



Wärmeversorgungskonzepte in Niedrigenergie- und Passivhäusern im ökonomischen Vergleich

Ein Eigenprojekt des Passivhaus Instituts

Version 1.0, März 2017

Autor
Dr.-Ing. Benjamin Krick

Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt, Deutschland, benjamin.krick@passiv.de

Inhalt

1	Einleitung, Fragestellung und Methode	3
2	Energiepreise	3
3	Monetarisierung verursachter Klimabelastungen: CO ₂ -Kompensation.....	5
4	Gebäudemodell im Klima Frankfurt am Main	5
5	Kostenvergleich der Gebäudehülle der Varianten	6
6	Lüftung des Gebäudes	7
7	Heizwärmeverteilung	9
8	Heizwärmerzeugung	11
8.1	Brennstoff gestützte Systeme	11
8.2	Direktelektrische Systeme	14
8.3	Wärmepumpensysteme	15
9	Warmwasser	18
9.1	Verteilung.....	18
9.2	Energiesparmaßnahmen	19
9.3	Warmwassererzeugung	20
10	Systemkombinationen.....	22
11	Fazit	24
12	Quellenverzeichnis.....	25

1 Einleitung, Fragestellung und Methode

Der Betrieb heute üblicher Gebäude trägt in hohem Ausmaß zum Klimawandel bei. Die Steigerung der Effizienz ist auch aus diesem Grund erklärtes Ziel der Europäischen Union und der Bundesrepublik Deutschland. Stets steht jedoch die Steigerung der Energieeffizienz unter dem Wirtschaftlichkeitsvorbehalt – Wenn Evidenz besteht, dass die Minderkosten im Betrieb einer Maßnahme die investiven Mehrkosten übersteigen, kann sie legislativ gefordert werden. Gleichzeitig ist es unabhängig vom gewählten Effizienzniveau der Gebäudehülle ratsam, Energieträger einzusetzen, die möglichst klimafreundlich sind und sich gut in die wandelnde Energieversorgung einfügen.

In diesem Beitrag werden die genannten Punkte mittels einer Parameterstudie untersucht. Als Energiebilanztool wird das [PHPP 9.6] genutzt. Preise stammen aus Internet- und Literaturrecherchen, aus Publikationen des Autors und des Passivhaus Instituts sowie aus Abrechnungen. Alle Preise sind Endverbraucherpreise inkl. MwSt. Sofern auf ältere Preisangaben zurückgegriffen wurde, wurden diese mit einer Baukostensteigerung von 1,5%pa auf 2016 korrigiert. Kostensteigerungen dieser Größenordnung sind in [Statistisches Bundesamt 2015] für 2014 belegt, aus [Neitzel et.al. 2015] ist eine annähernd lineare Entwicklung seit ca. 2006 ersichtlich. Für die Ermittlung der Lebenszykluskosten wird die Barwertmethode (2,5% Effektivzins, 1% Inflation = 1,49% Realzins) verwendet. Dabei werden folgende Nutzungsdauern angesetzt: Gebäudestruktur, Dämmung unter der Bodenplatte, nicht wasser- oder kühlmittelführende Leitungen: 80 Jahre. Wand- und Dachdämmung sowie wasserführende Leitungen 50 Jahre, Gebäudetechnik 20 Jahre, Ausnahme: Split Geräte, Durchlauferhitzer und Öl-Radiatoren: 12 Jahre. Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre. Die Klimawirkung wird durch Kompensationskosten abgebildet, die Bewertung nach dem PER-System gibt Hinweise auf die Tauglichkeit im vollständig regenerativen Energiesystem.

2 Energiepreise

Strom: Nach [DESTATIS 2017] stieg der Strompreis seit 2008 zunächst rasch, dann immer langsamer von 21 auf 30 €Cent in 2014 und verharrt seitdem dort. In dieser Untersuchung werden 30 €Cent/kWh für die kommenden 30 Jahre angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Stromanschluss im Gebäude vorhanden ist, also die einmalige und jährliche Anschlussgebühr aus Ohnehinkosten betrachtet werden können.

Viele Energieversorger bieten spezielle Tarife für Wärmepumpenstrom an. Diese liegen laut eigener Internet-Recherchen mit zwischen 18,3 und 20,5 €Cent/kWh deutlich unterhalb des hier angenommenen Strompreises. Jedoch fallen zusätzliche Grundkosten zwischen 57 €/a und 208 €/a an. Ausgehend vom Passivhaus mit und einer Arbeitszahl der Wärmepumpe von 2,6 ergibt sich ein Wärmepumpenstrombedarf von ca. 920 kWh/a. Für die unterschiedlichen Anbieter resultiert daraus ein Wärmepumpenstrompreis der mit zwischen 26 und 41 €Cent/kWh, sowohl niedriger, als auch höher als der für Strom angenommene Preis liegen kann. Darum wird hier bei den Passivhaus Varianten auf eine Differenzierung verzichtet. Bei den Niedrigenergiehaus Varianten mit seinem deutlich höheren Bedarf liegt der resultierende Arbeitspreis zwischen 21 und 23 Cent. Hier wurde eine Grundgebühr von 100 €/a und ein Arbeitspreis von 19 €Cent/kWh angenommen.

Erdgas: In den vergangenen 10 Jahren stieg der Gaspreis laut [gasvergleich] um ca. 6%, sank aber in den vergangenen 3 Jahren um 3%. Nun wird eine Trendwende erwartet. Das Statistische Bundesamt gibt in für Haushalte im ersten Halbjahr Jahr 2016 einen mittleren Endverbraucherpreis von 6,61 €Cent/kWh an [DESTATIS 2017], in [gasvergleich] werden für Ende 2017 6,9 €Cent/kWh prognostiziert. Dieser Preis wird hier angesetzt. Als jährliche Gasanschlussgebühr werden hier 150 €/a nach [heizungsvergleich] angenommen.

Heizöl: Die Preise für leichtes Heizöl sind in den vergangenen Jahren stark volatil. Lag der Preis pro Liter im Jahr 2000 bei 0,33 €, stieg er bis 2012 auf 0,89 €. 2016 lag er teilweise bei nur noch 0,39 € (Mittelwerte Deutschland bei einer Abnahme zwischen 4-5 m³ inkl. MwSt lt. [DESTATIS 2017]). [tecson] nennt einen Tiefstpreis von 38,5 €Cent im Februar 2016, ab dann stiegen die Preise bis auf 60,6 €Cent am 30.12.2016. Aus der Entwicklung des vergangenen Jahres ist eine deutliche Preissteigerung erkennbar. Hier wird mit einem Ölpreis von 0,65 €/Liter gerechnet. Bei einem Heizwert von 11,8 kWh/kg und einer Dichte von 0,83 kg/l entspricht dies 6,6 €Cent/kWh. Als Kosten für den Öltank werden nach [kesselheld] 2800 € bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren und zusätzlich 250 € für den Lagerraum angenommen.

Pellets: Pellet Preise sind abhängig von der Liefermenge sowie von der Lieferform. Für diese Studie wurde eine Lieferung pro Jahr angenommen. Dies entspricht einem überschlägigen Pellet-Bedarf von 1,3 Tonnen für das Passivhaus und 3,5 Tonnen für das NEH. Bei Sackware wird nur der Lagerraum (Kellerersatzraum à 250 €/m² [quadriga]), bei loser Ware zusätzlich ein Sacksilo benötigt, welches für das NEH aufgrund des höheren benötigten Volumens etwas teurer ist als für das PH. Die Barwerte der Einsparung bei den Pellets aufgrund des geringeren Preises der Lose Ware wurden mit auf den Gegenwartswert zurück gerechnet und mit den Mehrkosten für das Sacksilo (welches auch eine größere Fläche im Kellerersatzraum benötigt) verglichen. Für Passivhaus erweist sich die Sackware als deutlich günstiger (zudem ist die Nutzung der Säcke komfortabler für den Nutzer), erst nach über 50 Jahren (also außerhalb der Nutzungszeit) würde sich das Sacksilo rechnen. Beim Niedrigenergiehaus ist das Sacksilo jedoch die günstigere Option, die Mehrinvestition rechnet sich bereits nach 17 Jahren.

Damit beläuft sich der Pelletpreis beim Passivhaus (Sackware) auf 6,2 €Cent pro kWh, beim Niedrigenergiehaus (Sacksilo) auf 4,5 €Cent/kWh [heizpellets24].

Die Kosten für das Pelletlager wurden für das PH zu 250 € (nur Kellerersatzraum), für das NEH zu 3100 € (Kellerersatzraum + Silo [ATMOS] + Montage) kalkuliert und in den Investitionskosten berücksichtigt.

3 Monetarisierung verursachter Klimabelastungen: CO₂-Kompensation

Könnte die Klimabelastung durch den verursachten CO₂-Ausstoß der untersuchten Varianten monetarisiert werden, würde ein direkter Vergleich der des Barwertes inkl. CO₂-Kosten der Varianten eine Aussage nicht nur über die Wirtschaftlichkeit für den Bauherren oder Nutzer, sondern auch über die Klimabelastung und damit eine globale Empfehlung ermöglichen.

CO₂-Emissionen können beispielsweise durch Einsparungen an anderer Stelle, durch den Zubau von erneuerbaren Energien oder durch Aufforstungsprojekte kompensiert werden. In den vergangenen hat sich ein wachsender Markt für die CO₂-Kompensation gebildet. [Wolters et.al.] nennen Kosten von 5-50 € pro Tonne CO₂, je nach Kompensationsmaßnahme. Populäre Anbieter sind beispielsweise [Klimakollekte], [atmosfair] und [myclimate]. Während die beiden erstgenannten einheitlich 23 €/t CO₂eq für ihre Maßnahmen angeben, bei denen es sich um Klimaschutzprojekte in Schwellen- und Entwicklungsländern handelt, differenziert [myclimate]. Hier kann gewählt werden zwischen Klimaschutzprojekten in Schwellen- und Entwicklungsländern (24 €/t CO₂eq), Aufforstung durch Kleinbauern in Namibia (25 €/t CO₂eq), Effiziente Kocher für Kenia (23 €/t CO₂eq) und für Maßnahmen, die mindestens zu 50% in der Schweiz umgesetzt werden (75 €/t CO₂eq).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die 25 €/t CO₂eq für ein typisches Aufforstungsprojekt angesetzt und diese mit dem Faktor 2 Multipliziert, da davon ausgegangen werden muss, dass sich die Kompensation an Mangel an Möglichkeiten künftig verteuert. Daraus ergeben die folgenden Kosten bezogen auf unterschiedliche Energieträger:

	Strom	Strom WP	Heizöl	Erdgas	Pellets PH	Pellets NEH	Solarthermie
Energiepreis [€/kWh]	0,300 €	0,190 €	0,066 €	0,069 €	0,062 €	0,045 €	
Lager/Tank (Invest) [€]			3.050 €		244 €	1.430 €	
Grundgebühr [€/a]		100 €		150 €			
GWP [kg CO ₂ eq/kWh]	0,48		0,32	0,25	0,025		0,025
CO ₂ -Kosten [€/kWh]	0,024 €		0,016 €	0,013 €	0,001 €		0,001 €
Energie inkl. CO ₂ -Komp.	0,324 €	0,214 €	0,082 €	0,082 €	0,063 €	0,046 €	
Kosten [€/t CO ₂ eq]	50,00 €		Quelle GWP: GEMIS 9.4, Strom: Lineare Fortschreibung der Entwicklung in Deutschland: Mittelwert 2015-2035, vgl. [Krick 2016b]				

4 Gebäudemodell im Klima Frankfurt am Main

Als Gebäudemodell für diese Studie wurde das Haus des Autors, beschrieben in [Krick 2016a] in den Varianten Passivhaus (vgl. [Krick 2016b]) und Niedrigenergiehaus genutzt. Dabei entspricht das Niedrigenergiehaus bezüglich seiner Gebäudehülle dem Referenzgebäude der [EnE 2014], welches auch dem des Referentenentwurf vom Februar 2017 des [GEG] entspricht. Abbildung 1 zeigt relevante Größen der Varianten.

Das Gebäude mit im Erdgeschoss offenem Grundriss hat 5 Zimmer, eine Wohnküche, ein Duschbad und ein Gäste-WC. Bei der Grundrissgestaltung wurde auf kurze Leitungen für Wasser, Abwasser und Lüftung geachtet. Im umgesetzten Beispiel kommt eine erweiterte Kaskadenlüftung zum Einsatz. Das Lüftungsgerät ist in die Außenwand des Bades im EG integriert, in dem sich auch die Haustechnik (Solarspeicher mit elektrischer Nachheizung sowie Pumpengruppen und Heizkreissteuerungen) befindet. Die Wärmeverteilung erfolgt

über Decken- und Wandheizungen. Auf dem Süddach sind 4,2 kW PV sowie 16 m² Vakuum Röhren Kollektoren zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung installiert.

	NEH	Passivhaus
Beschreibung	Freistehendes Einfamilienhaus, kellerlos	
Energiebezugsfläche [m ²]	160	
Fensterfläche [m ²]	50	
U-Wert Wand [W/(m ² K)]	0,28	0,11
U-Wert Dach [W/(m ² K)]	0,20	0,09
U-Wert Boden [W/(m ² K)]	0,35	0,22
U-Wert Fensterrahmen [W/(m ² K)]	1,30	0,65
U-Wert Verglasung [W/(m ² K)]	1,20	0,54
g-Wert Verglasung [-]	0,60	0,52
Art der Lüftung	Abluft	mit WRG
WBG [%]	0%	91%
Luftdichtheit [1/h]	1,5	0,4
Jahresheizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]	78,0	14,9
Heizlast [W/m ²]	36,1	10,1



Abbildung 1: Relevante Größen der Varianten, Foto des Referenzgebäudes © Krick 2014

5 Kostenvergleich der Gebäudehülle der Varianten

Für den hier angestellten Kostenvergleich wurde zunächst mit Heizwärmekosten von 8 €Cent/kWh gerechnet.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, unterscheiden sich die beiden Varianten bezüglich der Gebäudehülle durch die Fenster und die Dämmstärken der Außenbauteile. Bei beiden Varianten werden Holz-Aluminium Fenster eingesetzt, für die mit einer Nutzungsdauer von 40 Jahren gerechnet wird. Diese Annahme scheint eher moderat. Der Verband Fenster + Fassade rechnet in [VFF 2014] mit 48 Jahren. Die Kosten beider Varianten sind dem Component-Award 2014 [Krick 2014] entnommen. Für die NEH-Variante wurde ein 2-fach verglastes Fenster mit Edelstahl-Randverbund gewählt. Dabei wurden typische Rahmenansichtsbreiten (zwischen 100 und 130 mm bei Rahmen-U-Werten zwischen 1,0 und 1,5 W/(m²K)) gewählt. Die Glasrand-Wärmebrücke beträgt 0,04 W/(mK). Die Einbauwärmebrücke wurde mit 0,05 W/(mK) für den seitlichen Anschluss und 0,09 W/(mK) für den unteren Anschluss und den oberen Anschluss (mit Verschattung) angenommen. Die Kosten wurden (inkl. Korrektur auf das Jahr 2016) zu 463 €/m² für das eingebaute Fenster ermittelt. Für die Variante „Passivhaus“ wurden 3-fach verglaste Fenster mit Kunststoff Abstandhaltern der Klasse phA eingesetzt. Beispielhaft wurden die Kennwerte des Fensters „Smartwin“ verwendet. Die angesetzten Kosten von 544 €/m² installiertem Fenster entsprechen dem Mittelwert der für den Component-Award 2014 eingereichten Holz-Aluminium Fenster. Bei knapp 50 m² Fensterfläche ergeben sich daraus Mehrinvestitionskosten von ca. 4.000 €. Demgegenüber stehen Wärmekosteneinsparungen über die Nutzungsdauer von ca. 5.900 €, die in eine Kosteneinsparung von ca. 1.900 € münden, vgl. Tabelle 1.

Für die Variante „Passivhaus“ wird eine um 17 cm stärkere Wärmedämmung für die Wand (WLG 032), 22 cm für das Dach (WLG 040) und 6 cm für die Bodenplatte (WLG 040) benötigt. Die Kosten hierfür wurden [Kah et.al. 2008] bzw. [Bausep] entnommen und wo erforderlich auf das Jahr 2016 hochgerechnet. Für die Wand- und Dachdämmung wurde eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, für die Bodendämmung von 80 Jahren (entspricht der

angenommenen Gebäudelebensdauer) angesetzt. Die investiven Mehrkosten summieren sich für Wand und Dach auf 6.650 €, für den Boden auf knapp 900 €. Tabelle 1 zeigt, dass auch im Bereich der opaken Gebäudehülle die gewählten Maßnahmen einzelwirtschaftlich sind. In Summe beträgt die Einsparung durch die Verbesserung der Gebäudehülle über den Lebenszyklus über 4.300 €. Der Barwert der Mehrinvestition in die Gebäudehülle beträgt 5.900 €. Neben der Kosteneinsparung sind die Vorteile der Passivhaus Gebäudehülle ein erhöhter Komfort sowie ein vermindertes Schimmelrisiko durch höhere Oberflächentemperaturen, eine größere Unabhängigkeit von Energiepreisschwankungen und die deutliche Verminderung des CO₂-Ausstoßes.

Allgemein/Fenster	NEH	Passivhaus	Opake Bauteile	NEH	Passivhaus
Wärmekosten (Nutzenergie) [€/kWh]	0,08		Wandfläche [m ²]	196	
Realzins [%]	1,5%		Dachfläche [m ²]	96	
Nutzungsdauer Fenster (F) [a]	40		Wand (W) Mehrkosten (15 cm) [€/m ²] 1	20,58 €	
Barwertfaktor	30,0		Dach (D) Mehrkosten (22 cm) [€/m ²] 1	27,26 €	
Fensterfläche [m ²]	50		Mehrinvest W/D Bauteile [€]	6.651 €	
Invest Fenster [Krick 2014] [€/m ²]	463 €	544 €	Heizw. W/D [kWh/(m ² a)]	33,1	14,9
Mehrinvest Fenster [€]	4.032 €		Heizwärmeeinsparung W/D [kWh/a]	2905	
Heizwärmebed. (F) [kWh/(m ² a)]	30,4	14,9	Wärmekosteneinsparung [€/a]	232 €	
Wärmekosteneinsparung F [€/a]	2474		Wand/Dach Nutzungsd. [a]	50	
Wärmekosteneinsparung F [€/a]	198 €		Barwertfaktor	35,1	
Wärmekosteneinsparung Nutzungsd. F [€/a]	5.931 €		Kosteneinsparung Nutzungsd. W/D [€]	1.500,3 €	
Kosteneinsparung Nutzungsd. F [€]	1.899 €		Bodenfläche [m ²]	83	
1 [Kah et.al. 2008], bezogen auf 2016. Wanddämmung anhand von [Bausep] umgerechnet auf WLG 032. 2 [Bausep] (Austrotherm XPS-Dämmung + 5% Montage).			Boden (B) Mehrkosten (6 cm) [€/m ²] 2	10,67 €	
			Mehrinvest Boden [€]	886 €	
			Heizw. (B) [kWh/(m ² a)]	18,0	14,9
			Heizwärmeeinsparung (B) [€/a]	495	
			Wärmekosteneinsparung B [€/a]	40 €	
			Boden Nutzungsdauer [a]	80	
		Barwertfaktor	46,6		
Kosteneinsparung Nutzungsdauer (alle) [€]	4.356 €		Kosteneinsparung Nutzungsd. B [€]	956,9 €	

Tabelle 1: Details zum Kostenvergleich der Gebäudehülle der Varianten

6 Lüftung des Gebäudes

Betrachtet werden hier drei Lüftungskonzepte: 1. Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung (Strombedarf nach [Kah et.al. 2008] 0,12 Wh/m³), 2. Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (in diesen beiden Fällen beträgt der mittlere Luftwechsel 0,37 1/h, eine Beheizung über die Zuluft ist damit möglich). 3. Lüftungsanlage mit WRG und erweitertem Überströmkonzept. Bei diesem Konzept lassen sich im Grundriss des gewählten Gebäudes die benötigten Leitungen leicht reduzieren. Dieses Konzept wird eingesetzt, wenn nicht über die Zuluft geheizt werden soll. Dann wird der mittlere Luftwechsel auf 0,25 1/h gesenkt. Der Heizwärmebedarf reduziert sich hierdurch um 0,5 kWh/(m²a), der Strombedarf für die Lüftungsanlage um ebenfalls 0,5 kWh/(m²a). Für die Lüftungsanlage mit WRG wurden ein WBG von 91% und ein Strombedarf von 0,31 Wh/m³ angenommen.

Bei der Abluftanlage wird Luft aus Küche und Bädern abgesaugt. Sie strömt über Undichtheiten in der Gebäudehülle und über Außenlufteinlässe nach. Für dieses Konzept ist eine hohe Luftdichtheit nicht relevant. Anders als für die Lüftung mit Wärmerückgewinnung, da hier Fehlluftströmungen durch Undichtheiten zu einer deutlich verminderten Effizienz führen. Die erhöhte Gebäudeluftdichtheit wird daher im Zusammenhang mit der Lüftungsanlage mit WRG betrachtet. In [Kah et.al. 2008] werden die Mehrinvestitionen für die

verbesserte Luftdichtheit für ein Einfamilienhaus mit 600 €, entsprechend 4 €/m²_{EBF} angesetzt. Dieser Wert wird hier übernommen. Als n₅₀-Werte wurden für die Abluftanlage 1,5 1/h und 0,4 1/h für die Anlage mit WRG angesetzt.

Die Investitionskosten für Abluftanlagen werden in [heizungsfinder] mit 15-20 €/m², in [Kah et.al. 2008] mit 27 €/m² benannt. Eigene Berechnungen für das konkrete Gebäude ergaben 13 €/m². Da dieser Wert sehr niedrig erscheint, wurde er mit 30% zu 17 €/m² beaufschlagt und für die weiteren Berechnungen angesetzt. Für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung muss mit deutlich höheren Investitionskosten gerechnet werden. [heizungsfinder] nennt 40-60 €/m², [Kah et.al. 2008] 40 €/m² und [energiesparen-im-haushalt] 65 €/m². Eigene Berechnungen für das konkrete Gebäude ergaben inkl. 30% Aufschlag 42 €/m² für die klassische Passivhauslüftung und 41 €/m² für die Kaskadenlüftung, die für die weiteren Berechnungen angesetzt wurden.

Für Leitungsnetz und Luftdichtheit wurde eine Nutzungsdauer von 80 Jahren, entsprechend der Gebäudenutzungsdauer angenommen, für die Lüftungsanlage selbst 30 Jahre. Als jährliche Wartungskosten wurden für die Abluftanlage pro Ventilator pauschal 10 €, für die Varianten mit WRG die Filterkosten + 50% Wartung = 59 €/a. Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich jährliche Kosten (Wartung, Wärme, Strom) von ca. 450 € für die Abluftanlage, 170 € für die WRG und 140 € für die Kaskade. Gemäß Tabelle 2 führt dies zu Kosteneinsparungen von 3500 € für die WRG im Vergleich zur Abluft und nochmals 800 € für die Kaskade über 30 Jahre. Damit weist die verbesserte Lüftung ähnliche Einsparungspotentiale auf wie die Maßnahmen der Gebäudehülle.

	Abluft	WRG	WRG-Kaskade
Recherche Invest [€/m²]	15-27 €	40-65 €	
Eigene Ermittlung			
Lüftungsanlage	316 €	2.348 €	2.348 €
Luftverteilung	143 €	451 €	414 €
Montage, Inbetriebnahme	1.652 €	2.370 €	2.311 €
Summe Inkl. Aufschlag 30%	2.743 €	6.719 €	6.595 €
Pro m ²	17 €	42 €	41 €
Luftdichtheit	- €	640 €	640 €
Restwert Leitungsnetz	1.232 €	2.365 €	2.287 €
Wartung + Filter [€/a]	30 €	59 €	59 €
Stromkosten [€/a]	27 €	70 €	47 €
Wärmekosten [€/a]	392 €	49 €	39 €
Summe jährl. Kosten [€/a]	449 €	178 €	145 €
Barwert jährliche Kosten	7.723 €	3.054 €	2.501 €
Barwert Lüftung (20 a)	9.234 €	7.408 €	6.809 €
Einsparung zu Abluft		1.826 €	2.425 €
Barw. Lüftung ohne Energie	2.027 €	5.362 €	5.317 €
Betrachtung 20a. Nutzung Geräte 20a, Netz 80a, Strom 0,3, Wärme 0,08 €/kWh			

Tabelle 2: Kostenvergleich Lüftungsvarianten.

7 Heizwärmeverteilung

Untersucht wurde die Heizwärmeverteilung klassisch über Heizkörper und für die Variante Passivhaus zusätzlich über eine Deckenaktivierung und über die Lüftungsanlage. Die Kosten für Pufferspeicher, Pumpengruppe, Mischer und Steuerung werden dem Wärmeerzeuger zugerechnet. Für die Auslegung wurde die mit dem PHPP ermittelte Heizlast mit einem Aufschlag von 20% versehen. Details können Tabelle 3 entnommen werden.

Die **Wärmeverteilung über die Lüftungsanlage** im Passivhaus hat besonders niedrige Kosten, da das Verteilnetz ohnehin vorhanden ist und nur noch ein Element zum Einbringen der Wärme und dessen Montage berechnet werden muss. Für eine Variante mit Elektro Heizregister ergeben sich zusätzliche Investitionskosten von 330 €, für eine Variante mit Wasser Heizregister 400 €, vgl. Tabelle 3.

Deckenaktivierung: Untersucht wurden die Varianten direkt elektrisch und Heizwarmwasser. In [Friembichler 2016] wird aus Behaglichkeitsgründen eine Grenze von 25 W/m^2 für die Heizlast genannt, was die Beheizung des NEH mit einer Heizlast von 36 W/m^2 ausschließt. Bei der direktelektrischen Variante werden Elektroheizkabel in der Decke vergossen, in diesem Fall fünf getrennte Elemente, die bereits eine Thermostatsteuerung mit Zeitschaltfunktion enthalten. Bei der Deckenaktivierung mittels Wasser werden HD-PE Rohre in die Decken einbetoniert. Die Heizleistung lässt sich über die Vorlauftemperatur und über den Verlegeabstand der Rohre einstellen. Die Recherche [klimadecke], [enob], [Hofmann2006] ergab Kosten für die Betonkernaktivierung zwischen 1,0 und 1,5 €/W Heizleistung, im Mittel 1,2 €/W, die hier gewählt wurden. Vorteil der Deckenaktivierung ist insbesondere die große Fläche, welche niedrige Vorlauftemperaturen ermöglicht und bei Wärmepumpensystemen für hohe Jahresarbeitszahlen sorgt. Außerdem wirkt die große Masse als Speicher, die in gewissen Grenzen als Puffer zum Ausgleich zwischen der abgegebenen Leistung des Wärmeerzeugers und der benötigten Heizenergie dienen kann.

Für nicht modulierende Wärmepumpen, Gas und Ölheizungen sowie insbesondere Pellet- und Scheitholzessel werden Pufferspeicher benötigt, um den Wärmebedarf an die Wärmeerzeugung anzupassen. Weitere Gründe für einen Speicher sind die Vermeidung von häufigem Takten und gemütliches Feuer wenn gewünscht beim Pellet- oder Stückholzkessel. Durch die geringe Heizlast im Passivhaus kann eine Decken- bzw. Bodenplattenaktivierung die Funktion des üblichen Wasser-Pufferspeichers mit übernehmen, der Pufferspeicher kann entfallen. Im Beispielgebäude beträgt die Masse der Betondecken bzw. –Bodenplatte bei einer Stärke von 20 cm ca. 77 Tonnen entsprechend einer Wärmespeicherfähigkeit von 20 kWh/K, vergleichbar mit einem 370 l Wasserspeicher bei einer Temperaturdifferenz von 50 K. Entsprechend der Leistung des Wärmeerzeugers steigen die Kosten für die Bauteilaktivierung bei der Anpassung der Heizleistung der Betonbauteile an den Wärmeerzeuger. Aus der maximalen Heizleistung der Decke nach [Friembichler 2016] und der Energiebezugsfläche ergibt sich die maximale an die Decke abgebbare Leistung zu 4 kW. Bei Erhöhung der Deckentemperatur um 1 K kann diese Leistung selbst ohne Wärmeabgabe an den Raum über 5 Stunden abgenommen werden. Gemäß Tabelle 3 liegen die Investitionskosten für die Deckenaktivierung im Passivhaus bei 2350 €, der Barwert über 20 Jahre bei 1.140 €. In der Variante mit Speicherfunktion bei maximal abnehmbarer Leistung ergibt sich ein Barwert von 2.350 €.

Heizkörper: In jedem Aufenthaltsraum und Bad wird ein Heizkörper vorgesehen. Im Passivhaus an den Innenwänden, im NEH an den Außenwänden im Bereich der Fenster, um komfortable Bedingungen herzustellen. Im NEH wird zusätzlich ein zweiter Heizkörper im Wohnzimmer und in jedem Zimmerteil der Galerie im DG vorgesehen. Die Auslegungstemperatur wurde mit 55/45° gewählt. Für das Passivhaus resultieren aus diesem Ansatz 8, für das NEH 13 Heizkörper. Die Länge der Heizleitungen ist im PH mit 16 m gering, im NEH aufgrund der höheren Heizkörperzahl und deren Lage an den Außenwänden mit 72 m deutlich höher. Ebenfalls mitberücksichtigt wurde der Platzbedarf der Heizkörper mit 19 cm Tiefe und 50 cm Breite. Da die Heizkörper nicht raumhoch sind, wurde die sich ergebende Fläche nur zu einem Drittel angesetzt und mit 1.604 €/m nach [DESTATIS 2016] multipliziert. Die Kosten für Heizkörper und Leitungen sowie deren Montage wurden in verschiedenen Internetquellen recherchiert und sind in Tabelle 2 detailliert aufgeführt, nach der sich für das Passivhaus Kosten von 2270 € und für das NEH Kosten von 5350 € ergeben. Die Barwerte liegen aufgrund der über den Betrachtungszeitraum hinaus gehenden Nutzungsdauern der Leitungen bei 1.900 € für das PH und 4.100 € für das NEH. Die Einsparung für das PH beläuft sich somit auf knapp 2.200 €.

Position	NEH	PH	Preis	Quelle	Kosten NEH	Kosten PH
Zuluftheizung direkt elektrisch (Nutzung 20a)						
El. Heizregister DN 160 2,4 kW Helios EHR-R 2,4/160				[lueftungs.net]		231 €
Reduzierstücke DN 160/125 2 Stück				[Luftshop]		13 €
Montage				Wie Heizkörper		89 €
				Invest / Barwert		333 €
Zuluftheizung Warmwasser (Nutzung 20a)						
WW Heizregister DN 160 3,1 kW bei 60/40 Helios WHR 160				[lueftungs.net]		292 €
Reduzierstücke DN 160/125 2 Stück				[Luftshop]		13 €
Montage				Wie Heizkörper		89 €
				Invest / Barwert		394 €
Deckenaktivierung direkt elektrisch (Nutzung Steuerung 20a, Rest 50a)						
Elt. Flächenhgz. Inkl. Steuerung 5*3 m³ = 2,25 kW			141 €	[heizung-solar24]		705 €
Montage (5 mal)			159 €	[toom]		795 €
				Investition		1.500 €
				Restwert		586 €
				Barwert (30a)		914 €
Deckenaktivierung Warmwasser (Nutzung 50a)						
Heizleistung [kW]	6,9	1,9	1,20 €	[klimadecke], [enob],	8.292 €	2.325 €
			Restwert	[Hofmann2006]	4.232 €	1.186 €
			Barwert (20a)		4.060 €	1.138 €
Heizleistung [kW]	3,0	4,0	1,20 €		3.600 €	4.800 €
			Restwert		1.837 €	2.450 €
			Barwert (20a)		1.763 €	2.350 €
Heizkörper (Leitungen Nutzung 50a, Rest 20a)						
Heizkörper 290 W [Stück] (2)	4	8	111 €	[heizungsdiscount]	444 €	888 €
Heizkörper 580 W [Stück] (2)	9		145 €	[heizungsdiscount]	1.305 €	- €
Heizkörpermontage [Stück]	13	8	89 €	[toom]	1.157 €	712 €
Leitungslänge [m] (1)	72	16	30 €	[klimadecke]	2.134 €	475 €
Platzbedarf	0,20	0,12	1.604 €	[DESTATIS 2016]	313 €	192 €
(1) Preis für Material und Montage, (2) inkl. Ventil				Investition	5.352 €	2.267 €
				Restwert 50a	1.249 €	340 €
				Barwert (30a)	4.104 €	1.927 €
				Einsparung		2.177 €

Tabelle 3: Kosten für Heizwärmeverteilung

Im Passivhaus ergibt sich für die Deckenaktivierung ein Barwertvorteil von fast 800 € gegenüber der Heizkörpervariante. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit, geringere Vorlauftemperaturen zu fahren sowie die Nutzung der thermischen Masse der Decke als

Speicher. Daher wird die Variante Heizkörper für das Passivhaus im Folgenden nicht mehr betrachtet.

8 Heizwärmeerzeugung

Zunächst werden hier Systeme zur reinen Heizwärmeerzeugung ohne Warmwasserbereitung betrachtet. Dabei werden stets die Varianten Passivhaus mit Luftheizung und Deckenaktivierung, sowie die Variante Niedrigenergiehaus mit Heizkörperheizung untersucht.

8.1 Brennstoff gestützte Systeme

Gaskessel: In [energieheld], [heizungsvergleich], [heizsparer], [kesselheld] und [Schniers 2017] werden Investitionskosten zwischen 5.700 € und 14.100 €, im Mittel 9.000 € genannt. Die jährlichen Kosten für Wartung/Instandhaltung, Schornsteinfeger und die Grundgebühr des Gasanschlusses werden zwischen 315 € und 440 €, im Mittel 375 € beziffert. Diese Kosten verstehen sich inklusive Warmwasserbereitung.

Für die hier betrachteten Varianten wurden die gleichen Brennwertkessel gewählt, die zwischen 1,9 kW und 11 kW modulieren können. Für das PH mit Luftheizung und die NEH-Variante wurde ein Gerät mit kleinem integrierten Pufferspeicher gewählt, für die PH-Variante mit Deckenaktivierung ein etwas preiswerteres Gerät ohne Speicher mit ansonsten identischen Kennwerten. Inklusiv der beanspruchten Stellfläche ergeben sich so Investitionskosten von 7.300 € für die Passivhaus Variante mit Luftheizung und die NEH-Variante, für die PH-Deckenheizungs-Variante 6.000 €. Die jährlichen Kosten wurden einheitlich zu 333 € ermittelt.

Da einige Komponenten über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren hinaus genutzt werden können, ist der Barwert der Investitionskosten in allen Fällen geringer. Abbildung 1 schlüsselt diese Kosten auf.

In Abbildung 2 werden die Barwerte von Heizwärmeverteilung und Lüftung sowie der jährlichen Kosten für Energie und CO₂-Kompensation mit dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Summe der Barwerte der Investitions- und Betriebskosten die Energiekosten dominieren. Die Kompensationskosten sind in allen Varianten nicht entscheidend. Die Passivhaus Variante mit Deckenaktivierung schneidet hier am günstigsten ab. Sie ist bezüglich der Investitionskosten und der Betriebskosten mit der Variante Heizung über Lüftung nahezu identisch – hier kompensieren die höheren Kosten für die Heizwärmeverteilung die geringeren Kosten bei der Wärmeerzeugung. Die Energieeinsparung resultiert hauptsächlich aus dem geringeren Lüftungswärmeverlust durch den niedrigeren Luftwechsel sowie des ebenfalls hierdurch verringerten Strombedarfes der Lüftung.

Der Barwert der zusätzlichen Kosten (Investition und jährliche Kosten) für die Warmwasserbereitung beträgt etwa 2.000 €.

Pelletofen: In [energieheld], [heizungsvergleich], [heizsparer] und [kesselheld] werden Investitionskosten zwischen 10.000 € und 33.000 €, im Mittel 21.000 € genannt. Die jährlichen Kosten für Wartung/Instandhaltung, Schornsteinfeger und die Grundgebühr des

Gasanschlusses werden zwischen 300 € und 650 €, im Mittel 480 € beziffert. Diese Kosten verstehen sich inklusive Warmwasserbereitung und für einen Kessel im Heizraum mit Brennstofflager und automatischer Brennstoffzufuhr.

Für diese Untersuchungen wurde in allen Varianten der gleiche Pelletofen mit Wassertasche, einem Modulationsbereich zwischen 3 kW und 10 kW mit einem Nennwirkungsgrad von 91% zur Aufstellung im Wohnraum gewählt. Die Wärmeabgabe erfolgt zu 80% wasserseitig. Aufgrund der raumseitigen Wärmeabgabe wurde auch für die Luft-Heizung die Option der Kaskadenlüftung gewählt. Dieser Ofen hat einen Pellet Vorrat von 32 kg, der von Hand nachzufüllen ist (siehe auch Abschnitt Energiepreise). Im Auslegungsfall beträgt die Reichweite einer Füllung bei der Variante NEH 27 Stunden, im Passivhaus 95 Stunden, jeweils ohne Warmwasserbereitung.

Die für den konkreten Fall ermittelten Investitionskosten summieren sich für den Wärmeerzeuger im Fall Passivhaus mit Luftheizung auf 8.750 €. Das sind etwa 1.500 € mehr als für die Gas-Beheizung. In der Barwertbetrachtung reduziert sich dieser Unterschied jedoch durch höheren Restwert (Flächenbedarf für das Lager, teurere Abgasanlage) wieder. Die Variante Deckenheizung wurde zu sehr ähnlichen Kosten ermittelt – hier wird die Deckenaktivierung wegen der Auslegung auf den minimalen Modulationsbereich des Ofens von 3 kW etwas teurer (auch diese Mehrkosten relativieren sich jedoch im Barwertbezug). Aufgrund der höheren Kosten für das Pellet Lager (vgl. auch „Energiepreise“ und Abb. 1) erhöht sich der Invest für die NEH-Variante auf 11.600 €. Die jährlichen Kosten wurden mit 283 € angesetzt. Dabei sind die Kosten für Wartung/Instandhaltung und für den Kaminfeger höher als beim Gaskessel, jedoch entfällt die Belastung durch die Grundgebühr des Gasanschlusses.

Aus Abbildung 1 ist ein leichter Kostenvorteil für die PH-Variante mit Deckenheizung ersichtlich, der aber aufgrund der gleichen Kosten für den Wärmeerzeuger geringer ausfällt als bei den Gasvarianten. Die NEH-Variante verursacht insbesondere durch die Kosten für das Pellet Lager die höheren Barwerte, die allerdings wie in „Energiepreise“ dargelegt durch niedrigere Brennstoffkosten gerechtfertigt sind.

Während die Passivhaus-Pellet Varianten etwas teurer sind, als die Gasvarianten, kehrt sich dieses Verhältnis bei den NEH-Varianten um. Hier kommen die geringeren Energie- und Kompensationskosten der Pelletheizung zum Tragen.

Da sich bisher alle PH-Varianten bezüglich ihres Energiebedarfes unterhalb der Grenze des Biomassebudgets bewegen, fällt die Bewertung ähnlich aus. Für Unterschiede von ca. 3 kWh/(m²a) PER sorgen die geringere Effizienz des Biomassekessels sowie dessen höherer Hilfsstrombedarf.

Vorläufig lässt sich resümieren, dass alle vier bisher vorgestellten Passivhaus-Versorgungsvarianten hinsichtlich ihrer Barwerte, die durch die Berücksichtigung der CO₂-Kompensation auch die Klimabelastung mit inkludieren, gleichwertig sind. Die Wahl des Wärmeverteilsystems als auch des Energieträgers ist (unter der Prämisse der Verfügbarkeit eines Gasanschlusses) vollständig nach den Vorlieben des Nutzers möglich. Die These, Pelletheizungen seien zu teuer, fand in diesem Beispiel keine Bestätigung. Die vielfältig erwünschte Wohnzimmer-Feuerromantik bringt im Auslegungsfall beim Passivhaus ein nachfüllen des Pellet-Vorratsbehälters alle vier Tage mit sich.

Den Biomassekessel ganzjährig zur Warmwasserbereitung zu nutzen ist aufgrund der relativ hohen Wärmeabgabe in den Aufstellraum nicht sinnvoll. Logisch ist die Ergänzung mit einer z.B. thermischen Solaranlage, die hier mit ca. 6.000 € zusätzlichem Barwert zu Buche schlägt.

Ölkessel: Hier wurde nur die Variante Passivhaus mit Lüftwärmeverteilung betrachtet. Im Vergleich sowohl zu der Gas- als auch zur Pellet-Variante weist der Ölkessel in allen Bereichen höhere Kosten auf, wie aus den Abbildungen 1 und 2 ersichtlich ist. Mit der Pellet-Variante ist bereits ein System abgebildet, welches auf lagerbare Brennstoffe zurückgreift. Daher wird die Variante „Öl“ hier nicht weiter berücksichtigt.

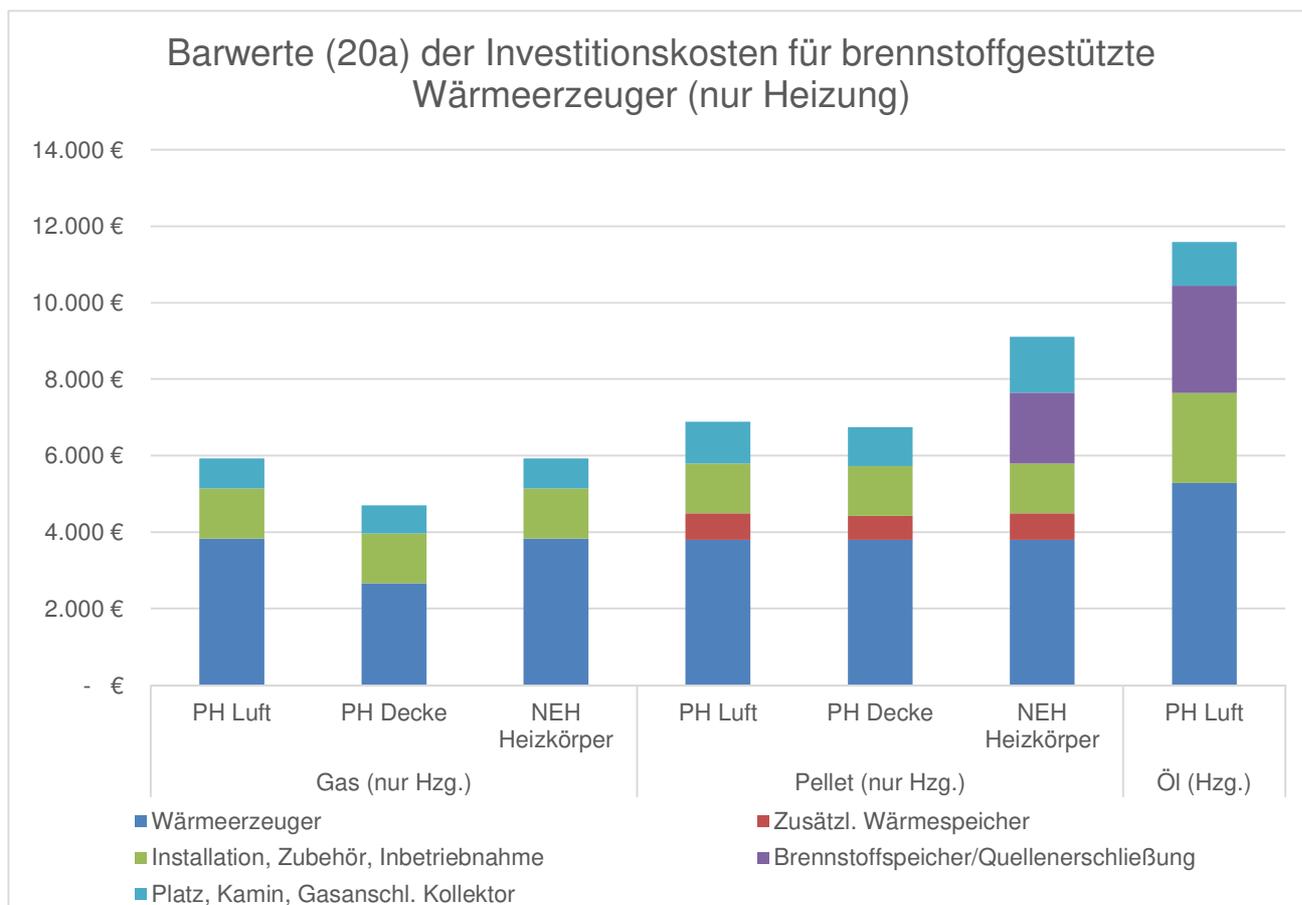


Abbildung 1: Barwert der Investitionskosten für brennstoffgestützte Wärmerezeuger (20 Jahre)

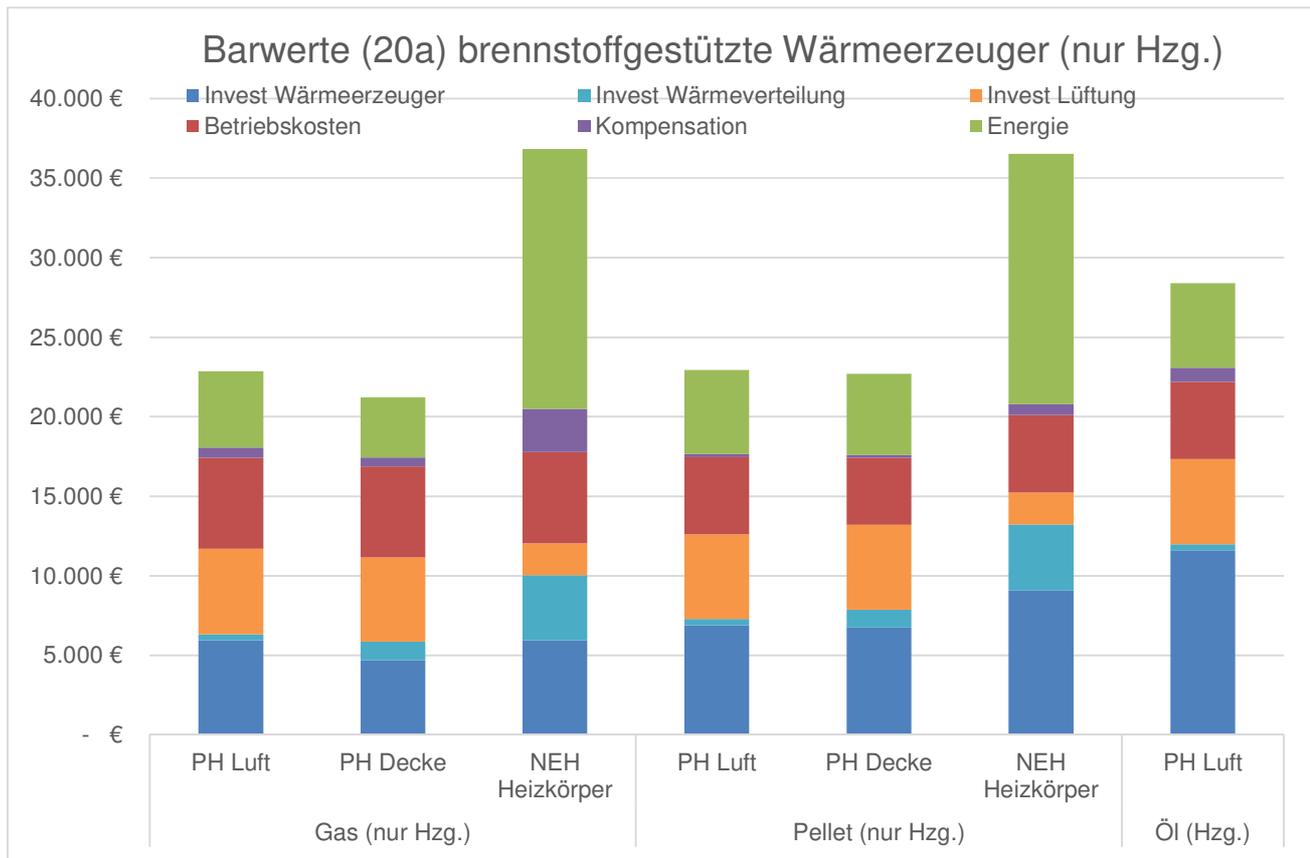


Abbildung 2: Barwerte der brennstoffgestützt Wärmeerzeuger (20 Jahre)

8.2 Direktelektrische Systeme

Hier werden für das Passivhaus die Systeme direkt elektrische Heizdecke sowie ein elektrisches Luftheizregister im Zuluftkanal angenommen. Während im ersten Fall bereits alle Kosten beim Punkt Heizwärmeverteilung aufgeführt wurden und enthalten sind, wird für die Zuluftheizung noch der elektrische Anschluss und ein Steuergerät benötigt, welche hier mit 200 € angesetzt werden. Für die Variante Niedrigenergiehaus werden in Anlehnung an die Wasser-Heizung 13 Marken-Ölradiatoren (Nutzungsdauer 12 Jahre) zu je 62 € angenommen, für die 13 zusätzliche Elektroauslässe à 55 € (mit einer Nutzungsdauer von 80 Jahren) ausgeführt werden. Inklusiv Platzbedarf ergeben sich daraus Investitionskosten von 2.460 € entsprechend 1.900 € Barwert. Dafür entstehen bei der Heizwärmeverteilung keine weiteren Kosten.

Das Ergebnis der Barwertanalyse überrascht. Wegen der geringen Investitionskosten liefern die direktelektrischen Systeme trotz der hohen Energiekosten die bisher besten Ergebnisse, wobei die Decken- und Luftheizung wieder in etwa gleichauf liegen. Die Gesamtkosten für das NEH sind mit über 74.000 € exorbitant. Dies zeigt, wie empfindlich das System auf hohe Energiekosten reagiert. Aufgrund des guten CO₂eq-Faktors des künftigen Strommixes spielen die Kompensationskosten auch bei den direkt elektrischen Systemen im Passivhaus eine untergeordnete Rolle, während sie im Niedrigenergiehaus den Barwert der Investition inkl. Lüftung deutlich übersteigen. Strom wird im Biomassebudget des PER-Verfahrens mit einem Konversionsfaktor von 2,5 belegt, d.h. es steht faktisch nur ein Viertel des Budgets zur Verfügung. Darum weisen die direktelektrischen PH-Varianten einen um ca. 6 kWh höheren PER-Bedarf auf als die Gas-Variante. Da Biomasse, Gas und Heizstrom oberhalb des

Biomassebudgets mit ähnlichen PER-Faktoren belegt sind, fallen auch die Unterschiede bei den NEH-Varianten zwar nur gering aus, übersteigen die zulässigen Passivhaus Classic Grenzwerte jedoch um das Doppelte.

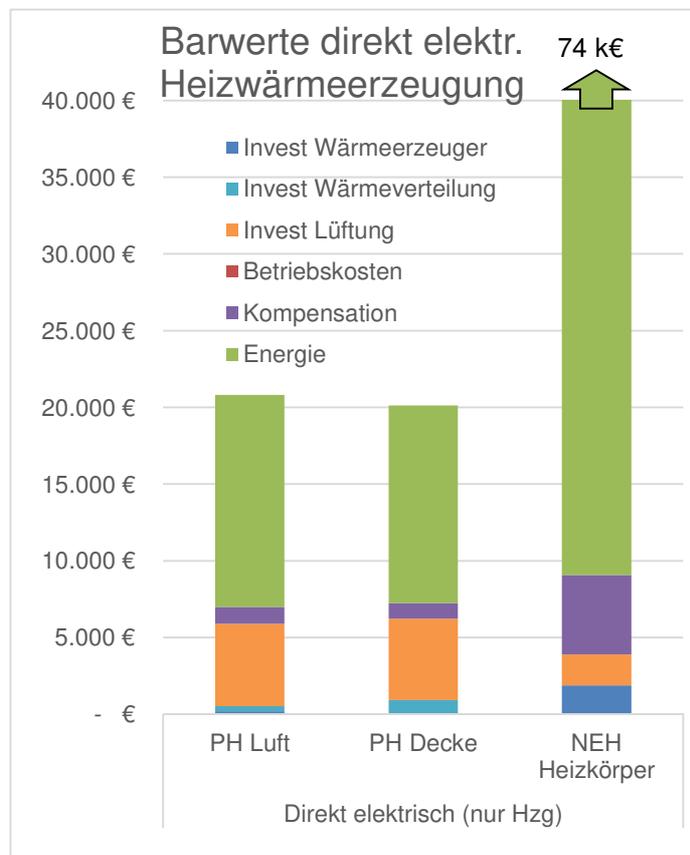


Abbildung 3: Barwerte Direkt elektrischer Systeme (30 Jahre)

8.3 Wärmepumpensysteme

Im Vergleich der Energiepreise wird deutlich: Nur wenn die Wärmepumpe eine Jahresarbeitszahl größer als 4 aufweist, können Energiekosten gegenüber der Gas-Variante eingespart werden. Die bisherige Praxis zeigt, dass solche Werte nur in Ausnahmefällen praktikabel sind. Wärmepumpen haben also nur dann eine Chance eine wirtschaftliche Alternative zu sein, wenn die Investitions- und Betriebskosten deutlich unter denen der brennstoffbasierten Systeme liegen.

Aus den bereits genannten Quellen ergeben sich für Sole-Wasser-Wärmepumpen Investitionskosten von im Mittel ca. 18.500 €, für Luft-Wasser-WP ca. 16.000 € und für Luft-Luft WP 13.300 €. Allerdings sind die jährlichen Kosten deutlich geringer, da z.B. kein Schornsteinfeger kommen muss und auch kein Gasanschluss benötigt wird. Hier werden für die Luft-Luft-WP kosten von ca. 50 € jährliche Betriebskosten, für die anderen beiden Systeme von ca. 100 €/a - entsprechend Barwerten von ca. 900 € bzw. 1.800 € - genannt und hier verwendet.

Dennoch: Von deutlich geringeren Kosten für die Wärmepumpensysteme kann hier keine Rede sein, im Gegenteil. Allerdings: Die genannten Kosten beziehen sich auf Systeme mit Warmwasserbereitung und auf Standard-Neu- oder sogar auf Altbauten. Das Passivhaus bietet deutliche Potentiale zur Vereinfachung gerade bei der Wärmepumpentechnik.

Luft als Wärmequelle: Ein Beispiel für die angeführte These sind die heute von vielen Herstellern verfügbaren Klima Split Geräte, die sowohl heizen, als auch kühlen können und mit einem variablen Kompressor ausgestattet sind (sog. Inverter-Schaltung) die in einem für Passivhäuser geeignetem Leistungsbereich modulieren. Aufgrund der hohen Stückzahlen sind diese Geräte äußerst preiswert. Das Passivhaus Institut untersucht gerade in einem Feldtest die Tauglichkeit solcher Systeme mit nur einer Inneneinheit (Mono-Splitt Gerät), also mit nur einer Wärmequelle im ganzen Haus. Die bisherigen Ergebnisse sind zufriedenstellend. Aus Komfortgründen wurde hier bei der Variante Passivhaus mit Luft-Heizung zusätzlich zu einem Monosplit-Gerät (Preise vgl. [Engelhardt]: ca. 1.300 €, 0,7 – 4 kW, bei -10°C max. 2,1 kW, SCOP 4,7) ein Elektro-Ölradiator im Bad vorgesehen, dem 5% der Heizwärmeversorgung zugewiesen wurden. Da die Wärmeversorgung nun nicht mehr über die Zuluft erfolgt, wurde als Lüftungssystem die „erweiterte Kaskade“ angenommen. Die Inneneinheiten fahren mit Volumenströmen bis 400 m³/h deutlich mehr Luft, als das leitungsintegrierte System. Darum wurden die „Vorlauftemperaturen“ hier mit 40 anstatt 55°C gewählt. In dieser Konfiguration ergibt sich nach dem PHPP zwar nicht der genannte SCOP von 4,7, jedoch eine immer noch sehr beachtliche Jahresarbeitszahl von 3,5. Zusammen mit den Investitionskosten von nur knapp 2.300 € ist der Barwert dieser Variante noch deutlich niedriger als bei den direkt elektrischen Systemen. Für das Split-Gerät wurde eine Nutzungsdauer von 12 Jahren angenommen.

Split Geräte mit geregelten Kompressoren sind mittlerweile von verschiedenen Herstellern auch mit einer Inneneinheit als Wassermodule lieferbar, dann jedoch, obwohl in ähnlichem Leistungsbereich zu wesentlich höheren Kosten, welche durch geringere Stückzahlen, insbesondere aber mit der Preispolitik der Hersteller erklärbar sind. Im Passivhaus mit Deckenheizung wurde ein Gerät mit einer Nennleistung von 3 kW, für das NEH von 7 kW der gleichen Baureihe vorgesehen. Die hier gewählten Geräte können mit PV Anlagen gekoppelt werden und so selbst produzierten PV-Strom (der allerdings in der Heizzeit in nur geringem Umfang anfällt) optimal nutzen, woraus sich ein im Mittel geringerer Strompreis und damit ein verbesserte Wirtschaftlichkeit ergeben kann. Für die Heizdeckenvariante des Passivhauses wurden Investitionskosten von knapp 8.000 €, für das Niedrigenergiehaus gut 11.500 € abgeschätzt. Aus der Kombination Flächenaktivierung mit ihrer niedrigen Vorlauftemperatur und der geregelten Wärmepumpe ergibt sich für das Passivhaus eine hervorragende Jahresarbeitszahl von 4,4. Die Niedrigenergiehausvariante erreicht, bedingt durch die hohen Vorlauftemperaturen von 55°C, bescheidene 2,6. Wie Abbildung 5 zeigt, liegen Gesamtkosten sowohl bei der PH-Variante mit Deckenaktivierung leicht unter, bei der NEH-Variante leicht über den Kosten der gasbeheizten Systeme.

Erdreich als Wärmequelle: Erdreichwärmepumpen können, gleiche Technologie vorausgesetzt, mit höheren Leistungszahlen arbeiten, da das Erdreich in der kalten Jahreszeit wärmer ist als die Luft. Diese Verbesserung wird durch höhere Kosten bei der Quellenerschließung (Erdreichwärmetauscher) erkauft. Die Kosten hierfür wurden zu 15 €/m verlegte Erdkollektorleitung recherchiert. Für das Passivhaus wurden keine Erdwärme Heizungspumpen gefunden. Daher wurde hier auf eine Warmwasser Wärmepumpe mit Erdreich-Direktverdampfer zurückgegriffen, die in Passivhäusern bereits mehrfach eingesetzt wurde. Die Wärmepumpe selbst ist mit Investitionskosten von knapp 3.000 € vergleichsweise preiswert. Inklusiv Montage, Inbetriebnahme und Erdkollektor wurden die Investitionskosten zu ca. 7.000 € abgeschätzt. Bei der Variante „Luftheizung“ errechnet das

PHPP eine Jahresarbeitszahl von 2,6, bei der Deckenheizung aufgrund der niedrigen Vorlauftemperatur eine hervorragende Jahresarbeitszahl von 4,1. Für das Niedrigenergiehaus wurde eine Wärmepumpe des gleichen Herstellers, ebenfalls mit-Erdreich Direktverdampferprogramm mit einer Nennleistung von 8 kW gewählt, die wie die Warmwasser WP mit einer festen Drehzahl arbeitet. Die Investitionskosten liegen mit 18.140 € im durch die vorausgehende Recherche erwarteten Bereich. Die Jahresarbeitszahl ist mit 3,1 durchaus respektabel. Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse im Detail: Aufgründ der guten Jahresarbeitszahl in Verbindung mit den vergleichsweise geringen Investitionskosten der eigentlich für die Warmwasserbereitung gedachten Wärmepumpe entpuppt sich die Deckenheizungsvariante als nach dem Split-Gerät zweitgünstigste Lösung.

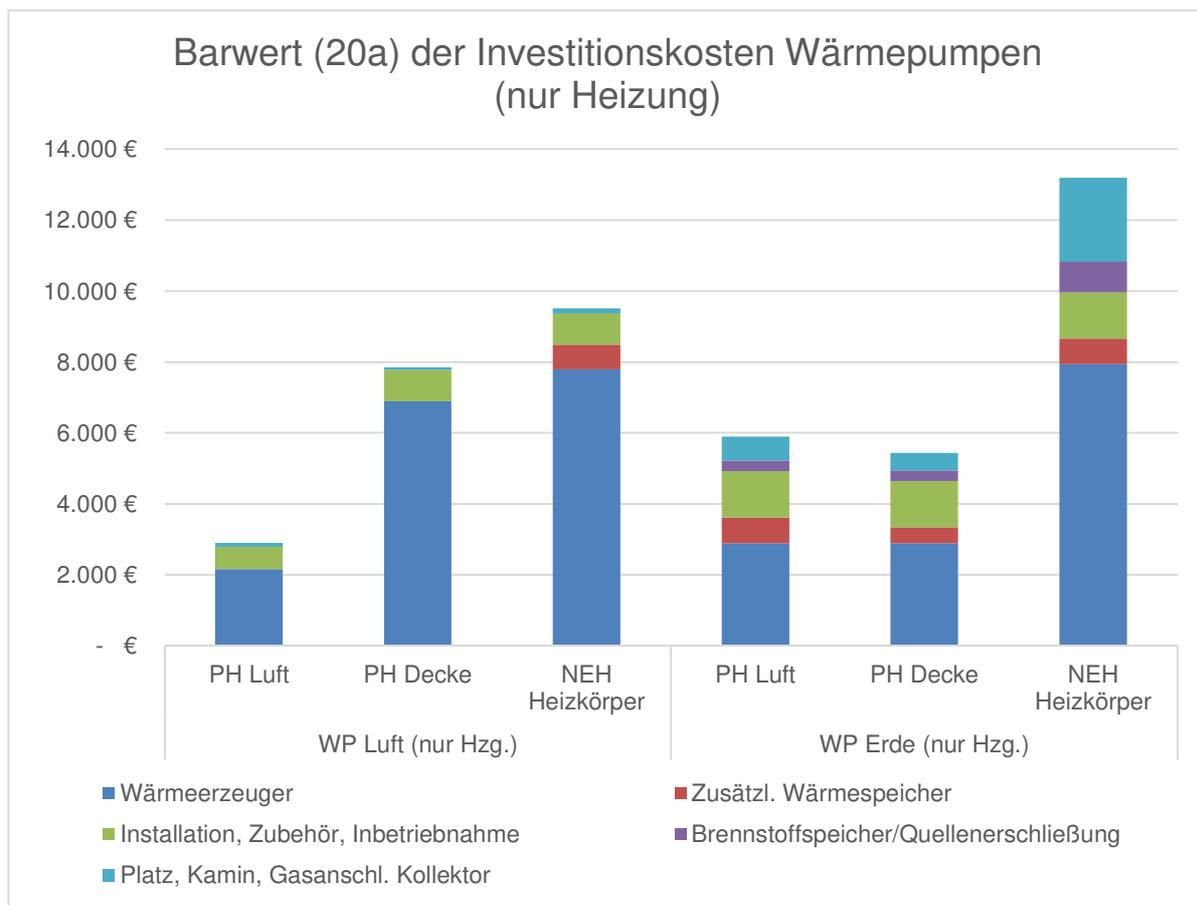


Abbildung 4: Barwert der Investitionskosten für Wärmepumpensysteme (30 Jahre)

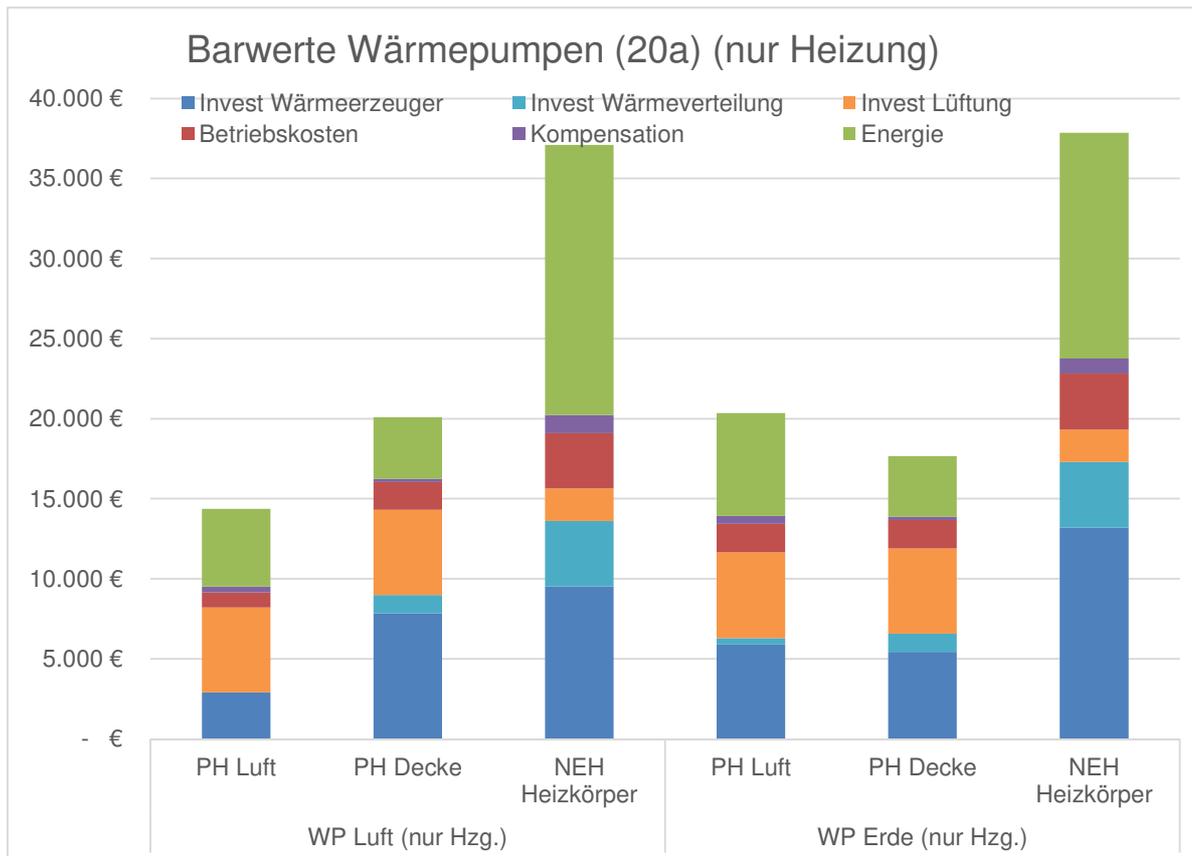


Abbildung 5: Barwert der Investitionskosten für brennstoffgestützte Wärmerezeuger (30 Jahre)

9 Warmwasser

9.1 Verteilung

Es wurden die Varianten dezentrale sowie zentrale Warmwasserbereitung mit und ohne Zirkulation mit je 4 Zapfstellen (Dusche, Waschbecken, Handwaschbecken und Spüle) betrachtet. Die Dusche ist in allen Fällen mit einem 6 Liter Sparduschkopf ausgerüstet, der als investitionskostenneutral angenommen wurde. Bei der dezentralen Lösung wird die Dusche mit einem 13 kW Durchlauferhitzer, jede andere Zapfstelle mit einem Armatur-integrierten 3,5 kW Durchlauferhitzer ausgestattet. Auf diese Weise ist es möglich mit nur 0,5 m WW Verteilleitung auszukommen. Bei der zentralen Variante mit Zirkulation beträgt die Länge der Zirkulationsleitung 10 m, die Länge der Stichleitungen in Summe 9 m. Gegenüber der dezentralen Variante erhöht sich der Wasserbedarf, da zunächst kaltes Wasser abgelassen werden muss, bis warmes Wasser von der warmen Zirkulationsleitungen durch die kalten Stichleitungen gelaufen ist. Die durchschnittliche Länge der Stichleitungen beträgt 2,25 m entsprechend einer Einsparung von ca. 0,3 Liter pro Zapfung. Bei täglich 3 Zapfungen jeder der 4 Personen und einen angenommenen Wasserpreis inkl. Abwasser von 5 €/m³ ergeben sich über die Betrachtungsdauer von 20 Jahren Kosten von ca. 220 €.

Die Verteilleitungen der Variante ohne Zirkulation betragen 14 m. Bewertet nach dem gleichen Schema betragen hier die zusätzlichen Wasserkosten 340 €. Um der Trägheit der Durchlauferhitzer der dezentralen Variante Rechnung zu tragen, wurde eine mittlere durchschnittliche Stichleitungslänge von 1 m angenommen entsprechend 100 €

Wasser/Abwasserkosten. Bei der Variante mit Zirkulation kommen die Kosten für die Pumpe, deren Installation sowie deren Stromverbrauch (6 W, 18 h/d) der Pumpe hinzu. Als Warmwassertemperatur wurden 50 °C angenommen. Diese Annahmen können nicht auf Mehrfamilienhäuser übertragen werden, da hier wegen des Legionellen Schutzes schärfere Bestimmungen andere Regelregime erzwingen. Für die Wärmeverluste durch Auskühlung der Leitungen wurde in den Zentralen Systemen ein Wärmepreis von 8 €Cent/kWh, für das dezentrale System 30 €Cent/kWh angenommen. Tabelle 4 zeigt, dass unter den angenommenen Randbedingungen das Verteilnetz inkl. Leitungsverlusten für die dezentrale Lösung, gefolgt von der zentralen Lösung ohne Zirkulation am kostengünstigsten sind – eine Aussage über die Kosten der Nutzwarmwasserbereitung wird hier noch nicht getroffen. Die Variante mit Zirkulation erzeugt die höchsten Kosten, den höchsten Energieverlust, trägt am meisten zur sommerlichen Überhitzung bei und ist zudem unter hygienischen Gesichtspunkten (Legionellen) am problematischsten. Diese Variante wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

		Quelle	Dezentral		Zentral Zirkulation		Zentral	
			Länge/ Anzahl	Kosten	Länge/ Anzahl	Kosten	Länge/ Anzahl	Kosten
Invest Netz	Nutzungsdauer [a]	50						
Zirkulationsleitungen [€/m]	30 €	[klimadecke]			10	298 €		
Stichleitungen [€/m]	30 €	[klimadecke]	0,5	15 €	9	268 €	14	417 €
Elektroauslässe [€/Stück]	55 €	[selber-bauen]	4	220 €	2	110 €	1	55 €
Summe Invest				235 €		675 €		472 €
Betrachtungszeitraum [a]	20	Barwertf. Netznutzungsd.	35,1		Barwertf. Betrachtungszeitraum		17,2	
Restwert Netz				120 €		345 €		241 €
Zirkulationspumpe inkl. Steuerung		[heizungsfinder]			1	150 €		
Montage Zirkulationspumpe		Wie Heizkörper			1	89 €		
Wärmeverluste [kWh/a]		[PHPP]	6		476		158	
Kosten Wärmeverluste [€/kWh], [€/a]			0,30 €	2 €	0,08 €	38 €	0,08 €	13 €
Barwert Wärmekosten (20a) [kWh]		[PHPP]		31 €		655 €		217 €
Strombedarf Zirkulationspumpe [kWh/a]						29 €		
Barwert Stromkosten						576 €		
Mittlere Stichleitungslänge			1,0		2,3		3,5	
Wasser [€/m³], [m³/a], [€]	5 €		1,1	96 €	2,5	216 €	3,9	335 €
Barwert Warmwasserverteilung				242 €		1.927 €		784 €

Tabelle 3: Kosten für Warmwasserverteilung sowie der damit einhergehenden Kosten für Wasser- und Energieverluste. Die Energiekosten für das tatsächlich nutzbare Wasser werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

9.2 Energiesparmaßnahmen

Zur Einsparung von Energie zur Bereitung von Warmwasser werden eine thermische Solaranlage und eine Duschwarmwasser-Wärmerückgewinnung (DWRG) betrachtet. Die thermische Solaranlage kann nur in zentralen Warmwasserverteilsystemen eingesetzt werden, die absolute Energieeinsparung ist auch abhängig von den Netzverlusten. Die DWRG ist systemunabhängig einsetzbar. Die höchsten Einsparpotentiale ergeben sich hier, wenn Kaltwasser und Warmwasser (vor der Erwärmung) über die DWRG geführt werden. Untersucht wurden die Solaranlage sowie die DWRG im zentralen System und zusätzlich die DWRG im dezentralen System. Für beide Systeme wurde die Nutzungsdauer mit 20 Jahren angesetzt.

Für die DWRG (gewählt wurde ein Gerät mit 66% Nennwirkungsgrad) ergibt sich nach [Schnieders 2015] im dezentralen System ein Invest von 748 €, im zentralen System werden zum Anschluss des Wärmetauschers an die Haupt-Kaltwasserleitung zusätzlich 3 m Rohr benötigt, die Investitionskosten erhöhen sich auf 837 €. Weitere Kosten fallen über die Nutzungsdauer nicht an. In beiden Varianten können über die Nutzungsdauer gut 15 MWh eingespart werden. Beim dezentralen System entspricht dies 35% der eingesetzten Energie, es ergeben sich Energieeinsparkosten von 0,073 €/kWh. Da der Bedarf im Zentralen System durch Speicher- und Leitungsverluste höher ist, können durch die DWRG nur 24% eingespart werden, die Energieeinsparkosten liegen bedingt durch den etwas höheren Invest bei 0,082 €/kWh.

Als Investitionskosten für thermische Solaranlagen für Einfamilienhäuser werden in [energieheld], [solaranlage-portal], [solaranlage] und [immobilo] 3.000 bis 12.000 €, im Mittel 5460 € genannt. Für die hier angesetzte Solaranlage mit 6 m² Flachkollektor und 300 l Speicher, die im konkreten Modell einen Beitrag von 68% am Warmwasserbedarf leistet, wurde nach eigenen Abschätzungen basierend auf den o.g. Quellen sowie [heizung-solar24] 3930 € ermittelt. Angesetzt wurden jedoch nur 3415 €, da im Zentralen System ohnehin ein Warmwasserspeicher vorhanden ist und hier nur geringe Mehrkosten für ein größeres Volumen anfallen. Jedoch wurden in den oben genannten Kosten auch 266 € für den höheren Flächenbedarf des Speichers inkludiert. Jährliche Wartungskosten inkl. Versicherung werden mit 90-140 € angegeben, angesetzt wurden hier 110 €. Die Stromkosten für die Solarpumpe wurden mit dem PHPP zu 8 €/a ermittelt. Der Gesamtbarwert (20a) beläuft sich somit auf 6750 €, die Energieeinsparung wurde zu 29 MWh im gleichen Zeitraum ermittelt. Hieraus ergeben sich Energieeinsparkosten von 0,19 €/kWh, die mit den in [Kah et.al. 2008] genannten Kosten gut übereinstimmen, jedoch für Wärmeerzeuger auf Brennstoffbasis nicht im wirtschaftlichen Bereich liegen.

Während die DWRG ganzjährig sowohl den Energiebedarf als auch die Heizleistung reduziert, bringt die thermische Solaranlage gerade in der Winterzeit, in der das Energieangebot künftig möglicherweise teurer ist, kaum Entlastung und sie wirkt sich nicht reduzierend auf die Wärmeerzeugerleistung aus.

9.3 Warmwassererzeugung

Bei der Betrachtung der in Abbildung 6 dargestellten Varianten fällt zunächst auf, dass die Kosten für das Verteilnetz ebenso wie die Kosten für die CO₂-Kompensation nicht entscheidend sind. Je nach Variante dominieren Energie-, oder Investitions- und Wartungskosten (blaue Säulen).

Getrennt von der Heizwärmeerzeugung: Untersucht wurden zunächst Möglichkeiten, Warmwasser getrennt vom Heizwärmeerzeuger bereitzustellen. Hierzu wurden eine Erd-Direktverdampfer Wärmepumpe, eine Luftwärmepumpe, die mit Innenluft arbeitet, und die diskutierte direktelektrische Variante modelliert. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse.

Während die Erdwärmepumpe, für die hier eine Jahresarbeitszahl von 3 angesetzt wurde, aufgrund ihrer hohen Investitionskosten- und Wartungskosten den höchsten Barwert aufweist, schneidet die Luft-Wärmepumpe deutlich besser ab. Sie verwendet Innenluft, die Jahresarbeitszahl wurde mit 3,5 angesetzt. Im Sommer kann so eine Kühlung realisiert werden, im Winter muss jedoch zusätzlich Heizwärme bereitgestellt werden. Diese wurde hier mit 6,9 €Cent/kWh angesetzt. Außerdem wurde ein zusätzlicher Heizkörper inkl.

Montage sowie die Luftführung mit Schalldämpfern und Blenden berücksichtigt. Eine Variante mit DWRG bringt leicht geringere Barwerte, diese sind jedoch nicht signifikant. Durch die DWRG reduziert sich aufgrund der höheren Zulauftemperaturen der COP der Wärmepumpe. Hier wurde eine Reduktion um ein Viertel angesetzt. Die Luft WP zur Warmwasserbereitung bietet die Möglichkeit, die Eigennutzung solar erzeugten Stromes zu erhöhen. Dies führt im Mittel zu geringeren Stromkosten, was den kleinen Vorteil der DWRG an dieser Stelle umkehren kann. Die direktelektrische Variante weist die bei weitem geringsten Investitionskosten, dafür aber auch die höchsten Energiekosten aus, liegt aber dennoch mit den Luft-Wärmepumpen gleichauf.

Fazit: Soll Warmwasser unabhängig vom Heizsystem bereit werden, sind Durchlauferhitzer mit DWRG die erste Wahl. Ist jedoch eine PV-Anlage vorhanden, eine Eigennutzung des erzeugten Stromes möglich und wird nicht direktelektrisch geheizt, kann auf eine Luft-Wärmepumpe zurückgegriffen werden – Bei dieser Variante fällt eine kostenlose sommerliche Kühlung mit ab.

Kombiniert mit der Heizwärmeerzeugung: Bei allen kombinierten Systemen wurde die bereits diskutierte zentrale Warmwasserverteilung ohne Zirkulation zugrunde gelegt. Die Kopplung führt bei einem Gaskessel zu signifikant niedrigeren Kosten als die Separate Warmwasserbereitung. Mit einer DWRG sind geringe Einsparungen möglich.

Pellet Kessel sind wegen des hohen Anteils direkter Wärmeabgabe in den Raum nicht für die ganzjährige Warmwasserbereitung geeignet. Zur Deckung der Bereitstellung des Warmwassers im Sommer wurde die Kombination mit einer thermischen Solaranlage, einer Luft-WP und einem zentralen Durchlauferhitzer mit DWRG untersucht, die hier mit den Gas-Lösungen ähnlichen Kosten die günstigste Pellet-Variante ist. Die Solarlösung zeigt zwar sehr niedrige Energie-, dafür aber sehr hohe Investitions- und Wartungskosten. Sie ist damit etwas teurer als die Pellet-Lösungen mit Luft WP, jedoch preiswerter als alle separaten Varianten. Vorteilhaft für die Wärmepumpen-Variante können sich die mögliche Kühlung und die Kombination mit einer PV-Anlage auswirken. Diese Variante ist in der Investition besonders günstig, da der große Speicher der Wärmepumpe als „Energiezentrale“ für den Pelletofen genutzt werden kann. Bei der gewählten Verschaltung ist es, unter der Prämisse einer zusätzlichen Außenanbindung der Wärmepumpe sogar möglich, das Gebäude in der Übergangszeit mit der Warmwasser-Wärmepumpe zu heizen (Mit geringem Investitionsaufwand ist dieses System allerdings nur möglich, wenn die Vorlauftemperaturen für Heizung und Warmwasserbereitung im gleichen Bereich liegen, also für die Luftheizung. Dann ist jedoch die Effizienz der WP besonders niedrig).

Stellvertretend für Wärmepumpenheizsysteme wurden hier die Luft-Wärmepumpen dargestellt, da bei den Erdwärmepumpen hohe zusätzliche Kosten für den Erdkollektor anfallen. Die Niedrigenergiehaus-Variante profitiert hier vom Wärmepumpenstromtarif.

Fazit: Ist die Kopplung mit der Heizwärmeerzeugung möglich, sollte diese genutzt werden. Der Einsatz einer DWRG ist in den hier betrachteten gekoppelten Systemen nicht besonders lohnend, führt jedoch ohne eine Erhöhung der Kosten zu einer Senkung des PER-Bedarfes und der Treibhausgasemissionen und kann darum empfohlen werden. Alle Wärmepumpensysteme können von der Kombination mit einer PV-Anlage profitieren.

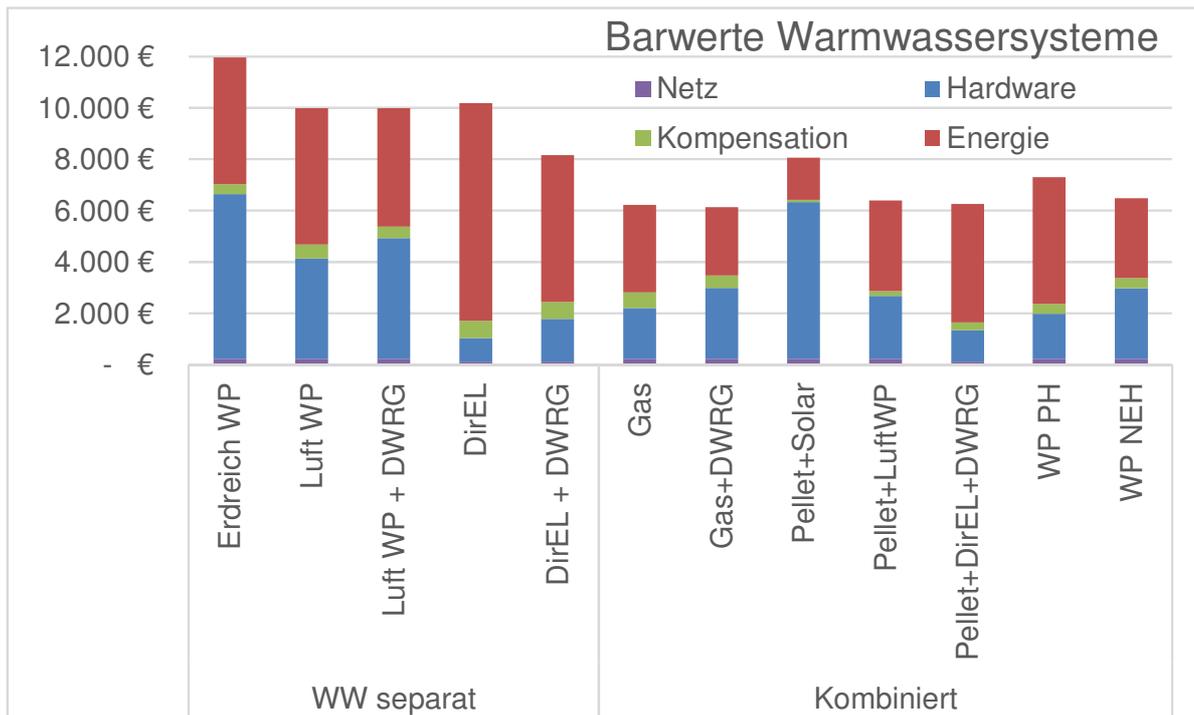


Abbildung 6: Barwert (30a) der untersuchten Warmwassersysteme

10 Systemkombinationen

Aus den möglichen Kombinationen wurden die in Abbildung 7 dargestellten Varianten ausgesucht. Zunächst zeigt sich erwartungsgemäß, dass die NEH-Varianten trotz der geringeren Investitionen in Gebäudehülle und Lüftung aufgrund der hier gezeigten geringeren Investitionskosten für die Gebäudetechnik und der geringeren Energie- und Kompensationskosten insgesamt deutlich kostengünstiger sind. Unabhängig von der Gebäudetechnik haben die NEH praktisch den gleichen Barwert.

Mit dem deutlich geringsten Barwert schneidet die Variante mit Beheizung über das Split-Gerät in Kombination mit Durchlauferhitzern und der DWRG zur Warmwasserbereitung ab. Die geringen Investitionskosten in Heizung und Warmwasserbereitung in Verbindung mit der Effizienz des geregelten Kompressors im Split Gerät ermöglichen dieses Ergebnis. Das Split Gerät ermöglicht auch eine sommerliche Kühlung ohne investive Mehrkosten. Mit einem PER-Bedarf von nur 31 kWh/(m²a) ist so auch das Passivhaus Premium erreichbar.

An zweiter Stelle folgen praktisch gleichwertig die anderen gewählten Wärmepumpen-Varianten und die Gas Heizung. Für die Luft-WP ist anzumerken, dass ein solches System (Verbindung einer Niedertemperatur Deckenheizung mit der Warmwasserbereitung) nur dann sinnvoll ist, wenn die Wärmepumpe auch das niedrige Temperaturniveau der Deckenheizung nutzen kann, wenn es also zwei getrennte Heizkreise für Warmwasser und Heizung gibt). Auch bei diesem System ist die Kühlung ohne Zusatzinvestition möglich- auch hierfür müssen die Heizkreise für WW und Heizung getrennt sein. Durch die hohe Speichermasse der aktivieren Decke und durch den Warmwasserspeicher, ist dieses System „Power To Heat“- fähig. In Verbindung mit einer PV-Anlage lässt sich deren

Eigenstromnutzung verbessern und so Energiekosten weiter senken. Bei dieser Variante wird das Passivhaus Premium mit einem PER-Bedarf von 27 kWh(m²a) erreicht.

Bei der direktverdampfenden Erdreichwärmepumpe wurde zur Entlastung der Quelle Erdreich zusätzlich eine DWRG vorgesehen. Der dennoch höhere Energiebedarf resultiert aus einem schlechteren COP der nicht-invertierenden Wärmepumpe. Auch wurden hier Heizung und Warmwasser nicht separiert. Auch dieses System ist „Power To Heat“ fähig, jedoch verbietet das System der Direktverdampfung die Kühloption. Passivhaus Premium kann auch hier erreicht werden.

Die Gas-Variante ist trotz der hier geringsten Energiekosten aufgrund der hohen laufenden Kosten (Gasanschluss, Schornsteinfeger) und des benötigten Schonsteins den Wärmepumpenlösungen bei einem Passivhaus unterlegen. Hier besteht weder die Möglichkeit zusätzlich zu kühlen, noch das Gebäude in einer „Power To Heat“-Strategie zu nutzen. Mit einem PER-Bedarf von 57,4 handelt es sich hier um ein Passivhaus Classic, das jedoch z.B. mit einer großen PV Anlage zum Passivhaus Plus werden kann.

Zusammen mit der komplett direktelektrischen Variante ist die Pelletheizung die teuerste Option bei den Passivhäusern, bei den Niedrigenergiehäusern ist die Pellet-Variante der Gasheizung aufgrund der dann geringeren Energiekosten der Lieferform „Lose Pellets“ geringfügig überlegen. Die Pellet Variante bringt die vielfach gewünschte Feuerromantik in das Haus. Allein dies wird vielen Bauherren die geringen Mehrkosten wert sein. Zusätzlich kann mit der hier gewählten sommerlichen Warmwasserbereitung über eine Raumluft WP zusätzlich gekühlt werden. Überdies fallen bei dieser Kühlung auch keine zusätzlichen Energiekosten an. Auch dieses System ist durch die Trinkwasser Wärmepumpe „Power To Heat“-fähig. Von allen untersuchten Systemen weist dieses die geringsten CO₂-Emissionen auf. Auch bei dieser Variante ist das Passivhaus Plus z.B. mit einer großen PV-Anlage erreichbar.

Auch dieses Variante kann durch entsprechende Energieerzeugung zum Passivhaus Plus werden. Zu nur geringen investiven Mehrkosten kann dieses System mit einem Split Gerät aufgerüstet, und so zu besten Ergebnissen gebracht werden – Kühlung inklusive.

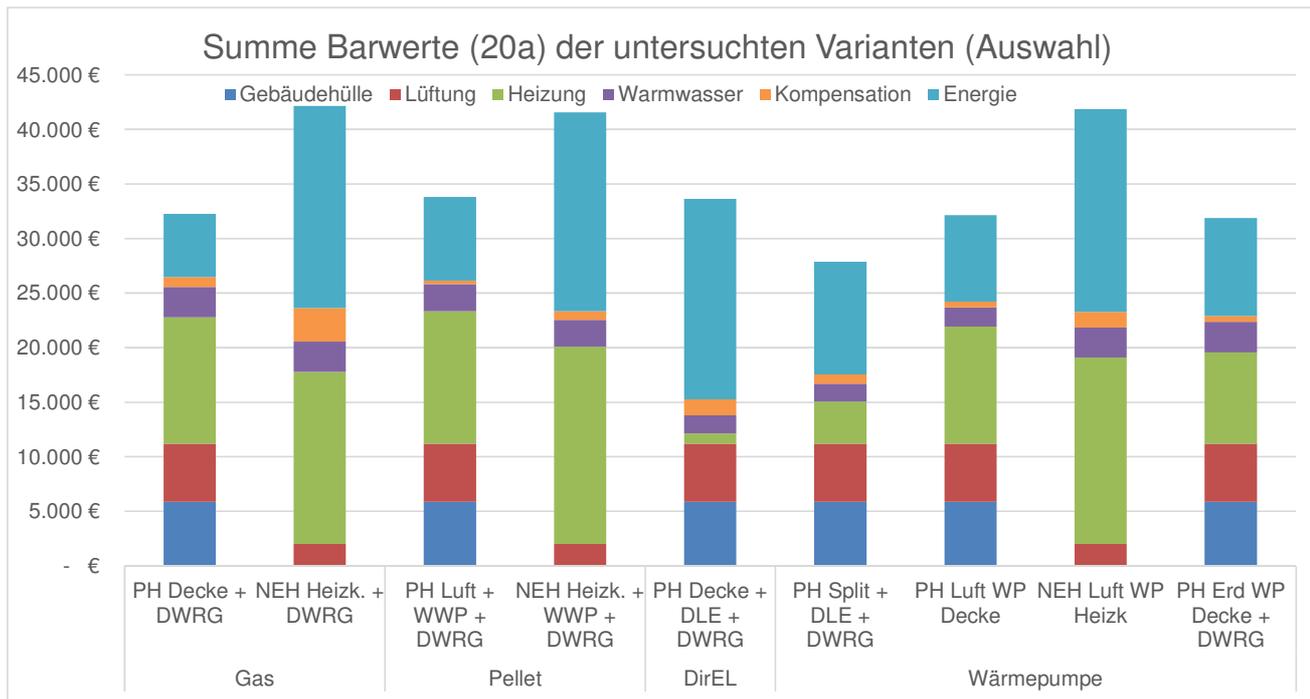


Abbildung 7: Barwert (30a) der untersuchten Systemkombinationen. In „Heizung“ sind die Kosten für Wartung, Instandhaltung, evtl. Gasanschluss, Schornstein) inkludiert. „Warmwasser“ enthält die zusätzlichen Kosten für die Warmwasserbereitung ohne Energiekosten. „Energie“ enthält den Barwert der Energie für Heizung, Warmwasser und den Hilfsstrom für WW und Hzg.

11 Fazit

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass Passivhauslösungen NEH-Lösungen kostenmäßig überlegen sind, da sie erheblich weniger Energie brauchen und zudem eine Vereinfachung des Heizsystems ermöglichen. Bezüglich des Heizwärmeverteilsystems sollte in Passivhäusern auf Heizkörper verzichtet werden und stattdessen Luft- oder Flächenheizsysteme zum Einsatz kommen. Besteht die Möglichkeit, Heizwärme und Warmwasser mit ein und demselben System zu bereiten, so sollte diese genutzt werden – eine Sonderrolle nimmt die Pelletheizung ein, hier sollte für den Sommer ein zusätzliches System vorgesehen werden. Bei Wärmepumpensystemen sollte auf eine Trennung von Heiz- und Warmwasserkreis geachtet werden, wenn eine Flächenheizung zum Einsatz kommt. Duschwarmwasser Wärmerückgewinnungen können in allen Brennstoffgestützten und nicht Hzg-WW-gekoppelten Systemen empfohlen werden.

Die hier untersuchten Wärmepumpenlösungen erwiesen sich als die im Lebenszyklus kostengünstigsten. Viele ermöglichen zusätzlich eine „Power to Heat“ Strategie und eine Gebäudekühlung. Zu geringen Mehrkosten ist auch die Pellet-Variante ein gangbarer Weg, der zusätzlich zu geringen Klimabelastungen auch die vielfach gewünschte Feuerromantik ermöglicht.

Die folgende Tabelle versucht noch einmal einen Überblick über die Ergebnisse zu geben.

	Gas		Pellet		DirEL	Wärmepumpe			
	PH Decke + DWRG	NEH Heizk. + DWRG	PH Luft + WWP + DWRG	NEH Heizk. + WWP + DWRG	PH Decke + DLE + DWRG	PH Split + DLE + DWRG	PH Luft WP Decke	NEH Luft WP Heizk	PH Erd WP Decke + DWRG
Kosten									
Th. Komfort									
Kühlung									
Power To Heat									
Klima									
PH Classic									
PH Plus									
PH Premium									

Tabelle 4: Zusammenfassung

12 Quellenverzeichnis

- [ATMOS] <http://www.ebay.de/itm/Pelletlager-Pellet-Silo-ideal-fur-ATMOS-mit-Stahlgestell-Textilsilo-Sacksilo-/111642189506?var=&hash=item19fe649ec2:m:moA13Lefl3hflITETOfYiLpw>
- [DESTATIS 2016] Statistisches Bundesamt: *Bauen und Wohnen - Baugenehmigungen / Baufertigstellungen Baukosten Lange Reihen 2015*, Wiesbaden 2016
- [DESTATIS 2017] Statistisches Bundesamt: *Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Dezember 2016*, Wiesbaden 2017
- [energiesparen-im-haushalt] <http://www.energiesparen-im-haushalt.de>
- [energieheld] www.energieheld.de/solarthermie/kosten
- [EnEV 2014] Regierung der Bundesrepublik Deutschland: *EnEV 2014: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, vom 18. November 2013*. Hier: Anhang 1, Tabelle 1.
- [Engelhardt] <http://www.split-waermepumpen.de/> bzw. <http://www.split-klimaanlagen.com>
- [enob] <http://www.enob.info/de/analysen/analyse/details/betonkerntemperierung/>
- [Friembichler 2016] Friembichler, F.;Handler, S.;Kreč, K.;Kuster,H.: *Energiespeicher Beton: Thermische Bauteilaktivierung. Planungsleitfaden Einfamilien- und Reihenhäuser*. bmvit: Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 9/2016
- [heizpellets24] <https://www.heizpellets24.de/pelletpreis-direkt/64342/6000/1> (November 2016)
- [heizsparer] www.heizsparer.de
- [heizungsdiscount] <https://www.heizungsdiscount24.de/>
- [heizungsvergleich] www.heizungsvergleich.de
- [heizung-solar24]<https://www.heizung-solar24.de>
- [Hofmann 2006] Hofmann, Helga: *Flächentemperierung*. In: DBZ Deutsche BauZeitschrift 6/2006, Gütersloh
- [Hornbach] <http://www.hornbach.de>
- [immobilo] <http://www.immobilo.de/ratgeber/solaranlagen/solarthermie/montage>
- [kesselheld] www.kesselheld.de

- [Kah et.al. 2008] Kah, Feist, Pfluger, Schnieders, Kaufmann, Schulz, Bastian: *Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung*. Passivhaus Institut im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung. Darmstadt, Berlin 2008.
- [klimadecke] http://www.klimadecke.com/main_dateien/mainframe_data/datenblatt/KOSTENVERGLEICH-KLIMATECHNIK.PDF
- [Krick 2014] Krick, B.: *COMPONENT AWARD 2014 – Vollständige Dokumentation*. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2014.
- [Krick 2016b] Krick, B.: *Ist Strom (noch) böse?* In: Feist, W. (Hrsg.): Tagungsband der 20. Internationalen Passivhaustagung 2016 in Darmstadt. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2016.
- [Krick 2016c] Krick, J.: Abgerechnete Daten Haus Krick, Reichsforststraße, Frankfurt, Privatmitteilung, Frankfurt 2016
- [lueftungs.net] www.lueftungs.net
- [PHPP 9.6] Feist, Bastian, Ebel, Gollwitzer, Grove-Smith, Kah, Kaufmann, Krick, Pfluger, Schnieders, Steiger: *Passivhaus Projektierungspaket 9.6*, Passivhaus Institut Darmstadt, 2016
- [Miller 2017] Miller, A.: *Zwei Jahre Monitoring Effizienzhaus Plus und Premium in der Praxis*. In: Feist (Hrsg.): Protokollband der 21. Internationalen Passivhaustagung 2017 in Wien. Passivhaus Institut Darmstadt 2017
- [Neitzel et.al. 2015] Neitzel, Dangel, Gottschalk, Schröder, Raschper, Wiblishauser: *Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen*. Im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bochum und Braunschweig im November 2015
- [quadriga] <http://www.quadriga-news.de/www.quadriga-news.de/index.php?StoryID=1237>
- [Schnieders 2015] Schnieders, Jürgen: *Wärmerückgewinnung aus Abwasser - Konzepte und Messdaten*. In: Feist, W. (Hrsg.) Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Nr. 49, *Effiziente Warmwasseraufbereitung*. Darmstadt 2015.
- [Schnieders 2017] Schnieders, Jürgen: *Abrechnung Heizungsanlage für eine Einfamilienhaus in DA Arheilgen*. Privatmitteilung, Darmstadt 2017.
- [selber-bauen] <http://www.haus-selber-bauen.com/elektro-installation.html#kosten-je-auslass>
- [solaranlage-portal] www.solaranlagen-portal.com/solarthermie/warmwasser/preise-kosten
- [solaranlage-ratgeber] www.solaranlage-ratgeber.de/solarthermie/solarthermie-wirtschaftlichkeit
- [solaranlage] www.solaranlage.eu/solarthermie/
- [Statistisches Bundesamt 2015] Statistisches Bundesamt: *Baupreise und Baukosten 2014*. Wiesbaden 2015
- [toom] https://www.toom-baumarkt.de/fileadmin/pdf/katalog-pdf/TOBM_14_1974_Katalog_HWK_WEB.pdf
- [VFF 2014] Verband Fenster + Fassade: *Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern – Stand 2014* Frankfurt am Main / Troisdorf 2014.

[Wolters et.al. 2015] Wolters, Nett, Tänzler, Wilkening, Götz, Krebs, Vogel: Aktualisierte Analyse des deutschen Marktes zur freiwilligen Kompensation von Treibhausgasemissionen. Herausgegeben durch das Bundesumweltamt, Dessau-Roßlau 2015

[yzxstore2009] http://stores.ebay.de/yzxstore2009?_dmd=1&_nkw=durchlauferhitzer