
A/V Verhältnis	0,52
Bauweise	Massivbauweise, Satteldach mit 45° Neigung nach Ost/West
Baulicher Zustand allgemein	Die Gebäude befinden sich in einem mangelhaften Zustand. Die ungedämmte Fassade weist Schäden auf, die Fensterläden sind größtenteils defekt, die Bauteiloberflächen im Inneren sind abgenutzt. Der Wärme- und Schallschutz sind ungenügend.
Außenwände	Die Außenwände sind massiv mit 24cm Bimshohlblocksteinen gemauert, beidseitig verputzt, ohne Wärmedämmung
Fenster	Die Fenster wurden im Jahr 1987 ausgewechselt. Eingebaut wurden damals Kunststoffenster mit einer Zweischeiben-Isolierverglasung.
Eingangstür	Haustür aus Holz im Urzustand ohne Lippendichtung, großflächig verglast
Geschoßdecken	Hohlkörperdecken ohne Trittschalldämmung, Holzdielenbelag auf Lattung, in den Nassräumen Terrazzo
oberste Geschoßdecke	Holzbalkendecke mit Lehmschlag
Kellerdecke	siehe Geschoßdecken
Dach	Dachschräge im ausgebauten Teil ungedämmt, innenseitig mit zementgebundenen Spanplatten bekleidet, keine Dampfbremse, Ziegel nur auf Lattung verlegt, keine Konsterlattung und Unterspannbahn
Dachflächenfenster	Die Fenster der Dachgauben weisen eine Brüstungshöhe von ca. 1,35m auf, die Dachflächenfenster im DG sind in einem schlechten Zustand
Kelleraußenwände	tragende Wände aus 30cm Betonhohlblocksteinen, innenseitig unverputzt
Kellerinnenwände	nichttragende Innenwände 11,5cm Betonhohlblocksteinen, unverputzt, Tür vom Treppenhaus zum Keller ohne Wärmedämmung und Dichtung
Kellerbodenplatte	Betonbodenplatte
Wärmetechnische Schwachstellen, Wärmebrücken und unkontrollierte Lüftungswärmeverluste	Obergeschossdecke ohne Wärmedämmung, Dach ohne luftdichte Ebene, Türen, Fenster und Dachflächenfenster ohne Dichtungen, Stürze und Deckenstirne ohne Wärmedämmung, Hauseingangstür ungedämmt
bauliche Besonderheiten	Oberkante Kellerdecke ca. 1 m über Gelände, sehr niedriges Kellergeschoss (lichte Höhe 2,05 m)



Abbildung 8.3: Bestand Fritz-Dächert-Weg, links: Dachgäbuben, Fenster, Hauseingangstür, unten: Grundriss EG, Ansicht Ost

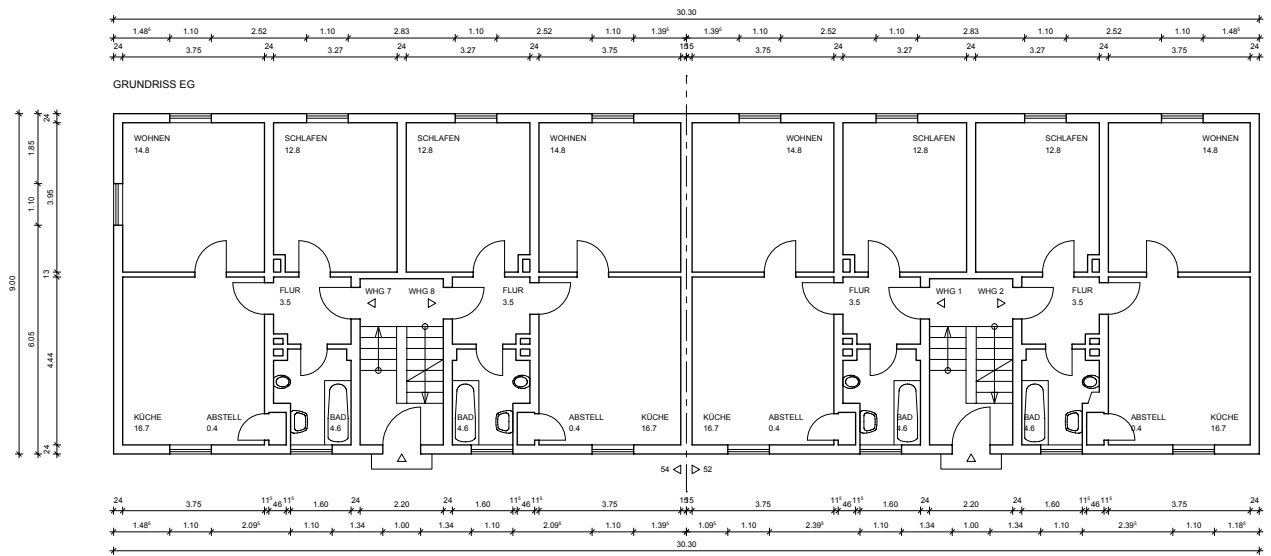


Abbildung 8.4: Bestand Fritz-Dächert-Weg, rechts: Treppenhaus, Kellerabteil, Hausanschluss, unten: Grundriss 1.OG, Ansicht West
Fotos: TUD, FG twe

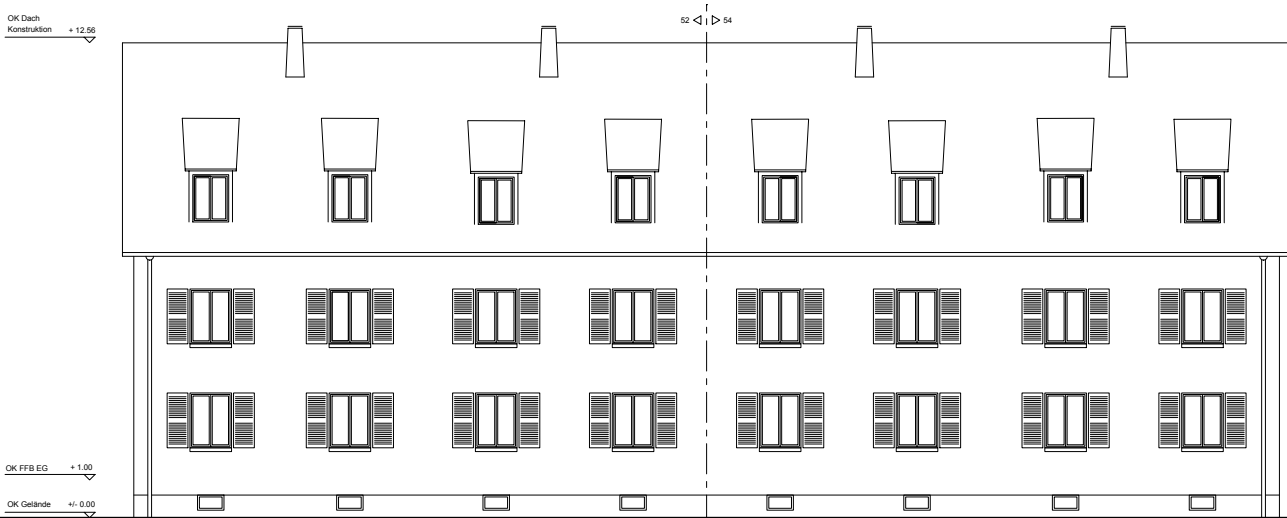
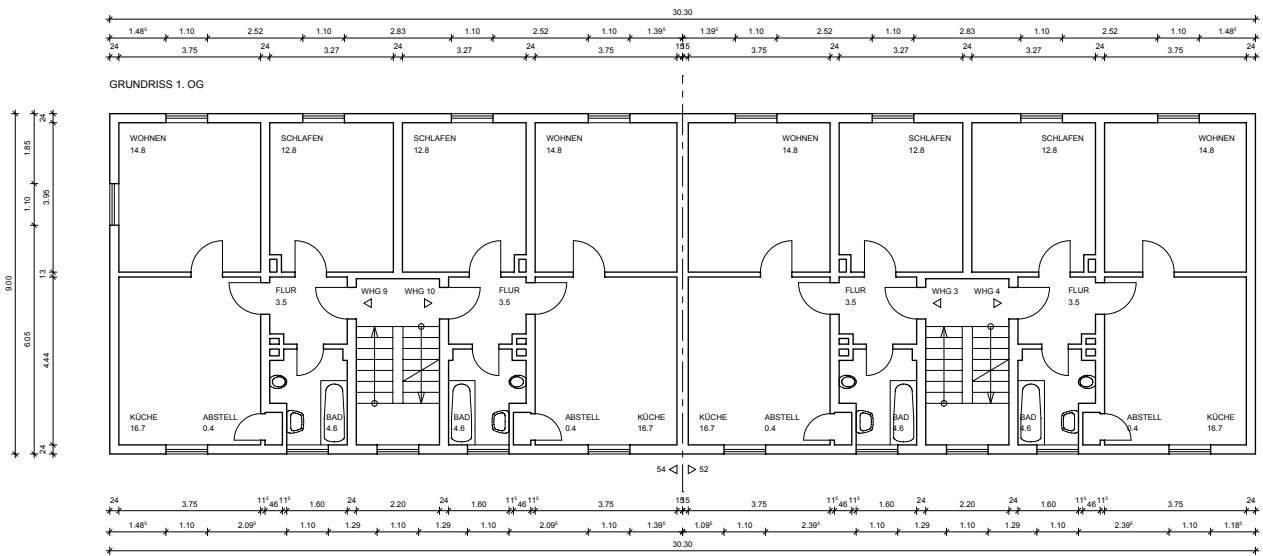
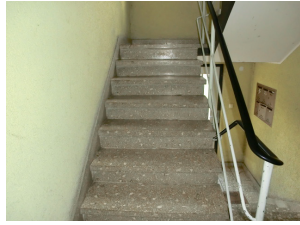
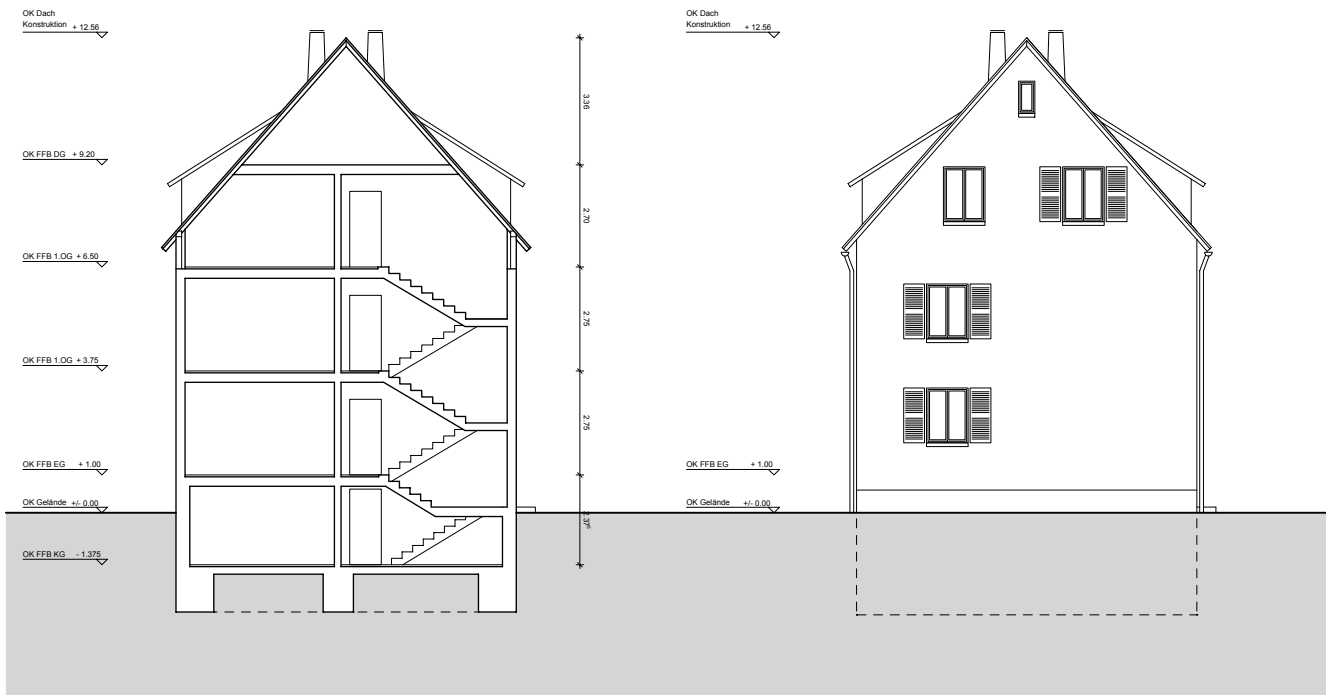
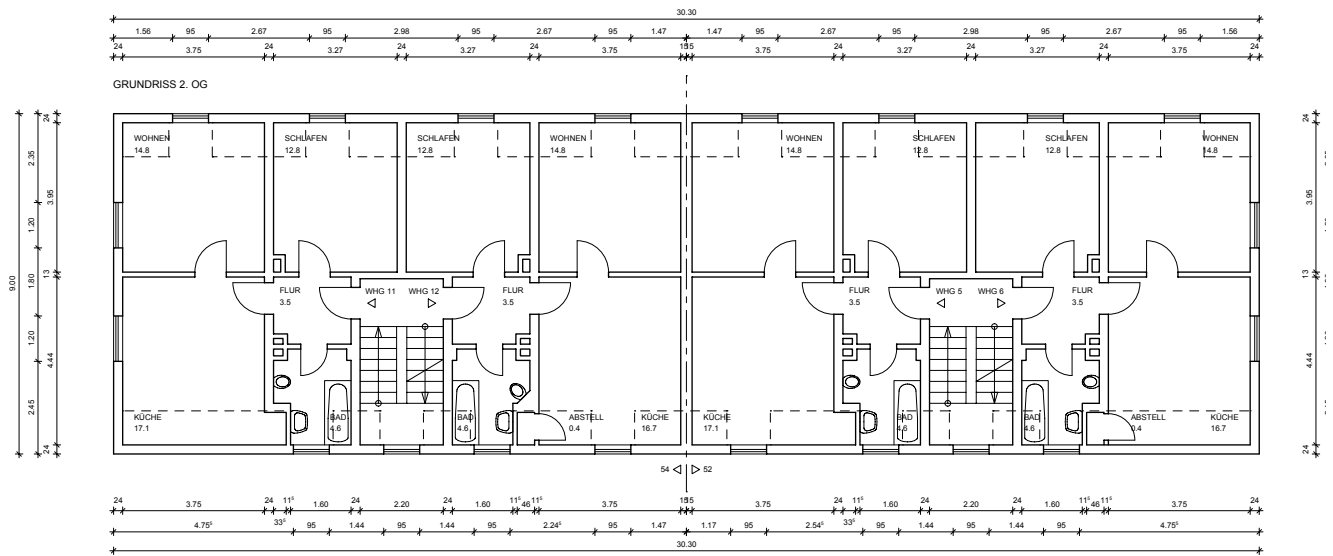




Abbildung 8.5: Bestand Fritz-Dächert-Weg, links: Ostfassade, Durchgang, unten: Grundriss 2.OG, Schnitt, Ansicht Süd
Fotos: TUD, FG twe



8.2.3 Grundrisstypologie

Das Gebäude ist als Zweispänner organisiert. Sämtliche Wohnungsgrundrisse des Gebäudes basieren auf demselben rationalen Schema einer funktionalen Dreizimmer-Wohnung mit ca. 53 m² Wohnfläche. Erschlossen werden diese über einen Flur, von dem man in das nach Westen orientierte Schlafzimmer, das Bad und die großzügige Wohnküche gelangt. Diese ist nach Osten ausgerichtet und führt als Durchgangszimmer zum Wohnzimmer. Auffällig ist, daß die Küche mit 16,7 m² größer ist als das Wohnzimmer mit 14,8 m². Zur Küche gehört eine kleine Abstellkammer, welche lediglich Schranktiefe besitzt und nicht mehr Stauraum bietet als ein herkömmlicher Küchenschrank. Die Abstellkammer schiebt sich in das 4,6 m² große Tageslichtbad. Im Badezimmer befindet sich neben dem Waschtisch und dem WC eine Badewanne, jedoch keine separate Dusche. Das Bad ist nicht barrierefrei im Sinne von DIN 18040-2. Keine der Wohnungen verfügt über einen Balkon. Teilweise wurde zwischen dem Schlafzimmer und der angrenzenden Nachbarwohnung ein Durchbruch geschaffen, so daß eine 3-Zimmer-Wohnung und eine 1-Zimmer-Wohnung entsteht. Dies führt jedoch dazu, daß das Schlafzimmer der 3-Zimmer-Wohnung ein Durchgangszimmer ist. Die Raumhöhe beträgt 2,50m.

8.2.4 Bauteilaufbauten

Im Folgenden werden die Bauteilaufbauten des Bestandsgebäudes dokumentiert.

Außenwände

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
1	Kalkzementputz	2,0	1.350
2	Bimsbetonhohlblocksteine	24,0	500
3	Innenputz (Kalkzement)	2,0	1.200

Innenwände

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
tragende Innenwände			
1	Innenputz (Kalkzement)	2,0	1.350
2	Bimsbetonhohlblocksteine	24,0	500
3	Innenputz (Kalkgipsputz)	2,0	1.350
nichttragende Innenwände			
1	Innenputz (Kalkzement)	2,0	1.350
2	Bimsbetonhohlblocksteine	11,5	500
3	Innenputz (Kalkgipsputz)	2,0	1.350

Bodenplatte

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
1	Stahlbeton-Bodenplatte	10 (Annahme)	2.475
2	Glattstrich (Estrich)	5 (Annahme)	2.100

Geschoßdecke

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
Wohnräume			
1	Parkett (Riemenboden)	2,0	530
2	Lattung 50/70, e=60cm, Sand zw. den Latten	5,0	530
3	Hohlkörperdecke: Leichtbetonfüllkörper zwischen Beton-Fertigrippen, e=62,5cm	20,0	880
4	Innenputz (Kalkgipsputz)	2,0	1.350
Nassräume			
1	Terrazzo	5,0	2.400
2	Hohlkörperdecke: Leichtbetonfüllkörper zwischen Beton-Fertigrippen, e=62,5cm	20,0	880
3	Innenputz (Kalkgipsputz)	2,0	1.350

oberste Geschoßdecke

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
Holzbalkendecke mit Blindboden und Lehmschlag			
Sparrenbereich			
1	Holzsparren ca. 18/10	18,0	530
2	Putz auf Schilfrohrmatte	2,0	1.350
Gefachbereich			
1	Strohlehm	12,0	1.500
2	Fehlboden Holz	2,0	530
3	Luftschicht	4,0	
4	Putz auf Schilfrohrmatte	2,0	1.350

Kellerdecke

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
Hohlkörperdecke			
1	Parkett (Riemenboden)	2,0	530
2	Lattung 50/70, e=60cm, Sand zw. den Latten	5,0	530
3	Hohlkörperdecke: Leichtbetonfüllkörper zwischen Beton-Fertigrippen, e=62,5cm	20,0	880

Dach

#	Baustoff	Dicke [cm]	Rohdichte [kg/m ³]
1	Biberschwanzziegel	1,5	1.800
2	Lattung 25/45	2,5	530
3	Sparren 11/8,5, e = ca. 60 cm	11,0	530
4	Kalziumsilikatplatte (nur im 2.OG)	2,5	1.200

8.2.5 Thermografie der Gebäudehülle

Zur Beurteilung der energetischen Qualität des Wohngebäudes wurden am 15. Januar 2015 in der Zeit von 14:00 bis 16:00 Uhr Außen- und Innenthermographien der Gebäudehülle erstellt. Verwendet wurde dazu das hochauflösende Thermographiesystem „VarioCam High Resolution“ der Firma Jenoptik. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm „IRBIS 3+“ der Firma InfraTec GmbH verwendet. Die klimatischen Randbedingungen der Untersuchung sind im Folgenden zusammengefasst:

Außentemperatur Vortag (Mittelwert) 14.01.15, 15h - 15.01.2015, 14h	5,9 °C
Außentemperatur (Mittelwert) 15.05.15, 14h - 16h	10,3 °C
Windbedingungen	schwacher Wind
Niederschlag	kein Niederschlag

Die dargestellten IR-Bilder werden im Folgenden immer mit dem zugehörigen Lichtbild dargestellt, welches direkt im Anschluss an die Untersuchung aufgenommen wurde. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die IR-Bilder zudem alle mit derselben Temperaturskala (6°C bis 13°C) dargestellt. Bei der Beurteilung der Aufnahmen ist zu beachten, daß die Emissivität der Verglasung von der Emissivität der Putzoberflächen abweicht.

Zur Kontrolle der Temperaturmessung wurde ein Oberflächentempersensor des Typs PT 100 Platin auf die Putzoberfläche der Westfassade von Haus 56 geklebt und mit einem Messverstärkersystem der Firma bmcm verbunden. Nach ausreichender Wartezeit wurde mit dem Oberflächensensor eine Temperatur von 10,1 °C gemessen. Das IR-Bild zeigt im Mittel an derselben Stelle eine Oberflächentemperatur von 10,2 °C. Die Abweichung von 0,1 K ist für die Auswertung als hinreichend genau anzusehen.

Abbildung 8.6 zeigt die Nordfassade des Gebäudes. Deutlich erkennbar sind die niedrigen Oberflächentemperaturen im Bereich des unbeheizten Dachstuhls sowie an der Nord-Ost-Ecke des Gebäudes. An dieser Stelle befindet sich zum Einen eine geometrische Wärmebrücke (Außenwanddecke), als auch ein undichtetes Regenfallrohr, so daß es an dieser Stelle aufgrund von Verdunstungskälte zu einer niedrigen Oberflächentemperatur von bis zu 6,6 °C kommt. Die ungedämmten Stürze sowie die Heizkörper unterhalb der Fenster zeichnen sich durch sehr warme Oberflächentemperaturen auf der Thermografieaufnahme ab. Dies gilt auch für die einbindende Geschossdecke sowie Innenwände (stoffliche Wärmebrücke). Im Überschneidungsbereich von einbindender Innenwand, Geschossdecke und innenliegender Heizungsleitung verstärkt sich dieser Effekt und führt zu einer Oberflächentemperatur von 11,3 °C. Die hohen Oberflächentemperaturen der Fenster sind nur bedingt aussagekräftig, da sich in den Glasscheiben das gegenüberliegende Gebäude und dessen Wärmestrahlung widerspiegelt.

Die Westfassade des Gebäudes ist in Abbildung 8.7 abgebildet. Zum Zeitpunkt der Thermografieaufnahme waren lediglich die Wohnungen im Haus 56 (auf dem Bild links) beheizt. Daher sind in diesem Bereich die Außenwandoberflächen 1-2 K höher als im Bereich von Haus 58. Deutlich erkennbar ist die Lage des Heizraumes im Untergeschoss sowie, analog zu Abbildung 8.6 die Wärmeverluste im Bereich der Fensterstürze und -brüstungen. Eine Undichtigkeit der Regenrinne im Bereich der unteren Befestigung zeichnet sich durch deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen aus (7,1°C im Bereich der Befestigung des regenfallrohres gegenüber 9,4°C im Bereich des Zimmers). Deutlich sichtbar sind auch in dieser Aufnahme die einbindende Geschossdecke sowie die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von Stein und Mörtelfugen.

Abbildung 8.8 zeigt die Ostfassade des Hauses. Offensichtlich ist die Regenrinne undicht

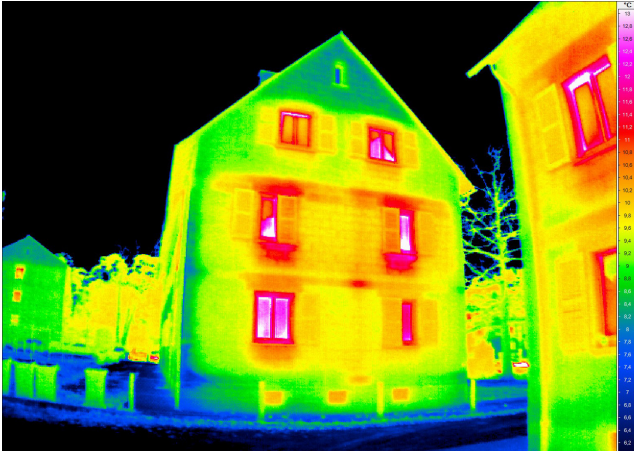


Abbildung 8.6: Thermografie der Nordfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15. Die Abbildung zeigt die Oberflächentemperaturen der Außenwände sowie Wärmebrücken im Bereich der einbindenden Geschossdecken sowie Außenecken



Abbildung 8.10: Nordfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15.

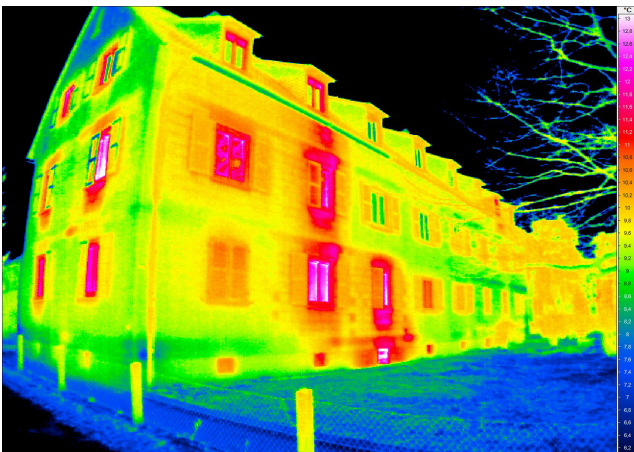


Abbildung 8.7: Thermografie der Westfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15. Die Abbildung zeigt die Oberflächentemperaturen der Außenwände sowie Wärmeverluste im Bereich des Heizungsraumes im UG



Abbildung 8.11: Westfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15.

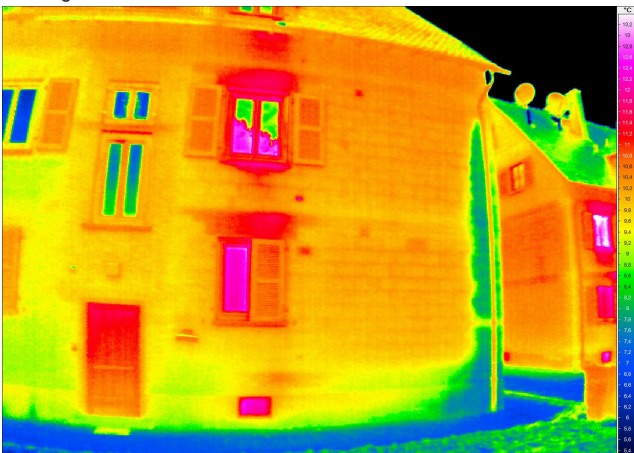


Abbildung 8.8: Thermografie der unsanierten Ostfassade des Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15. Die Abbildung zeigt die Oberflächentemperaturen der Außenwände sowie Wärmeverluste im Bereich von Lüftungsöffnungen und Fensterstürzen



Abbildung 8.9: Ostfassade des unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58, aufgenommen am 15.01.15.

und durchfeuchtet die Außenwand, was sich in einer niedrigeren Oberflächentemperatur und einer Vermoosung in diesem Bereich zeigt. Die Oberflächentemperatur liegt in diesem Bereich bei ca. 8 °C. Die Oberflächentemperatur der Wand liegt im Bereich der geheizten Zimmer bei 10,2 °C, im Bereich der Geschosdecken bei 9,9 °C, im Bereich des Kellers bei 9,4 °C und im Bereich der Stürze bei 11,5 °C. Erkennbar ist auch die ungenügende Wärmedämmung der Hauseingangstür sowie punktuelle Wärmebrücken in Form von Lüftungsöffnungen von Bad und der Abstellkammer der Küchen. Auffällig ist die hohe Oberflächentemperatur des Kellerfensters, bei der eine Oberflächentemperatur von 12,1 °C festzustellen ist. Die Temperaturanhebung der unbeheizten Kellerräume erfolgt hauptsächlich durch Transmissionsverluste der EG-Wohnung. Die Wohnungen links des Treppenhauses waren zum Zeitpunkt der Untersuchung unbewohnt und damit auch unbeheizt. Dies zeigt sich in der um ca. 1 K niedrigeren Oberflächentemperatur der Außenwand.

Eine Thermografie-Aufnahme eines Innenraumes ist in Abbildung 8.12 dargestellt. Es handelt sich dabei um das Eckzimmer im Erdgeschoss an der Nord-Westlichen Gebäudeecke. Die Innenraumtemperatur betrug zum Zeitpunkt der Messung 23,6 °C. Bei der Wand auf der rechten Bildseite handelt es sich um eine Außenwand, bei der linken Wand um eine Innenwand. Diese weist daher deutlich höhere Oberflächentemperaturen (22,2-24,1°C) als die Außenwände auf. Je nach Höhe im Raum weisen die Außenwände im Bereich der Steine eine Oberflächentemperatur von 19,9 bis 21,8 °C auf, im Bereich der Mörtelfugen jeweils ca. 0,4 °C kälter. Deutlich erkennbar ist die geometrische Wärmebrücke im Bereich der Außenwanddecke. Hier sinkt die Oberflächentemperatur bis auf 16,8 °C ab. Mit einer Oberflächentemperatur von ca. 20,2 °C weist das abgebildete Fenster eine durchaus gute Wärmedämmeigenschaft auf. Aufgrund der konstruktiven Ausbildung der Fensterleibungen mit Anschlag sind keine größeren Undichtigkeiten in diesem Bereich erkennbar, lediglich im Bereich der Fensterbank sinkt die Oberflächentemperatur auf 18,4 °C. Die Fußbodentemperatur beträgt 22 °C, die Deckentemperatur 23,1°C.

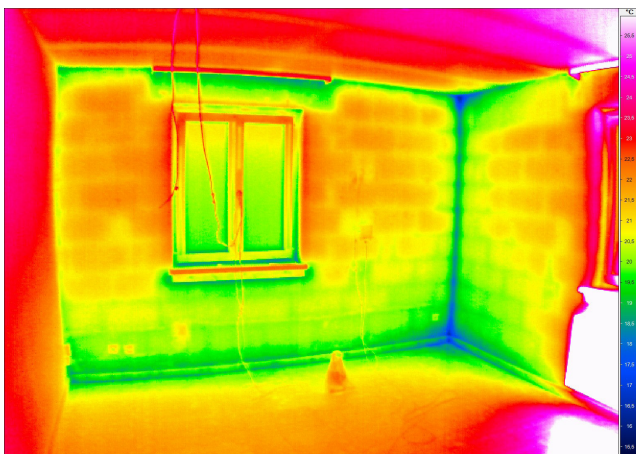


Abbildung 8.12: Thermografie Innenraum Nord-West-Ecke EG Fritz-Dächert-Weg 56, aufgenommen am 15.01.15.



Abbildung 8.13: Innenraum Nord-West-Ecke EG Fritz-Dächert-Weg 56, aufgenommen am 15.01.15.

8.2.6 Wärmetechnische Einstufung der Gebäudehülle

² Zur Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenwände, der Kellerdecke, der Dachschräge sowie der Decke unter dem Dachboden wurden in den äußeren Wohnungen am nördlichen Ende des Gebäudes Nr. 56 Messungen durchgeführt. Die Messungen fanden am 15.01.2015 in der Zeit zwischen 10 Uhr und 18 Uhr statt. In den drei Wohnungen waren am Vortag die Heizkörper von der Frostschutzstellung auf ca. Stufe 3,5 eingestellt worden. Die Außentemperatur betrug im Messzeitraum zwischen 9,2°C und 10,4°C. Es war schwach windig. Für die Messungen wurden auf beiden Seiten der Bauteile die Oberflächentemperaturen Θ_i und Θ_e mit PT100 Oberflächenfühlern erfasst. Die Messfühler wurden zu diesem Zweck jeweils aufgeklebt. Des Weiteren wurde die Wärmestromdichte mit einer 144 cm² großen Wärmestromplatte (Thermoelement) gemessen. Mithilfe der beiden Temperaturgrößen und des Wärmestroms wurde der Wärmedurchgangskoeffizient entsprechend DIN EN ISO 6946 berechnet:

$$U = 1 / (R_{se} + \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\dot{q}} + R_{si}),$$

wobei R_{se} und R_{si} die Wärmeübergangswiderständen nach DIN EN ISO 6946 sind. Parallel wurde jeweils die Raumtemperatur Θ_i des beheizten Raumes erfasst und zur Kontrolle aus den drei gemessenen Temperaturgrößen unter der Vorgabe des Wärmeübergangswiderstandes nach DIN EN ISO 6946 ein weiterer Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten berechnet:

$$U = 1 / (R_{se} + \frac{\theta_i - \theta_{se}}{\theta_i - \theta_{si}} \cdot R_{si})$$

Der U-Wert der Außenwände wurde im nach Nordwesten orientierten Eckraum im 1.OG an der westlichen Außenwand gemessen. Die Messpositionen auf der Wand befanden sich in einer Höhe von ca. 1,2 m ca. 60 cm seitlich des Fensters. In dieser Wand befindet sich kein Heizkörper. Der in Tabelle 8.1 angegebene U-Wert wurde von den individuellen Eigenschaften des Steines, auf dem die Messsensoren befestigt waren, auf die mittleren Wand-eigenschaften transferiert. Hierfür wurde die thermographisch gemessene Verteilung der Oberflächentemperatur der Innenwand ausgewertet. Der gemittelte U-Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$\bar{U} = 1 / (R_{se} + \frac{(\frac{1}{U} - R_{se})(\theta_{si} - \theta_{se})}{(\frac{1}{U} - R_{se})\theta_{si} - R_{si}\theta_{se} - (\frac{1}{U} - R_{se} - R_{si})\bar{\theta}_{si}} \cdot R_{si}),$$

mit $\bar{\theta}_{si}$ der mittleren Oberflächentemperatur der Wand an vergleichbaren Positionen. Im Fall von Wänden wird $R_{se}=0,04$ und $R_{si}=0,13$ angesetzt.

Eine auf Literaturangaben beruhende rechnerische Abschätzung des zu erwartenden U-Werts mit Werten für die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Hohlblocksteine (2-k Hbl nach 1952, Rohdichteklasse Hbl 50 < 1 kg/dm³, 24 cm dick) mit Normalmörtel nach DIN 4108 von 0,38 W/m K unter Berücksichtigung der Putzschichten (außen Kalkzementputz, innen Kalkgipsputz, je 2cm dick) mit Wärmeleitfähigkeit 1 W/m K bzw. 0,7 W/m K ergibt einen U-Wert von 1,18 W/m²K der gemessene Wert liegt bei 1,25 W/m²K.

Zur Bestimmung des U-Wertes der Kellerdecke wurde die Wärmestromplatte über einer

² Vgl. Messbericht zur U-Wert Messung vom 15.01.2015, TUD FG TWE, Dr. rer. nat. Wieland Weise.

Fuge des Dielenbodens im EG befestigt. Im Keller wurde der Temperaturfühler abseits der Betonträger der Kellerdecke befestigt. Für die Kellerdecke wird $R_{se}=R_{si}=0,17$ angesetzt. Zur Bestimmung der U-Werte der Dachschräge und des Dachbodens wurden die Messungen im zweiten OG im hinter dem Treppenhaus an die Westfassade grenzenden Raum durchgeführt. Für die Messung des Wertes der Dachschräge befanden sich die Messfühler in einer Höhe von ca. 1,5m und 60 cm seitlich der Dachgaube. Die Heizung befindet sich in diesem Raum unter dem Gaubenfenster. Bezüglich der Dachschräge wird $R_{se}=0,04$ und $R_{si}=0,1$ angesetzt, im Falle der Messung zum Dachboden $R_{se}=R_{si}=0,1$.

In der folgenden Tabelle werden die auf diese Weise ermittelten U-Werte der Bauteile des Fritz-Dächert-Wegs 56-58 dargestellt und mit den gesetzlichen Mindestanforderungen der EnEV 2014 bei der Sanierung von Außenbauteilen verglichen. Zum Vergleich werden ebenfalls die Werte des energy+Home in Mühlthal angegeben. Nicht empirisch ermittelte Werte (z.B. U-Wert der Außentüren) werden durch Literaturwerte ersetzt und als solche gekennzeichnet.

Tabelle 8.1: U-Werte des Bestandes und Mindestanforderungen nach EnEV 2014

Bauteil	U-Werte [W/(m ² K)]		
	Ist-Zustand	EnEV 2014	energy+Home
Bodenplatte	1,50 ³	0,30	0,22 - 0,50
Außenwände	1,25 ¹	0,24	0,13 - 0,18
Kelleraußenwände	1,25 ¹	0,30	0,12 - 0,20
Fenster	2,70 ³	1,30	0,80
Dachflächenfenster	-	1,40	1,00
Außentüren	3,50 ³	1,80	1,80
oberste Geschossdecke	0,91 ¹	0,30	-
Kellerdecke	0,90 ¹	0,30	-
Dach	1,58 ¹	0,24	0,12

¹ Messwert

² Rechenwert

³ Literaturwert

Die Mindestanforderungen an U-Werte nach dem Bauteilverfahren der EnEV 2014 gelten nicht, wenn der Primärenergiebedarf und die Transmissionswärmeverluste des gesamten Gebäudes den Höchstwert für einen Neubau um nicht mehr als 40% überschreiten.

Der Effizienzhaus Plus Standard wird gemäss Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) über einen negativen Primärenergie- und Endenergiebedarf definiert.³ Es werden also keine gesonderten Vorgaben hinsichtlich der U-Werte der Außenbauteile gemacht, jedoch sind dazu erfahrungsgemäß U-Werte notwendig, wie sie zum Erreichen des Passivhaus-Standards notwendig sind. Um dies zu erreichen wird vom Passivhaus-Institut ein maximaler U-Wert für opake Außenbauteile von max. 0,15 W/(m²K) und ein maximaler U-Wert für Fenster von 0,8 W/(m²K) gefordert.⁴ Diese Vorgaben wurden beim energy+Home weitestgehend eingehalten, sofern die Gebäudesubstanz dies zugelassen hat.

³ Vgl. BMUB, 2014, S.9.

⁴ Vgl. http://www.passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm [03.02.2015].



Abbildung 8.14: Innenraumaufnahme der U-Wert-Messung der Außenwand im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58. Die Abbildung zeigt die Wärmestromplatte und den innenraumseitig angebrachten Oberflächentemperaturfühler.



Abbildung 8.15: Außenaufnahme der U-Wert-Messung der Außenwand im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58. Die Abbildung zeigt den auf der Außenwand angebrachten Oberflächentemperaturfühler außen.



Abbildung 8.16: Innenraumaufnahme der U-Wert-Messung des Daches im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58. Die Abb. zeigt die Wärmestromplatte und den innenraumseitig angebrachten Oberflächentemperaturfühler.

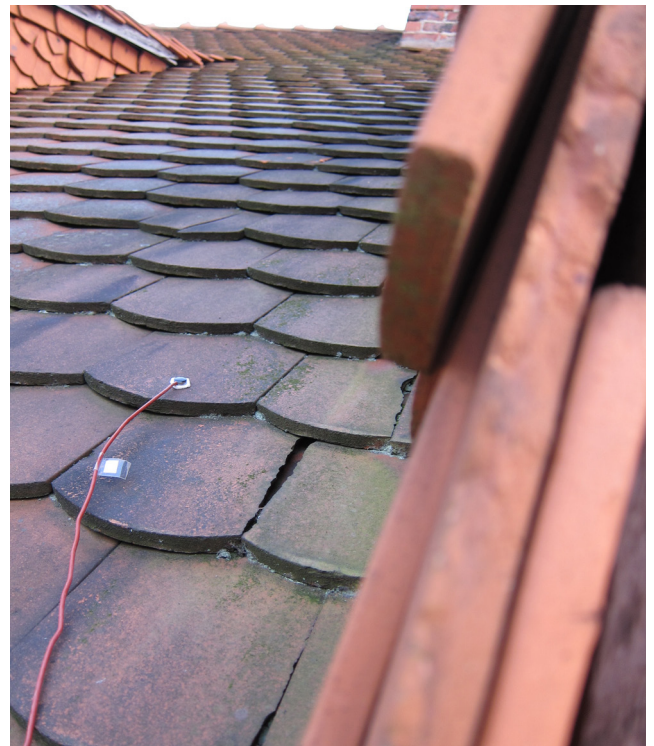


Abbildung 8.17: Außenaufnahme der U-Wert-Messung des Daches im unsanierten Fritz-Dächert-Weg 56-58. Die Abbildung zeigt den auf dem Dach angebrachten Oberflächentemperaturfühler außen.

8.2.7 Heizungs- und Trinkwarmwasseranlage

Die Wärmeerzeugung erfolgt über eine 1991 eingebaute gebäudezentrale Gas-Heizungsanlage mit einer Nennleistung von 64 kW. Die Vor- / Rücklauftemperatur beträgt 70/55 °C, der Wirkungsgrad beträgt 93%, der Abgasverlust 7%. Die Aufstellung des Gerätes der Typs Buderus Loganagas G_224E Lownox befindet sich im unbeheizten Keller in einem separaten Heizraum. Im selben Raum befindet sich der Warmwasser-Speicher Multicell MC-H der Firma Fröling mit einem Speichervolumen von 500 l.

Die horizontale Verteilung der Leitungen erfolgt im unbeheizten Keller unter der Decke, der Abstand der mäßig gedämmten aber gut zugänglichen Leitungen zur Decke beträgt ca. 5cm. Die Heizkörper sind in jedem Raum im Außenwandbereich unter den Fenstern angeordnet und verfügen über eine Regelung mit Thermostatventilen. Die Heizungsleitungen sind aufputz verlegt, ungedämmt aber gut zugänglich.

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt ebenfalls gebäudezentral mit Zirkulation. Die vertikalen Strangleitungen sind in einem Installationsschacht geführt und dementsprechend nicht zugänglich. Das System entspricht der Anlage 04 nach DIN V 4701-10 Bbl. 1:2007-02.

8.2.8 Energiebilanz

Die Energiebilanz des bestehenden Gebäudes wird im Folgenden nach dem vereinfachten Verfahren nach EnEV rechnerisch ermittelt. Dabei werden sowohl die Energieverluste, als auch die Gewinne dargestellt und der Endenergiebedarf bzw. der Primärenergiebedarf angegeben.

Tabelle 8.2: Energiebilanz des bestehenden Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg 56-58

Energiebilanz					
Grunddaten			Fassade		
Gebäudebezeichnung	FDW 56-58		opake Fassadenfläche Nord	m ²	100,8
Ausrichtung	Ost-West		opake Fassadenfläche Ost	m ²	147,2
Länge	m	30,3	opake Fassadenfläche Süd	m ²	97,4
Breite	m	9,05	opake Fassadenfläche West	m ²	154,2
Grundfläche	m ²	274,2	Fensterfläche Nord	m ²	3,87
Brutto-Geschoßfläche	m ²	822,7	Fensterfläche Ost	m ²	44,5
Wohnfläche	m ²	603,4	Fensterfläche Süd	m ²	7,3
Anzahl Vollgeschosse		3	Fensterfläche West	m ²	37,4
Geschosshöhe	m	2,75	Fensterflächenanteil Nord	%	3,7
Beheiztes Gebäudevolumen	m ³	2.505,0	Fensterflächenanteil Ost	%	23,2
Gebäudenutzfläche A _n	m ²	801,6	Fensterflächenanteil Süd	%	7,0
Gesamte thermische Hüllfläche	m ²	1.295,3	Fensterflächenanteil West	%	19,5
A/V Verhältnis	-	0,52	gesamte Fassadenfläche Nord	m ²	104,7
Anzahl Haushalte (2 Pers.)	-	12	gesamte Fassadenfläche Ost	m ²	191,6
Anzahl Bewohner	-	24	gesamte Fassadenfläche Süd	m ²	104,7
			gesamte Fassadenfläche West	m ²	191,6
			Dach	Satteldach	
			Dachneigung	°	45
			Dachfläche Nord / Süd	m ²	193,9
			Dachfläche Ost /West	m ²	193,9

U-Wert opake Fassade	W/m ² K	1,25	Lüftungsverluste H_v	W/K	476
U-Wert transparente Fassade	W/m ² K	2,70	interne Gewinne Q_i	kWh/a	17.635
U-Wert Bodenplatte	W/m ² K	1,50	solare Gewinne Nord	kWh/a	165
U-Wert Dach	W/m ² K	1,58	solare Gewinne Ost	kWh/a	2.930
H_t opake Fassade	W/K	624	solare Gewinne Süd	kWh/a	841
H_t transparente Fassade	W/K	251	solare Gewinne West	kWh/a	2.463
H_t unterer Gebäudeabschluss	W/K	329	solare Gewinne Q_s	kWh/a	6.399
H_t oberer Gebäudeabschluss	W/K	613			
Transmissionsverluste H_t	W/K	1.880	Jahresheizwärmebedarf Q_h	kWh/a	132.669
Transmissionsverluste H_t	W/m ² K	1,50	Jahresheizwärmebedarf q_h	kWh/m²a	166
Jahreswarmwasserbedarf Q_{ww}	kWh/a	12.000	Jahresstrombedarf Q_{el}	kWh/a	35.160
Jahresendenergiebedarf Q_e	kWh/a	200.573	Jahresprimärenergiebedarf Q_p	kWh/a	221.840
$Q_{he,e}$ Hilfsenergie	kWh/a	930	$Q_{he,p}$ Hilfsenergie	kWh/a	2.232
$Q_{l,e}$ Lüftung	kWh/a	0	$Q_{l,p}$ Lüftung	kWh/a	0
$Q_{tw,e}$ Trinkwasser	kWh/a	16.560	$Q_{tw,p}$ Trinkwasser	kWh/a	18.216
$Q_{h,e}$ Heizung	kWh/a	183.084	$Q_{h,p}$ Heizung	kWh/a	201.392
bezogener Jahresendenergiebedarf q_e	kWh/m²a	250	bezogener Jahresprimärenergiebedarf q_p	kWh/m²a	277

Der Grenzwert für die Transmissionswärmeverluste H_t nach EnEV 2014 beträgt 0,5 W/m²K und wird von dem Gebäude um mehr als 40% überschritten. Dasselbe gilt für den Höchstwert des auf die Gebäudenutzfläche bezogenen Jahresprimärenergiebedarfs q_p von 92 kWh/m²a.

8.3 Geschoßwohnungsbauten der 50er Jahre

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) hat den Gebäudebestand in Deutschland im Rahmen ihrer Forschungstätigkeit nach Baualter und Gebäudegröße in Klassen eingeteilt, um einen schnellen Zugriff auf typische Flächen und U-Werte zu erhalten bzw. schnelle Aussagen über typische Energiekennwerte treffen zu können.⁵ Die Baualtersklassen orientieren sich dabei an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und den Veränderungen wärmetechnisch relevanter Bauvorschriften. Sie ermöglichen es, allgemein übliche Konstruktionsweisen, typische Bauteilflächen und technische Kennwerte zu erfassen und eine verallgemeinerte deutsche Gebäudetypologie zu erstellen. Das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg lässt sich dabei der Baualtersklassen MFH_D (Baualtersklasse 1949-57) zuordnen.

Im Rahmen der Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Jahr 2009 die Wärmedurchgangskoeffizienten von nicht nachträglich gedämmten Bauteilen zur vereinfachten Ermittlung energetischer Kennwerte festgelegt.⁶ Die Einteilung des Gebäudebestandes in Baualtersklassen orientiert sich dabei an der Einteilung wie sie bereits

5 Vgl. IWU, 2005.

6 Vgl. BMVBS, 2009.

zuvor vom IWU vorgenommen wurde, so daß sich die Kennwerte gegenüberstellen lassen. Demgegenüber werden die vor Ort gemessenen Bauteilkennwerte des Fritz-Dächert-Weges gestellt, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob es sich bei dem Gebäude in Eberstadt um ein typisches bzw. repräsentatives Gebäude dieser Zeit handelt.

Tabelle 8.3: Bauteilkennwerte von Gebäuden der 50er Jahre - Vergleich IWU, BMVBS und Fritz-Dächert-Weg

Bauteil	1949-1957 IWU	1949-1957 BMVBS	Ist-Zustand
Flächen / Volumen / Kennzahlen			
beheizte Wohnfläche [m ²]	574,8	-	603,4
mittlere lichte Raumhöhe [m]	2,65	-	2,52
beheiztes Gebäudevolumen [m ³]	1.919,2	-	2.505,0
Anzahl Vollgeschosse	3	-	3
Anzahl Wohneinheiten	9	-	12
oberste Geschossdecke Fläche [m ²]	355	-	181,4
Außenwände Fläche [m ²]	464	-	593
Kellerdecke Fläche [m ²]	355	-	274
Fenster g-Wert	0,7	0,75	-
Fenster Konstruktion	Isolierverglasung in alten Zweikammer Kunststoffrahmen	Holzfenster, zwei Scheiben / Kunststofffenster, Isolierverglasung	Kunststofffenster, 2-Scheiben-Isolierverglasung von 1987
Heizsystem	Gas-Niedertemperaturkessel 84kW aus den 80er Jahren		Gas-Spezialheizkessel 64 kW Buderus Loganagas G_224E Lownox
Warmwasserbereitung	Warmwasserbereitung über den Heizkessel mit beigestelltem Speicher		Warmwasserbereitung über den Heizkessel mit beigestelltem Speicher
U-Werte			
Bodenplatte	-	1,50	-
oberste Geschossdecke	0,78	0,80	0,91
Kellerdecke	1,65	1,50	0,90
Außenwände	1,44	1,40	1,25
Kelleraußenwände	-	1,50	1,25
Fenster	2,80	2,70	-
Außentüren	-	3,50	-
Dach	1,11 / 1,41	1,40	1,58

Baukonstruktion

⁷ Als Nachkriegsbauten werden in der Regel Gebäude bezeichnet, welche zwischen 1945 und 1959 erbaut wurden. Diese Zeit war geprägt durch die Auswirkungen des 2. Weltkrieges und lässt sich unterteilen in die Jahre 1945-52, in denen die Bauwirtschaft stark von der Trümmerbeseitigung und der Bereitstellung günstiger und einfacher Wohnungen geprägt war, sowie die Jahre 1952-1959, welche als Zeit des Wirtschaftswunders bekannt wurde. Der extremen Wohnungsnot wurde in dieser Zeit mit einer regen Bautätigkeit entgegengetreten und die Städte nach dem Leitbild der gegliederten und aufgelockerten Stadt wiederaufgebaut. Diesem Ideal eines städtebaulichen Leitbildes mit Riegeln anstelle von Blockrändern entspricht auch die Fritz-Dächert-Siedlung in Eberstadt mit seinen großzügigen Abstandsflächen. Die durchschnittliche Wohnungsgröße pro Bewohner wuchs in dieser Zeit von 14 m² auf 19 m² an, wobei das erste Wohnungsbaugesetz von 1950 für den sozialen Wohnungsbau Wohnungsgrößen zwischen 32 und 65 m² vorschrieb. Zum Vergleich: die Wohnungsgröße im Fritz-Dächert-Weg beträgt 53 m². Die Merkmale einer meist kleinteiligen Bebauung, welche selten mehr als vier Geschosse aufweist, funktionaler Grundrisse sowie luftiger und sonniger Außenräumen finden sich ebenso bei den beiden Gebäuden im Fritz-Dächert-Weg. Die Sparsamkeit, welche den Wohnungen hinsichtlich ihres Raumangebots innewohnt, lässt sich auch auf die Baukonstruktion übertragen. Sowohl Material, als auch Heizenergie waren nicht im Überfluß vorhanden, folgerichtig daher, dass DIN 4108, die erste Verordnung zum energiesparenden Bauen, aus dem Jahr 1952 stammt. Hinsichtlich der Konstruktion lassen sich folgende Bauteil Ausführungen als typisch für die 50er Jahre feststellen.

Flachgründungen werden meist als Streifenfundament aus unbewehrtem Stampfbeton ausgeführt. Zum Teil finden sich aus gemauerte Fundamente aus Hartbrannt- oder Trümmerziegeln. Die Bodenplatte ist in den meisten Fällen mit einer Dicke von ca. 10 cm betoniert und mit einem Glattstrich versehen. Eine Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit fehlt in der Regel. Kellerwände wurden entweder mit Stampfbeton betoniert oder Mauerwerk gemauert. Auch wenn Abdichtungsarbeiten auf Bitumen- oder Asphaltbasis bereits üblich waren, sind diese heutzutage aufgrund geringer Qualität meist undicht, so daß Kellerwände heute oftmals feucht sind. Dies liegt auch an der fehlenden horizontalen Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit. Teilweise wurde auch auf einen Zementputz als vertikale Abdichtung zurückgegriffen.

Die Außenwände der Nachkriegsbauten werden in der Regel massiv gemauert, jedoch verschwindet der Vollziegel nahezu gänzlich und wird durch Hoch- und Langlochziegel sowie Leichtbetonsteine ersetzt. Holzwolleleichtbauplatten dienen vielfach als Dämmstoff bei Stürzen, Ringbalken, Heizkörpernischen und an Dachunterseiten. Sie eignen sich sowohl als Schalungseinlage, als auch als Putzträgerplatte, was ihnen gegenüber den zu dieser Zeit verfügbaren Mineralwolleplatten einen Vorteil verschafft, da diese nicht als Putzträger geeignet waren. Erst Ende der 50er Jahre finden diese eine breite Verwendung als Trittschalldämmung unter schwimmenden Estrichen.

Fenster wurden vorwiegend als Holzfenster mit einer Einfachverglasung ausgeführt, zum Teil auch bereits als Kasten- und Doppelfenster. Beim untersuchten Referenzgebäude wurden die Fenster bereits durch Kunststofffenster mit einer Zweischeiben-Isolierverglasung ausgetauscht.

Aufgrund von Holz mangel wurden Decken in den 50er Jahren überwiegend als Stahlbetondecken ausgeführt, oftmals auch aufgrund von Materialknappheit in Rippenbauweise mit oder ohne Füllkörper. Zur Verringerung des Schalungsaufwands wurden im Wohnungsbau

7 Vgl. Giebeler, 2008, S. 172 ff.

verschiedene Systeme⁸ mit Stahlbetonrippen und dazwischen eingehängten Bimsbeton- oder Holzwolleleichtbaukörpern eingesetzt und mit oder ohne Aufbeton realisiert. Des Weiteren finden sich, wie auch im Fritz-Dächert-Weg ausgeführt, verschiedene Teilfertigteil- und Fertigteildecken-Systeme⁹ aus vorgefertigten Balken und dazwischengehängten Füllkörpern aus Leicht- oder Bimsbeton.

Bei Gebäuden der Nachkriegszeit dominieren neben dem Flachdach vor allem steile Satteldachkonstruktionen aus Holz. Als Dachdeckung werden die in der Zwischenkriegszeit noch vorwiegend verwendeten Biberschwanzziegel zunehmend durch Flachdachpfannen abgelöst. Bei den Gebäuden im Fritz-Dächert-Weg finden sich diese jedoch noch, was auf die steile Dachneigung zurückzuführen ist.

Fazit

Der Vergleich nicht nur der energetischen Kennwerte, sondern auch der vorgefundenen Baukonstruktion¹⁰ mit den in der Literatur beschriebenen Konstruktionen zeigt, dass das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 56-58 als repräsentatives bzw. typisches Gebäude der 50er Jahre beschrieben werden kann. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Gebäude ist damit gegeben.

8 Remy-Decke, Durisol-Decke, Phlmann-Decke, Wirus-P-Decke, u.a.

9 F-Decke, Zech-Decke, Kaiser-Katzenberger-Decke, Rapid-Decke, Schäfer-Decke, u.a.

10 siehe Kapitel 8.2.5

9 Beispielhafte Konzeption einer Geschosswohnungsbau- sanierung zum Plusenergiegebäude

Nachdem im vorherigen Kapitel die wesentlichen Merkmale von Geschosswohnungsbaureihen der 1950er Jahre ermittelt und mit dem Referenzgebäude im Fritz-Dächert-Weg in Darmstadt Eberstadt verglichen wurden, wird im Folgenden der Einfluss unterschiedlicher baulicher und anlagentechnischer Maßnahmen auf den Energieverbrauch des Referenzgebäudes und einzelner Wohnungen innerhalb des Gebäudes untersucht. Dies dient als Grundlage zur Untersuchung einzelner Einflussfaktoren auf die Plusenergie-Bilanz und der Ableitung einer Sanierungskonzeption sowie allgemeiner Planungsempfehlungen in Kapitel 10.

9.1 Vergleichende Betrachtung von Sanierungsmaßnahmen

Im Folgenden wird untersucht, wie sich verschiedene Sanierungsmaßnahmen auf den Heizenergiebedarf der einzelnen Wohnungen des Referenzgebäudes auswirken. Dieser ist stark abhängig von der Lage der Wohnung im Gebäude und einzelne Maßnahmen wirken sich unterschiedlich stark auf verschiedene Wohnungen aus. Daher wird jeweils der Bedarf der einzelnen Wohnungen sowie der Gesamtbedarf pro Maßnahme angegeben.

Bei der Betrachtung bzw. Konzeption handelt es sich um ein sukzessives Vorgehen, bei der die einzelnen Sanierungsmaßnahmen kumuliert werden. Ziel der Maßnahmen ist es, den Energiebedarf derart zu senken, dass durch die Belegung der solaraktiv nutzbaren Hüllflächen mit Photovoltaik eine positive Endenergiebilanz erzielt werden kann. Folgende Maßnahmen werden dabei untersucht:

- M 01a Wärmedämmung der Außenwand mit 16cm Mineralwolle WLK 035
- M 01b wie M01a, jedoch mit 24cm Mineralwolle WLK 035
- M 02 wie M01b + Fenster mit einem U-Wert 0,8 W/m²K und einem erhöhten Fensterflächenanteil
- M 03 wie M02 + Dämmung der Kellerdecke
- M 04a wie M03 + Verbesserung des U-Wertes des Daches auf 0,15 W/m²K
- M 04b wie M04a + Vergrößerung der Dachfenster /-gauben
- M 05 wie M04b + Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- M 06 wie M05 + Einbau einer Luft/Wasser Wärmepumpe



Abbildung 9.1: Lage und Nummerierung der Wohnungen im Fritz-Dächert-Weg 56-58

Wohnungen, welche nicht an der Nord- bzw. Südfassade liegen benötigen weniger Heizenergie als die äußeren Wohnungen. Am wenigsten Heizenergie benötigen die beiden Wohnungen, welche im 1. Obergeschoss in der Mitte des Gebäudes liegen, da diese zu allen Seiten von beheizten Wohnungen umgeben sind und daher die Transmissionswärmeverluste gegenüber den anderen Wohnungen minimiert sind.

Die Energiebedarfsberechnungen wurden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS 17 durchgeführt. TRNSYS ist ein modulares Programm zur Berechnung des thermische Verhaltens und des Energiebedarfs von Gebäuden. Es besteht aus den zwei Teilprogrammen TRNBUILD und Simulation Studio, die zur Definition der Bauteile, der Haustechnik und deren Verknüpfung untereinander dienen.

Im Vorprogramm TRNBUILD wurden zunächst die thermischen Zonen des Gebäudes definiert und die Bauteilaufbauten der Gebäudehülle, deren Orientierungen, Flächen und thermische Eigenschaften sowie die Innenraum-Solltemperaturen eingegeben. Diese Daten wurden anschließend in Simulation Studio als Gebäudemodell eingefügt und die Systemkomponenten Klimadaten, Gebäudemodell und haustechnische Komponenten miteinander verknüpft.

Für die thermischen Untersuchungen wurde der Wetterdatensatz TRY 12 (Standort Mannheim) des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) verwendet. Dieser Wetterdatensatz liefert Lufttemperaturen, Strahlungsintensitäten, Windgeschwindigkeiten und andere Parametern für ein Jahr als Grundlage der Energiebedarfsberechnung. Die Randbedingungen zur Ermittlung des Energiebedarfs wurden nach DIN 18599-10 Tabelle 4 mit einer Heizungs-Solltemperatur von 20°C, internen Wärmegewinnen von 90 Wh/m²d, einer Nutzungszeit von 00:00 bis 24:00 Uhr, einer Betriebszeit von 06:00 bis 23:00 Uhr sowie einem Nutzungswärmebedarf für Trinkwarmwasser von 15 kWh/m²a definiert.

Durch die Verwendung des Simulationsprogramms zur Berechnung des Energiebedarfs unterscheiden sich die angegebenen Werte aufgrund unterschiedlicher Berechnungsmethoden von der Ermittlung des Energiebedarfs nach EnEV.¹ Eine qualitative Aussage zur energetischen Wirksamkeit einzelner Sanierungsmaßnahmen ist dennoch gegeben.

1 Vgl. Zerwas u.a., 2008, S.174 ff.

9.1.1 Bestand

Beschreibung
Bestehende Gebäudekubatur, Konstruktion und Anlagentechnik gemäss Beschreibung in Kapitel 8.2.

Tabelle 9.5: energetische Kennwerte des Bestandsgebäudes

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]						
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h	Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
48,95	156,70	44,04	47,18	118,30	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{he} + Q_{ww,e} + Q_{le} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]					Endenergiebedarf Q_e	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung Q_{he}	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung Q_{le}	Hilfsenergie $Q_{he,e}$		
43,9	163,25	22,08	-	1,16	230,39	253,40

Den höchsten Primärenergiebedarf für Heizwärme weisen mit durchschnittlich 208,7 kWh/m²a die Wohnungen im 2. Obergeschoss auf. Die Wohnungen im Erdgeschoss benötigen im Durchschnitt 186,3 kWh/m²a, diejenigen im 1. Obergeschoss lediglich 143,7 kWh/m²a. Die mittleren beiden Wohnungen weisen jeweils aufgrund niedrigerer Transmissionswärmeverluste einen ca. 21 % niedrigeren Heizwärmebedarf als die äusseren Wohnungen auf, wobei die Wohnungen an der Nordfassade einen ca. 9 % höheren Primärenergiebedarf für Heizwärme als die Wohnungen an der Südfassade aufweisen.

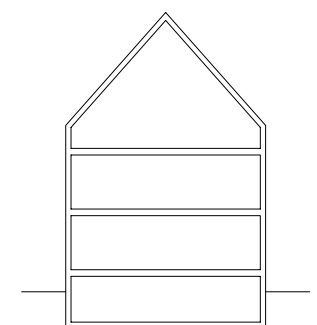
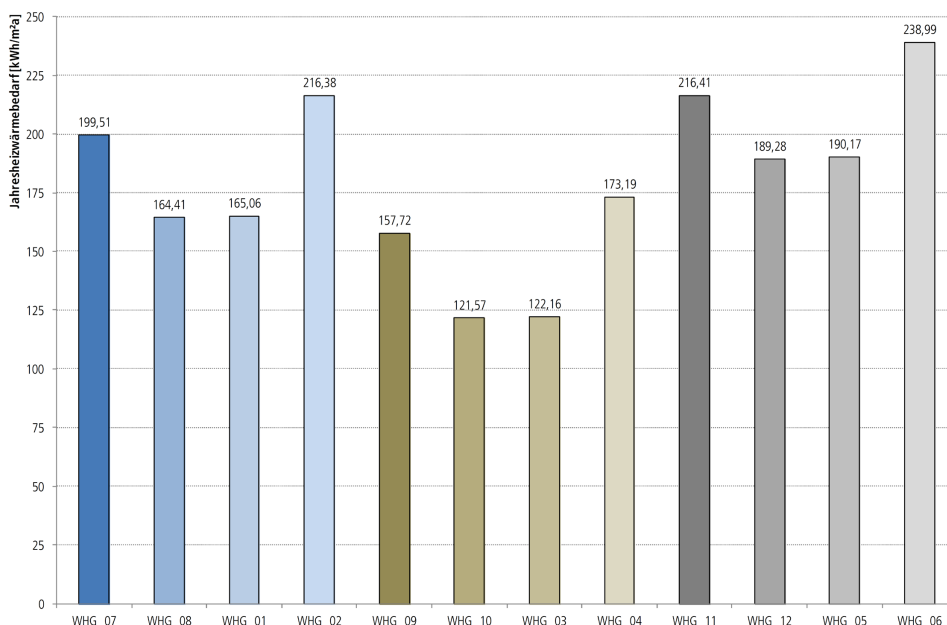


Abbildung 9.2: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen im Bestand in kWh/m²a. Mittelwert 179,6 kWh/m²a

9.1.2 Maßnahme 01a: Außenwärmedämmung 16cm

Tabelle 9.6: energetische Kennwerte der Maßnahme 01a

Beschreibung
Dämmung der Außenwände mit 16cm Mineralwolle WLG 035 bis 1m unter OK Kellerdecke. Aufschüttung des Terrains an der Westfassade bis OK EG.

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]					Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h		
50,92	111,47	44,04	47,18	78,98	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{l,e} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]						Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung $Q_{l,e}$	Hilfsenergie $Q_{he,e}$	Endenergiebedarf Q_e	
43,9	109,01	22,08	-	1,16	176,15	193,77

Durch das Anbringen einer 16 cm dicken Wärmedämmung auf die Außenwände lässt sich der Heizwärmebedarf drastisch senken. Die Wohnungen im 2. Obergeschoss weisen nach dieser Maßnahme nur noch einen durchschnittlichen Heizwärmebedarf von 160,1 kWh/m²a auf. Die Wohnungen im Erdgeschoss benötigen im Schnitt noch 119,5 kWh/m²a und die Wohnungen im 1. Obergeschoss noch 80,2 kWh/m²a. Der Primärenergiebedarf für Heizwärme kann demnach mit dieser Maßnahme um 33 % gesenkt werden.

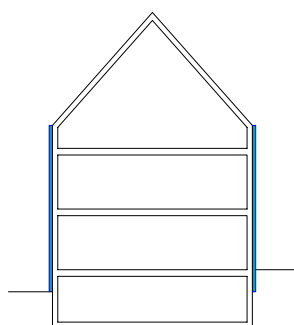
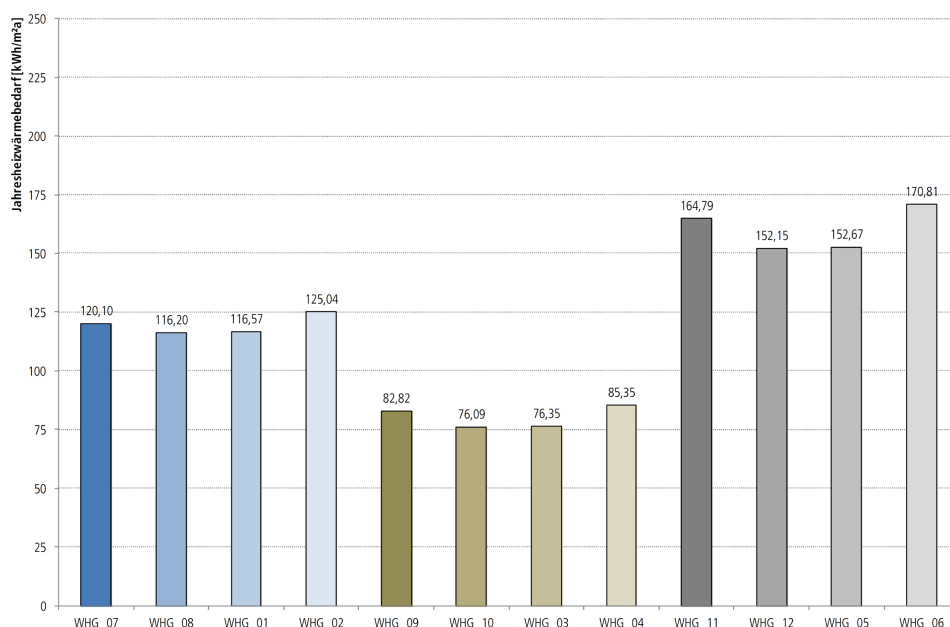


Abbildung 9.3: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 01a in kWh/m²a. Mittelwert 119,9 kWh/m²a



9.1.3 Maßnahme 01b: Außenwärmedämmung 24cm

Beschreibung
Dämmung der Außenwände mit 24cm Mineralwolle WLG 035 bis 1m unter OK Kellerdecke. Aufschüttung des Terrains an der Westfassade bis OK EG.

Tabelle 9.7: energetische Kennwerte der Maßnahme 01b

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]						
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h	Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
51,10	108,74	44,04	47,18	76,61	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{le} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]					Endenergiebedarf Q_e	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung Q_{le}	Hilfsenergie $Q_{he,e}$		
43,9	105,73	22,08	-	1,16	172,87	190,16

Durch das Anbringen einer 24cm dicken anstelle einer 16cm dicken Wärmedämmung auf die Außenwände lässt sich der Heizwärmebedarf lediglich um weitere 3% senken. Der durchschnittliche Primärenergiebedarf für Heizwärme beträgt bei dieser Variante 116,3 kWh/m²a gegenüber 119,9 kWh/m²a bei der Variante mit 16cm Wärmedämmung. Der Vorteil gegenüber der 16cm dicken Dämmschicht liegt darin, dass Lüftungsleitungen oder Regenfallrohre in der Fassadendämmschicht ohne grosse energetische Einbußen integriert werden können.

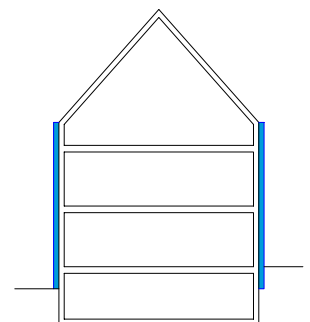
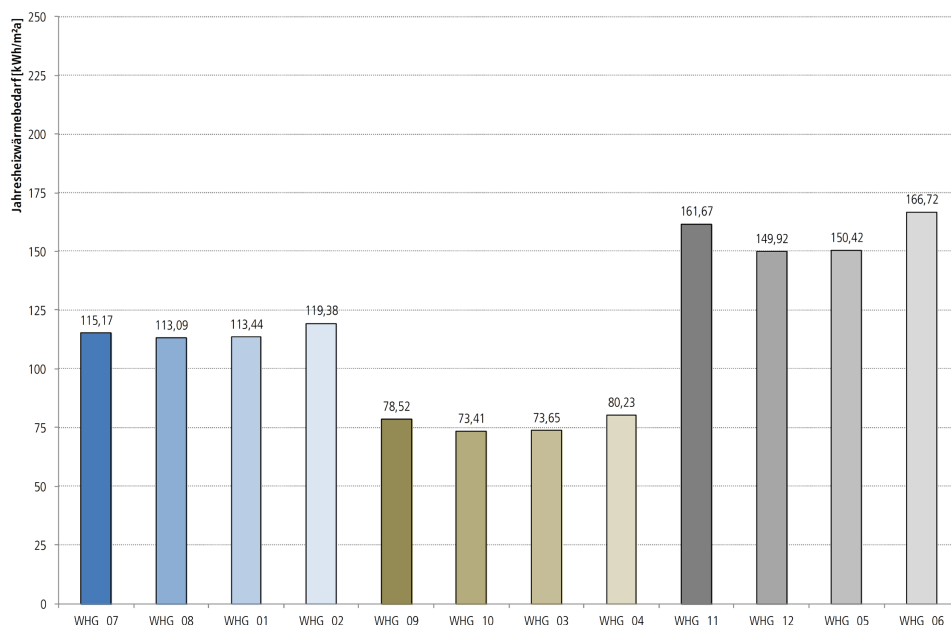


Abbildung 9.4: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 01b in kWh/m²a. Mittelwert 116,3 kWh/m²a

9.1.4 Maßnahme 02: Erhöhung des Anteils und der energetischen Qualität der Fensterflächen

Tabelle 9.8: energetische Kennwerte der Maßnahme 02

Beschreibung
Dämmung der Außenwände wie bei Maßnahme 01b, Fenster mit einem U-Wert 0,8 W/m ² K (g-Wert 0,5) und einem erhöhten Fensterflächenanteil von Nord 4% auf 6%, Ost 23%, Süd 7% auf 8%, West 20% auf 28%.

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$				[kWh/m ² a]	Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h		
52,32	93,32	44,04	47,18	64,34	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{le} + Q_{he,e}$					[kWh/m ² a]	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung Q_{le}	Hilfsenergie $Q_{he,e}$	Endenergiebedarf Q_e	
43,9	88,77	22,08	-	1,16	155,91	171,50

Durch die Vergrößerung des Fensterflächenanteils und die Verbesserung der energetischen Qualität der Fenster lässt sich der Primärenergiebedarf für Heizwärme um 16% auf 97,6 kWh/m²a senken. Diese Maßnahme betrifft den Bedarf aller Wohnungen, jedoch verringert sich der Bedarf der Wohnungen am südlichen Ende der Zeile aufgrund der größeren solaren Gewinne überproportional (Verringerung um 20%).

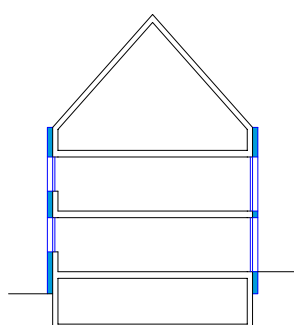
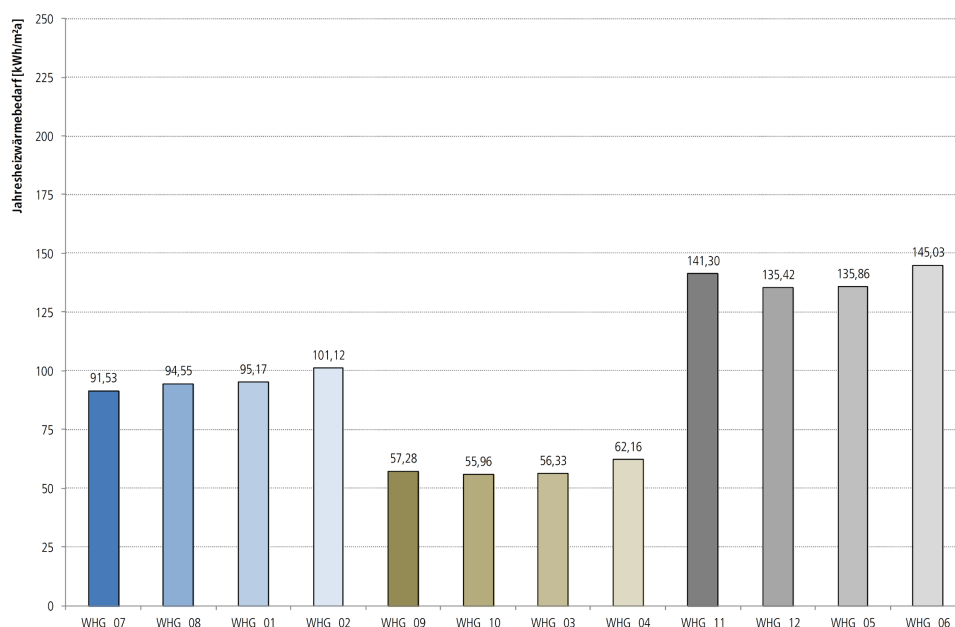


Abbildung 9.5: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 02 in kWh/m²a. Mittelwert 97,6 kWh/m²a



9.1.5 Maßnahme 03: Dämmung der Kellerdecke

Beschreibung
Dämmung der Kellerdecke. Aufgrund der niedrigen Raumhöhe im UG sowie der unter der Kellerdecke geführten Rohrleitungen erfolgt die Dämmung auf der Rohdecke mit 2cm Polyurethan 024 Trittschalldämmung und 3cm Polystyrol 040 Wärmedämmung. U-Wert Decke 0,40 W/m ² K

Tabelle 9.9: energetische Kennwerte der Maßnahme 03

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]					Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h		
53,64	80,98	44,04	47,18	56,82	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{l,e} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]					Endenergiebedarf Q_e	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung $Q_{l,e}$	Hilfsenergie $Q_{he,e}$		
43,9	78,38	22,08	-	1,16	145,52	160,07

Der durchschnittliche Primärenergiebedarf für Heizwärme verringert sich durch die Dämmung der Kellerdecke um 12 % auf 86,2 kWh/m²a. Am meisten profitieren von dieser Maßnahmen die Wohnungen im Erdgeschoss. Deren Heizwärmebedarf sinkt durch diese Maßnahme um 31% gegenüber Maßnahme 02.

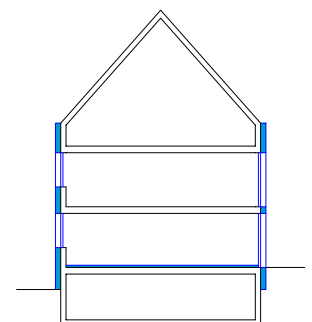
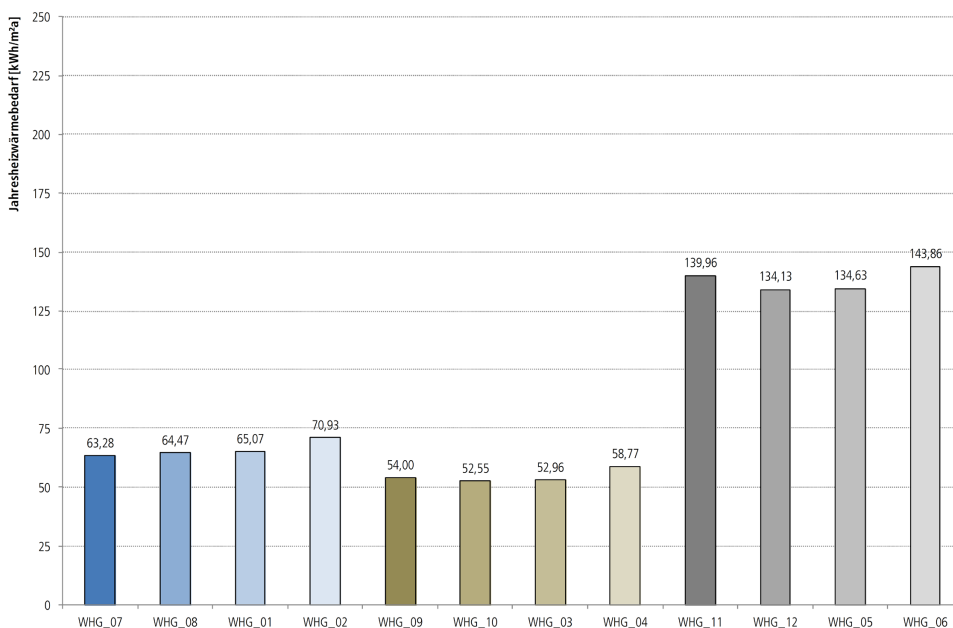


Abbildung 9.6: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 03 in kWh/m²a. Mittelwert 86,2 kWh/m²a

9.1.6 Maßnahme 04a: Dämmung des Daches

Tabelle 9.10: energetische Kennwerte der Maßnahme 04a

Beschreibung
Verringerung des U-Wertes des Daches von ursprünglich 1,58 W/m ² K auf 0,15 W/m ² K.

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]					Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h		
55,01	61,66	44,04	47,18	39,07	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{he,e} + Q_{ww,e} + Q_{l,e} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]						Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{he,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung $Q_{l,e}$	Hilfsenergie $Q_{he,e}$	Endenergiebedarf Q_e	
43,9	53,92	22,08	-	1,16	121,06	133,17

Durch die energetische Verbesserung des Daches reduziert sich der durchschnittliche Primärenergiebedarf für Heizwärme um weitere 32% auf 59,3 kWh/m²a. Die Wohnungen im 2.Obergeschoß profitieren am meisten von dieser Maßnahme. Gegenüber Maßnahme 3 verringert sich deren Heizwärmebedarf um 52 % auf durchschnittlich 67,5 kWh/m²a.

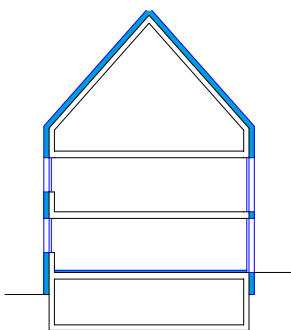
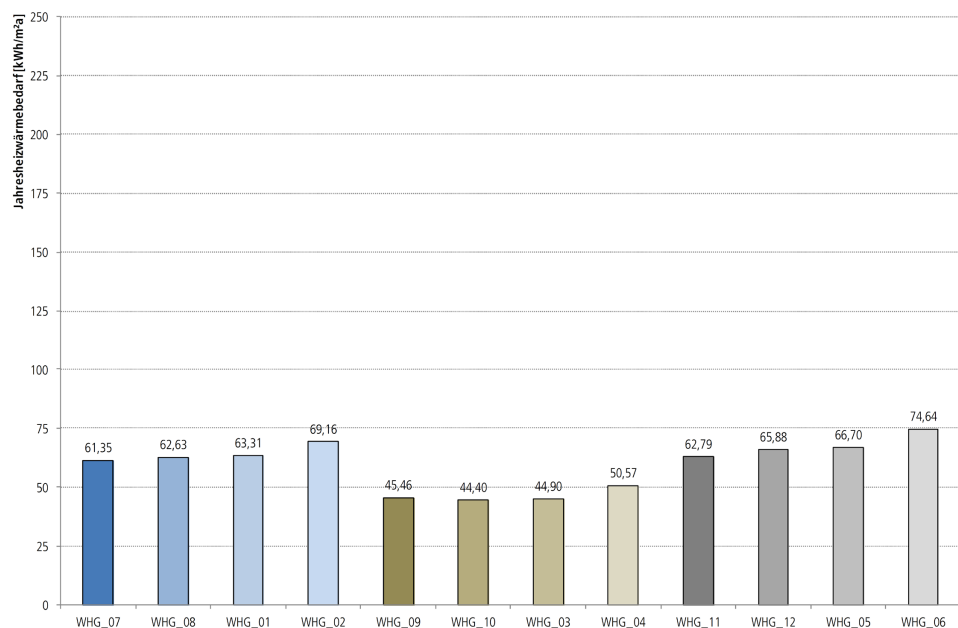


Abbildung 9.7: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 04a in kWh/m²a. Mittelwert 59,3 kWh/m²a



9.1.7 Maßnahme 04b: Dämmung des Daches und Vergrößerung des Fensterflächenanteils im Dachgeschoss

Beschreibung
Neben der Dämmung des Daches wie in Maßnahme 04a werden jeweils zwei Wohnungen des 2.Obergeschosses zu einer Wohnung zusammengelegt und der Fensterflächenanteil in diesem Geschoss vergrößert. Des weiteren werden sämtlichen Haushaltsgeräte gegen energieeffiziente Geräte der Klasse A+++ ausgetauscht.

Tabelle 9.11: energetische Kennwerte der Maßnahme 04b

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m²a]					Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h		
55,56	65,42	36,74	66,31	39,68	1,38	1,1

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{l,e} + Q_{he,e}$ [kWh/m²a]					Endenergiebedarf Q_e	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m²a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung $Q_{l,e}$	Hilfsenergie $Q_{he,e}$		
20,0	54,76	22,08	-	1,16	98,0	107,8

Die Vergrößerung des Fensterflächenanteils im Dachgeschoss führt zu keinen nennenswerten Verbesserungen hinsichtlich des Primärenergiebedarfs für Heizwärme (60,2 kWh/m²a). Der Jahresstrombedarf wird in der Berechnung gemäß Definition Effizienzhaus-Plus des BMUB pauschal auf 20 kWh/m²a reduziert, dadurch reduziert sich der Jahresprimärenergiebedarf gesamt von 191,74 kWh/m²a auf 107,3 kWh/m²a.

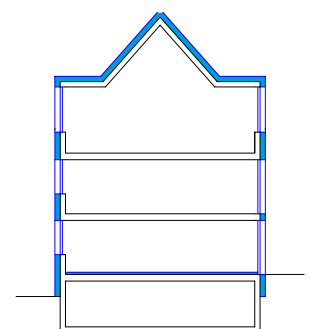
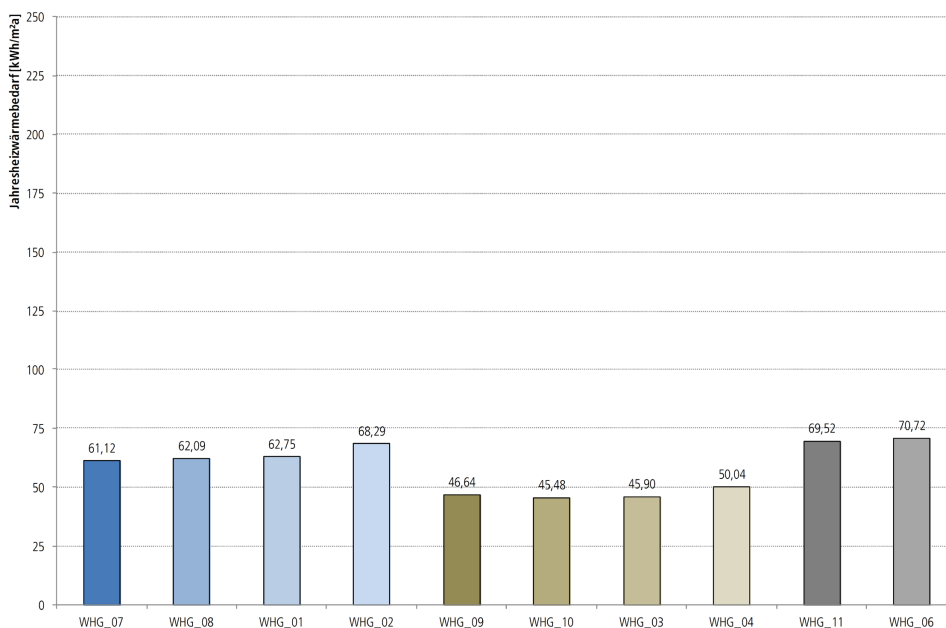


Abbildung 9.8: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 04b in kWh/m²a. Mittelwert 60,2 kWh/m²a

9.1.8 Maßnahme 5: Lüftungsanlage mit WRG

Tabelle 9.12: energetische Kennwerte der Maßnahme 05

Beschreibung						
Zusätzlich zu den baulichen Maßnahmen 1-4 wird eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut.						
Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta * (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]						
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h	Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
30,79	65,42	36,74	66,31	16,47	1,38	1,1
Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{h,e} + Q_{ww,e} + Q_{l,e} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]						Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf Q_{el}	Heizung $Q_{h,e}$	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung $Q_{l,e}$	Hilfsenergie $Q_{he,e}$	Endenergiebedarf Q_e	
20,0	23,14	22,08	1,6	1,16	67,98	74,78

Der Primärenergiebedarf für Heizwärme reduziert sich durch den Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung auf durchschnittlich 25,5 kWh/m²a.

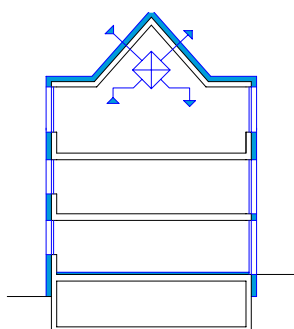
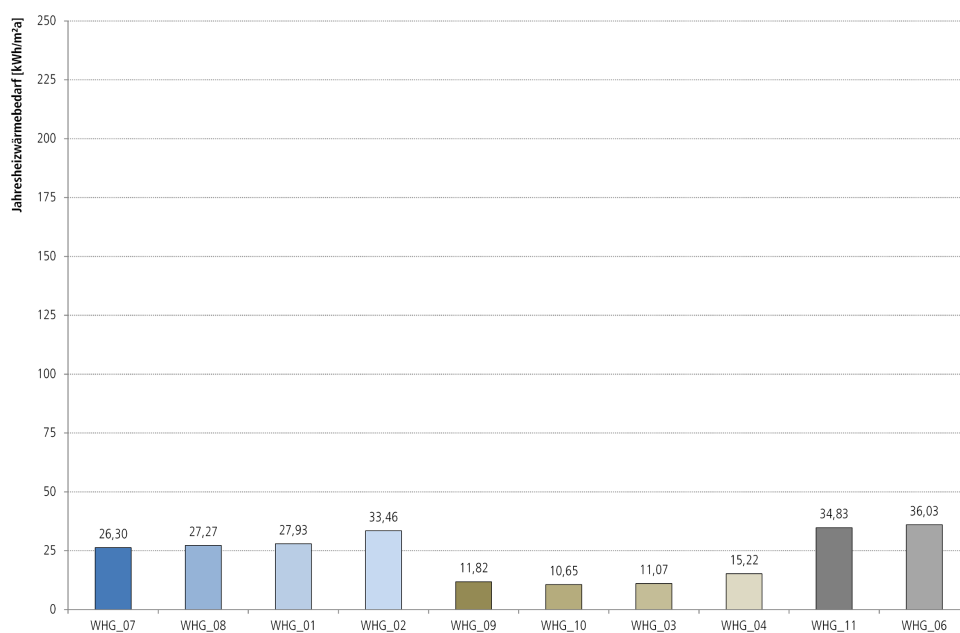


Abbildung 9.9: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 05 in kWh/m²a. Mittelwert 25,5 kWh/m²a



9.1.9 Maßnahme 6: Luft/Wasser-Wärmepumpe

Beschreibung
Zusätzlich zu den baulichen Maßnahmen 1-5 wird als Heizungssystem eine Luft/Wasser Wärmepumpe anstelle des bestehenden Gas-Brennwertkessels eingebaut.

Tabelle 9.13: energetische Kennwerte der Maßnahme 06

Heizwärmebedarf $Q_h = (H_v + H_t) - \eta \cdot (Q_i + Q_s)$ [kWh/m ² a]						
Lüftungswärmeverluste H_v	Transmissionswärmeverluste H_t	interne Gewinne Q_i	solare Gewinne Q_s	Heizwärmebedarf Q_h	Anlagenaufwandszahl e_p	Primärenergiefaktor
30,79	65,42	36,74	66,31	16,77	0,37	2,4

Endenergiebedarf $Q_e = Q_{el,e} + Q_{he} + Q_{ww,e} + Q_{le} + Q_{he,e}$ [kWh/m ² a]					Endenergiebedarf Q_e	Jahresprimärenergiebedarf Q_p [kWh/m ² a]
Jahresstrombedarf $Q_{el,e}$	Heizung Q_{he}	Warmwasser $Q_{ww,e}$	Lüftung Q_{le}	Hilfsenergie $Q_{he,e}$		
20,0	6,20	4,60	1,60	2,40	34,80	83,52

Durch den Ersatz des Gas-Brennwertkessels durch eine Luft-Wasser-Wärmepumpe lässt sich der Primärenergiebedarf für Heizwärme auf durchschnittlich 14,9 kWh/m²a senken. Die Anlagenaufwandszahl sinkt auf 0,37, wodurch der Endenergiebedarf gegenüber Maßnahme 5 nahezu halbiert wird. Primärenergetisch beträgt die Verbesserung jedoch nur 21%, da mit der beschriebenen Anlage der Primärenergiefaktor von 1,1 auf 2,4 steigt.

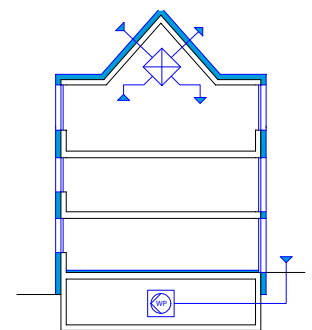
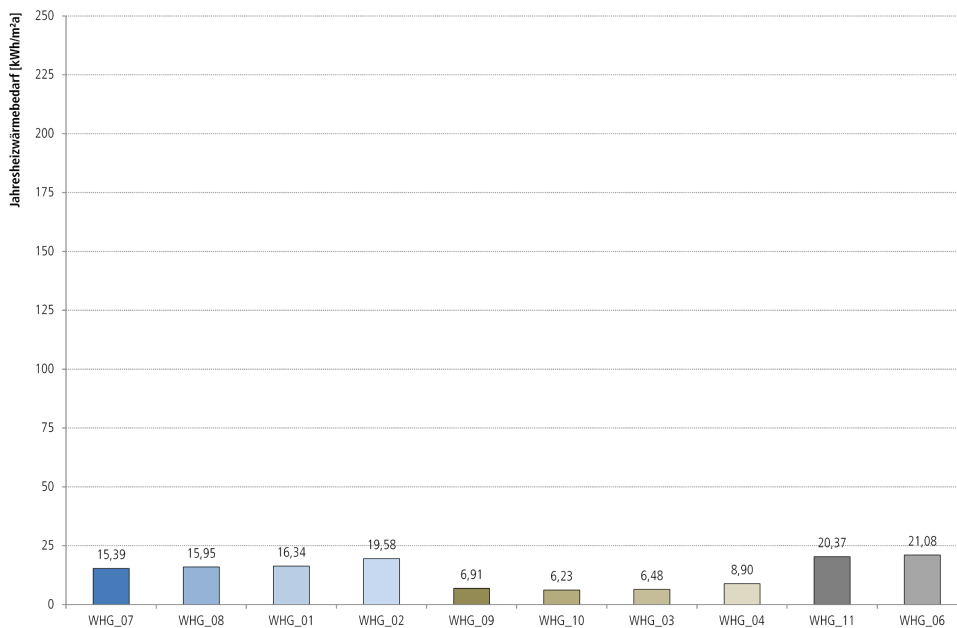


Abbildung 9.10: Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Wohnungen für Maßnahme 06 in kWh/m²a. Mittelwert 14,9 kWh/m²a

9.2 Maßnahmenvergleich und Ableitung eines Planungsszenarios

Abbildung 9.11 zeigt den Primärenergiebedarf für Heizwärme der einzelnen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich

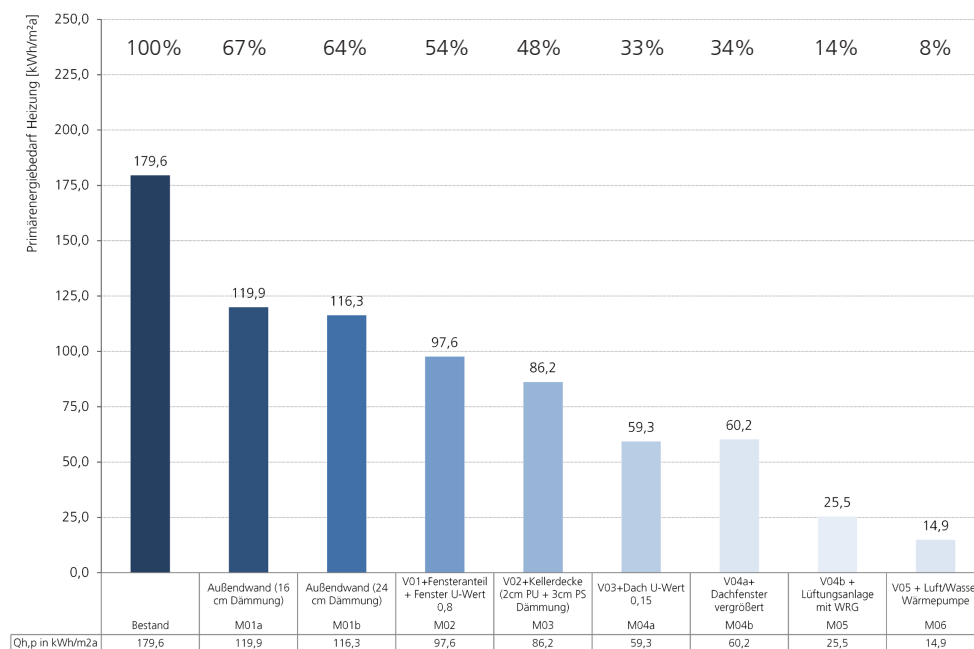


Abbildung 9.11: Primärenergiebedarf für Heizwärme in kWh/m²a der einzelnen Sanierungsmaßnahmen im Vergleich

Um den Endenergiebedarf aus Maßnahme 6 von 34,8 kWh/m²a bzw. 27.900 kWh/a durch die regenerative Erzeugung von Solarstrom decken zu können, sind mehrere Varianten denkbar (Annahme Dachneigung 45°, monokristalline PV-Anlage, 15% Wirkungsgrad):

6.1 PV-Anlage ausschließlich auf dem Dach.

Benötigte Fläche: Dachfläche Ost/West insgesamt 260m²
erzeugter PV-Strom: 28.500 kWh

6.2 PV-Anlage auf dem Dach, sowie Belegung der Fassaden Ost und West.

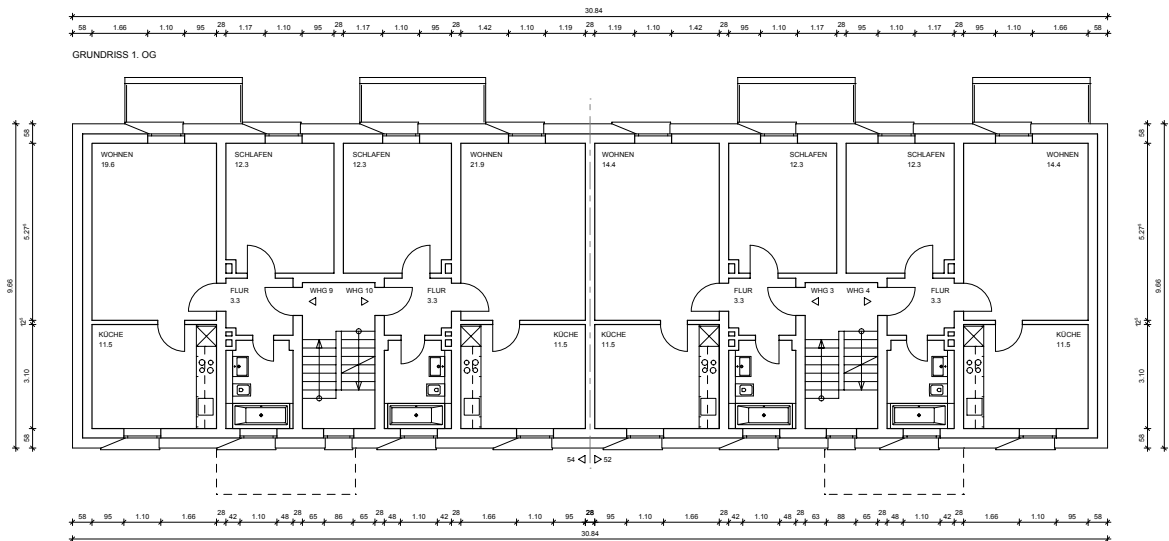
Benötigte Fläche: Dachfläche Ost/West 120m², Fassadenfläche 200m²
erzeugter PV-Strom: 28.275 kWh

6.3 PV-Anlage auf dem Dach, Belegung Giebelwand Süd.

Benötigte Fläche: Dachfläche Ost/West insgesamt 200m², Fassadenfläche 70m²,
erzeugter PV-Strom: 28.100 kWh

Aufgrund der notwendigen Belichtungsfläche im 2.Obergeschoss, stehen auf dem Dach lediglich 200m² für die Nutzung einer PV-Anlage zur Verfügung. Variante 6.1 lässt sich daher nicht realisieren. Die Belegung von 200 m² Fassadenfläche, wie in Variante 6.2 beschrieben, ist aus gestalterischen und wirtschaftlichen Gründen mit Nachteilen behaftet. Variante 6.3 hingegen ist sowohl aus technischer wie architektonischer Sicht sinnvoll und wird in Abbildung 9.12 als Planungsszenario für die direkte Übertragung des energy+Home Konzeptes dargestellt.

Abbildung 9.12: Entwurfs-
 skizze des Fritz-Dächert-Weg
 56-58 als Plusenergiegebäude,
 Grundriss 1. und 2.OG,
 Ansicht West, Ansicht Süd,
 Schnitt A-A und Visualisierung
 Visualisierung: Patrick Frey



OK Dach
 Konstruktion
 +12.83'

OK FFB 2.OG
 +4.50

OK FFB 1.OG
 +3.75

OK FFB EG
 +1.00

OK Gelände
 ±0.00



9.3 Modellrechnung zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Anhand einer Kostenberechnung nach DIN 276 für die 2.Ebene der Kostengruppen `300 Baukonstruktion` und `400 Technische Anlagen` wurden die Sanierungskosten der beispielhaften Geschosswohnungsbauzeile abgeschätzt. Grundlage dazu sind statistische Kostenkennwerte des Baukosteninformationszentrums für die Modernisierung von Wohnbauten, welche nach 1945 errichtet wurden², sowie Kostenkennwerte der energy+Home Sanierung als Vergleich und zur Schätzung des finanziellen Mehraufwandes zur Erzielung der Plusenergiebilanz. Die Ergebnisse dieser Berechnung dienen als Grundlage zur Abschätzung der Nutzungskosten des sanierten Gebäudes, mit dem Ziel, eine Aussage darüber treffen zu können, ab welchem Mietpreis die Sanierung als wirtschaftlich anzusehen ist.

Die Lebenszykluskosten der Sanierung stellen sich wie folgt dar:

KG	Beschreibung	€/Einheit			energy+ Home	Fritz-Dä- chert-Weg	Bauko- sten
		von	Ø	bis			
Herstellungskosten Baukonstruktion							
310	Baugrube	33	52	125	44	35	9.800
320	Gründung	115	275	567	125	115	31.510
330	Außenwände	196	279	418	295	280	218.340
340	Innenwände	72	168	237	98	90	87.080
350	Decken	139	186	237	266	220	180.840
360	Dächer	142	272	357	424	350	123.760
370	Einbauten	5	9	20	12	10	10.960
390	Sonstiges	12	24	40	110	30	32.880
300	Total Brutto						695.170
Herstellungskosten Technische Anlagen							
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	28	61	108	70	61	66.860
420	Wärmeversorgungsanlagen	41	61	76	117	100	109.600
430	Lufttechnische Anlagen	8	32	71	35	32	35.070
440	Starkstromanlagen	23	48	81	151	100	109.600
450	Fernmeldeanlagen	5	13	42	20	13	14.250
490	Sonstiges Technische Anlagen		3			3	6.580
400	Total Brutto						341.960
Nutzungskosten							
352	Barwert Inspektion und Wartung Baukonstruktion						16.190
353	Barwert Inspektion und Wartung Technische Anlagen						86.350
410	Barwert Instandsetzung Baukonstruktion						194.230
420	Barwert Instandsetzung Technische Anlagen						72.630
	Total Nutzungskosten						369.400

Tabelle 9.14: Kostenberechnung nach DIN 276 und DIN 18960 für die Sanierung zum Geschosswohnungsbau-Plusenergiegebäude

² Vgl. BKI, 2014, S.380 ff.

Zur Berechnung der Herstellungskosten enthält Tabelle 9.14 Angaben zu durchschnittlichen Kosten von Modernisierungen nach BKI. Da die in diesem Rahmen untersuchten Gebäude keine Plusenergiegebäude beinhalten wurden die Kostenkennwerte mit den Kostenkennwerten der energy+Home Sanierung gegenübergestellt. Die gewählten Kostenkennwerte liegen im Wesentlichen im Bereich üblicher Sanierungskosten und orientieren sich zudem bei großer Abweichung von den Kosten des energy+Home an dessen Kostenkennwerten.

Die Betriebskosten wurden in der Berechnung der Nutzungskosten nicht integriert, da diese über die Nebenkosten direkt abgerechnet werden und damit keinen Einfluss auf die Kaltmiete haben.

Für die Ermittlung der Nutzungskosten wurde analog zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 5 ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, eine allgemeine Preissteigerung von 2 %, eine Preissteigerung für Energiekosten von 4 %, ein Diskontierungszinssatz von 5,5 %, sowie Nutzungsdauern der Bauteile und jährliche Aufwendungen für Inspektion, Wartung und Instandsetzung in Anlehnung an das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen sowie VDI-Richtlinie 2067 gewählt. Darüber hinaus wurde eine jährliche Mietpreissteigerung von 1% angenommen.

Die Sanierung ist als wirtschaftlich zu betrachten, sobald der Kapitalwert, also die Summe aus Einnahmen und Ausgaben, größer 0 ist. Die Einnahmen resultieren dabei aus den Mieteinnahmen des Objektes und die Ausgaben aus der Summe von Herstellungs- und Nutzungskosten über den Betrachtungszeitraum. Dies ist für das untersuchte Referenzgebäude unter Annahme der zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen ab einer Kaltmiete von $10,65 \text{ €/m}^2_{\text{WF}}$ der Fall.

Es bleibt im Einzelfall zu prüfen, ob die ortsübliche Vergleichsmiete unter oder über diesem Preisniveau liegt, und ob im ersten Fall eine Erhöhung der Jahresmiete um 11 % der umlagefähigen Kosten nach §559 BGB auf das Niveau der ortsüblichen Vergleichsmiete möglich ist.

9.4 Vergleichende Gegenüberstellung von EFH-Sanierung und MFH-Sanierung

In Kapitel 8.1 wurden die maßgeblichen Faktoren identifiziert, welche neben der energetischen Qualität der Gebäudehülle und der verwendeten Anlagentechnik einen Einfluß auf die Energiebilanz einer Sanierung zum Plusenergiegebäude haben. Im Folgenden werden einzelne dieser Faktoren näher untersucht, um einen Vergleich zwischen der Sanierung des untersuchten Einfamilienhauses und der untersuchten Geschosswohnungsbau-Zeile als Grundlage allgemeiner Planungsempfehlungen herzustellen.

Kompaktheit

Um Transmissionswärmeverluste zu minimieren sollte das beheizbare Gebäudevolumen die kleinstmögliche wärmeübertragende Umfassungsfläche aufweisen. Dieser Kompaktheitsgrad wird mit dem A/V-Verhältnis beschrieben und ist umso besser, je kleiner der Wert ist. Seit Inkrafttreten der EnEV 2009 ist der jährliche zulässige Primärenergiebedarf nicht mehr abhängig vom A/V-Verhältnis, sondern vom Energiebedarf des EnEV-Referenzgebäudes, womit dem nicht existenten Zusammenhang zwischen Kompaktheit und Anlagenverlusten, Lüftungswärmeverlusten, solaren und internen Erträgen Rechnung getragen wird.³ Ungeachtet dessen führt eine Reduktion des A/V-Verhältnisses von $0,1 \text{ m}^{-1}$ zu einer Heizenergieverringerung von etwa $5\text{-}6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ⁴ und ein niedriges A/V-Verhältnis ist somit als positiv zu bewerten. Bei bestehenden Gebäuden ist die Möglichkeit, Einfluß auf die Kompaktheit nehmen zu können gegenüber einem Neubau gering, jedoch können untergeordnete Bauteile wie Gauben oder Vor- und Rücksprünge in der Fassade durchaus auch bei einer Sanierung `korrigiert` und damit die Kompaktheit erhöht werden.

Die Geschosswohnungsbauzeile im Fritz-Dächert-Weg ist im Vergleich zum energy+Home Einfamilienhaus mit einem A/V-Verhältnis von $0,52 \text{ m}^{-1}$ gegenüber $0,67 \text{ m}^{-1}$ wesentlich kompakter. Dies deckt sich mit den Angaben der Deutschen Gebäudetypologie⁵, welche für Mehrfamilienhäusern der Baualtersklasse des Fritz-Dächert-Weges ein A/V-Verhältnis von $0,38 \text{ m}^{-1}$ (MFH_E) bis $0,61 \text{ m}^{-1}$ (MFH_D) und für Einfamilienhäuser der Baualtersklasse des energy+Home $0,55 \text{ m}^{-1}$ (EFH_E) bis $0,80 \text{ m}^{-1}$ (EFH_D) angibt.

Dem gegenüber steht beim Geschosswohnungsbau jedoch eine größere Energiebezugsfläche (EBF), die beim Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 822 m^2 beträgt und beim energy+Home lediglich 270 m^2 . Auf 1 m^2 solaraktiv nutzbarer Dachfläche kommen dementsprechend beim Einfamilienhaus 3 m^2 EBF und bei Geschosswohnungsbau $3,95 \text{ m}^2$ EBF. Reicht die Dachfläche nicht aus, um den notwendigen solaren Ertrag zu erwirtschaften, so können zusätzlich Fassadenflächen hinzugezogen werden. Diese weisen gegenüber der Dachfläche einen wesentlich geringeren Ausnutzungsgrad auf, so dass vor einer Aktivierung der Fassadenfläche zuerst immer die Dachflächen genutzt werden sollten.⁶ Der untersuchte Geschosswohnungsbau weist gegenüber dem Einfamilienhaus ein höheres Potential zur solaraktiven Nutzung der Fassadenfläche auf, auf 1 m^2 Fassadenfläche kommen $2,33 \text{ m}^2$ EBF gegenüber $3,00 \text{ m}^2$ beim Einfamilienhaus.⁷ In Summe stehen dem Geschosswohnungsbau damit gleich viel solaraktiv nutzbare Hüllflächen pro m^2 EBF zur Verfügung, wobei die Art der Hüllfläche (Dach bzw. Wand) jedoch einen großen Einfluss auf den Ertrag hat. Dahingehend ist es leichter, mit einem Einfamilienhaus eine Plusenergiebilanz zu erreichen, da der Dachflächenanteil beim Einfamilienhaus größer ist.

3 Vgl. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, 2014, S.38.

4 Vgl. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, 2014, S.5.

5 Vgl. IWU, 2005.



6 Vgl. Hegger 2014, S. 86.

7 Bei Annahme, dass 80% der opaken Ost-, Süd- und Westfassade solaraktiv nutzbar sind. Bei einer Nord-Süd-Ausrichtung des Gebäudes verschiebt sich das Verhältnis zugunsten des EFH.

Hegger et.al.⁸ haben die Abhängigkeit der Plusenergiebilanz von der Gebäudekubatur und dem damit verbundenen Verhältnis der Energiebezugsfläche zur solaraktiv nutzbaren Hüllfläche untersucht und dabei festgestellt, dass sich ein größerer Energieüberschuss bei niedriger Geschossigkeit und ein größeres Energiedefizit bei hoher Geschossigkeit einstellt. Bei einer Zeilenbebauung liegt die Bilanzgrenze, in Abhängigkeit von der Gebäudebreite, zwischen 6 und 7 Geschossen. Zu diesem Ergebnis kommt auch Großklos in seiner Analyse der Einflussfaktoren bei Ein- und Mehrfamilienhäusern.⁹

Die untersuchte Geschosswohnungsbau-Zeile der 50er Jahre ist demnach hinsichtlich seiner Kompaktheit für die Übertragbarkeit des energy+Home Konzeptes geeignet, es muss jedoch beachtet werden, dass nicht das A/V-Verhältnis die ausschlaggebende Größe zur Beurteilung der Kompaktheit darstellt, sondern das Verhältnis solaraktiver Dachfläche zur Energiebezugsfläche.

Tabelle 9.15: Vergleich von A/V Verhältnis, Energiebezugsfläche und Gebäudehüllfläche von EFH und MFH

	MFH	EFH
		
A/V-Verhältnis [m ⁻¹]	0,51	0,67
Energiebezugsfläche [m ²]	822	270
Solaraktiv nutzbare Gebäudehüllfläche [m ²]	560	160
Solaraktiv nutzbare Dachfläche [m ²]	210	90
Solaraktiv nutzbare Fassadenfläche [m ²] (80% der opaken Fassadenfläche Ost, Süd, West)	350	90
Verhältnis solaraktiv nutzbarer Dachfläche zu Fassadenfläche	1 : 1,7	1 : 1
Verhältnis EBF zu solaraktiv nutzbare Hüllfläche (m ² EBF pro 1m ² Hüllfläche)	1,47	1,50
Verhältnis solaraktiv nutzbare Dachfläche zu EBF (m ² EBF pro 1m ² Dachfläche)	3,95	3,00
Verhältnis solaraktiv nutzbare Fassadenfläche zu EBF (m ² EBF pro 1m ² Fassadenfläche)	2,33	3,00

Ausrichtung

Wird der für die Plusenergiebilanz notwendige Ertrag mithilfe einer Photovoltaik-Anlage erzeugt, so ist die Höhe des Ertrages neben dem Wirkungsgrad der Anlage vor allem abhängig von der solaren Strahlungsstärke, die je nach Standort und Ausrichtung der solaraktiven Fläche variiert. Abbildung 9.13 zeigt den Ertrag der PV-Flächen im Jahresverlauf für die Konzeptskizze des Referenzgebäudes im Fritz-Dächert-Weg, welches im zentralen Rhein-Main Gebiet steht und eine Ost-/West-Ausrichtung sowie 45° Dachneigung aufweist. Gut erkennbar ist der hohe Ertrag in den Monaten April bis September und der deutlich geringere Ertrag in den Wintermonaten. Ermittelt wurden die Monatswerte nach DIN EN

8 Vgl. Hegger et al., 2014, S.88 ff.

9 Vgl. Großklos, 2015, S.35.

15316-4-6:2009-07¹⁰ für monokristalline, mäßig belüftete Siliciummodule und Strahlungsintensitäten für den Referenzort Mannheim nach DIN V 18599-10:2011-12.¹¹

Die Ost-/West-Ausrichtung des bestehenden Gebäudes ist dabei durchaus als positiv zu betrachten, da die Strahlungsintensität auf beiden Dachflächen annähernd gleich groß ist. Der Ertrag einer nach Süden ausgerichteten Dachfläche ist zwar bei gleicher Dachneigung und Größe höher, jedoch lässt sich bei einem Satteldach und Nord-/Süd-Ausrichtung nur die Hälfte der Dachfläche belegen.

Abbildung 9.13 zeigt ebenfalls den PV-Ertrag in Abhängigkeit von Ausrichtung und Dachneigung bei alleiniger Belegung der Dachflächen in unterschiedlichen Varianten. Den größten Ertrag liefert eine Belegung der Dachfläche mit jeweils 100m² auf der Ost- und Westseite bei 30° Dachneigung. Bei der bestehenden 45° Dachneigung ist der Ertrag ca. 6 % geringer. Den geringsten Ertrag liefert eine vertikale Belegung der Fassadenfläche. Diese sollte daher möglichst nur dann belegt werden, wenn die Dachfläche nicht ausreichend groß ist, oder aufgrund von Gauben oder Dachfenster eine Belegung mit PV-Modulen nicht möglich ist.

Eine Belegung beider Dachflächen bei Nord-/Süd-Ausrichtung des Gebäudes führt zu etwas geringeren Werten ist jedoch aus oben genannten Gründen auszuschließen. Eine ausschließliche Belegung der Süddachfläche führt aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Fläche zu einem sehr niedrigen Ertrag. Anders als beim Neubau eines Gebäudes, bei der die Geometrie des Daches gegebenenfalls einem optimierten Ertrag angepasst werden kann, ist demnach eine Ost-/West-Ausrichtung einer bestehenden Gebäudezeile mit Satteldach gegenüber einer Nord-/Süd-Ausrichtung für die Realisierung eines Plusenergiegebäudes vorteilhaft.

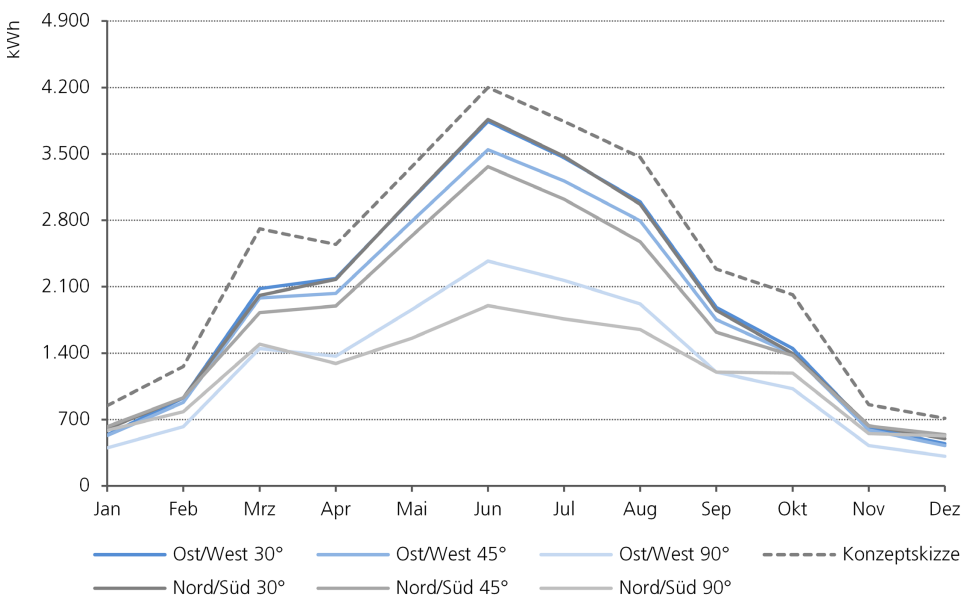


Abbildung 9.13: monatlicher PV-Ertrag in kWh in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Dachfläche bei 100 m² PV-Fläche je Himmelsrichtung

Diese Überlegungen werden auch durch folgenden Vergleich am Beispiel des energy+Home verdeutlicht. Das Gebäude weist mit seiner Ost-West-Ausrichtung und 15° Dachneigung einen Ertrag von 120 kWh/m²a (bzw. 9.880 kWh in Summe) bei einer Größe der Solaranlage von 82,5 m² auf. Üblicherweise wird eine Dachneigung von ca. 30° und eine Südausrichtung

10 Vgl. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik / Bauwesen im DIN, 2009.

11 Vgl. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik / Bauwesen / Lichttechnik im DIN, 2011, S. 97.

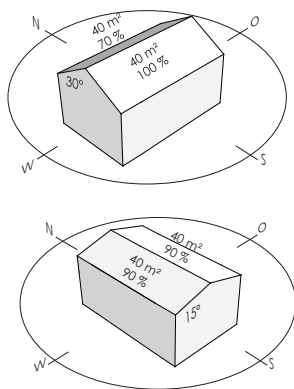


Abbildung 9.14: Solare Einstrahlung auf das energy+Home bei Ost-/West und Nord-/Süd Ausrichtung bei 15° und 30° Dachneigung

Die Dachfläche als Optimum für eine Solaranlage betrachtet. Die solare Einstrahlung beträgt gegenüber dem Maximalwert bei optimaler Ausrichtung und Dachneigung sowohl auf der Ost-, als auch auf der Westseite 90%.

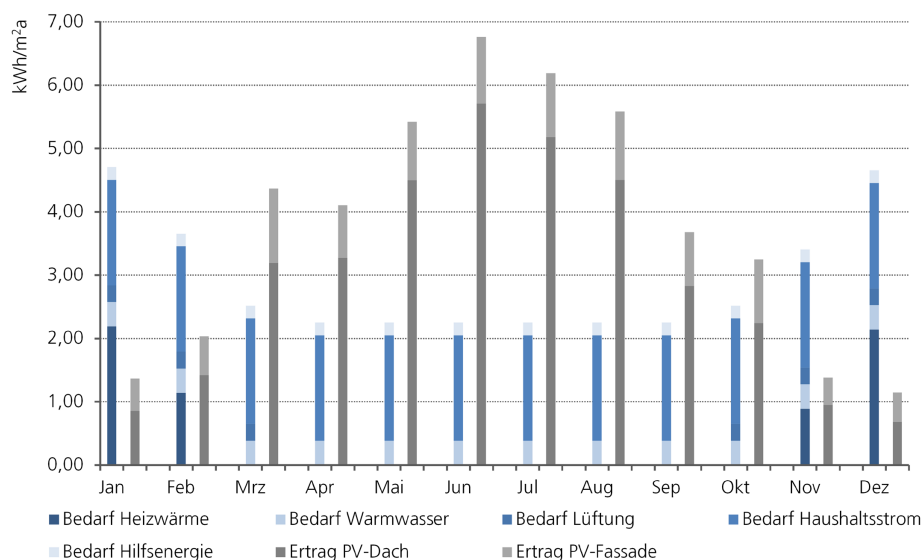
Ein um 90° gedrehtes Haus mit derselben Grundfläche, Nord-Süd-Ausrichtung und 30° Dachneigung weist bei identischer Größe der Solaranlage eine solare Einstrahlung von 100% auf der Südseite und lediglich 70% auf der Nordseite auf. Der Ertrag der PV-Anlage beträgt bei dieser Variante dadurch 9.335 kWh bzw. 113 kWh/m²a und ist somit sogar 5 % geringer als bei der zuvor betrachteten Ost-West Ausrichtung des Gebäudes.

Hinsichtlich der Dachneigung führt eine Abweichung von den als optimal angesehenen 30° zwar zu einem geringeren Ertrag in der Jahressumme, jedoch sinkt dadurch vor allem der Ertrag in den Sommermonaten in denen sowieso ein Überschuss vorhanden ist. Der Eigenverbrauchsanteil steigt dadurch. Hinsichtlich seiner Ausrichtung ist eine Ost-/West-Ausrichtung für eine Geschosswohnungsbau-Zeile der 50er Jahre mit Satteldach für die Übertragbarkeit des energy+Home Konzeptes vorteilhaft. Es muss jedoch im Einzelfall geprüft werden, ob die Dachfläche in Abhängigkeit des Gebäudestandortes innerhalb Deutschlands alleine ausreichend für eine positive Bilanz ist, oder ob Fassadenflächen aktiviert bzw. Energie anderweitig erzeugt werden muss.

Eigenverbrauchsanteil

Abbildung 9.15 zeigt den monatlichen Endenergiebedarf für Heizwärme, Warmwasser, Lüftung, Haushaltsstrom und Hilfsenergie sowie den PV-Ertrag des Referenz-Geschosswohnungsbaus für den Standort Mannheim nach DIN 18599-10:2001-12.

Abbildung 9.15: Monatlicher Strombedarf und -erzeugung der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg in kWh/m²a



Dem regenerativ erzeugten Strom aus der PV-Anlage steht ein Energiebedarf gegenüber, der in den Sommermonaten gering und den Wintermonaten hoch ist. Der PV-Ertrag ist demgegenüber in den Sommermonaten am größten. Daraus resultiert, dass nicht der gesamte selbst erzeugte Strom direkt genutzt, sondern ein Teil in das öffentliche Netz eingespeist bzw. in den Wintermonaten daraus entnommen werden muss. Auf rechnerischer Grundlage der Monatsbilanz wird 70 % des Energieverbrauchs über die PV-Anlage gedeckt und 30 % durch das Netz gedeckt. Der regenerativ erzeugte Strom wird zu 54 % selbst genutzt und zu 46 % in das Netz eingespeist.

Abbildung 9.16 veranschaulicht den monatlichen Anteil von Eigennutzung, Netzbezug

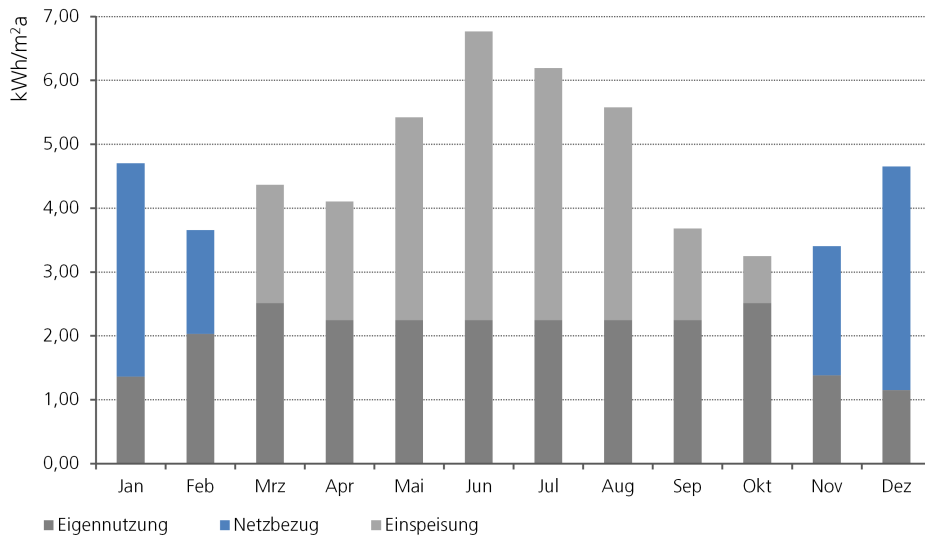


Abbildung 9.16: Monatliche Bilanz von Eigennutzung, Netzbezug und Netzeinspeisung der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg.

und Netzeinspeisung. In den Monaten März bis Oktober wird der Energiebedarf durch den Eigennutzungsanteil gedeckt und die überschüssige Energiemenge in das Stromnetz eingespeist. In den Monaten November bis Februar muss zusätzlich zum Eigenverbrauch Strom aus dem Netz bezogen werden. Die alleinige Betrachtung der Monatsbilanz ist jedoch zur Beurteilung des Eigennutzungsgrades nicht ausreichend. Im Tagesverlauf besteht ein erhöhter Stromverbrauch werktags in den Morgenstunden (ca. 8 Uhr), zur Mittagszeit (ca. 13 Uhr) und vor allem in den Abendstunden (ca. 20 Uhr). An Sonntagen sind die Energiespitzen zur Mittagszeit und abends. Der PV-Ertrag ist jedoch zwischen 12 und 16 Uhr am höchsten. Betrachtet man die Energiebilanz auf Stundenbasis, erkennt man, dass der Eigennutzungsanteil auf 34 % sinkt und die Netzabhängigkeit auf 57 % steigt. Der Energieertrag, der in das Netz eingespeist wird steigt von 20,5 kWh/m² auf 28,3 kWh/m². Der Energieüberschuss, also die Differenz aus eingespeister und bezogener Energiemenge bleibt jedoch annähernd gleich. Dieser Effekt tritt sowohl beim Einfamilienhaus¹², als auch beim Geschosswohnungsbau auf, jedoch ist die absolute Größe des Energieüberschusses beim Geschosswohnungsbau ungleich größer. Um den Eigennutzungsgrad zu erhöhen bieten Stromspeicher eine Möglichkeit, den im Tagesverlauf erzeugten Strom besser zu nutzen. Dieser Aspekt wird im Folgenden näher untersucht.

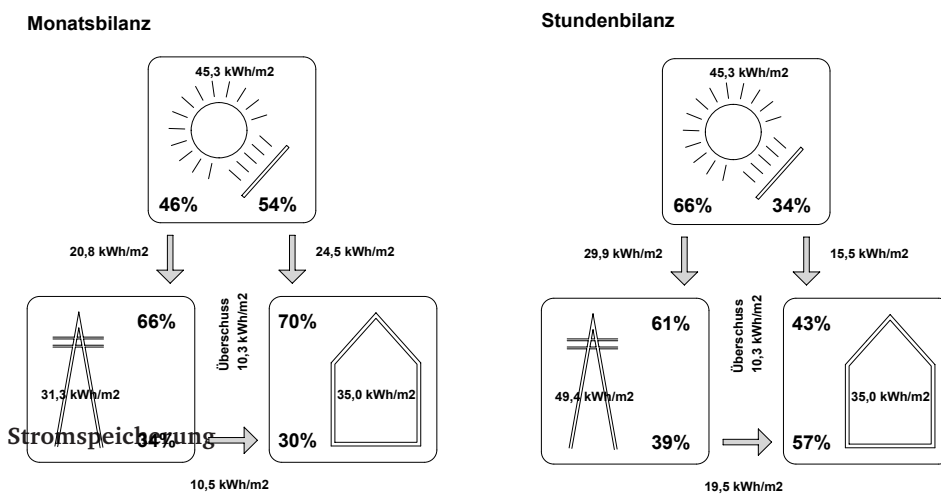


Abbildung 9.17: Monats- und Stundenbilanz der Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert Weg mit Angabe der prozentualen Anteile von Eigennutzung, Netzbezug und Einspeisung.

Mithilfe eines Stromspeichers kann der Anteil der im Gebäude regenerativ erzeugter Energie gesteigert werden. Dies führt zu einer Steigerung der Gebäudeautarkie und einer Entlastung des öffentlichen Stromnetzes in den Sommermonaten.

Ob ein Stromspeicher eingebaut wird hängt in der Praxis im Wesentlichen von dessen Wirtschaftlichkeit ab. Die Kosten für einen Energiespeicher lassen sich als Kosten pro Gerät und als Kosten pro gespeicherter kWh Energie angeben, wobei die Kosten pro gespeicherter kWh maßgebend sind, da hierbei die Gerätekosten mit der gespeicherten Energiemenge in Bezug gesetzt wird. Für die Berechnung der Kosten pro gespeicherter Kilowattstunde werden die Investitionskosten durch die praktisch speicherbare Energiemenge (Nennkapazität multipliziert mit der Anzahl der Vollzyklen unter Berücksichtigung der Entladetiefe und des Systemwirkungsgrades) geteilt, um den Preis pro gespeicherter Kilowattstunde Strom ermitteln zu können.¹³ Liegen diese Kosten unter dem Preis für eine kWh Strom aus dem Netz kann die Anschaffung des Stromspeichers als wirtschaftlich bezeichnet werden. Darüber hinaus können die Anschaffungskosten eines Stromspeichers durch die KfW-Bank mit bis zu 30% der Anschaffungskosten gefördert werden.¹⁴ Allerdings darf die Anlagengröße 30 kW_p nicht übersteigen, um eine Förderung zu erhalten. Die in Kapitel 9.1.10 beschriebene für die Plusenergie-Bilanz notwendige Photovoltaik-Anlage für die Geschosswohnungsbau-Zeile weist eine Leistung von 39,2 kW_p auf und kann daher keine Förderung erhalten.

Kleine PV-Anlagen im Plusenergie-Einfamilienhausbereich können damit sehr gut gefördert werden, größere Anlagen, wie sie für das Referenzgebäude im Fritz-Dächert-Weg zur Erzielung der Plusenergiebilanz notwendig sind, jedoch nicht. Mit den derzeit auf dem Markt erhältlichen Li-Ion-Batteriespeichern erreicht man Kosten pro eingesparter kWh von 15 bis 21 cent/kWh (mit bzw. ohne Förderung), welche jedoch um die Kosten für die Infrastruktur (Laderegler, Wechselrichter, Anbindung) zu erweitern sind.

Der Preis für eine kWh Strom aus dem öffentlichen Netz beträgt im Bundesdurchschnitt 29 cent/kWh.¹⁵ Aufgrund der Einspeisevergütung, welche für eine PV-Anlage der Größe des Referenzgebäudes nach EEG 2014 12 cent/kWh beträgt,¹⁶ lässt sich der Strombezugspreis um den Betrag der Einspeisevergütung reduzieren, da bei einem Plusenergiegebäude für jede aus dem Netz bezogene kWh Strom mindestens eine kWh eingespeist wird. Daraus resultiert ein Netto-Strombezugspreis von 17 cent/kWh.

Unter Berücksichtigung der Infrastrukturkosten sind Batteriespeicher zur Zeit noch nicht wirtschaftlich. In Abhängigkeit der Strompreisentwicklung und der Entwicklung der Speicherkosten stehen sie jedoch vor allem im Einfamilienhausbereich unter Berücksichtigung der KfW-Förderung an der Schwelle der Wirtschaftlichkeit und bietet die Möglichkeit, den Eigenverbrauchsanteil bis auf 40% zu steigern.¹⁷

Um einen möglichst hohen Anteil an Eigennutzungsgrad des selbsterzeugtem Stroms zu erzielen, wäre auch die Nutzung von Elektromobilität vor allen im Zeitraum von März bis September eines Jahres ein möglicher Ansatz, die Wirtschaftlichkeit des Gebäudes deutlich zu steigern und gleichzeitig nicht regenerierbare Ressourcen zu substituieren.

Unter Einbeziehung des Mobilitätsverhaltens der Bewohner, können bei der Nutzung des PKW's als Zwischenspeicher für Stromüberschüsse die Kosten konventioneller Verbrennungsmotoren und deren Kraftstoffverbrauch sowie deren Umweltbelastungen in die Betrachtung einbezogen werden. Folgende Annahme soll dies in Ergänzung zu Kapitel 5.3 deutlich machen:

Ein PKW mit Kraftstoffmotor verbraucht 7 Liter je 100 Kilometer bei einem Bezinpreis von

13 <http://www.energieheld.de/photovoltaik/stromspeicher/kosten> [06.07.2015].

14 Vgl. KfW-Programms Erneuerbare Energien „Speicher“ (Nr. 275).

15 Vgl. Schönemann, u.a., 2015, S. 185 ff.

16 Mittlere Dachanlagen: 10 bis 40 kW_p, Einspeisevergütung bei Inbetriebnahme August 2015.

17 Vgl. Schönemann, u.a., 2015, S. 194.

1,50 EUR/Liter. Je 100 Kilometer gefahrener Laufleistung ergeben sich dadurch Kosten von 10,50 EUR bzw. bei einer jährlichen Laufleistung von 10.000 km Kosten in Höhe von 1.050 EUR. Das Plusenergiegebäude erwirtschaftet in den Monaten März bis September einen Strom-überschuss der zum Betrieb eines Elektromobils genutzt werden kann. Anteilig fährt das Auto in diesem Zeitraum ca. 6.000 km, wodurch sich bei einem Verbrauch von 15 kWh pro 100 km und Kosten in Höhe von 0,15 EUR/kWh (Kosten der nicht eingespeisten kWh) Kosten in Höhe von 135 EUR ergeben. Für die restlichen Monate wird eine Laufleistung von 4.000 km und Stromkosten von 0,25 EUR angenommen, da in diesem Zeitraum kein Stromüberschuss erwirtschaftet wird und das Auto mit Netzstrom geladen werden muss. Dadurch ergeben sich nochmals Kosten in Höhe von 150 EUR. Der Anteil der Herstellungs- und Instandhaltungskosten für die PV-Anlage wird in Abhängigkeit der für das Elektroauto genutzten Strommenge mit 10 % der auf das Jahr bezogenen Herstellungskosten angenommen. Dadurch entstehen nochmals Kosten in Höhe von ca. 100 EUR, so dass sich die Betriebskosten des Elektroautos im Jahr auf 385 EUR belaufen. Gegenüber dem benzinbetriebenen Auto lassen sich somit jährlich 665 EUR einsparen, unter der Annahme konstanter Energiepreise für Benzin und Strom. Tendenziell ist eher davon auszugehen, dass sich die Benzinpreise/Ölpreise schneller verteuern als möglicherweise die Strompreise. Diese immobilien-ökonomische Betrachtung von Elektromobilität im Rahmen der Umwandlung von Bestandsgebäuden mit Plusenergiestandard könnte Inhalt weiterer Forschung sein.

Belegungsdichte

Die durchschnittliche Wohnfläche in Deutschland beträgt 45m² pro Person, Tendenz steigend.¹⁸ Bei Mehrfamilienhäusern ist dabei die Belegungsdichte, also die Anzahl Personen pro Quadratmeter höher als in einem Einfamilienhaus. Oder anders ausgedrückt, die Flächeninanspruchnahme eines Mehrfamilienhaus-Bewohners ist geringer als diejenige eines Einfamilienhaus-Bewohners.

Der Energiebedarf für Haushaltsstrom inkl. Beleuchtung, Warmwasserbedarf und Hilfsstrom für die Lüftungsanlage ist abhängig von der Belegungsdichte des Gebäudes. Bei der Berechnung des Energieverbrauchs für Warmwasser nach EnEV ist die Abhängigkeit des Energiebedarfs von der Bewohneranzahl gegeben.¹⁹ In der Berechnung des Haushaltsstrombedarfs wird jedoch unabhängig von der Belegungsdichte pauschal 20 kWh/m²a angesetzt.²⁰ Dieses Vorgehen ignoriert die Tatsache, daß der Haushaltsstrombedarf mit der Anzahl der Bewohner steigt. Dies kann dazu führen, dass die Plusenergiebilanz nicht erfüllt wird, wenn die Größe der PV-Anlage allein auf Grundlage der Endenergiebedarfs-Berechnung nach EnEV bzw. BMUB erfolgt.

Sinnvoller erscheint eine Berechnung nach dem PHPP, welches den Haushaltsstrombedarf in Abhängigkeit der Bewohneranzahl berechnet. Abbildung 9.15 zeigt den Gesamt-Endenergiebedarf in Abhängigkeit des Flächenverbrauchs pro Person für das in Kapitel 9.1 beschriebene Referenzgebäude. Es zeigt sich, dass die Auslegung der PV-Anlage für einen Flächenverbrauch von 40 m² pro Person ausreicht, um eine positive Energiebilanz zu erzielen. Dies entspricht einer Bewohneranzahl von 20 Personen. Unterschreitet man diese Bewohneranzahl, wirkt sich dies positiv auf die Bilanz aus. Bei mehr Bewohnern, bzw. einem niedrigeren Flächenverbrauch pro Person reicht die Größe der PV-Anlage nicht mehr aus, um eine positive Bilanz zu erzielen.

Die notwendige PV-Fläche nimmt bei gleichem Wirkungsgrad und Ausrichtung bzw. Neigung des Daches mit steigendem Flächenverbrauch der Bewohner ab. Wie Abbildung 9.19 zu entnehmen ist, ist das Verhältnis der notwendigen PV-Fläche zur Flächeninanspruchnahme nicht proportional, sondern steigt bei abnehmendem Flächenverbrauch der Bewohner

18 Quelle: Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, Pressemitteilung Nr. 09/2013.

19 500 kWh Nutzenergie pro Person und Jahr. Vgl. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel, 2014, S.5.

20 Vgl. BMUB, 2014, S.9.

überproportional an. Daraus lässt sich folgern, dass es bei einem Einfamilienhaus bzw. bei einer niedrigen Wohndichte einfacher ist, eine positive Plusenergie-Bilanz zu erreichen.²¹ Zu hinterfragen sei an dieser Stelle, ob die Bilanzierungsmethode (unabhängig davon ob nach EnEV oder BMUB) den Aspekt des Flächenverbrauchs nicht sinnvollerweise mit integrieren sollte, beispielsweise durch den Bezug des Energieverbrauchs in kWh pro Quadratmeter, Jahr und Person.

Abbildung 9.18: Vergleich von Energiebedarf und Ertrag der PV-Anlage in Abhängigkeit des Flächenverbrauchs pro Bewohner

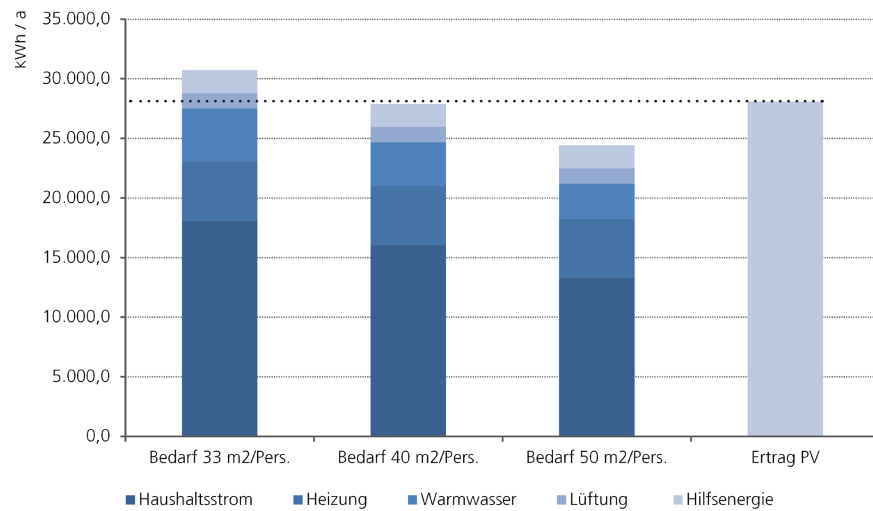
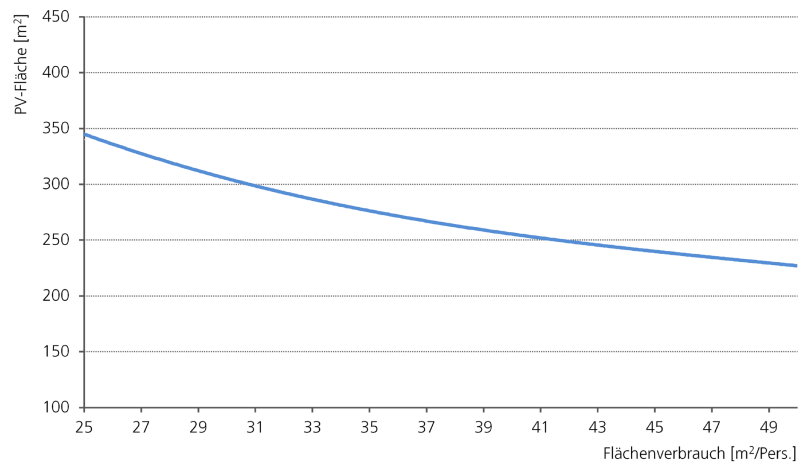


Abbildung 9.19: Notwendige PV-Fläche des Referenzgebäudes in Abhängigkeit des Flächenverbrauchs der Bewohner



CO₂ Bilanz und Übertragung auf den Gebäudebestand

21 Vgl. Hegger, 2014, S. 93f.

Im Bestand spielt der Heizenergieträger eine entscheidende Rolle beim Vergleich der CO₂-Bilanz vor und nach der Sanierung. Das energy+Home verbrauchte vor der Sanierung ca. 5.600 Liter Heizöl pro Jahr, was in etwa einem Äquivalent von 16.900 kg CO₂/a entspricht. Bei einer Gesamtanzahl von 6,37 Mio ölbefeuerten Einfamilienhäusern²² und einer Annahme, dass bereits 25% des dieses Einfamilienhausbestandes saniert wurden²³, entspricht dies CO₂ Emissionen von ca. 80 Mio Tonnen pro Jahr für den Gebäudebestand Deutschlands. Nach der Sanierung weist das energy+Home lediglich CO₂ Emissionen in Höhe von 2.700 kg CO₂/a auf und erzeugt darüber hinaus 9.880 kWh Strom, den man als Gutschrift in Höhe von ca. 5.900 kg CO₂ anrechnen kann. In Summe ergeben sich dadurch rechnerisch CO₂ Emissionen von -3.200 kg CO₂ pro Jahr und Gebäude. Bei Annahme einer Neubauquote von 1% und einer gleichzeitigen Sanierungsquote nach Vorbild des energy+Home von 2% ergibt sich über einen Zeitraum von 20 Jahren ein Einsparpotential von ca. 340 Mio. Tonnen CO₂.

Die Geschosswohnungsbau-Zeile im Fritz-Dächert-Weg hingegen wird mit einem Gas-Brennwertkessel beheizt und weist vor der Sanierung einen Endenergiebedarf von 250 kWh/m²a auf. Das entspricht CO₂-Emissionen des gesamten Gebäudes in Höhe von 23.900 kg CO₂/a.²⁴ Durch die Sanierung und die Umstellung auf Strom als alleinigen Energieträger verringert sich zwar der Endenergiebedarf auf 34,8 kWh/m²a, die CO₂-Emissionen steigen aufgrund des Strom-Mix in Deutschland jedoch auf 33.600 kg/a.²⁵ Nach Abzug der Gutschrift aus dem regenerativ erzeugten Strom verbleiben CO₂-Emissionen in Höhe von -11.900 kg CO₂ pro Jahr und Gebäude. Bei einer Annahme von 780.000 vergleichbarer Gebäude in Deutschland, einer Neubauquote von 1% und einer Sanierungsquote von 2% ergibt sich über einen Zeitraum von 20 Jahren ein Einsparpotential von ca. 98 Mio. Tonnen CO₂.

Wie man diesem Vergleich entnehmen kann, ist das CO₂-Einsparpotential bei ölbeheizten Einfamilienhäusern ungleich größer als bei gasbeheizten Mehrfamilienhäusern. Der Grund liegt zum Einen in der höheren Anzahl vergleichbarer Einfamilienhäusern, zum Anderen am Umrechnungsfaktor Energie zu kg CO₂, welcher beim Strom-Mix-Deutschland um den Faktor 3 höher ist als bei Gas. Es zeigt sich auch hierbei, dass eine ganzheitliche Betrachtung einer Sanierungsstrategie sich nicht allein auf einen Aspekt (in diesem Fall den energetischen) beschränken sollte.

Fazit

Die Übertragung des energy+Home Konzeptes auf eine Geschosswohnungsbau-Zeile aus den 1950er Jahren ist möglich, jedoch führen eine Reihe von Faktoren dazu, dass die Umwandlung eines Mehrfamilienhauses in ein Plusenergiegebäude schwieriger umzusetzen ist als die Umwandlung eines Einfamilienhauses. Die geringere zur Verfügung stehende solaraktiv nutzbare Dachfläche gegenüber der Energiebezugsfläche, der höhere Haushaltsstrombedarf aufgrund höherer Belegungsdichte, die eingeschränkte Nutzbarkeit der Förderung von Speichertechnologien sowie eine sinkende Einspeisevergütung bei gleichzeitig steigender Netzeinspeisung von regenerativ erzeugtem Strom in den Sommermonaten führt dazu, die Fokussierung auf Strom als alleinigen Energieträger bei diesem Gebäudetyp infrage zu stellen. Beispielsweise sollte durch die steilere Dachneigung des Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg gegenüber dem energy+Home die Nutzung von Solarthermie zur Warmwasserbereitung geprüft werden. Eine alternative regenerative Energieerzeugung mithilfe eines Biomasse-Blockheizkraftwerkes könnte alternativ beim Geschosswohnungsbau eine sinnvolle Alternative zur Wärmepumpe darstellen und den Autarkiegrad des Gebäudes anheben.

22 Vgl. Destatis, Mikrozensus, Tab. 11.

23 Vgl. IWU Datenbasis Gebäudebestand, 2010, S.47.

24 205 kWh/m²a Endenergie, Anlagenaufwandszahl 1,38, 181 kWh/m²a Nutzenergie, 600 m² Wohnfläche.

25 34,8 kWh/m²a Endenergie, Anlagenaufwandszahl 0,37, 94 kWh/m²a Nutzenergie, 600 m² Wohnfläche.
1 kWh Strom = 0,6 kg CO₂, 1 kWh Erdgas = 0,22 kg CO₂.

10 Planungsempfehlungen und Schlussbetrachtungen

10.1 Planungsempfehlungen für die Sanierung von Bestandsgebäuden hin zu Plusenergiegebäuden

Im Folgenden werden Empfehlungen ausgesprochen, wann sich eine Umwandlung eines Bestandgebäudes als Plusenergiegebäude anstelle einer Sanierung nach Einergieeinsparverordnung ökologisch, ökonomisch und technologisch sinnvoll durchführen lässt.

Als Randbedingungen für derartige Empfehlungen gilt:

- Die nachfolgenden Betrachtungen gelten für freistehende Einfamilienhäuser in geschlossener Bebauung als Reihenhaus, Doppelhaus oder Reihenendhaus sowie für freistehende Geschosswohnungsbau-Zeilen der 50er Jahre.
- Das Haus ist im unsanierten Zustand und hat einen Primärenergieverbrauch von mehr als 250 Kilowattstunden pro Jahr.
- Das bestehende Haus verwendet als Energieträger Öl oder Gas.
- Das Haus steht an einem Standort in Deutschland, bei dem eine reelle Nachfrage nach Wohneigentum besteht und ein mittleres bis höheres Mietpreisniveau vorhanden ist (durchschnittliche Wohnungsmiete $\geq 7,50$ EUR). Bezogen auf den Immobilienwert entspricht dies ca. einem üblichen Marktwert je Quadratmeter Wohnfläche im Neubaulzustand mit einem Verkaufspreis von $\geq 2.500,00$ EUR/m² Wohnfläche.
- Der Lebenszyklus einer Photovoltaikanlage wird mit mindestens 25 Jahren zugrunde gelegt. Dies trifft für heutige Qualitätsprodukte im Bereich von Photovoltaikanlagen zu. Über Produkte mit möglicherweise minderer Qualität und Lebensdauer kann keine Aussage getroffen werden.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln lassen sich folgende Strategien für die Sanierung zu Plusenergiegebäuden empfehlen:

1. Vorhandene Flächenreserven sind im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen zu nutzen, um den immobilienwirtschaftlichen Wert zu erhöhen. Dies kann der Ausbau eines Dachgeschosses sein oder wie im Fall des energy⁺Home die Nutzung von Flächen unter Balkonen oder der Konvertierung von Technikräumen wie z.B. dem Tanklagerraum. Mit diesen Maßnahmen sollte auch gleichzeitig eine Reduktion von Wärmebrücken erfolgen. Flächenreserven
2. Aus baulicher Sicht spielt die Optimierung der Gebäudehülle eine zentrale Rolle bei der Sanierung zu einem Plusenergiegebäude. Dabei sollte die Geometrie der Gebäudehülle hinsichtlich des A/V-Verhältnisses optimiert und wenn möglich untergeordnete Vor- und Rücksprünge in der Fassadenebene vermieden werden. Bestandsgebäude mit einer hohen Kompaktheit bzw. einem niedrigem A/V-Verhältnis eignen sich besonders gut für die Umwandlung in ein Plusenergiegebäude. Bei Geschosswohnungsbau-Zeilen liegt die Grenze zur Umwandelbarkeit in ein Plusenergiegebäude bei sechs Geschossen. Pro m² Wohnfläche lässt sich der Flächenbedarf für eine PV-Anlage mit 0,5m² annehmen und pro m² solaraktiv nutzbarer Hüllfläche sollten nicht mehr als 1,5m² Energiebezugsfläche vorhanden sein. Volumina
3. Die thermische Zonierung und Optimierung der Nutzflächen führt zu einer Reduzierung des Heizwärmebedarfes und die passive Nutzung solarer Einstrahlung bei gleichzeitiger Optimierung der Wärmedämmung der transluzenten Bauteile zu höheren solaren Gewinnen. Die solare Einstrahlung kann darüber hinaus zur aktiven Nutzung Gebäudehülle

	<p>mittels Photovoltaik oder Solarthermie gebraucht werden. Die opaken Bauteile sollten hinsichtlich ihrer Wärmedämmung optimiert werden und einen U-Wert $< 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweisen.¹</p>
Baukonstruktion / Umweltverträglichkeit	<p>4. Bei der Wahl der Baukonstruktion ist auf eine möglichst hohe Umweltverträglichkeit der Baustoffe, eine lange Nutzungsdauer der Bauteile und eine gute Recyclierbarkeit der einzelnen Bauteilschichten zu achten. Beim energy+Home wurde aus diesem Grund beispielsweise größtenteils ein Aussenwandaufbau mit einer Dämmung aus Mineralwolle und langlebigen Faserzementplatten auf einer Holz-Unterkonstruktion anstelle eines WDVS-Systems gewählt.</p>
Wärmebrücken	<p>5. Bei der energetischen Verbesserung der Außenbauteile ist auf eine möglichst konsequente Vermeidung von Wärmebrücken zu achten. Diese führen nicht nur zu unkontrollierten Energieverlusten sondern können auch zu Schäden an der Gebäudehülle führen. Durch gute Planung und sorgfältige Ausführung insbesondere von Übergängen zwischen unterschiedlichen Bauteilen lassen sich diese Schwachstellen in der Gebäudehülle vermeiden.</p>
Fenster Eigenschaften	<p>6. Es empfiehlt sich eine Dreifachverglasung aus Gründen des Wärmeschutzes, der Behaglichkeit und des Schallschutzes. Dies gilt auch für die Dachflächenfenster. Vor allem dann, wenn das Gebäude im innerstädtischen Bereich liegt und durch Verkehrsimmissionen belastet ist. Dabei sollte eine Verglasung mit $U_g < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, ein g-Wert $> 50 \%$ und ein thermisch getrennter Randverbund gewählt werden.</p>
Fenster Festverglasung	<p>7. Der Anteil von Festverglasungen sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, aber auch zur Reduktion von Wärmebrücken über den Rahmenanteil überprüft werden. Ein hoher festverglaster Anteil kann sich auch architektonisch vorteilhaft für die Gestaltung und Erscheinung des Gebäudes einsetzen lassen. Die Optimierung eines festverglasten Anteils erzeugt geringere Kosten für die Verglasung, einen geringeren Anteil von Wärmebrücken, einen größeren Öffnungsanteil im Hinblick auf solare Gewinne (Reduktionsrahmenanteil zugunsten der vergrößerten Verglasungsflächen) und weniger Möglichkeiten einer Falschlüftung bzw. Fensterfehlstellungen, da das Risiko, daß gekippte oder geöffnete Fenster übersehen werden und damit zu unkontrollierten Lüftungswärmeverlusten führen reduziert wird.</p>
Dach Wärmedämmung	<p>8. Bei einem intakten Dachstuhl und ausreichender Belastbarkeit der Dachkonstruktion empfiehlt es sich für die zusätzlichen Dämmungsmaßnahmen auf eine Kombination von Auf-, Zwischen- und Untersparrendämmung zu setzen. Die Aufsparrendämmung hat den Vorteil, dass Wärmebrücken der Sparren eliminiert werden. Die Zwischensparrendämmung nutzt die Ebene der Tragkonstruktion um Transmissionswärmeverluste zu verringern. Die Untersparrendämmung kann als dünne Vorsatzschale ausgebildet werden und ermöglicht zusätzlich zur U-Wert-Verbesserung die Leitungsführung von Elektrik- und Lüftungsleitungen. Gleichzeitig wird hier eine robuste Innenoberfläche geschaffen, welche die Anforderungen an die Luftdichtheit nicht erfüllen muss, wenn die Luftdichtheitsebene auf der Unterseite der Zwischensparrendämmung angeordnet wird.</p>
Dach Belichtung	<p>9. Es gilt immer zu überprüfen, inwieweit sich Dachräume- und Dachvolumina nach oben öffnen lassen. Nutzungsräume unter dem Dach können über die Dachfläche zusätzlich belichtet, und damit der erhöhte Wirkungsgrad von Zenitlicht gegenüber einer vertikalen Verglasung genutzt werden. Dies erfolgte beim energy+Home über die Anordnung von acht Dachflächenfenstern. Dabei werden die tiefer liegenden Räume besser</p>

¹ Vgl. Hegger u.a. 2013, S.144 ff.

belichtet, was wiederum zur Stromersparnis von Beleuchtung führt und eine höhere Aufenthalts- und Lebensqualität erzeugt. Weiterhin kann dadurch eine Reduzierung der Leistung der mechanischen Lüftungsanlage erfolgen, da über den thermischen Auftrieb eine natürliche Nachtauskühlung und Nachtlüftung während der Sommermonate möglich ist.

10. Aufgrund der verbesserten Dichtheit der Gebäudehülle ist zur Sicherstellung der Raumluftqualität unter Vermeidung von Lüftungswärmeverlusten eine mechanischen Lüftungsanlage oder eine automatisierte natürliche Lüftung sinnvoll. Im Falle einer mechanischen Lüftung sollte diese zur Steigerung der energetischen Qualität über eine hoch effiziente Wärmerückgewinnung verfügen und kann bedarfsabhängig über CO₂-, Mischgas- oder VOC-Sensoren geregelt werden und damit optimal auf die tatsächlich vorhandene Raumluftqualität reagieren.
- Luftdichtheit

11. Die Verwendung von Niedertemperatursystemen ist eine Voraussetzung für den sinnvollen Betrieb des ausgeführten Haustechnikkonzeptes mit einer Wärmepumpe. Sollten also bei Standardsanierungen Flächenheizungssysteme wie z.B. Fußbodenheizung, Wandheizung oder Deckenheizung integriert werden, sind auch die Voraussetzungen für einen energieeffizienten Wärmepumpenbetrieb gegeben.
- Flächenheizsystem

Im Rahmen von Sanierungen sind zumindest in den Untergeschossen auch Verbesserungen der Dämmung gegen das Erdreich bzw. nicht beheizte Kellerräume erforderlich. Hier kann die Dämmung unter dem Estrich in Verbindung mit einer Fußbodenheizung eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

12. Zur Reduktion des Stromverbrauchs im Winter empfiehlt es sich, ein sekundäres Heizsystem, z.B. ein Ofen/Kamin, welcher regenerativ (z.B. mit Holz) befeuert wird, zu ergänzen. Dieser Ofen bzw. Kamin ist wasserführend auszustatten, um überschüssige Wärmeenergie in den Brauchwasserspeicher einzuführen. Hierdurch wird die Leistung der Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung wesentlich reduziert.
- sekundäres Heizsystem

13. Der Anteil des Haushaltsstroms am Gesamtenergiebedarf ist bei Plusenergiegebäuden gegenüber konventionellen Gebäuden größer. Um diesen Anteil zu senken empfiehlt sich die Verwendung energiesparender Leuchtmittel wie LED-Leuchten oder Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten. Durch eine Regelung der Beleuchtung mittels Bewegungs- oder Präsenzsensoren kann zudem eine erhebliche Energieeinsparung erreicht werden. Dies gilt auch für die Verwendung energiesparender Haushaltsgeräte mit der Energieeffizienzklasse A⁺⁺⁺.
- Haushaltsstrom

14. Es wurde nachgewiesen, dass eine reine Süd-Ausrichtung für die Installation einer Photovoltaikanlage nicht erforderlich ist. Mit der Ost-/West- Ausrichtung kann die gesamte Dachfläche der Ost- und Westseite genutzt werden. Der etwas niedrigere Wirkungsgrad der Photovoltaikanlage wird über die größere nutzbare Fläche kompensiert. Bei einer Nord-/Süd-Ausrichtung des Daches lässt sich die Planungsempfehlung ableiten, die Südseite möglichst intensiv mit Photovoltaikanlagen zu belegen und die Zenitbelichtung auf der Nordseite zu ermöglichen. Bei steileren Dachneigungen gegenüber dem energy⁺Home wird gleichzeitig der Wirkungsgrad der PV-Anlage erhöht.
- Photovoltaik Ausrichtung

15. Bei der Installation einer PV-Anlage sollte darauf geachtet werden, dass die Dachkonstruktion wetterfest ist und noch mindestens 25 Jahre hält, damit die PV-Anlage nicht vor Ablauf ihrer Nutzungsdauer abgebaut werden muss. Optimalerweise ist eine Integration der Solarmodule in die Dachfläche anzustreben, um auch aus baukultureller Sicht eine möglichst lange Akzeptanz der Anlage zu gewährleisten. Darüber hinaus sollte die Anlage eine Neigung von mind. 3-5 % aufweisen, damit Staub und Regen
- Photovoltaik Rahmenbedingungen

	abgewaschen wird und nicht die Leistung der Anlage verringert. Auch sollte darauf geachtet werden, dass die Anlage möglichst wenig verschattet wird (z.B. durch Bäume, Antennen, Gauben, etc.).
Photovoltaik Eigennutzung / Elektromobilität	16. Es wird ein möglichst hoher Anteil an Eigennutzungsgrad des selbsterzeugtem Stroms angestrebt. Dies bedeutet, dass im Jahresverlauf auch in den Sommermonaten der Eigenstromanteil bis zu einem gewissen Prozentsatz selbstgenutzt wird. Hierbei sind Batteriespeicher oder Konzepte wie Elektromobilität vor allen im Zeitraum von März bis September eines Jahres ein möglicher Ansatz, um den Eigenstromanteil zu erhöhen, die Wirtschaftlichkeit des Gebäudes deutlich zu steigern und gleichzeitig nicht regenerierbare Ressourcen zu substituieren.
Energieversorgung	17. Im Einzelfall muss geprüft werden, ob eine Fokussierung auf Strom als alleinigen Energieträger sinnvoll ist, oder ob eine Kombination aus PV-Anlage, Solarthermie oder Biomasse-Blockheizkraftwerk zu einem größeren Autarkiegrad des Gebäudes führt.
Nutzerverhalten	18. Der Einfluß des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch steigt bei erhöhtem energetischen Standard des Gebäudes. Es ist daher wichtig, das Energiebewußtsein der Bewohner zu sensibilisieren und sie über den korrekten Umgang mit dem sanierten Gebäude zu informieren, damit sich das Nutzerverhalten dem sanierten Gebäude anpasst.
Baukultur	19. Keine Sanierung ohne baukulturelle und architektonische Verbesserung. Mit jeglichem Eingriff und jeder Entscheidung ein bestehendes Gebäude zu sanieren, muss immer eine baukulturelle und gestalterische Verbesserung oder zumindest Aufrechterhaltung der architektonischen Qualität einhergehen. Die geschaffenen Qualitäten müssen für mindestens 40 bis 50 Jahre den Wohnanforderungen und der Nutzerakzeptanz gerecht werden, damit sich die graue Energie in den Baustoffen, welche im Rahmen der Sanierung dem Gebäude zugeführt werden, ausreichend amortisieren kann. Gleichzeitig muss sich bei jeder Sanierung der Bauherr und der damit betraute Architekt der baukulturellen Verantwortung seines Gebäudes als Beitrag im öffentlichen Raum bewusst sein.

10.2 Schlussbetrachtungen

Die Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten energetischer Sanierungen hin zu Plusenergiegebäuden stellt eine komplexe Betrachtung sich gegenseitig überlagernder energetischer, ökologischer und ökonomischer Einflussfaktoren dar.

Mittels Ökobilanzierungen lassen sich Aussagen über mögliche Umweltwirkungen von Bauprodukten und Betriebsprozessen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes treffen. Als wesentliche Einflussfaktoren lassen sich die verwendeten Materialarten und -mengen, die Lebensdauer der Bauteile, der Energiebedarf und -ertrag im Betrieb sowie der gewählte Betrachtungszeitraum definieren.

Die möglichen Umweltwirkungen der Sanierung zum Plusenergiegebäude energy+Home wurden für fünf verschiedene Wirkungskategorien sowie den Primärenergiebedarf in Anlehnung an das vereinfachte Verfahren der deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen ermittelt. Ziel der Untersuchung war es, die ökologische Qualität des sanierten Gebäudes im Vergleich zu einem durchschnittlichen Einfamilienhaus in Deutschland sowie dem unsanierten Bestand zu bestimmen. Bei allen betrachteten Wirkungskategorien konnte nachgewiesen werden, dass die Umweltwirkungen im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren deutlich geringer ausfallen als diejenigen des Referenzgebäudes und des unsanierten Bestandes. Dies ist auf die Beibehaltung der bestehenden Primärkonstruktion und die Gutschrift aus der regenerativ erzeugten Energie zurückzuführen.

Zur genaueren Beurteilung der ökologischen Aspekte der Sanierungsstrategie des energy+Home wurde eine alternative Sanierung nach EnEV sowie der Abbruch und Neubau des Gebäudes mit vergleichbarer Volumetrie und Konstruktion numerisch analysiert. Anhand dieser vergleichenden Ökobilanzierung konnte die Vorteilhaftigkeit der Plusenergie-Sanierung nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass der Einfluß der Gutschrift aus der regenerativ erzeugten Energie die Mehraufwendungen im Bereich der Gebäudekonstruktion wieder ausgleicht. Gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes weisen die jeweiligen Sanierungsvarianten deutlich geringere CO₂-Emissionen im Lebenszyklus auf. Das methodische Vorgehen der sukzessiven Amortisation der Umweltwirkungen aus der Gebäudekonstruktion durch eine Gutschrift des PV-Stroms basiert auf den Rechenwerten des Strom-Mix Deutschlands und wird sich mit Voranschreiten der Energiewende zu Ungunsten der Plusenergiegebäude verändern. Es ist daher auch nur bedingt auf andere Länder übertragbar. Welche Auswirkungen eine Änderung des Strom-Mix bei Ausbau der regenerativen Stromerzeugung auf zukünftige Sanierungen hat war nicht Teil der vorliegenden Untersuchung und kann Inhalt weiterführender Forschung sein.

Anhand einer Kostenfeststellung auf Grundlage der Unternehmer-Schlussrechnungen wurden die Herstellungskosten der Sanierung ermittelt. Diese dienten zusammen mit den Angaben zum Energiebedarf, welche nach DIN 18599 berechnet wurden, als Grundlage für die Abschätzung der Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Als maßgebende Einflussfaktoren auf diese Kosten lassen sich neben dem Betrachtungszeitraum die Annahmen für die Preissteigerung (allgemein und für Energie), der gewählte Diskontierungszinssatz, die Einspeisevergütung, die Instandsetzungszyklen auf Basis der Nutzungsdauer der Bauteile und die angenommenen Prozentsätze für Instandhaltung, Inspektion und Wartung identifizieren. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren ist eine Vergleichbarkeit von Lebenszykluskostenberechnungen generell nur bedingt möglich. Auch ist die Methode, Instandsetzungskosten als Prozentsatz der Herstellungskosten anzunehmen nur bedingt aussagekräftig, da die Investition in höherwertige, und damit meist teurere, Produkte oft längere Nutzungsdauern bzw. niedrigere Nutzungskosten nach sich zieht. Diese These wurde durch die Untersuchung bestätigt, bei der sich zeigte, dass die Betriebskosten des energy+Home nur einen relativ geringen Anteil gegenüber den Herstellungskosten aufweisen.

Um die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen zu beurteilen, wurden die Investitionskosten in energieeffizienzbedingte Kosten, Instandsetzungskosten und Kosten für wohnwertverbessernde Maßnahmen unterteilt. Es konnte festgestellt werden, dass der Anteil der energieeffizienzbedingten Kosten den kleinsten Anteil an den Gesamtkosten ausmacht und dass die verhältnismäßig hohen Gesamtkosten vor allem auf den hohen Wohnstandard des Gebäudes zurückzuführen sind. Als Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Energiekosten vor und nach der Sanierung ermittelt und mithilfe der Kapitalwertmethode nachgewiesen, dass unter Berücksichtigung des Kopplungseffektes² die Sanierung des energy+Home als wirtschaftlich zu betrachten ist.

Analog zum Vorgehen bei der ökologischen Untersuchung wurden die Kosten der Sanierung zum Plusenergiegebäude einer Kostenschätzung für eine Sanierung nach EnEV und einem Abbruch und Neubau des Gebäudes gegenübergestellt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Anteil der Betriebskosten bei einer Sanierung zum Plusenergiegebäude gegenüber einer Sanierung nach EnEV deutlich niedriger ist und dass sich die Mehrkosten für die Herstellung im Lebenszyklus wieder nahezu ausgleichen, sowie gegenüber dem unsanierten Bestand langfristig amortisieren. Der Abbruch und Neubau des Gebäudes führt zu höheren Lebenszykluskosten, was auf die Kosten für den Abbruch des bestehenden Gebäudes und vor allem auf die Errichtung der kompletten Gebäudestruktur inklusive Primärkonstruktion zurückzuführen ist.

Die Gegenüberstellung der ökologischen und ökonomischen Kennwerte für die Sanierung zum Plusenergiegebäude und die Sanierung nach EnEV zeigte, dass bei vergleichbaren Lebenszykluskosten, die Plusenergiesanierung im Betrachtungszeitraum wesentlich geringere CO₂-Emissionen aufweist und daher eine Übertragung des Konzeptes auf andere Gebäude, das Ziel der Bundesregierung, die CO₂-Emissionen bis 2050 um 80% zu reduzieren, unterstützen würde. Es lässt sich auch feststellen, dass eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung immer sowohl ökonomische wie ökologische Gesichtspunkte berücksichtigen sollte.

Um die energetische Qualität des Gebäudes nachzuweisen und die im Vorfeld der Sanierung angestellte Prognose des Energiebedarfs zu verifizieren wurde im Jahr 2014 ein Monitoring mithilfe der Messtechnik TeBIS durchgeführt. Dabei wurden das Innen- und Außenklima, die Innenraumluftqualität, die Energieströme zu und von den Geräten zur Wärmeerzeugung und -speicherung, der Stromverbrauch getrennt nach unterschiedlichen Nutzungen, sowie die selbst erzeugten Strommengen gemessen. Die Prognose der Energieverbräuche nach DIN 18599 hat ihre Tauglichkeit bewiesen, jedoch zeigten die Untersuchungen auch, dass die Steuerung einzelner Anlagenkomponenten wie der Lüftungsanlage und der Wärmepumpe noch Optimierungspotentiale aufweist. Die Annahme, dass das Gebäude im Jahresmittel einen Energieüberschuss erwirtschaftet, konnte nachgewiesen werden. Dieser Überschuss war im Untersuchungszeitraum jedoch nicht so hoch wie erwartet, was vor allem auf einen nutzerspezifisch erhöhten Heizwärmebedarf zurückzuführen ist.

Mit den Untersuchungen zur Umwandlung eines repräsentativen Gebäudes aus den 70er Jahren zu einem Plusenergiegebäude, dem energy+Home, wurde das ökologische, ökonomische und energetische Potential von Einfamilienhaus-Bestandssanierungen hin zum Plusenergiegebäude aufgezeigt und eine Grundlage für die Sanierung vergleichbarer Bauten geschaffen.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Übertragbarkeit auf eine freistehende Geschosswohnungsbau-Zeile aus den 50er Jahren belegen, dass sich das Konzept des energy+Home auch auf andere Gebäudetypen und Baualterklassen übertragen lässt. Anhand einer

² Kopplung von energieeffizienzverbessernder Maßnahmen mit gleichzeitig sowieso anstehender Instandhaltungsmassnahmen, siehe Kapitel 4.7.1.

Untersuchung der Bauteilaufbauten, einer U-Wert Messung und Thermografieaufnahmen des Referenzgebäudes wurde zunächst dessen energetische Qualität ermittelt und geprüft, ob es sich um ein typisches Gebäude der Baualtersklasse 1949-57 handelt. Dazu wurden die vorgefundenen Kennwerte mit bekannten Angaben aus der Literatur verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass eine Übereinstimmung gegeben und damit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

Anhand einer thermischen Simulation mit der Software TRNSYS wurde der Einfluss verschiedener energetischer Maßnahmen auf den Primärenergiebedarf für Heizwärme des Gebäudes und einzelner Wohnungen innerhalb der Geschosswohnungsbau-Zeile untersucht. Es zeigte sich, dass unter Berücksichtigung dieser baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen der Endenergiebedarf des Gebäudes derart gesenkt werden kann, dass die solaraktiv nutzbaren Hüllflächen ausreichen, um mithilfe von Solarenergie eine positive Jahresbilanz für den untersuchten Gebäudetyp zu erzielen.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Kompaktheit, der Ausrichtung, des Eigenbedarfsanteils, der Stromspeicherung und der Belegungsdichte auf die Energiebilanz des untersuchten Ein- und Mehrfamilienhauses untersucht, um die Unterschiede der beiden Gebäudetypologien bei der Umwandlung in ein Plusenergiegebäude aufzuzeigen. Es konnte gezeigt werden, dass es beim Einfamilienhaus aufgrund eines günstigeren Verhältnisses solaraktiv nutzbarer Hüllfläche zu Energiebezugsfläche sowie einer niedrigeren Belegungsdichte und dem damit verbundenen geringeren Warmwasserbedarf und Haushaltsstromverbrauch pro Quadratmeter, einfacher ist eine Plusenergiebilanz zu erzielen, als dies bei der Geschosswohnungsbau-Zeile der Fall ist. Es konnte auch nachgewiesen werden, dass bei bestehenden Gebäuden mit Satteldach eine Ost-/West-Ausrichtung für die Umwandlung in ein Plusenergiegebäude vorteilhaft ist, und dass Stromspeicher vor allem im Einfamilienhausbereich eine sinnvolle Möglichkeit zur Erhöhung des Eigenverbrauchs darstellen. Trotz der beschriebenen Unterschiede ist die Umwandlung freistehender Geschosswohnungsbau-Zeilen aus den 50er Jahren mit einer Höhe bis zu sechs Geschossen möglich. Es ist jedoch im Einzelfall zu prüfen, mit welcher Technologie dies erreicht werden kann. Eine alleinige Fokussierung auf Strom als alleinigen Energieträger führt bei Übertragung des Konzeptes zu einer Verschärfung der Netzauslastung in den Sommermonaten und lässt sich auch mithilfe von Stromspeichern derzeit noch nicht wirtschaftlich lösen. Vor allem im Geschosswohnungsbau ist daher eine größere Autarkie durch alternative Energieerzeugungssysteme anzustreben.

Als Ergebnis der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass Sanierungen von Einfamilienhäusern aus den 70er Jahren und Geschosswohnungsbau-Zeilen der 50er Jahre hin zu Plusenergiehäusern möglich, ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar sind. Die Umwandlung und Nutzung bestehender Bausubstanz bietet dabei sowohl gegenüber dem unsanierten Bestand, als auch gegenüber dem Abbruch und Neubau des Gebäudes die Möglichkeit, langfristig Kosten und CO₂-Emissionen einzusparen.

Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e.V. :
EnEV 2014 Energie-Einsparverordnung, Bonn, 2014.

BKI Baukosteninformationszentrum:

BKI Baukosten Gebäude 2013. Statistische Kostenkennwerte Teil 1, Stuttgart, 2013

BKI Baukosten Bauelemente 2013. Statistische Kostenkennwerte Teil 2, Stuttgart, 2013

BKI Baukosten Gebäude Altbau 2014. Statistische Kostenkennwerte, Stuttgart, 2014.

Bertram, Mathias / Bongard, Stefan:

Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):

Wege zum Effizienzhaus Plus, Berlin, 2014.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):

Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand, Berlin, 2009.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):

Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden, BMVBS-Online-Publikation 07/2012.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):

Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen, BMVBS-Online-Publikation 26/2013.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR):

Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB, Berlin, 2011.

CO2online Gemeinnützige GmbH / deutscher Mieterbund e.V. :

Heizspiegel Bundesweit 2013. Vergleichswerte zu Heizenergieverbrauch, Heizkosten und CO₂-Emissionen für das Abrechnungsjahr 2012, Berlin, 2013.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena):

dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“, Berlin, 2012.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena):

dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“, Berlin, 2012.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena):

Der dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, Berlin, 2012.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena):

Initiative Energieeffizienz Private Haushalte. Das EU-Energielabel, Entscheidungshilfe für Verbraucher, Berlin, 2013.

Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen GmbH (DGNB GmbH):

Nutzungsprofil kleine Wohngebäude Version 2013

DGNB Kriterium ECO 1.1 Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus, 2013
DGNB Kriterium ENV 1.1 Ökobilanz - Emissionsbedingte Umweltwirkungen, 2013
DGNB Kriterium ENV 2.1 Ökobilanz - Primärenergie, 2013.

Deutsches Privates Institut für Nachhaltige Immobilienwirtschaft GmbH & Co. KG:
Zertifizierung von Bestandgebäuden nach BREEAM DE - Bewertung gewerblicher Bestandsgebäude Teil 1 Gebäude, Teil 2 Betrieb, Teil 3 Nutzer - Handbuch zu Teil 1-3, Frankfurt am Main, 2013.

Ebert, Thilo u.a.:
Zertifizierungssysteme für Gebäude, 1. Auflage, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH&Co. KG, München, 2010.

Fisch, Norbert M. u.a.:
Netto-Plusenergie-Gebäude mit Stromlastmanagement und Elektro-Mobilität, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013.

Giebeler, Georg u.a.:
Atlas Sanierung - Instandhaltung, Umbau, Ergänzung, 1. Auflage, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH&Co. KG, München, 2008.

Gromer, Christian:
Die Bewertung von nachhaltigen Immobilien Ein kapitalmarkttheoretischer Ansatz basierend auf dem Realloptionsgedanken, Springer Gabler, Stuttgart, 2012.

Großklos, Marc:
Wege zu Gebäuden mit Energieüberschuss. Analyse der Einflussfaktoren bei Ein- und Mehrfamilienhäusern, in: 2. aktivPlus Symposium, 2015.

Hegger, Manfred u.a.:
Baustoff Atlas - Nachhaltige Architektur, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2005.

Hegger, Manfred u.a.:
Energie Atlas - Nachhaltige Architektur, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2007.

Hegger, Manfred u.a.:
Ökobilanzierung Velux Model Home 2020 „Licht Aktiv Haus“ Hamburg, Fachgebiet Energieeffizientes Bauen TU Darmstadt, 2011.

Hegger, Manfred u.a.:
Aktiv Haus - Das Grundlagenwerk, Vom Passivhaus zum Energieplushaus, Verlag Georg D.W. Callwey GmbH&Co KG, München, 2013.

Hegger, Manfred u.a.:
Aktiv-Stadthaus, Entwicklungsgrundlage für städtische Mehrfamilienhäuser in Plus-Energie-Bauweise nach EU 2020 und zur Vorbereitung eines Demonstrativ-Bauvorhabens in Frankfurt a. M., Forschungsinitiative ZukunftBau F2857, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.

Heller, Hartmut / Tichelmann, Karsten:
Vergleichende Ökobilanzbetrachtung und Lebenszyklusanalyse, TU Darmstadt, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik, Darmstadt, 2010.

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU):

Deutsche Gebäudetypologie. Systematik und Datensätze, Darmstadt, 2005.

Klöpffer, Walter / Grahl, Birgit:

Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, Weinheim, 2009.

König, Holger u.a.:

Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2009.

Kurtz, Ingmar u.a.:

energy+Home. Ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Wohngebäudes zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität, Darmstadt, 2015

Magistrat der Wissenschaftsstadt Darmstadt:

Mietspiegel Darmstadt 2010. Fortschreibung des Mietspiegels Darmstadt 2008 zur Berechnung der ortsüblichen Vergleichsmiete für nicht preisgebundenen Wohnraum, Darmstadt, 2010.

Nationale Plattform Elektromobilität (NEP):

Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin, 2011.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN 276-1:2008-12. Kosten im Bauwesen. Teil1: Hochbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.

Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes im DIN:

DIN EN ISO 14040:2009-09. Umweltmanagement. Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes im DIN:

DIN EN ISO 14044:2006-04. Umweltmanagement. Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.

Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik / Bauwesen im DIN:

DIN EN 15316-4-6:2009-07. Heizungsanlagen in Gebäuden. Verfahren zur Berechnung der Energieanforderung und Nutzungsgrade der Anlagen. Teil 4-6: Wärmeerzeugungssysteme, photovoltaische Systeme, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN EN 15643-1:2011-05. Nachhaltigkeit von Bauwerken. Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN EN 15643-2:2011-05. Nachhaltigkeit von Bauwerken. Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN 15804:2012-04. Nachhaltigkeit von Bauwerken. Umweltproduktdeklarationen. Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN 15978:2012-10. Nachhaltigkeit von Bauwerken. Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden. Berechnungsmethode, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

Normenausschuss Bauwesen im DIN u.a.:

DIN V 18599-1:2007-02. Energetische Bewertung von Gebäuden –Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.

Normenausschuss Bauwesen im DIN u.a.:

DIN V 18599-10:2007-02. Energetische Bewertung von Gebäuden. Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.

Normenausschuss Bauwesen im DIN:

DIN 18960:2008-02. Nutzungskosten im Hochbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.

o.V. :

Baugesetzbuch mit Verordnung über Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, Baunutzungsverordnung, Planzeichenverordnung, Raumordnungsgesetz, Raumordnungsverordnung, 40. Aufl., dtv, München, 2007.

Pfeiffer, Martin u.a.:

Nutzungsdauertabellen für Wohngebäude, 1. Auflage, Bauwerk GmbH, Berlin, 2010.

Pfnür, Andreas / Müller, Nikolas:

Energetische Gebäudesanierung in Deutschland. Prognose der Kosten alternativer Sanierungsfahrpläne und Analyse der finanziellen Belastung für Eigentümer und Mieter bis 2050, Damstadt, 2013.

Schünemann, Christoph / Felsmann, Clemens:

Photovoltaik im Effizienzhaus Plus. Optimierung des Eigenverbrauchs, in: Energieeffizienzhaus-Plus. Innovative Gebäude mit erneuerbaren Energien, Hamburg, 2015.

Sommer, Goetz / Kröll, Ralf:

Lehrbuch zur Immobilienbewertung Unter Berücksichtigung der ImmoWertV und der Sachwert-Richtlinie, 4.Aufl., Werner Verlag, Köln, 2013.

Statistisches Bundesamt (Destatis):

Bauen und Wohnen. Mikrozensus Zusatzerhebung 2010. Bestand und Struktur der Wohneinheiten. Wohnsituation der Haushalte, Wiesbaden, 2010.

Steffen, Nelly:

Die Qualität der Innenraumluft, in: GreenBuilding - Nachhaltig planen, bauen und betreiben, 05/2014.

Tichelmann, Karsten:

energy+Home - Die erste Sanierung eines Wohnhauses zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität, TU Darmstadt Fachbereich Architektur, 3. Auflage, Darmstadt, 2014.

Verband deutscher Ingenieure (VDI):

VDI 2067. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Grundlagen und Kostenberechnung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

Wagner, Hermann-Josef, u.a.:

CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken, in: BWK Das Energie Fachmagazin, Bd. 59, 2007.

Zerwas, Martin u.a.:

Energieausweis nach DIN V 18599 und mittels Gebäudesimulation – ein Projektbericht. in: Bauphysik, 06/2008.

Anhang

A.1 Erweiterte Betrachtung der Wirkungskategorien alternativer Sanierungsvarianten

Ergänzend zur Betrachtung des Treibhauspotentials und des Gesamtprimärenergiebedarfs in Kapitel 2 werden im folgenden das Ozonabbaupotential, das photochemische Oxidantienbildungspotential, das Versauerungspotential sowie das Eutrophierungspotential der Gebäudekonstruktion und die Gesamtwirkungsabschätzung in diesen Kategorien für die Varianten „Sanierung nach EnEV“, „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“ sowie „Abbruch und Neubau nach EnEV“ dargestellt.

A.1.1 Sanierung nach EnEV - Gebäudekonstruktion

A.1.1.1 Ozonabbaupotential Gebäudekonstruktion ODP_K

Das Ozonabbaupotential (ODP) der Gebäudekonstruktion für die Sanierung nach EnEV liegt bei lediglich 27% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, welches einen Anteil von 46% gegenüber dem Referenzwert hat.

In noch größerem Maße als beim Treibhauspotential entfällt der größte Anteil von 63% auf die Herstellung. 22% entfallen auf die Instandhaltung und 15% auf die Entsorgung.

$$ODP_K = 1,43E-07 \text{ kgR}_{11}\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung A.1: Ozonabbaupotential ODP, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert

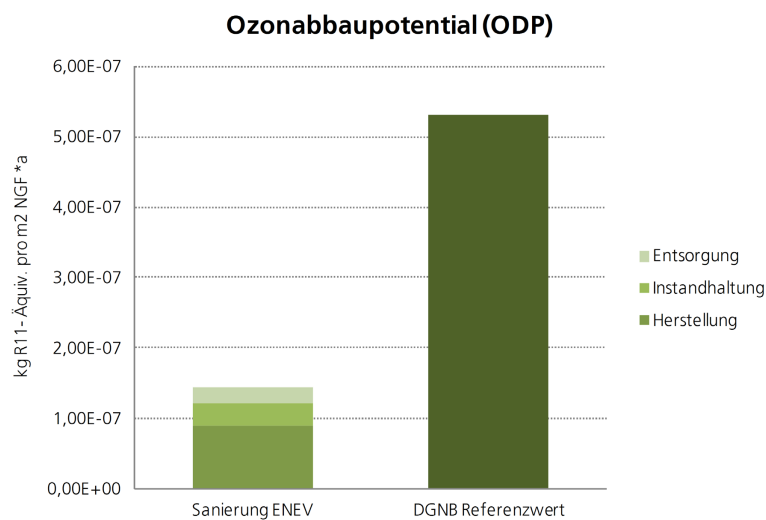
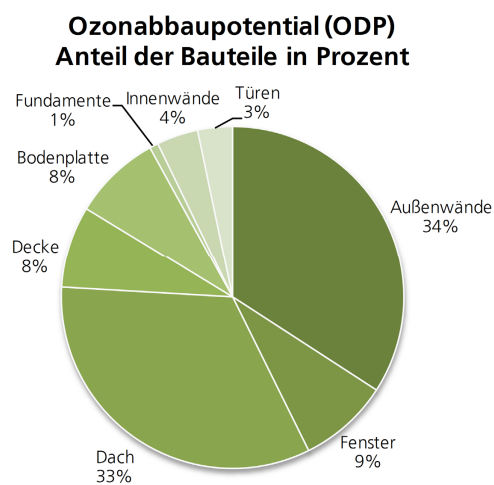


Abbildung A.2: Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent



A.1.1.2 Photochem. Oxidantienbildungspotential $POCP_K$

Das Photochemische Oxidantienbildungspotential ($POCP$) der Gebäudekonstruktion für die Sanierung nach EnEV liegt bei 67% des DGNB Referenzwerts und damit 24% unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“.

Der Anteil des Abbruchs und der Entsorgung am photochemischen Oxidantienbildungspotentials beträgt mit 38%, die Instandhaltung hat mit 17% nur einen relativ geringen Anteil, und die Herstellung mit 45% den größten.

$$POCP_K = 2,80E-03 \text{ kgC}_2\text{H}_4\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

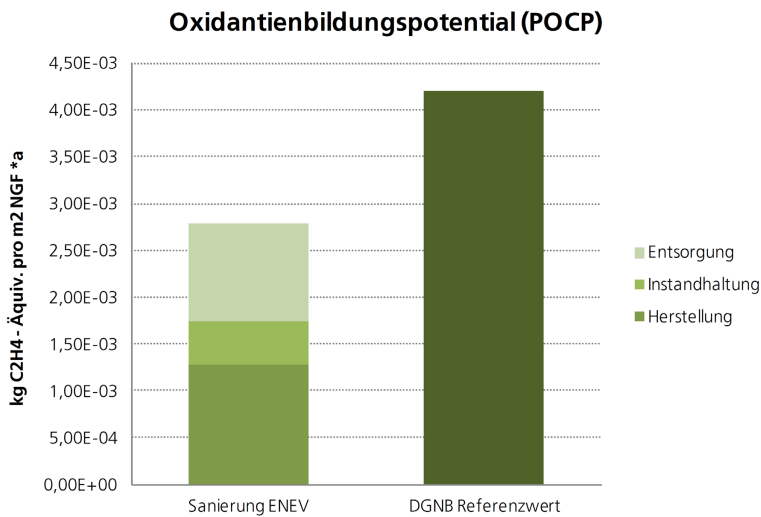


Abbildung A.3: Photochemische Oxidantienbildungspotential $POCP$, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert

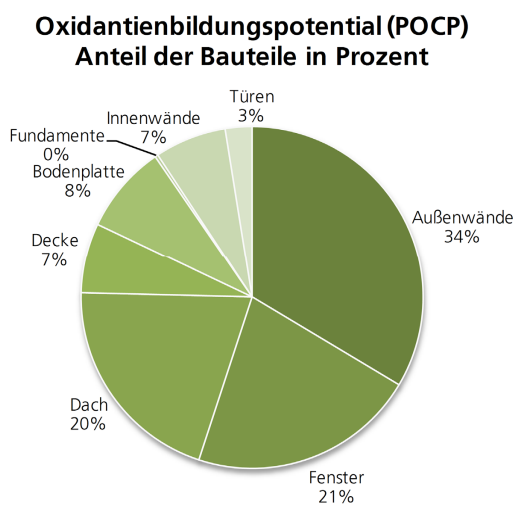


Abbildung A.4: Anteil der Bauteile am Photochemischen Oxidantienbildungspotential in Prozent

A.1.1.3 Versauerungspotential Gebäudekonstruktion AP_K

Das Versauerungspotential (AP) der Gebäudekonstruktion für die Sanierung nach EnEV liegt bei 43% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, dessen Wert bei 55% des Referenzwertes lag.

Ähnlich wie beim Ozonabbaupotential liegt der größte Anteil bei der Herstellung (62%). 24% des Versauerungspotentials entfällt auf die Instandhaltung und lediglich 14% auf die Entsorgung.

$$AP_K = 1,58E-02 \text{ kgSO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung A.5: Versauerungspotential AP, Vergleich anierung nach EnEV / DGNB Referenzwert

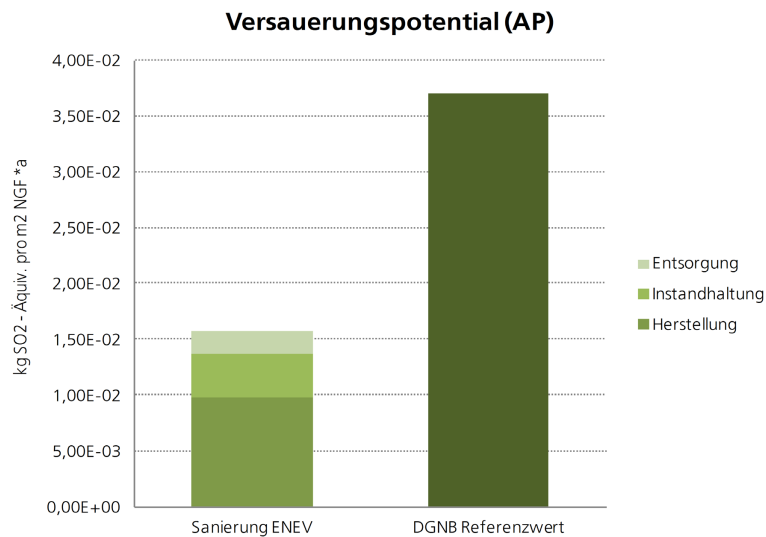
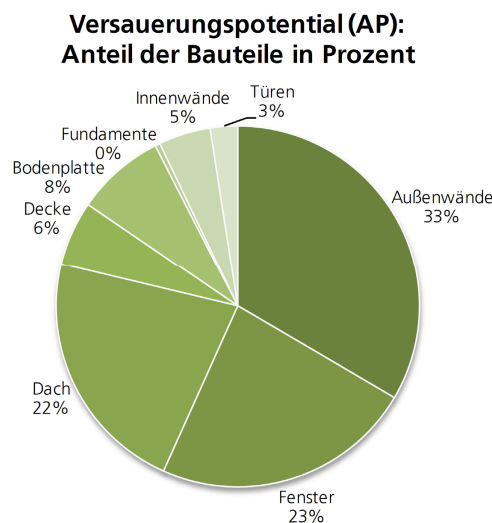


Abbildung A.6: Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent



A.1.1.4 Eutrophierungspotential Gebäudekonstruktion EP_k

Das Eutrophierungspotential (EP) der Gebäudekonstruktion für A für die Sanierung nach EnEV liegt bei 33% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, dessen Wert bei 46% des Referenzwertes lag.

Auch beim Eutrophierungspotential entfällt mit 74% der größte Anteil der Umweltwirkung auf die Herstellung. Lediglich 6% entfallen auf die Instandhaltung und 21% auf die Entsorgung.

EP_k 1,50E-03 kgPO₄-Äquiv./m²*a

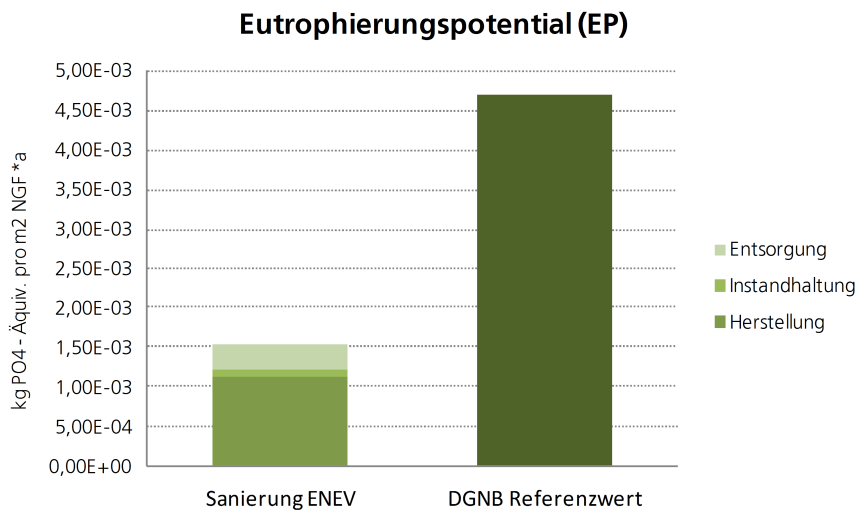


Abbildung A.7: Eutrophierungspotential EP, Vergleich Sanierung nach EnEV / DGNB Referenzwert

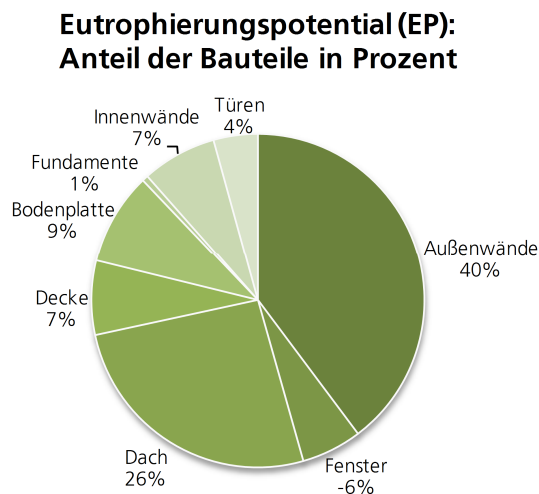
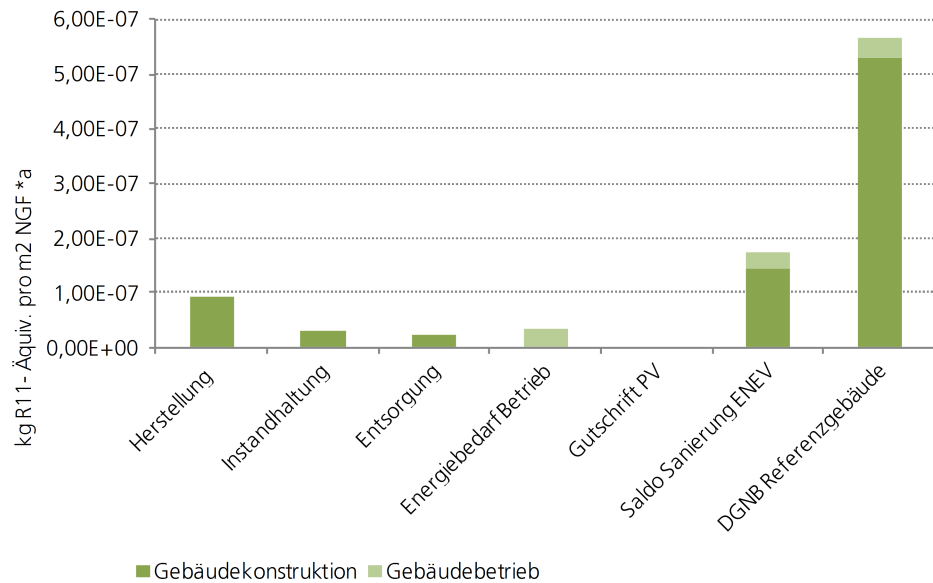


Abbildung A.8: Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent

A.1.2 Sanierung nach ENEV - Gesamtwirkungsabschätzung

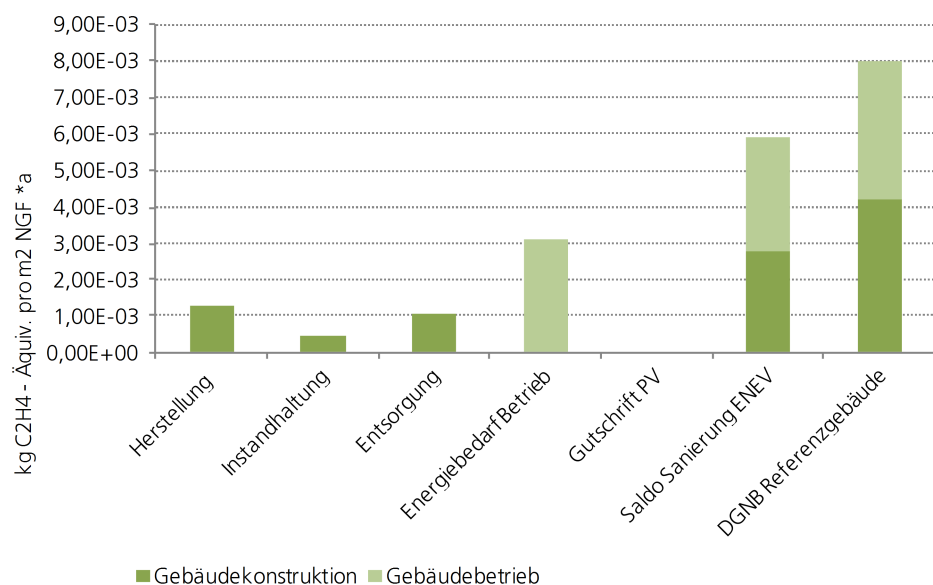
A.1.2.1 Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential

Abbildung A.9: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential Sanierung nach ENEV



A.1.2.2 Gesamtwirkungsabschätzung Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Abbildung A.10: Gesamtwirkungsabschätzung photochemisches Oxidantienbildungspotential Sanierung nach ENEV



A.1.2.3 Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential

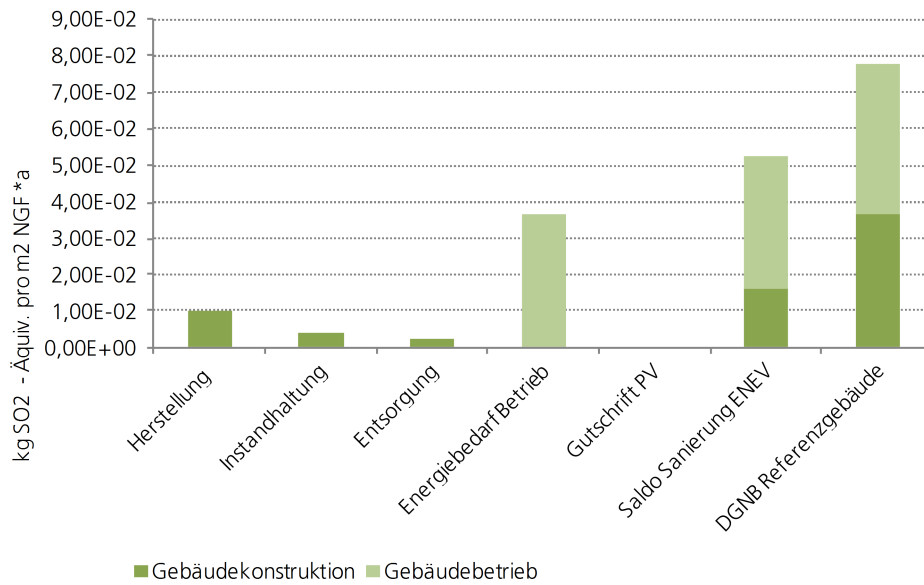


Abbildung A.11: Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential Sanierung nach EnEV

A.1.2.4 Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential

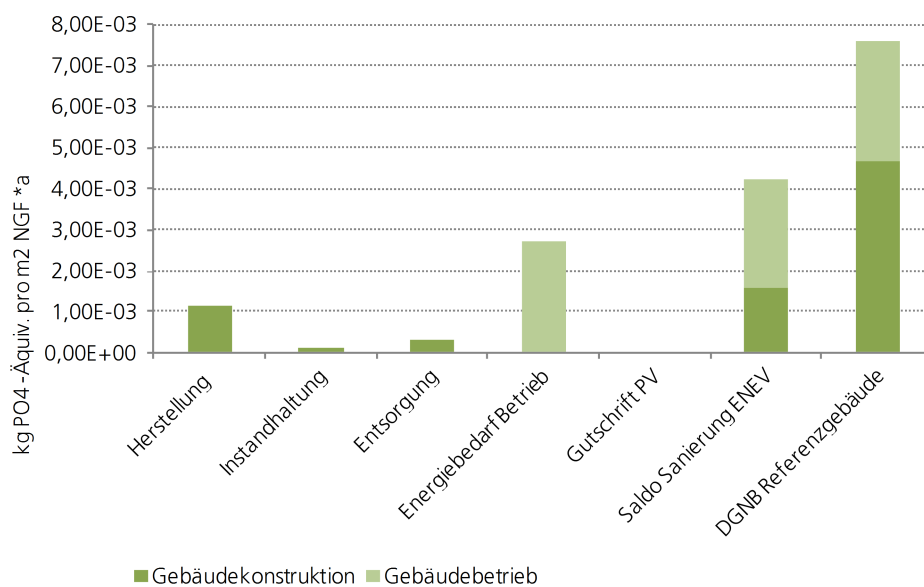


Abbildung A.12: Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential, Sanierung nach EnEV

A.1.3 Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes Gebäudekonstruktion

A.1.3.1 Ozonabbaupotential Gebäudekonstruktion ODP_K

Das Ozonabbaupotential (ODP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes liegt bei 61% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, jedoch noch weit unter dem des Referenzwertes.

Im Gegensatz zum Treibhauspotential entfällt nur ein relativ geringer Anteil von 15% auf die Entsorgung. 60% entfallen auf die Herstellung und 25% auf die Instandhaltung.

$$ODP_K = 3,25E-07 \text{ kgR}_{11}\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung A.13: Ozonabbaupotential ODP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert

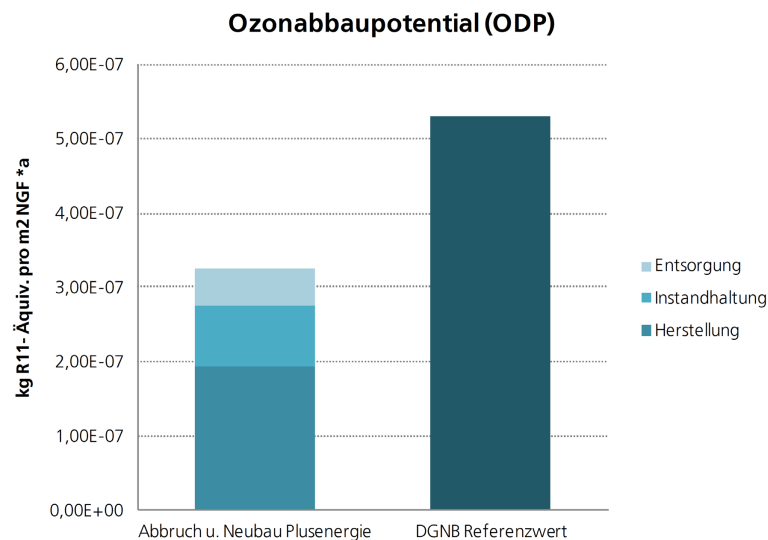
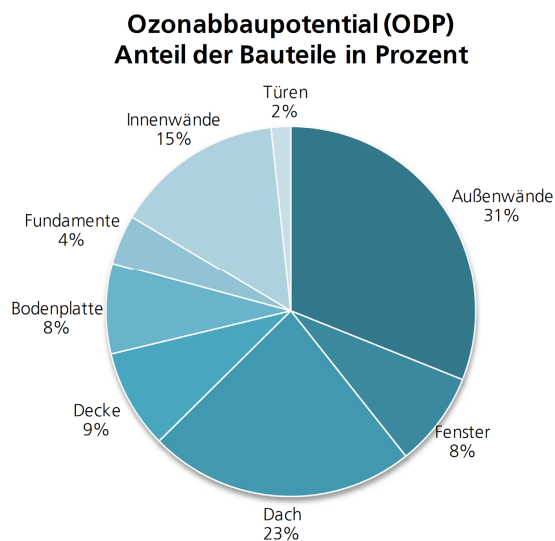


Abbildung A.14: Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent



A.1.3.2 Photochem. Oxidantienbildungspotential $POCP_K$

Das Photochemische Oxidantienbildungspotential ($POCP$) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes liegt 20% über dem Wert des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, dessen Wert 9% unter dem Referenzwert liegt.

Der Anteil des Abbruchs und der Entsorgung am photochemischen Oxidantienbildungspotential beträgt mit 45% etwas mehr als die Herstellung (41%). Die Instandhaltung hat mit 14% nur einen relativ geringen Anteil.

$$POCP_K = 5,03E-03 \text{ kgC}_2\text{H}_4\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

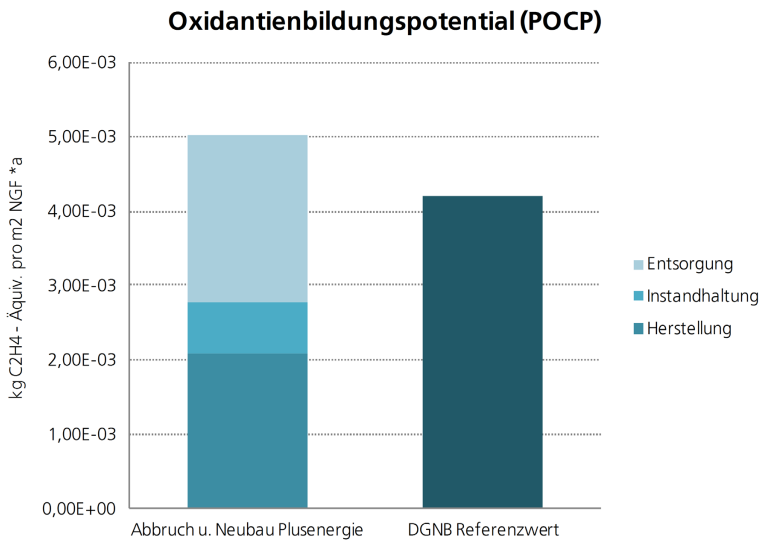


Abbildung A.15: Photochemische Oxidantienbildungspotential $POCP$, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert

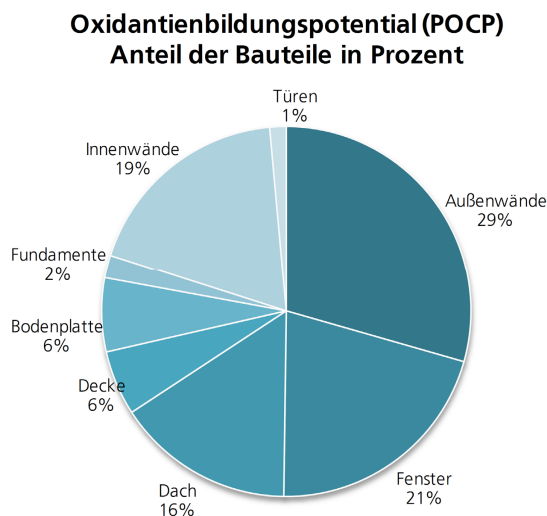


Abbildung A.16: Anteil der Bauteile am Photochemischen Oxidantienbildungspotential in Prozent

A.1.3.3 Versauerungspotential Gebäudekonstruktion AP_K

Das Versauerungspotential (AP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes liegt bei 69% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“ (55% des Referenzwertes), jedoch noch unter dem des Referenzwertes.

Im Gegensatz zum Treibhauspotential entfällt nur ein relativ geringer Anteil von 13% auf die Entsorgung, 65% entfallen auf die Herstellung und 22% auf die Instandhaltung.

$$AP_K = 2,57E-02 \text{ kgSO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung A.17: Versauerungspotential AP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert

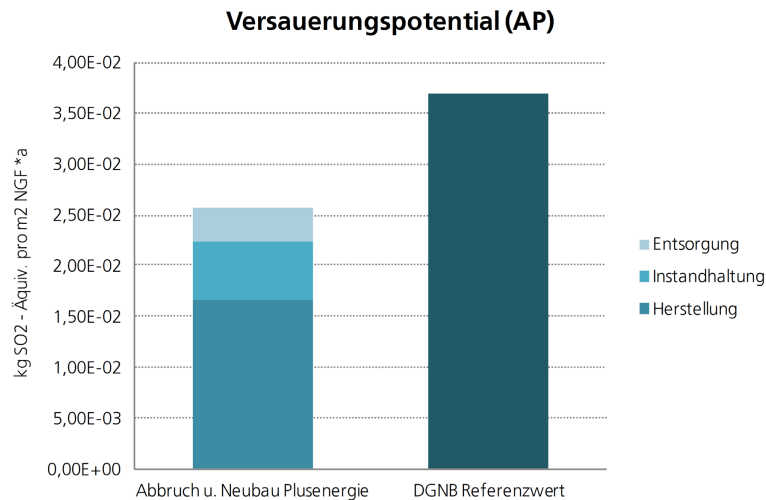
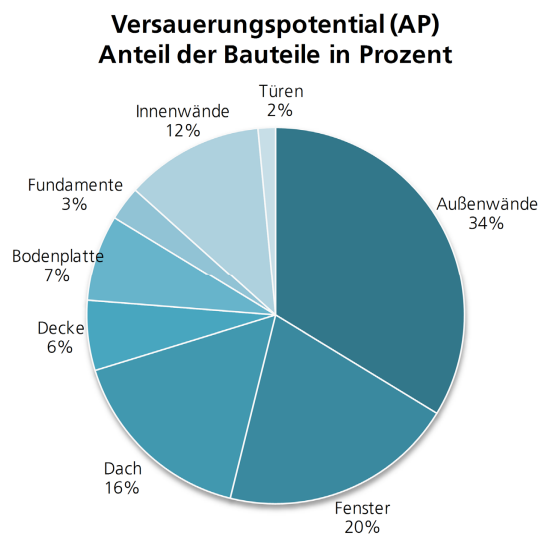


Abbildung A.18: Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent



A.1.3.4 Eutrophierungspotential Gebäudekonstruktion EP_k

Das Eutrophierungspotential (EP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes liegt bei 73% des DGNB Referenzwerts und damit ebenfalls über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, jedoch noch unter dem des Referenzwertes.

Im Gegensatz zum Treibhauspotential entfällt nur ein relativ geringer Anteil von 14% auf die Instandhaltung. 65% entfallen auf die Herstellung und 32% auf die Entsorgung.

EP_k 3,44E-03 kgPO₄-Äquiv./m²*a

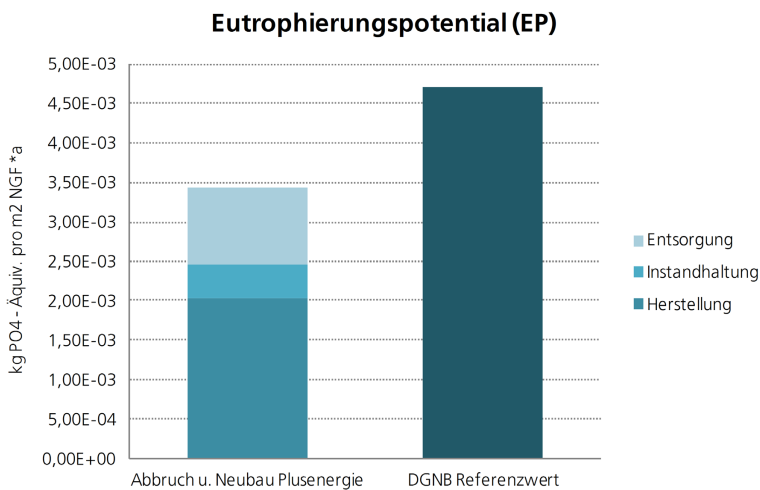


Abbildung A.19: Eutrophierungspotential EP, Vergleich Abbruch und Neubau Plusenergie / DGNB Referenzwert

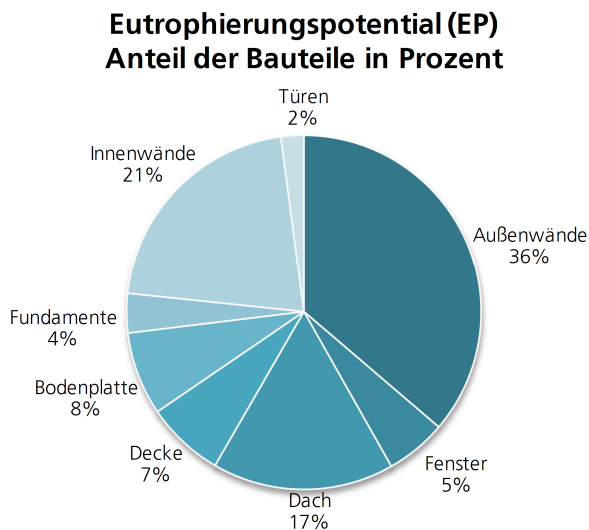
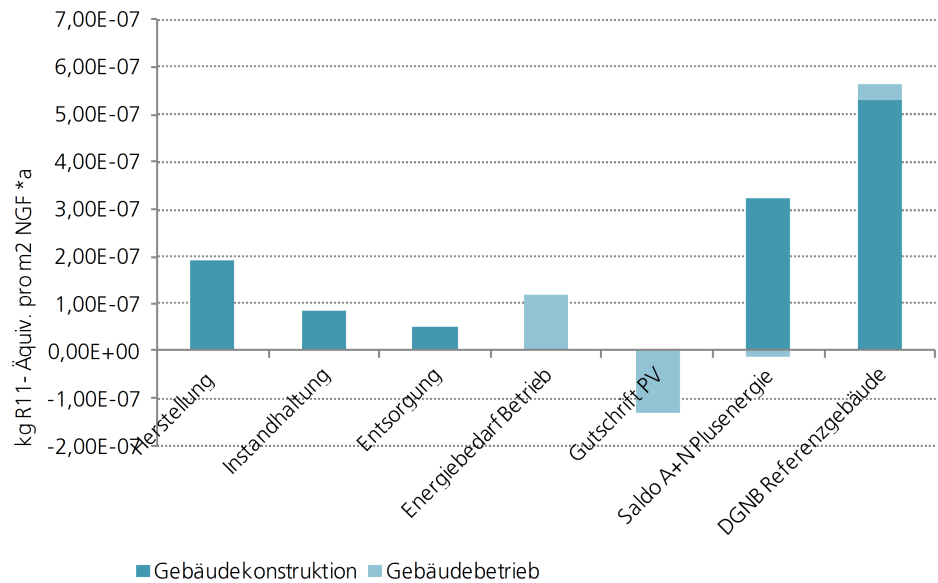


Abbildung A.20: Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent

A.1.4 Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes Gesamtwirkungsabschätzung

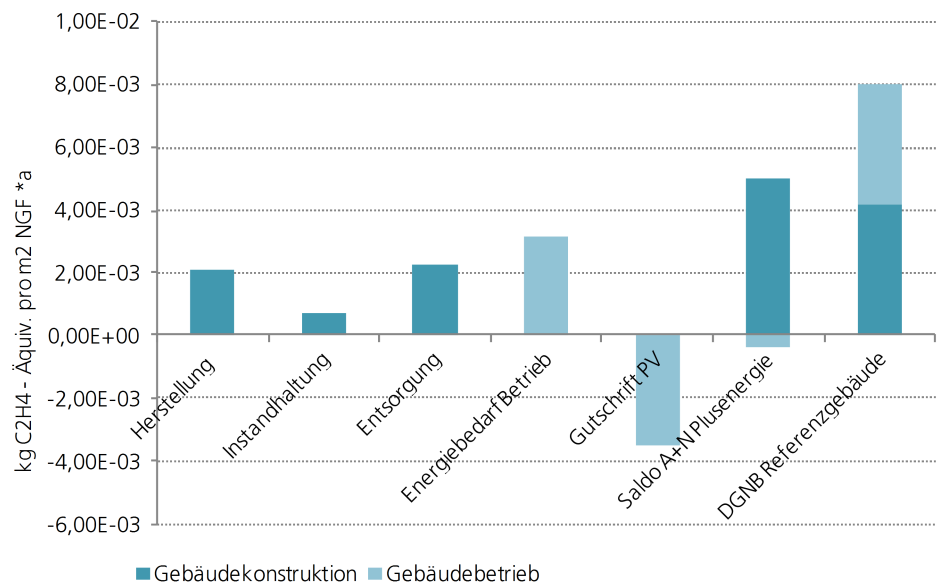
A.1.4.1 Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential

Abbildung A.21: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential Abbruch und Neubau Plusenergie



A.1.4.2 Gesamtwirkungsabschätzung Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Abbildung A.22: Gesamtwirkungsabschätzung photochemisches Oxidantienbildungspotential Abbruch und Neubau Plusenergie



A.1.4.3 Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential

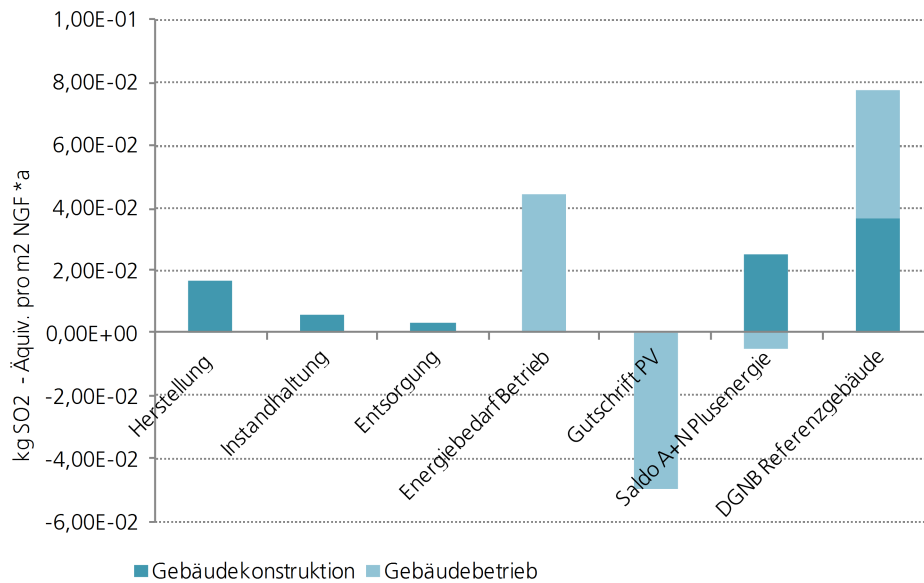


Abbildung A.23: Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential Abbruch und Neubau Plusenergie

A.1.4.4 Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential

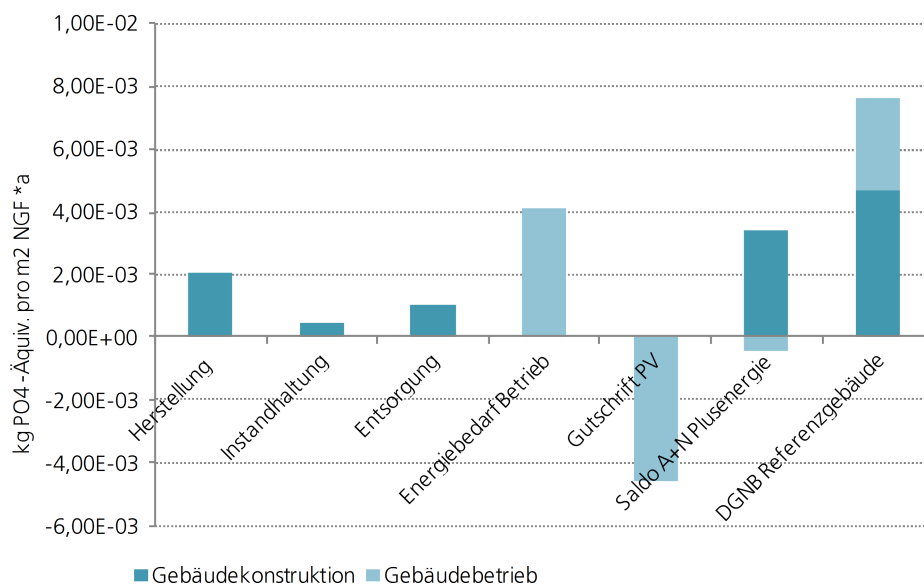


Abbildung A.24: Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential Abbruch und Neubau Plusenergie

A.1.5 Abbruch und Neubau nach EnEV

A.1.5.1 Umweltwirkungen Gebäudekonstruktion

A.1.5.1 Ozonabbaupotential Gebäudekonstruktion ODP_K

Das Ozonabbaupotential (ODP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Hauses liegt bei lediglich 42% des DGNB Referenzwerts und damit sogar noch unter dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, welcher 4% höher lag. Der Grund dafür dürfte bei den Umweltwirkungen der anlagentechnischen Komponenten des energy+Home zu suchen sein.

Im Gegensatz zum Treibhauspotential entfällt nur ein relativ geringer Anteil von 20% auf die Entsorgung. 66% entfallen auf die Herstellung und 14% auf die Instandhaltung.

$$ODP_K = 2,22E-07 \text{ kgR}_{11}\text{-Äquiv./m}^{2*}\text{a}$$

Abbildung A.25: Ozonabbaupotential ODP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert

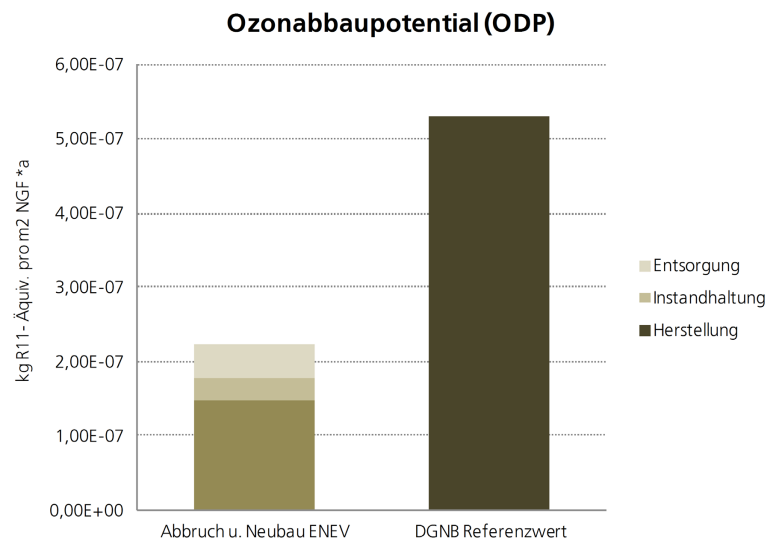
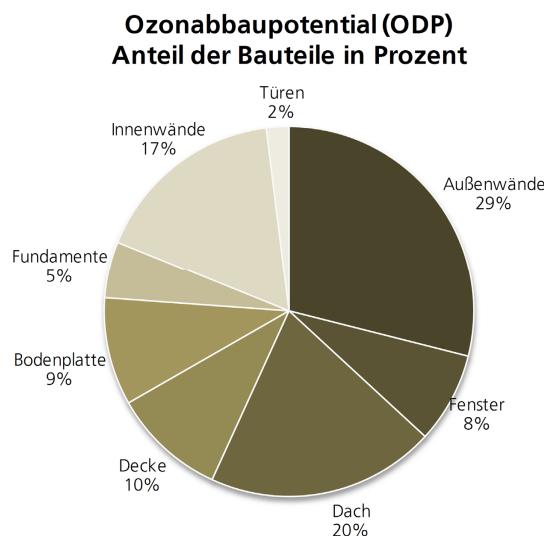


Abbildung A.26: Anteil der Bauteile am Ozonabbaupotential in Prozent



A.1.5.2 Photochem. Oxidantienbildungspotential $POCP_K$

Das Photochemische Oxidantienbildungspotential ($POCP$) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Hauses liegt 5% unter dem Wert des DGNB Referenzwerts.

Der Anteil des Abbruchs und der Entsorgung am photochemischen Oxidantienbildungspotentials beträgt mit 41% nur geringfügig unter dem Wert für die Herstellung (45%). Die Instandhaltung hat mit 14% nur einen relativ geringen Anteil.

$$POCP_K = 3,99E-03 \text{ kgC}_2\text{H}_4\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

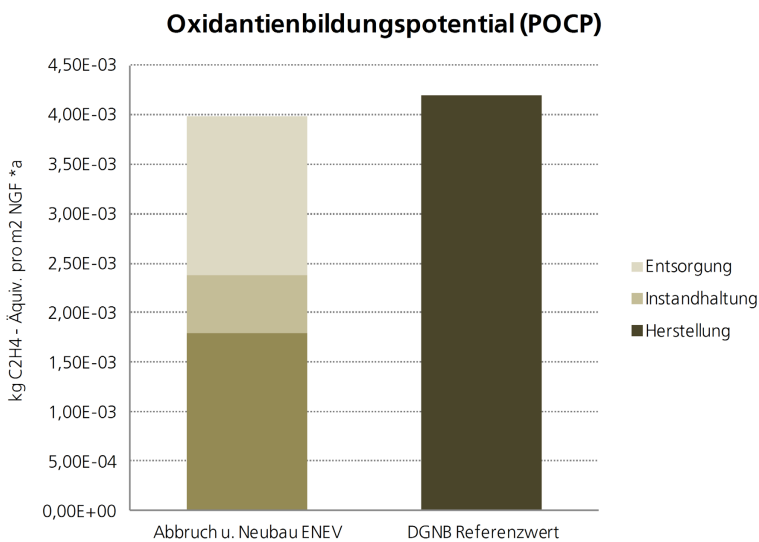


Abbildung A.27: Photochemische Oxidantienbildungspotential $POCP$, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert

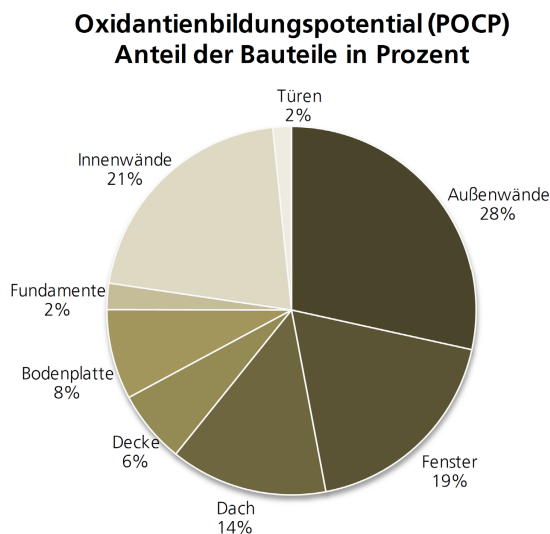


Abbildung A.28: Anteil der Bauteile am Photochemischen Oxidantienbildungspotential in Prozent

A.1.5.3 Versauerungspotential Gebäudekonstruktion AP_K

Das Versauerungspotential (AP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Hauses liegt bei 57% des DGNB Referenzwertes und damit in etwa so hoch wie der Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, dessen Wert 55% des Referenzwertes beträgt.

Im Gegensatz zum Treibhauspotential entfällt nur ein relativ geringer Anteil von 12% auf die Entsorgung, 70% entfallen auf die Herstellung und 18% auf die Instandhaltung.

$$AP_K = 2,11E-02 \text{ kgSO}_2\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

Abbildung A.29: Versauerungspotential AP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert

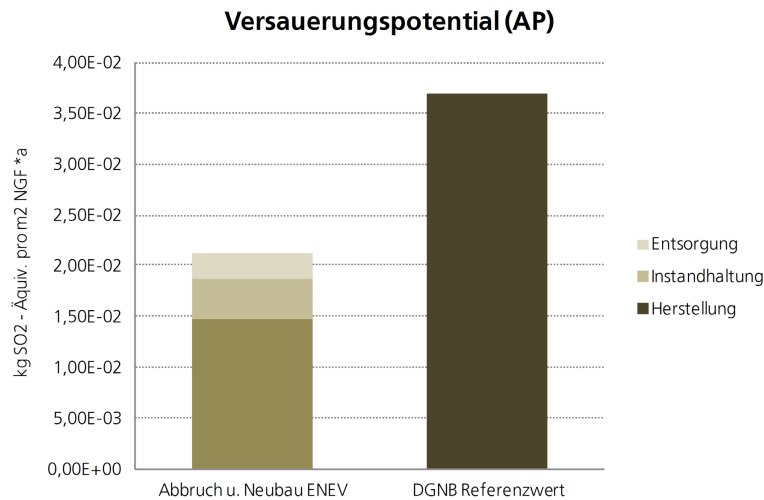
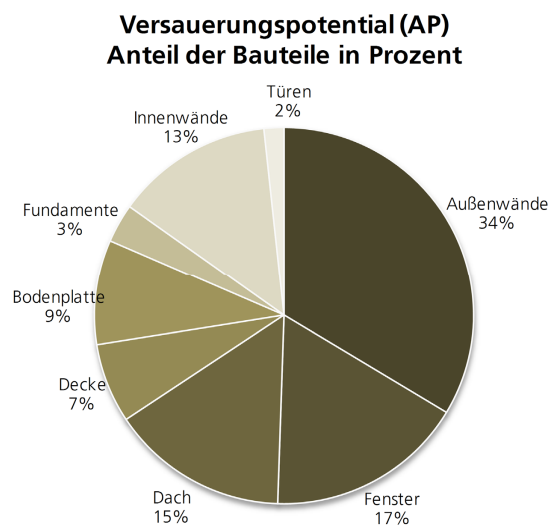


Abbildung A.30: Anteil der Bauteile am Versauerungspotential in Prozent



A.1.5.4 Eutrophierungspotential Gebäudekonstruktion EP_k

Das Eutrophierungspotential (EP) der Gebäudekonstruktion für Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Hauses liegt bei 60% des DGNB Referenzwerts und damit 14% über dem Wert der Variante „Sanierung zum energy+Home“, jedoch weit unter dem des Referenzwertes.

Fast ein Drittel (30%) des Eutrophierungspotentials gehen zu Lasten von Abbruch und Entsorgung des bestehenden Gebäudes und dessen Rückbau am end of life. Lediglich 10% entfallen auf die Instandhaltung und 60% auf die Herstellung des Neubaus.

$$AP_k = 2,81E-03 \text{ kgPO}_4\text{-Äquiv./m}^2\text{*a}$$

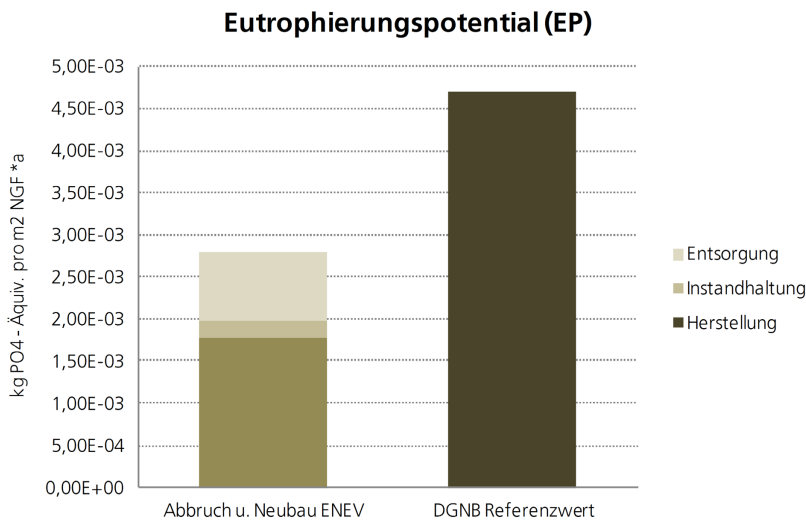


Abbildung A.31: Eutrophierungspotential EP, Vergleich Abbruch und Neubau EnEV / DGNB Referenzwert

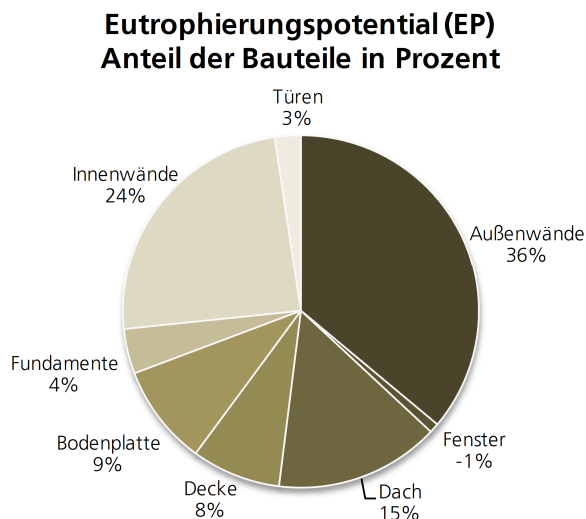
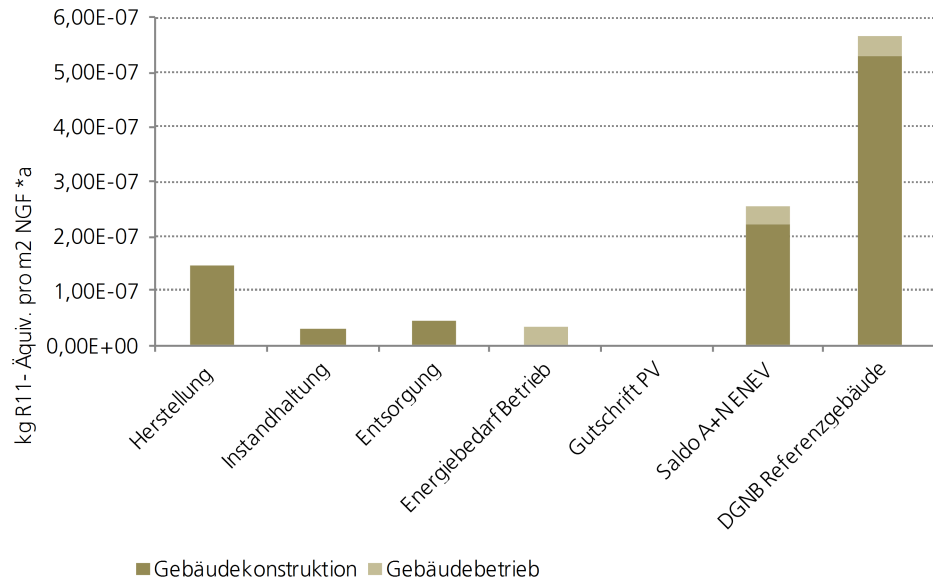


Abbildung A.32: Anteil der Bauteile am Eutrophierungspotential in Prozent

A.1.6 Abbruch und Neubau nach EnEV Gesamtwirkungsabschätzung

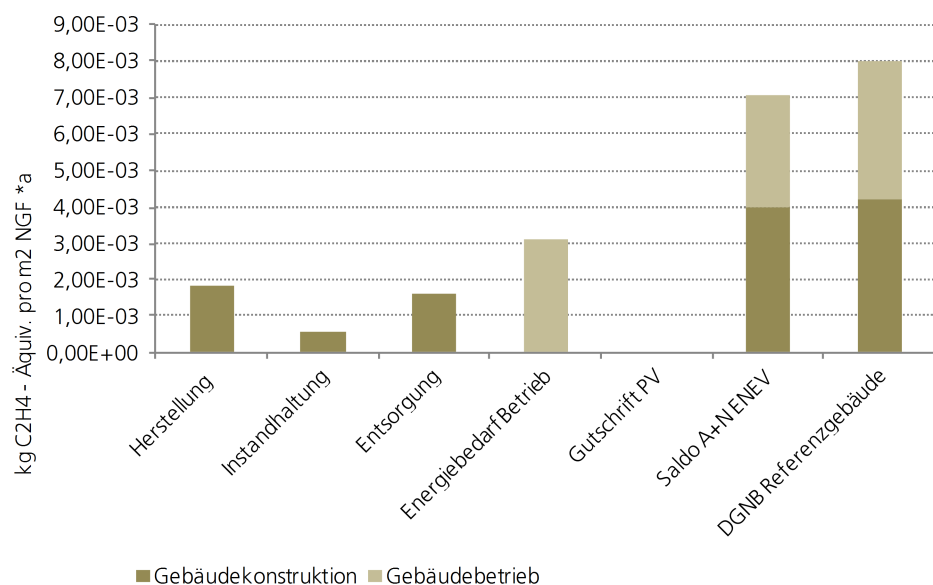
A.1.6.1 Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential

Abbildung A.33: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbaupotential Abbruch und Neubau EnEV



A.1.6.2 Gesamtwirkungsabschätzung Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Abbildung A.34: Gesamtwirkungsabschätzung photochemisches Oxidantienbildungspotential Abbruch und Neubau EnEV



A.1.6.3 Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential

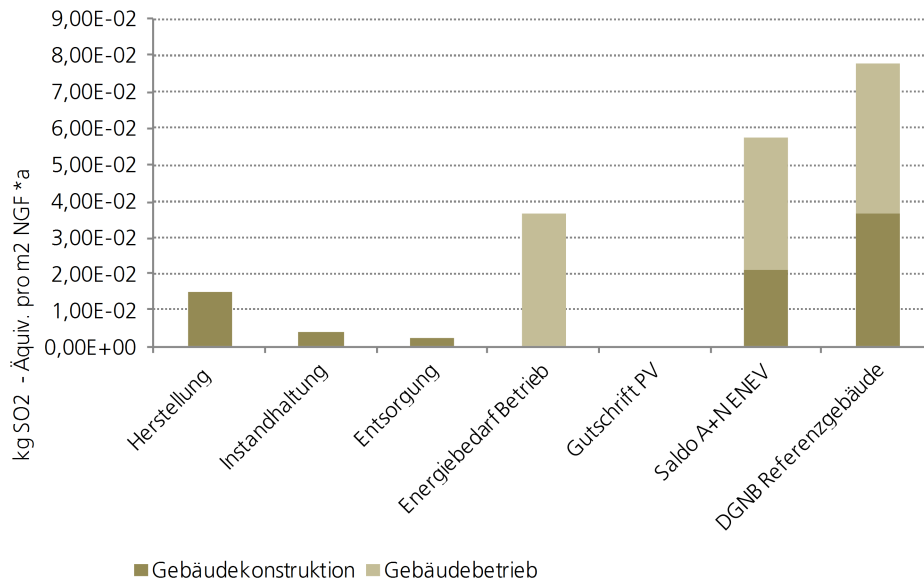


Abbildung A.35: Gesamtwirkungsabschätzung Versauerungspotential Abbruch und Neubau EnEV

A.1.6.4 Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential

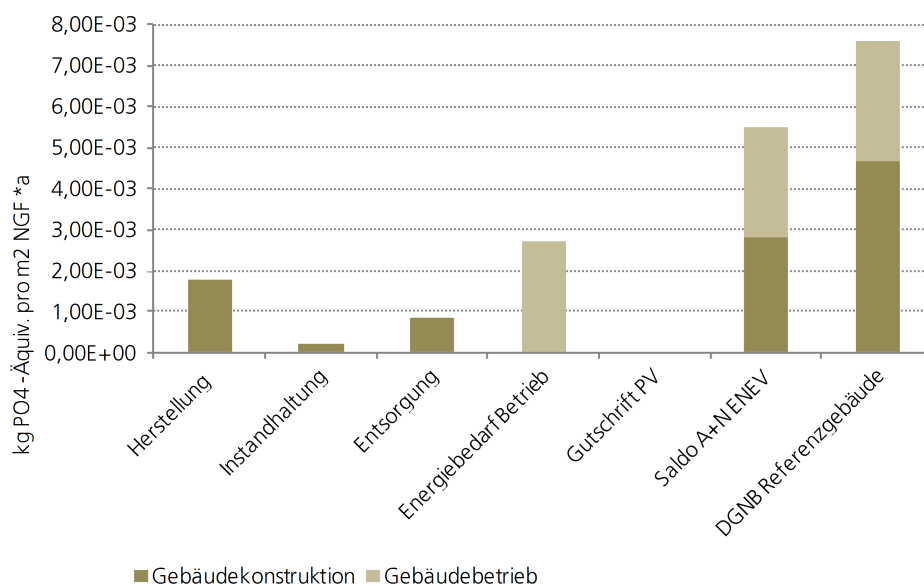


Abbildung A.36: Gesamtwirkungsabschätzung Eutrophierungspotential Abbruch und Neubau EnEV

A.2 Auswertung und vergleichende Betrachtung der Sanierungs- und Neubauvarianten

A.2.1 Vergleichende Betrachtung Ozonabbaupotential ODP

Betrachtet man das Ozonabbaupotential, so hat die Variante der Sanierung nach EnEV die geringste Umweltwirkung. Der Grund dafür dürfte das Fehlen einer Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung sein, was sich in einer deutlich geringeren Umweltwirkung im Bereich der Konstruktion widerspiegelt. Trotzdem schneidet die Sanierungsvariante des energy+Home besser ab als ein Abbruch und Neubau nach EnEV, auch wenn es 26 Jahre dauert, bis sich der Mehraufwand im Bereich der Konstruktion wieder amortisiert.

Abbildung A.37: Entwicklung des Ozonabbaupotentials im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

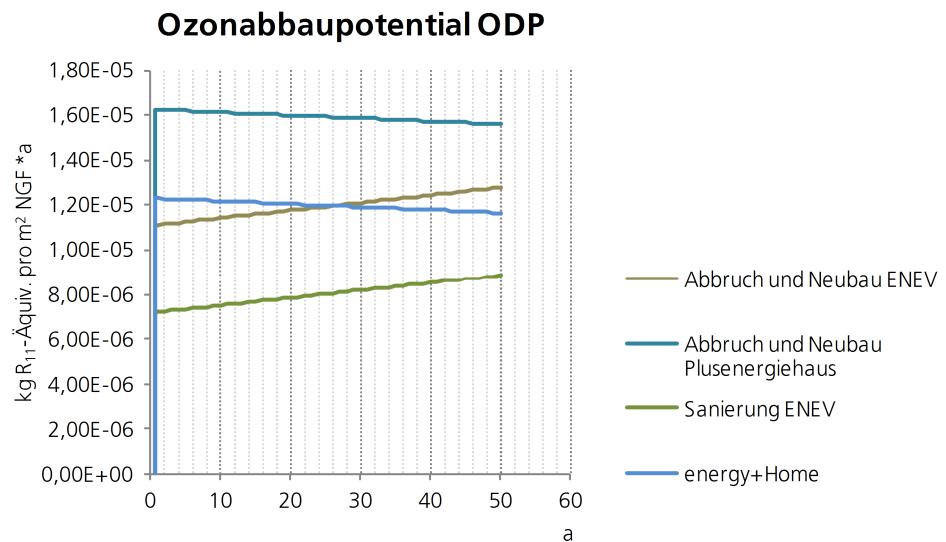
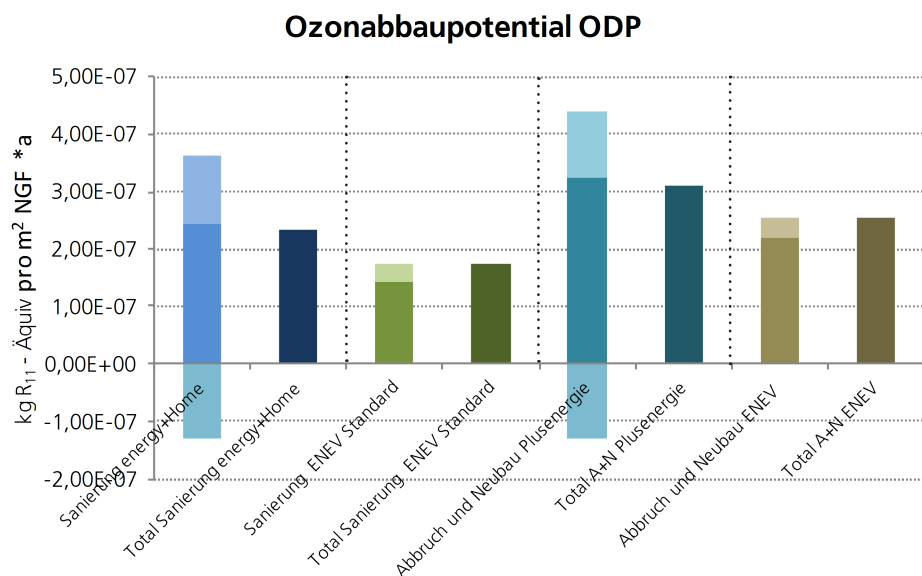


Abbildung A.38: Gegenüberstellung des Ozonabbaupotentials der Sanierungs- und Neubauvarianten



A.2.2 Vergleichende Betrachtung photochemisches Oxidantienbildungspotential POCP

Auch beim photochemischen Oxidantienbildungspotential hat das energy+Home die geringste Umweltwirkung. Gegenüber dem Abbruch und Neubau eines EnEV hat die Sanierungsvariante ein 51 % geringeres Umweltwirkungspotential. Der Mehraufwand im Bereich der Konstruktion amortisiert sich gegenüber der Sanierung nach EnEV nach 15 Jahren.

Bricht man das bestehende Gebäude ab und errichtet stattdessen ein Plusenergiegebäude mit der selben Kubatur und Ausstattung wie das energy+Home, so amortisiert sich der Mehraufwand für die Konstruktion gegenüber einem Abbruch und Neubau nach EnEV ebenfalls nach 15 Jahren und gegenüber der Sanierung nach EnEV nach ca. 32 Jahren.

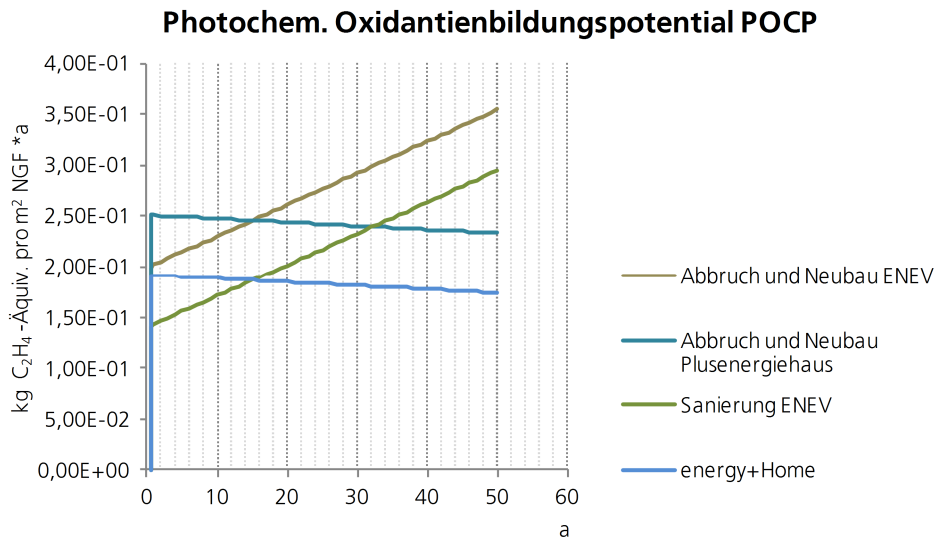


Abbildung A.39: Entwicklung des photochem. Oxidantienbildungspotentials im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

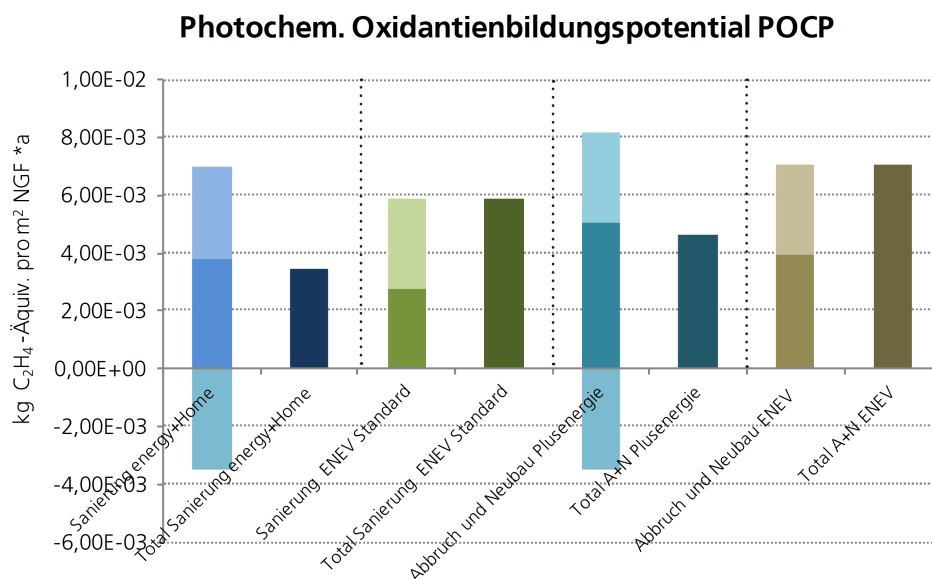


Abbildung A.40: Gegenüberstellung des photochem. Oxidantienbildungspotentials der Sanierungs- und Neubauvarianten

A.2.3 Vergleichende Betrachtung Versauerungspotential AP

Ähnlich wie beim Treibhauspotential und photochemischen Oxidantienbildungspotential hat auch beim Versauerungspotential das energy+Home das geringste Umweltwirkungspotential, gefolgt von der Variante „Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes“, der Variante „Sanierung nach EnEV“ und dem Abbruch und Neubau nach EnEV. Gegenüber der EnEV-Varianten amortisieren sich die größeren Aufwände im Bereich der Konstruktion bei den beiden Plusenergievarianten nach 5 Jahren. Bricht man das bestehende Gebäude ab und errichtet stattdessen ein Plusenergiegebäude neu amortisiert sich dieser Aufwand nach 12 Jahren.

Abbildung A.41: Entwicklung des Versauerungspotentials im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

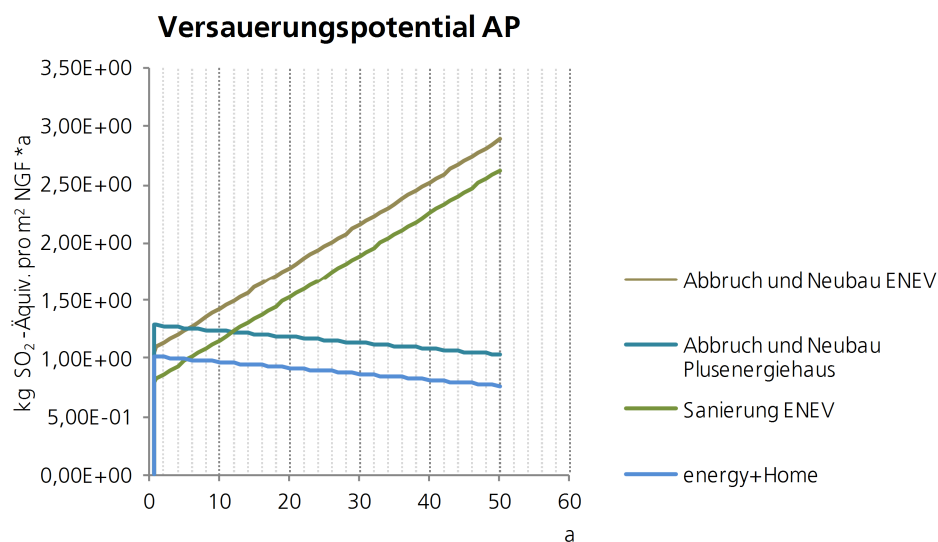
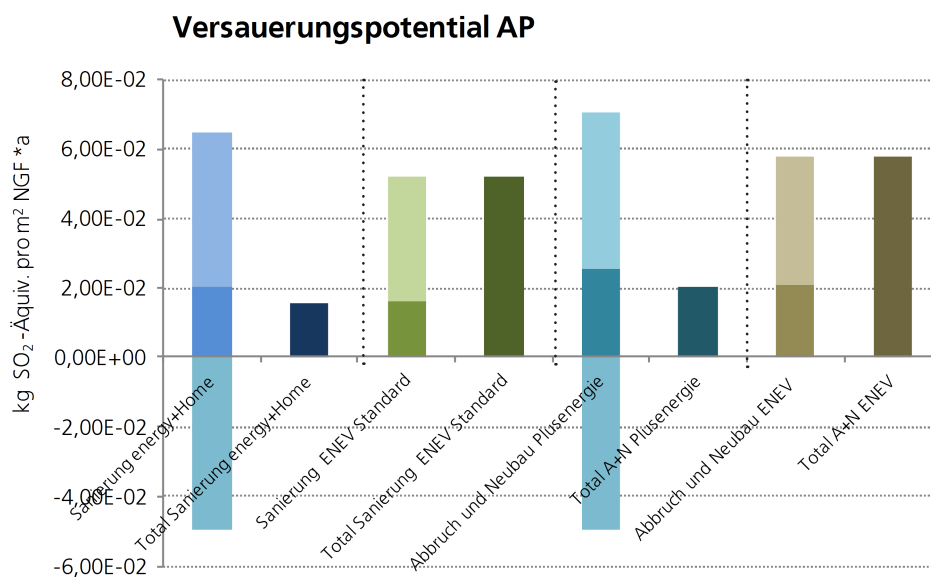


Abbildung A.42: Gegenüberstellung des Versauerungspotentials der Sanierungs- und Neubaularianen



A.2.4 Vergleichende Betrachtung Eutrophierungspotential EP

Der beim Versauerungspotential beschriebene Effekt lässt sich auch beim Eutrophierungspotential feststellen. Hierbei amortisieren sich die Plusenergie-Varianten gegenüber den EnEV-Varianten nach 10 Jahren und die Plusenergie-Neubauvariante gegenüber der Sanierung nach EnEV nach 30 Jahren.

Das energy+Home hat nach 50 Jahren gerade einmal 31 % des Eutrophierungspotentials der EnEV-Neubau-Variante. Aufgrund der Gutschrift der Photovoltaik-Anlage wird die Schere zwischen den Plusenergie-Varianten gegenüber den EnEV-Varianten immer größer, je länger der Betrachtungszeitraum ist.

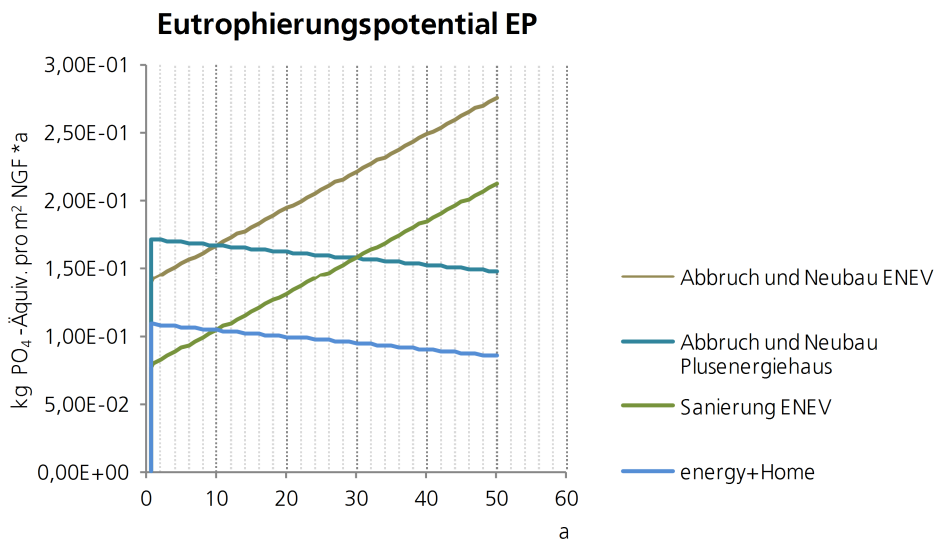


Abbildung A.43: Entwicklung des Eutrophierungspotentials im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

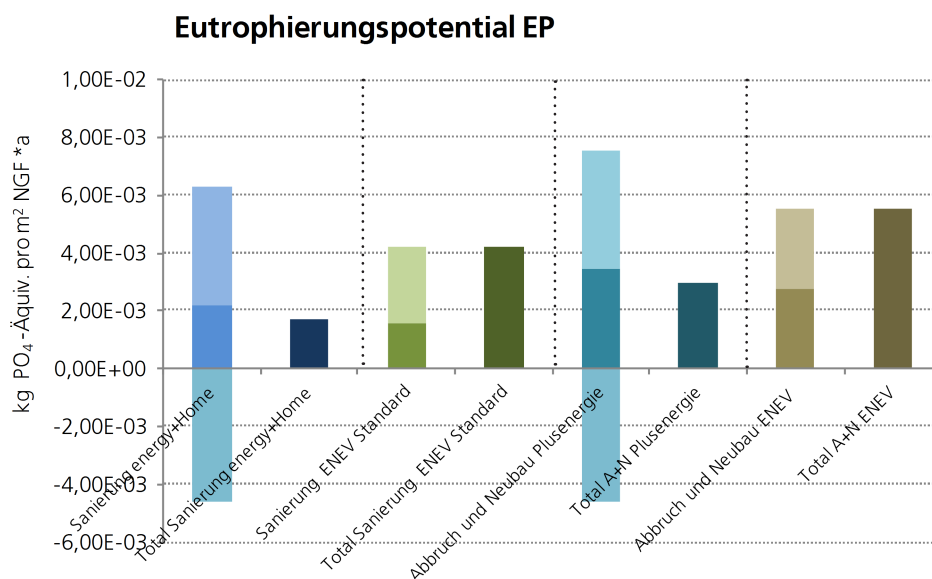


Abbildung A.44: Gegenüberstellung des Eutrophierungspotentials der Sanierungs- und Neubauvarianten

A.3 Herstellungskosten energy+Home - Kostenfeststellung

A.3.1 KG 300 Baukonstruktion

Tabelle A.1: Herstellungskosten des energy+Home, KG 300 Baukonstruktion

KG	Beschreibung	energy+Home Baukosten	Moderni- sierung	Instand- setzung	Energie- effizienz
310	Baugrube	2.406 €	0 €	2.406 €	0 €
311	Baugrubenherstellung	1.096 €	0 €	1.096 €	0 €
319	Baugrube, sonstiges	1.310 €	0 €	1.310 €	0 €
320	Gründung	13.809 €	1.331 €	11.551 €	928 €
322	Flachgründungen	392 €	392 €	0 €	0 €
324	Unterböden und Bodenplatten	1.153 €	939 €	214 €	0 €
326	Bauwerksabdichtungen	5.776 €	0 €	4.848 €	928 €
327	Drainagen	601 €	0 €	601 €	0 €
329	Gründung, sonstiges	5.887 €	0 €	5.887 €	0 €
330	Außenwände	82.762 €	24.828 €	35.662 €	22.272 €
331	Tragende Außenwände	2.375 €	689 €	1.686 €	0 €
334	Außentüren und Fenster	36.302 €	9.251 €	16.316 €	10.735 €
335	Außenwandbekleidungen, außen	32.466 €	10.403 €	10.526 €	11.537 €
336	Außenwandbekleidungen, innen	1.176 €	1.176 €	0 €	0 €
338	Sonnenschutz	4.698 €	3.309 €	1.389 €	0 €
339	Außenwände, sonstiges	5.744 €	0 €	5.744 €	0 €
340	Innenwände	29.697 €	22.626 €	7.012 €	60 €
341	Tragende Innenwände	110 €	0 €	110 €	0 €
342	Nichttragende Innenwände	5.572 €	5.572 €	0 €	0 €
343	Innenstützen	47 €	47 €	0 €	0 €
344	Innentüren und -fenster	13.695 €	13.695 €	0 €	0 €
345	Innenwandbekleidungen	10.088 €	3.126 €	6.902 €	60 €
349	Innenwände, sonstiges	185 €	185 €	0 €	0 €
350	Decken	29.321 €	21.065 €	4.844 €	3.412 €
351	Deckenkonstruktionen	1.466 €	486 €	980 €	0 €
352	Deckenbeläge	20.959 €	14.742 €	2.805 €	3.412 €
353	Deckenbekleidungen	5.569 €	5.569 €	0 €	0 €
359	Decken, sonstiges	1.327 €	268 €	1.058 €	0 €
360	Dächer	55.182 €	7.885 €	31.681 €	15.616 €
361	Dachkonstruktionen	3.474 €	0 €	0 €	3.474 €
362	Dachfenster	11.520 €	7.320 €	2.100 €	2.100 €
363	Dachbeläge	35.456 €	413 €	25.003 €	10.041 €
364	Dachbekleidungen	4.639 €	152 €	4.487 €	0 €
369	Dächer, sonstiges	92 €	0 €	92 €	0 €
370	Baukonstruktive Einbauten	2.807 €	2.807 €	0 €	0 €
371	Allgemeine Einbauten	2.807 €	2.807 €	0 €	0 €
390	Sonstiges Baukonstruktionen	24.862 €	11.265 €	13.597 €	0 €
391	Baustelleneinrichtung	4.582 €	1.178 €	3.404 €	0 €
392	Gerüste	7.414 €	4.121 €	3.293 €	0 €
394	Abbruchmaßnahmen	8.180 €	2.947 €	5.233 €	0 €
396	Materialentsorgung	108 €	0 €	108 €	0 €
399	Sonstiges	4.579 €	3.019 €	1.560 €	0 €
300	Total Netto	240.846 €	91.806 €	106.753 €	42.287 €
	MwSt. 19%	45.761 €	17.443 €	20.283 €	8.035 €
	Total Brutto	286.607 €	109.249 €	127.036 €	50.321 €

A.3.2 KG 400 Technische Anlagen

KG	Beschreibung	energy+Home Baukosten	Moderni- sierung	Instand- setzung	Energie- effizienz
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	15.898 €	13.082 €	2.817 €	0 €
411	Abwasseranlagen	2.817 €	0 €	2.817 €	0 €
412	Wasseranlagen	13.082 €	13.082 €	0 €	0 €
420	Wärmeversorgungsanlagen	26.606 €	3.062 €	15.914 €	7.630 €
421	Wärmeerzeugungsanlagen	9.813 €	0 €	5.991 €	3.822 €
422	Wärmeverteilnetze	3.507 €	3.062 €	267 €	178 €
423	Raumheizflächen	9.076 €	0 €	5.445 €	3.630 €
429	Sonstiges	4.211 €	0 €	4.211 €	0 €
430	Lufttechnische Anlagen	7.952 €	0 €	4.771 €	3.181 €
431	Lüftungsanlagen	7.952 €	0 €	4.771 €	3.181 €
440	Starkstromanlagen	34.349 €	13.355 €	1.494 €	19.500 €
442	Eigenstromversorgungsanlagen	19.500 €	0 €	0 €	19.500 €
444	Niederspannungsinstallationsanlagen	14.849 €	13.355 €	1.494 €	0 €
400	Total Netto	84.805 €	29.498 €	24.995 €	30.311 €
	MwSt. 19%	16.113 €	5.605 €	4.749 €	5.759 €
	Total Brutto	100.918 €	35.103 €	29.744 €	36.070 €

Tabelle A.2: Herstellungskosten des energy+Home, KG 400 Technische Anlagen

A.3.3 KG 500 Außenanlagen ¹

KG	Beschreibung	energy+Home Baukosten	Moderni- sierung	Instand- setzung	Energie- effizienz
510	Geländeflächen	3.477 €		3.477 €	
512	Bodenarbeiten	3.377 €		3.377 €	
519	Geländeflächen, sonstiges	100 €		100 €	
520	Befestigte Flächen	3.834 €		3.834 €	
521	Wege	2.190 €		2.190 €	
523	Plätze, Höfe	1.645 €		1.645 €	
530	Baukonstruktionen in Außenanlagen	5.630 €		5.630 €	
531	Einfriedungen	1.630 €		1.630 €	
533	Mauern, Wände	4.000 €		4.000 €	
590	Sonstige Außenanlagen	437 €		437 €	
594	Abbruchmaßnahmen	437 €		437 €	
500	Total Netto	13.378 €		13.378 €	
	MwSt. 19%	2.542 €		2.542 €	
	Total Brutto	15.919 €		15.919 €	

Tabelle A.3: Herstellungskosten des energy+Home, KG 500 Außenanlagen

¹ Die Ermittlung der Kosten der Außenanlagen dient lediglich dem Abgleich der Gesamtkosten per Kostengruppen und per Gewerke und hat keine Relevanz im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Kosten einer Sanierung nach dem Vorbild des energy+Home

Abbildung A.45: Kostengruppe 300
Baukonstruktion, Verteilung der
Kosten

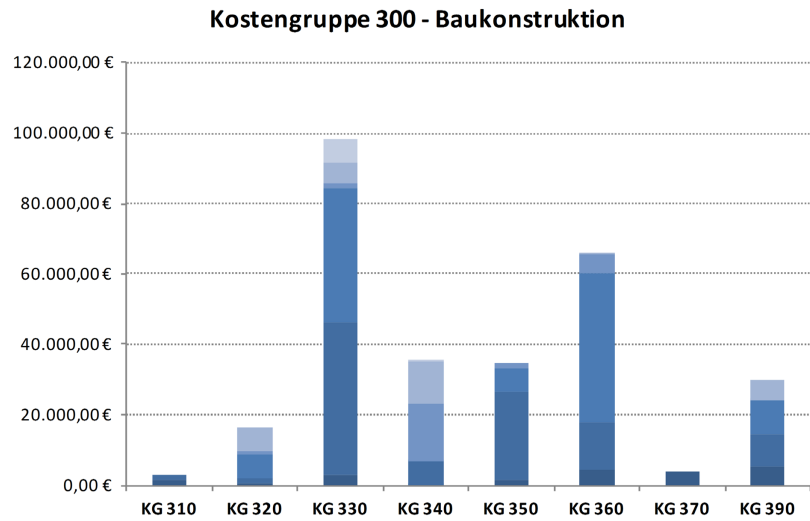


Abbildung A.46: Kostengruppe 400
Technische Anlagen, Verteilung
der Kosten

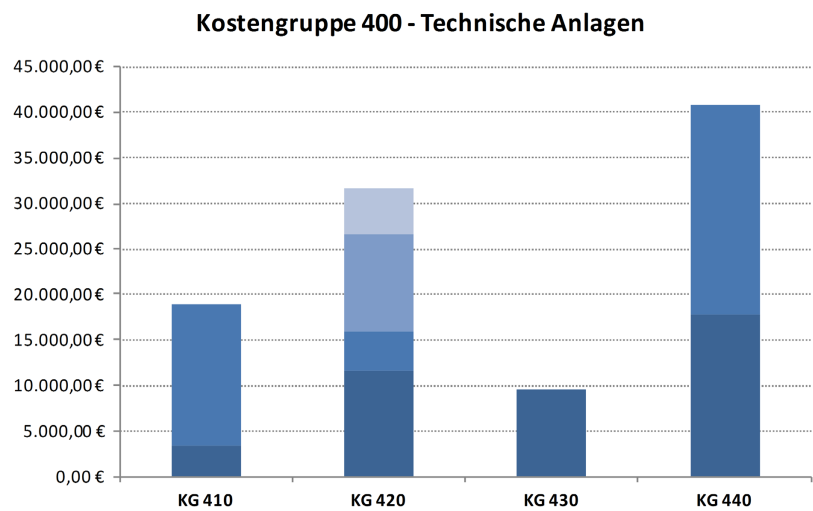
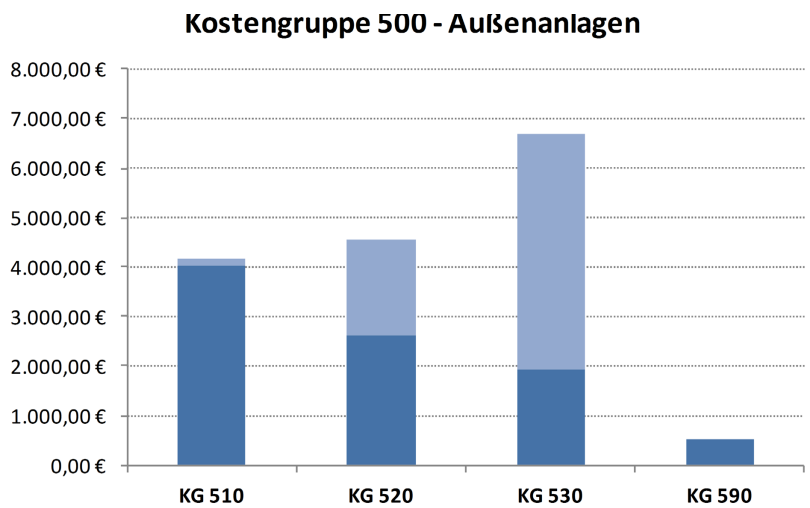


Abbildung A.47: Kostengruppe
500 Außenanlagen, Verteilung der
Kosten



A.3.4 Investitionskosten nach Gewerken sortiert

Gewerk	energy+Home Baukosten
Rohbauarbeiten	25.250 €
Trockenbauarbeiten	34.018 €
Metallbauarbeiten	4.798 €
Zimmer- und Holzbauarbeiten	25.737 €
Schlosserarbeiten	2.337 €
Verglasungsarbeiten	36.764 €
Rolladenarbeiten	1.608 €
Schreinerarbeiten	16.988 €
Fliesen- und Plattenarbeiten	17.282 €
Abdichtungsarbeiten (Balkon)	887 €
Bodenbelagsarbeiten (Parkett)	10.541 €
Dacharbeiten	61.625 €
Baustelleneinrichtung	7.831 €
Elektroarbeiten	34.349 €
Raumlufttech. Anlagen, FBH	15.278 €
Heizung und WW	25.545 €
Kamin	3.321 €
Öltank	1.500 €
Landschaftsbauarbeiten	8.818 €
Erdarbeiten	4.560 €
Total Netto	339.038 €
MwSt. 19%	64.417 €
Total Brutto	403.455 €

Tabelle A.4: Herstellungskosten nach Gewerken sortiert

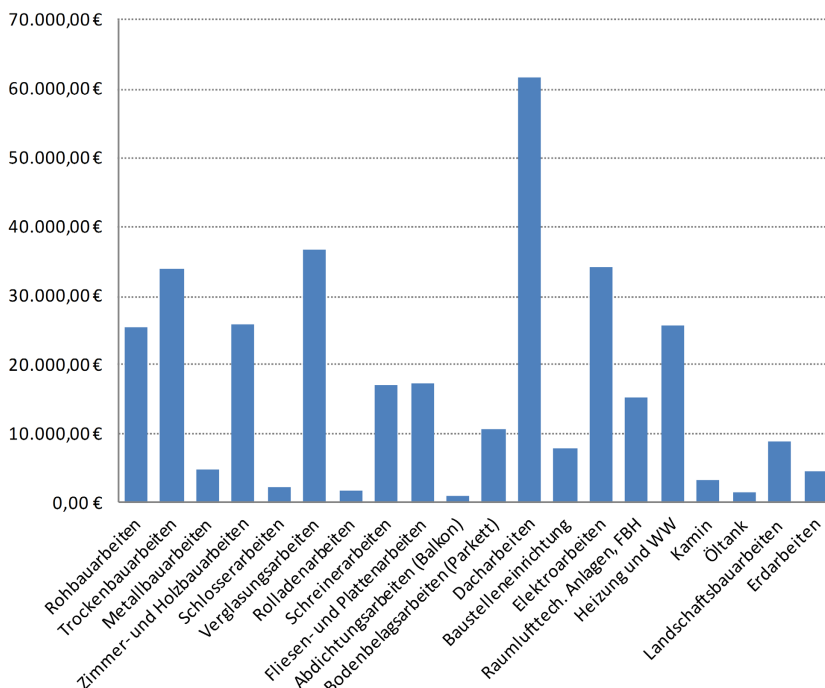


Abbildung A.48: Herstellungskosten nach Gewerken sortiert

A.4 Nutzungskosten energy+Home

A.4.1 Betriebskosten energy+Home für Inspektion und Wartung

Komponenten-Nr.	Nutzungsdauer [a] Quelle: BNB	Faktor für Inspektion und Wartung $f_{w+insp.}$ [%] Quelle: für 352 BNB 4.1.1 353 VDI 2067, Anhang A	Ersatzhäufigkeit für	Bezeichnung des Bauteils	Investition [€]
	T_N		n		A_0
			352	Inspektion und Wartung der Baukonstruktion	
				Baugrube	2.406
1	50	0,10%	0	Baugrube	2.406
				Gründung	13.809
2	50	0,10%	0	Flachgründungen	392
3	50	0,10%	0	Unterböden und Bodenplatten	1.153
4	35	0,10%	1	Bauwerksabdichtungen	5.776
5	35	0,10%	1	Drainagen	601
6	50	0,10%	0	Gründung, sonstiges	5.887
				Außenwände	82.762
7	50	0,10%	0	Tragende Außenwände	2.375
8	40	0,10%	1	Außentüren und Fenster	36.302
9	40	0,10%	1	Außenwandbekleidungen, außen	32.466
10	50	0,10%	0	Außenwandbekleidungen, innen	1.176
11	15	0,10%	3	Sonnenschutz	4.698
12	50	0,10%	0	Außenwände, sonstiges	5.744
				Innenwände	29.697
13	50	0,10%	0	Tragende Innenwände	110
14	50	0,10%	0	Nichttragende Innenwände	5.572
15	50	0,10%	0	Innenstützen	47
16	50	0,10%	0	Innentüren und -fenster	13.695
17	50	0,10%	0	Innenwandbekleidungen	10.088
18	50	0,10%	0	Innenwände, sonstiges	185
				Decken	29.321
19	50	0,10%	0	Deckenkonstruktionen	1.466
20	50	0,10%	0	Deckenbeläge	20.959
21	50	0,10%	0	Deckenbekleidungen	5.569
22	50	0,10%	0	Decken, sonstiges	1.327
				Dächer	55.182
23	50	0,10%	0	Dachkonstruktionen	3.474
24	35	0,10%	1	Dachfenster	11.520
25	50	0,10%	0	Dachbeläge	35.456
26	50	0,10%	0	Dachbekleidungen	4.639
27	50	0,10%	0	Dächer, sonstiges	92
				Baukonstruktive Einbauten	2.807
28	30	0,10%	1	Allgemeine Einbauten	2.807
				Instandsetzungskosten der BK, sonstiges	24.862
29	50	0,10%	0	Sonstige Maßnahmen Baukonstruktion	24.862

240.846

			353	Inspektion und Wartung der Technischen Anlagen	
				Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	
1	50	0,00%	0	Abwasseranlage	2.817
2	50	1,00%	0	Wasseranlagen	13.082
				Wärmeversorgungsanlagen	
3	25	1,5%	1	Wärmeerzeugungsanlagen	9.813
4	50	0,0%	0	Wärmeverteilnetze	3.507
5	25	0,0%	1	Raumheizflächen	9.076
6	25	0,0%	1	Wärmeversorgungsanlagen, sonstiges	4.211
				Lufttechnische Anlagen	
7	25	10,0%	1	Lüftungsanlage (Platten-Wärmerückgewinner)	7.952
				Starkstromanlagen	
8	20	1,0%	2	PV-Anlage	19.500
9	30	1,0%	1	Niederspannungsanlagen	14.849

84.805

Tabelle A.5: Inspektion und
Wartung - Investitionskosten der
KG 300 und 400 nach DIN 276 in
Form der KG 352 und 353 nach
DIN 18960

Komponenten-Nr.	Barwert der Ersatzinvestition				Barwert des Restwertes R_W	Summe der Barwerte $A_0+A_1+\dots-R_W$	Summe der Barwerte * a (Annuität) der kapitalgebundenen Zahlungen $A_{NK}=(A_0+A_1+\dots-R_W)*a$	Barwert Inspektions- und Wartungs-kosten $f_k*A_0*b_{IN}$	Annuität der Inspektions- und Wartungs-kosten $A_{IN}=f_k*A_0*b_{IN}*a$
	A_1	A_2	A_3	A_4					
1					0	2.406	142	56	3
2					0	392	23	9	1
3					0	1.153	68	27	2
4	1.773				454	7.095	419	134	8
5	185				47	738	44	14	1
6					0	5.887	348	137	8
7					0	2.375	140	55	3
8	9.415				4.134	41.583	2.456	845	50
9	8.421				3.697	37.190	2.196	756	45
10					0	1.176	69	27	2
11	2.832	1.707	1.029		525	9.742	575	109	6
12					0	5.744	339	134	8
13					0	110	6	3	0
14					0	5.572	329	130	8
15					0	47	3	1	0
16					0	13.695	809	319	19
17					0	10.088	596	235	14
18					0	185	11	4	0
19					0	1.466	87	34	2
20					0	20.959	1.238	488	29
21					0	5.569	329	130	8
22					0	1.327	78	31	2
23					0	3.474	205	81	5
24	3.537				905	14.152	836	268	16
25					0	35.456	2.094	826	49
26					0	4.639	274	108	6
27					0	92	5	2	0
28	1.020				117	3.711	219	65	4
29					0	24.862	1.468	579	34
	27.183	1.707	1.029	0	9.879	260.887	15.408	5.608	331
1					0	2.817	166	0	0
2					0	13.082	773	3.046	180
3	4.222				0	14.035	829	3.427	202
4					0	3.507	207	0	0
5	3.905				0	12.980	767	0	0
6	1.811				0	6.022	356	0	0
7	3.421				0	11.373	672	18.515	1.094
8	9.931	5.058			1.480	33.008	1.950	4.540	268
9	5.397				617	19.629	1.159	3.457	204
	28.686	5.058	0	0	2.097	116.452	6.878	32.986	1.948
Kapitalgebundene Kosten Inspektion und Wartung							22.286	38.593	2.279

A.4.2 Betriebskosten energy+Home für Instandsetzung

Tabelle A.6: Instandsetzungskosten Technische Anlagen - KG 400 nach DIN 276 in Form der KG 420 nach DIN 18960

Komponenten-Nr.	Nutzungsdauer [a] Quelle: VDI 2067	Faktor für Instandsetzung [%] Quelle: VDI 2067	f_{inst}	Ersatzhäufigkeit n	Bezeichnung des Bauteils	Investition [€] A_0
	T_N			n		A_0
					420	Instandsetzung der Technischen Anlagen
					421	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen
1	50	1,00%		0	Abwasseranlage	2.817
2	50	1,00%		0	Wasseranlagen	13.082
					422	Wärmeversorgungsanlagen
3	25	1,0%		1	Wärmeerzeugungsanlagen	9.813
4	50	0,5%		0	Wärmeverteilstetze	3.507
5	25	1,0%		1	Raumheizflächen	9.076
6	25	1,4%		1	Wärmeversorgungsanlagen, sonstiges	4.211
					423	Lufttechnische Anlagen
7	25	2,0%		1	Lüftungsanlage (Platten-Wärmerückgewinner)	7.952
					424	Starkstromanlagen
8	25	1,5%		1	PV-Anlage	19.500
9	30	10,0%		1	Niederspannungsanlagen	14.849

84.805

Komponenten-Nr.	Barwert der Ersatzinvestition				Barwert des Restwertes R_W	Summe der Barwerte $A_0+A_1+\dots-R_W$	Summe der Barwerte * a (Annuität) der kapitalgebundenen Zahlungen $A_{NK}=(A_0+A_1+\dots-R_W)*a$	Barwert Instandsetzungskosten $f_k*A_0*b_{IN}$	Annuität der Instandsetzungskosten $A_{IN}=f_k*A_0*b_{IN}*a$
	A_1	A_2	A_3	A_4					
1					0	2.817	166	656	39
2					0	13.082	773	3.046	180
3	4.222				0	14.035	829	2.285	135
4					0	3.507	207	408	24
5	3.905				0	12.980	767	2.113	125
6	1.811				0	6.022	356	1.372	81
7	3.421				0	11.373	672	3.703	219
8	8.389				0	27.889	1.647	6.810	402
9	5.397				617	19.629	1.159	34.572	2.042
	27.145	0	0	0	617	111.333	6.576	54.966	3.246

Kapitalgebundene Kosten Technische Anlagen							6.576	54.966	3.246
--	--	--	--	--	--	--	--------------	---------------	--------------

Tabelle A.7: Instandsetzung - Investitionskosten der KG 300 nach DIN 276 in Form der KG 410 nach DIN 18960

Komponenten-Nr.	Nutzungsdauer [a] Quelle: BNB	Faktor für Instandsetzung $f_{\text{inst.}}$ [%] Quelle: Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau Mehrfamilienhäuser - Neubau 4.1.1	Ersatzhäufigkeit n	Bezeichnung des Bauteils	Investition [€]
	T_N		n		A_0
			410	Instandsetzung der Baukonstruktion	
				Baugrube	2.406
1	50	1,20%	0	Baugrube	2.406
			411	Gründung	
2	50	1,20%	0	Flachgründungen	392
3	50	1,20%	0	Unterböden und Bodenplatten	1.153
4	35	1,20%	1	Bauwerksabdichtungen	5.776
5	35	1,20%	1	Drainagen	601
6	50	1,20%	0	Gründung, sonstiges	5.887
			412	Außenwände	
7	50	1,20%	0	Tragende Außenwände	2.375
8	40	1,20%	1	Außentüren und Fenster	36.302
9	40	1,20%	1	Außenwandbekleidungen, außen	32.466
10	50	1,20%	0	Außenwandbekleidungen, innen	1.176
11	15	1,20%	3	Sonnenschutz	4.698
12	50	1,20%	0	Außenwände, sonstiges	5.744
			413	Innenwände	
13	50	1,20%	0	Tragende Innenwände	110
14	50	1,20%	0	Nichttragende Innenwände	5.572
15	50	1,20%	0	Innenstützen	47
16	50	1,20%	0	Innentüren und -fenster	13.695
17	50	1,20%	0	Innenwandbekleidungen	10.088
18	50	1,20%	0	Innenwände, sonstiges	185
			414	Decken	
19	50	1,20%	0	Deckenkonstruktionen	1.466
20	50	1,20%	0	Deckenbeläge	20.959
21	50	1,20%	0	Deckenbekleidungen	5.569
22	50	1,20%	0	Decken, sonstiges	1.327
			415	Dächer	
23	50	1,20%	0	Dachkonstruktionen	3.474
24	35	1,20%	1	Dachfenster	11.520
25	50	1,20%	0	Dachbeläge	35.456
26	50	1,20%	0	Dachbekleidungen	4.639
27	50	1,20%	0	Dächer, sonstiges	92
			416	Baukonstruktive Einbauten	
28	30	1,20%	1	Allgemeine Einbauten	2.807
			419	Instandsetzungskosten der BK, sonstiges	
29	50	1,20%	0	Sonstige Maßnahmen Baukonstruktion	24.862
					240.846

Tabelle A.8: Instandsetzungskosten - KG 300 nach DIN 276 in Form der KG 410 nach DIN 18960

Komponenten-Nr.	Barwert der Ersatzinvestition				Barwert des Restwertes R_W	Summe der Barwerte $A_0+A_1+\dots-R_W$	Summe der Barwerte * a (Annuität) der kapitalgebundenen Zahlungen $A_{NK}=(A_0+A_1+\dots-R_W)*a$	Barwert Instandsetzungskosten $f_k*A_0*b_{IN}$	Annuität der Instandsetzungskosten $A_N=f_k*A_0*b_N+a$
	A_1	A_2	A_3	A_4					
1					0	2.406	142	672	40
2					0	392	23	110	6
3					0	1.153	68	322	19
4	1.773				454	7.095	419	1.614	95
5	185				47	738	44	168	10
6					0	5.887	348	1.645	97
7					0	2.375	140	664	39
8	9.415				4.134	41.583	2.456	10.143	599
9	8.421				3.697	37.190	2.196	9.071	536
10					0	1.176	69	329	19
11	2.832	1.707	1.029		525	9.742	575	1.313	78
12					0	5.744	339	1.605	95
13					0	110	6	31	2
14					0	5.572	329	1.557	92
15					0	47	3	13	1
16					0	13.695	809	3.826	226
17					0	10.088	596	2.818	166
18					0	185	11	52	3
19					0	1.466	87	410	24
20					0	20.959	1.238	5.856	346
21					0	5.569	329	1.556	92
22					0	1.327	78	371	22
23					0	3.474	205	971	57
24	3.537				905	14.152	836	3.219	190
25					0	35.456	2.094	9.906	585
26					0	4.639	274	1.296	77
27					0	92	5	26	2
28	1.020				117	3.711	219	784	46
29					0	24.862	1.468	6.946	410
	27.183	1.707	1.029	0	9.879	260.887	15.408	67.292	3.974
Kapitalgebundene Kosten Instandsetzung Baukonstruktion							15.408	67.292	3.974

A.5 Kostenschätzung der Varianten

Ergänzend zu den Angaben in Kapitel 4 werden im Weiteren die Kostenschätzungen der Varianten Abbruch und Neubau eines EnEV-Gebäudes sowie Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes detailliert aufgelistet.

A.5.1 Kostenschätzung Abbruch und Neubau EnEV-Standard

Tabelle A.9: Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des Einfamilienhauses im EnEV-Standard

KG	Beschreibung	Fläche/ Volumen	€/Einheit	Baukosten (brutto)
300	Baukonstruktion			
310	Baugrube			14.984 €
311	Baugrubenherstellung	392,20 m ³ BGI	23,46	9.201 €
312	Baugrubenumschließung	35,00 m ²	165,24	5.783 €
320	Gründung			29.921 €
321	Baugrundverbesserung	157,80 m ²	15,30	2.414 €
322	Flachgründungen	37,36 m ²	59,16	2.210 €
324	Unterböden und Bodenplatten	131,80 m ²	67,32	8.873 €
325	Bodenbeläge	120,40 m ²	81,60	9.825 €
326	Bauwerksabdichtungen	157,80 m ²	23,46	3.702 €
327	Drainagen	157,80 m ²	18,36	2.897 €
330	Außenwände			94.817 €
331	Tragende Außenwände	347,60 m ²	112,20	39.001 €
334	Außentüren und Fenster	60,30 m ²	457,98	27.616 €
335	Außenwandbekleidungen, außen	63,90 m ²	94,86	6.062 €
336	Außenwandbekleidungen, innen	263,70 m ²	32,64	8.607 €
338	Sonnenschutz	60,30 m ²	224,40	13.531 €
340	Innenwände			30.806 €
341	Tragende Innenwände	138,22 m ²	81,60	11.279 €
342	Nichttragende Innenwände	85,40 m ²	61,20	5.226 €
343	Innenstützen	2,53 m ²	82,62	209 €
344	Innentüren und -fenster	21,70 m ²	317,22	6.884 €
345	Innenwandbekleidungen	201,90 m ²	35,70	7.208 €
350	Decken			36.175 €
351	Deckenkonstruktionen	131,80 m ²	156,06	20.569 €
352	Deckenbeläge	112,50 m ²	113,22	12.737 €
353	Deckenbekleidungen	112,50 m ²	25,50	2.869 €
360	Dächer			49.572 €
361	Dachkonstruktionen	160,00 m ²	68,34	10.934 €
362	Dachfenster	12,80 m ²	1064,88	13.630 €
363	Dachbeläge	160,00 m ²	122,40	19.584 €
364	Dachbekleidungen	108,50 m ²	49,98	5.423 €

370	Baukonstruktive Einbauten				3.328 €
371	Allgemeine Einbauten	299,30	m ² BGF	5,81	1.740 €
372	Besondere Einbauten	299,30	m ² BGF	5,30	1.587 €
390	Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen				33.474 €
391	Baustelleneinrichtung	299,30	m ² BGF	14,28	4.274 €
392	Gerüste	299,30	m ² BGF	11,22	3.358 €
393	Sicherungsmaßnahmen	299,30	m ² BGF	5,10	1.526 €
394	Abbruchmaßnahmen	958,40	m ³ BRI	22,44	21.507 €
397	Zusätzliche Maßnahmen	299,30	m ² BGF	9,38	2.809 €
300	Total Brutto KG 300				293.076 €

KG	Beschreibung	Fläche/Volumen	€/Einheit	Baukosten (brutto)	
400	Technische Anlagen				
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen			18.928 €	
411	Abwasseranlagen	299,30	m ² BGF	19,38	5.800 €
412	Wasseranlagen	299,30	m ² BGF	43,86	13.127 €
420	Wärmeversorgungsanlagen			32.905 €	
421	Wärmeerzeugungsanlagen	299,30	m ² BGF	62,00	18.557 €
422	Wärmeverteilstetze	299,30	m ² BGF	11,22	3.358 €
423	Raumheizflächen	299,30	m ² BGF	25,50	7.632 €
429	Wärmeversorgungsanlagen, sonstiges	299,30	m ² BGF	11,22	3.358 €
430	Lufttechnische Anlagen			8.979 €	
431	Lüftungsanlagen	299,30	m ² BGF	30,00	8.979 €
440	Starkstromanlagen			9.159 €	
444	Niederspannungsinstallationsanlagen	299,30	m ² BGF	26,52	7.937 €
445	Beleuchtungsanlagen	299,30	m ² BGF	2,55	763 €
446	Blitzschutz- und Erdungsanlagen	299,30	m ² BGF	1,53	458 €
450	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen			2.106 €	
451	Telekommunikationsanlagen	299,30	m ² BGF	1,22	366 €
452	Such- und Signalanlagen	299,30	m ² BGF	2,75	824 €
455	Fernseh- und Antennenanlagen	299,30	m ² BGF	3,06	916 €
400	Total Brutto KG 400			72.077 €	
	Total Brutto KG 300+400 Abbruch und Neubau EnEV			365.153 €	

Abbildung A.49: Kostengruppe 300 Baukonstruktion, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes

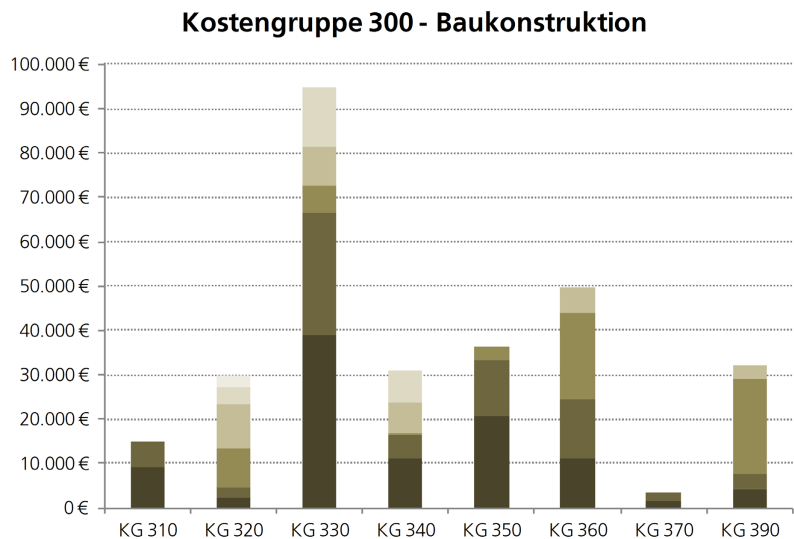
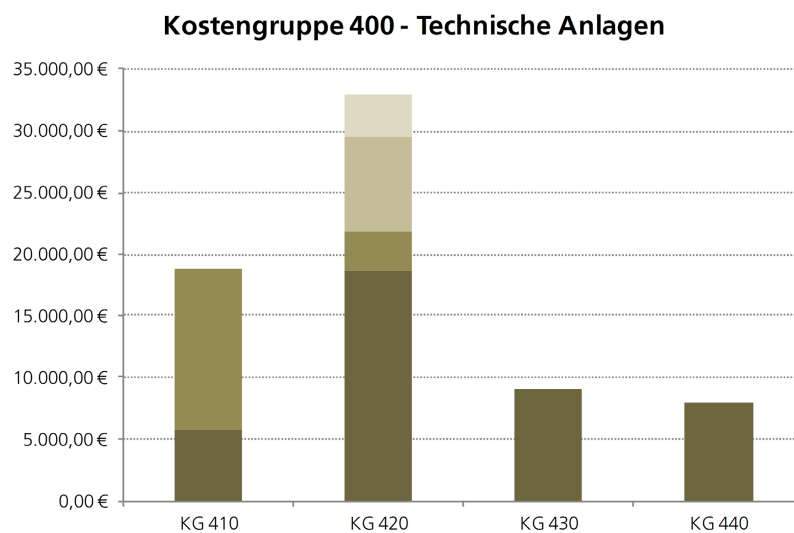


Abbildung A.50: Kostengruppe 400 Technische Anlagen, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines EnEV-Standard Gebäudes



A.5.2 Kostenschätzung Abbruch und Neubau Plusenergiegebäude

KG	Beschreibung	Fläche/ Volumen	€/Einheit	Baukosten (brutto)
300	Baukonstruktion			
310	Baugrube			14.984 €
311	Baugrubenherstellung	392,20 m ³	21,42	9.201 €
312	Baugrubenumschließung	35 m ²	165,24	5.783 €
320	Gründung			36.809 €
321	Baugrundverbesserung	157,80 m ²	15,30	2.414 €
322	Flachgründungen	37,36 m ²	59,16	2.210 €
324	Unterböden und Bodenplatten	131,80 m ²	89,76	11.830 €
325	Bodenbeläge	120,40 m ²	114,24	13.754 €
326	Bauwerksabdichtungen	157,80 m ²	23,46	3.702 €
327	Drainagen	157,80 m ²	18,36	2.897 €
330	Außenwände			113.383 €
331	Tragende Außenwände	347,60 m ²	112,20	39.001 €
334	Außentüren und Fenster	60,30 m ²	687,48	41.455 €
335	Außenwandbekleidungen, außen	63,90 m ²	126,48	8.082 €
336	Außenwandbekleidungen, innen	263,70 m ²	32,64	8.607 €
338	Sonnenschutz	60,30 m ²	269,28	16.238 €
340	Innenwände			30.806 €
341	Tragende Innenwände	138,22 m ²	81,60	11.279 €
342	Nichttragende Innenwände	85,40 m ²	61,20	5.226 €
343	Innenstützen	2,53 m ²	82,62	209 €
344	Innentüren und -fenster	21,70 m ²	317,22	6.884 €
345	Innenwandbekleidungen	201,90 m ²	35,70	7.208 €
350	Decken			36.175 €
351	Deckenkonstruktionen	131,80 m ²	156,06	20.569 €
352	Deckenbeläge	112,50 m ²	113,22	12.737 €
353	Deckenbekleidungen	112,50 m ²	25,50	2.869 €
360	Dächer			62.176 €
361	Dachkonstruktionen	160,00 m ²	95,88	15.341 €
362	Dachfenster	12,80 m ²	1332,12	17.051 €
363	Dachbeläge	160,00 m ²	135,66	21.706 €
364	Dachbekleidungen	108,50 m ²	74,46	8.079 €
370	Baukonstruktive Einbauten			3.325 €
371	Allgemeine Einbauten	299,30 m ² BGF	5,81	1.739 €
372	Besondere Einbauten	299,30 m ² BGF	5,30	1.586 €

Tabelle A.10: Kostenschätzung für Abbruch und Neubau des Einfamilienhauses im Plusenergie-Standard

390	Sonstige Maßnahmen für Baukonstruktionen				33.473 €
391	Baustelleneinrichtung	299,30	m ² BGF	14,28	4.274 €
392	Gerüste	299,30	m ² BGF	11,22	3.358 €
393	Sicherungsmaßnahmen	299,30	m ² BGF	5,10	1.526 €
394	Abbruchmaßnahmen	958,40	m ³ BRI	22,44	21.506 €
397	Zusätzliche Maßnahmen	299,30	m ² BGF	9,38	2.807 €
300	Total Brutto KG 300				331.130 €

KG	Beschreibung	Fläche/ Volumen	€/Einheit	Baukosten (brutto)
400	Technische Anlagen			
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen			22.286 €
411	Abwasseranlagen	299,30	m ² BGF	7.632 €
412	Wasseranlagen	299,30	m ² BGF	14.654 €
420	Wärmeversorgungsanlagen			29.002 €
421	Wärmeerzeugungsanlagen	299,30	m ² BGF	14.654 €
422	Wärmeverteilstetze	299,30	m ² BGF	3.358 €
423	Raumheizflächen	299,30	m ² BGF	7.632 €
429	Wärmeversorgungsanlagen, sonstiges	299,30	m ² BGF	3.358 €
430	Lufttechnische Anlagen			13.469 €
431	Lüftungsanlagen	299,30	m ² BGF	13.469 €
440	Starkstromanlagen			30.460 €
443	PV-Anlage		psch.	19.500 €
444	Niederspannungsinstallationsanlagen	299,30	m ² BGF	8.548 €
445	Beleuchtungsanlagen	299,30	m ² BGF	1.954 €
446	Blitzschutz- und Erdungsanlagen	299,30	m ² BGF	458 €
450	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen			2.045 €
451	Telekommunikationsanlagen	299,30	m ² BGF	366 €
452	Such- und Signalanlagen	299,30	m ² BGF	763 €
455	Fernseh- und Antennenanlagen	299,30	m ² BGF	916 €
400	Total Brutto KG 400			97.262 €

Kostengruppe 300 - Baukonstruktion

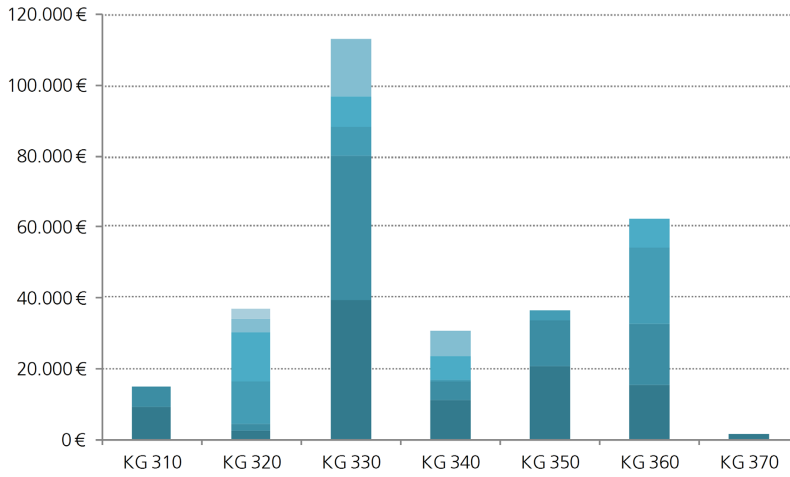


Abbildung A.51: Kostengruppe 300 Baukonstruktion, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes

Kostengruppe 400 - Technische Anlagen

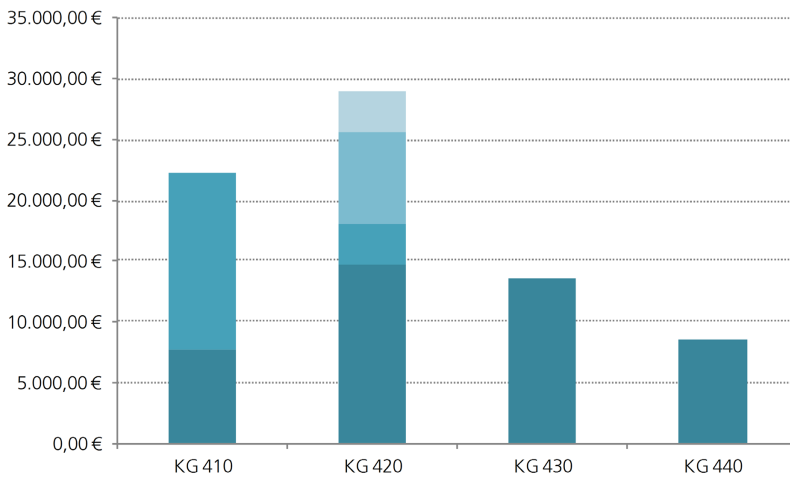


Abbildung A.52: Technische Anlagen, Verteilung der Kosten für die Variante Abbruch und Neubau eines Plusenergiegebäudes

A.6 Lebenslauf / Wissenschaftlicher Werdegang

Ingmar Kurtz
geboren am 24.06.1981 in Darmstadt

Berufliche Laufbahn

seit 08/2016	Architekt bei Karl Dudler Architekten, Frankfurt a.M.
08/2012 - 12/2016	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik, TU Darmstadt
seit 10/2012	Eingetragener Architekt bei der Architekten- und Stadtplanerkammer Hessen
05/2010 - 07/2012	Architekt bei Stücheli Architekten, Zürich CH
01/2010 - 04/2010	Architekt bei GlassX AG / Architekturbüro Prof. Dietrich Schwarz, Zürich CH
04/2007 - 12/2009	Architekt bei Fugazza Steinmann & Partner Dipl. Architekten ETH / SIA AG, Wettingen CH
03/2005 - 10/2006	Stud. Mitarbeiter bei T S B Ingenieurgesellschaft mbH, Darmstadt
08/2005 - 10/2005	Stud. Mitarbeiter bei Planquadrat Architekten, Darmstadt
02/2004 - 04/2004	Stud. Mitarbeiter bei Nassauische Heimstätte, Frankfurt a.M.
11/2002 - 06/2004	Stud. Mitarbeiter bei der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau (VHT), Darmstadt

Ausbildung

10/2001 - 02 /2007	Architekturstudium an der TU Darmstadt
10/2004 - 03/2005	Architekturstudium an der ETH Zürich
08/1993 - 06/2000	Gymnasium an der Albert-Einstein-Schule, Groß-Bieberau
1987 - 1993	Grundschule und Förderstufe in Reinheim

A.7 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt habe. Alle wörtlichen und sinnge-
mäßigen Entlehnungen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Dissertation ist
bisher an keiner anderen Fakultät vorgelegt worden.

Darmstadt, den 18.12.2015

Ingmar Kurtz
Dipl.-Ing. Architekt



Die Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten energetischer Sanierungen hin zu Plusenergiegebäuden setzt eine komplexe Betrachtung sich gegenseitig überlagernder energetischer, ökologischer und ökonomischer Einflussfaktoren voraus.

Vor dem Hintergrund der gegenwärtigen klimapolitischen Debatte, in der die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses steht, spielen nachhaltige Sanierungsstrategien, bei denen der zukunftsorientierte Umgang mit dem Gebäudebestand und dessen Relevanz für den Klimaschutz aufgezeigt werden, eine zentrale Rolle. Anhand der Untersuchung des energy+Home, der ersten Sanierung eines Gebäudes aus den 70er Jahren hin zu einem Plusenergiegebäude, werden die resultierenden

Auswirkungen baulicher und technologischer Maßnahmen in Gegenüberstellung alternativer Sanierungsstrategien quantifiziert dargestellt, sowie die Übertragbarkeit des konzeptionellen Ansatzes auf einen exemplarischen Geschosswohnungsbau analysiert.

Die am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt vorgelegte Dissertation zeigt damit das Potential von Bestandssanierungen auf, beschreibt die Möglichkeiten und Grenzen des methodisch konzeptionellen Verfahrens der Umwandlung, sowie die Wechselwirkungen energetischer, ökologischer und ökonomischer Einflussfaktoren, welche einen bedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkungen, Lebenszykluskosten und den Energieverbrauch der Sanierungsmaßnahme nehmen.