

DIPLOMARBEIT

Energetischer und ökonomischer Vergleich von Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssystemen in Nied- rigenergie- und Passivhäusern.

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Haas
E373
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Thomas Rührlinger Bakk.tech.
Matrikelnr.: 0225972
Im Köhbrunn 22
4663 Laakirchen

Wien, im März 2008

Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen um mich bei meinen Eltern zu bedanken, die mir durch ihre ständige Unterstützung und Hilfsbereitschaft in allen Belangen des Lebens die jahrelange Schulausbildung und das Studium erst ermöglicht haben!

Außerdem danke ich herzlichst meiner Freundin Mara, die mir mit viel Rücksicht, Geduld und moralischer Unterstützung immer hilfreich zur Seite steht!

Last but not least möchte ich mich ganz besonders bei den Herren Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Haas, Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lukas Kranzl und Univ.Ass. Dipl.-Ing. Andreas Müller für die Betreuung und Unterstützung bei dieser Diplomarbeit bedanken!

Kurzfassung

Niedrigenergie- und Passivhäuser werden sowohl national als auch international als ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Energiesysteme und Reduzierung der Treibhausgase angesehen.

Untersucht werden soll welche Heiz- und Warmwasserbereitungssysteme in solchen Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf, sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht, von Vorteil sind.

Dazu werden zwei Referenzgebäude, das eine im Niedrigenergie- und das andere in Passivhausdämmstandard, mit jeweils 36 bzw. 39 verschiedenen Heizsystem-Varianten definiert und diese neben den zu erwartenden kumulierten Energieaufwänden und energiebedingten Emissionen der Nutzung auch hinsichtlich deren Kosten untersucht.

Es zeigt sich, dass in den allermeisten untersuchten Modellvarianten sich durch Komponenten wie Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Solarkollektoren deutliche Einsparungen an Primärenergie realisieren lassen, es aber auch bei bereits sehr niedrigem Endenergiebedarf durch den höheren Energieaufwand bei der Herstellung (Stichwort: graue Energie) insgesamt zu einer Erhöhung kommen kann. Luftheizsysteme in Passivhäusern weisen sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile auf. Der zusätzliche Aufwand zur Verbesserung des Niedrigenergie- auf Passivhausstandard erweist sich in allen Fällen als ökologisch sinnvoll.

Abstract

Low-energy and passive houses are, both nationally and internationally, viewed as a major contribution to the development of sustainable energy-systems and to the reduction of greenhouse gases.

It should be examined, what heating and hot water systems, in such residential houses with low energy requirements, both from an environmental and from an economic perspective, are beneficial.

To this end, two reference buildings, one in the low energy- and the other in passive house-insulation-standard, each with 36 or 39 different heating system variants, are defined and investigated with regard to the expected cumulative energy demands, energy-related emissions and costs.

It turns out that in most studied model variants, by components such as ventilation systems with heat recovery and solar collectors, substantial savings in primary energy can be realized but also, already at a very low energy demand, due to higher energy demand in the production (keyword: gray energy), a total increase may occur. Air heating systems in passive houses have both environmental and economic benefits. The extra effort to improve the low-energy- to passive-house-insulation-standard, proved in all cases to be ecologically expedient.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	ZENTRALE FRAGESTELLUNGEN	1
1.3	WESENTLICHE LITERATUR	2
1.4	AUFBAU DER ARBEIT	2
2	DEFINITIONEN UND SYSTEMABGRENZUNG	4
2.1	METHODEN ZUR BEWERTUNG VON UMWELTAUSWIRKUNGEN	4
2.2	BEGRIFFSDEFINITIONEN	7
2.2.1	<i>Heiztechnische Begriffe</i>	7
2.2.2	<i>Energetische Begriffe</i>	12
2.2.3	<i>Bezugsflächen</i>	16
2.3	BEDEUTUNG DER HEIZUNG UND WARMWASSERBEREITUNG IN ÖSTERREICH	17
2.3.1	<i>Energieeinsatz</i>	17
2.3.2	<i>Emissionen</i>	19
2.4	WOHNHÄUSER MIT NIEDRIGEM ENERGIEBEDARF	22
2.4.1	<i>Beschreibung verschiedener Gebäudetypen (Energiestandards)</i>	22
2.4.2	<i>Einflussparameter auf den Energieverbrauch</i>	26
2.5	BEHAGLICHKEITSKRITERIEN	29
3	HEIZ-, WARMWASSERBEREITUNGS- UND LÜFTUNGSANLAGEN	32
3.1	EINTEILUNG	34
3.2	BESCHREIBUNG VON KOMPONENTEN, TECHNIKEN UND ANLAGEN	35
3.2.1	<i>Warmwasserbereitung</i>	36
3.2.2	<i>Lüftungssysteme</i>	37
3.2.3	<i>Wärmeerzeuger</i>	42
3.2.4	<i>Wärmespeicher</i>	69
3.2.5	<i>Wärmeabgabe- und Wärmeverteilungssysteme</i>	71
3.3	BESCHREIBUNG DER MODELL-VARIANTEN	75
3.3.1	<i>Warmwasserheizsysteme</i>	77
3.3.2	<i>Luftheizsystem</i>	82
3.3.3	<i>Einfluss der Dimensionierung auf den SD</i>	84
4	ÖKOLOGISCHER VERGLEICH	87
4.1	METHODISCHE VORGEHENSWEISE	87
4.2	BERECHNUNG DES ENDENERGIEBEDARFS	89
4.2.1	<i>Endenergiebedarf ohne Hilfsstrom</i>	89
4.2.2	<i>Hilfsstrombedarf</i>	90
4.3	BESTIMMUNG DER PRIMÄRENERGIEFAKTOREN	94
4.3.1	<i>Elektrische Energie</i>	94
4.3.2	<i>Verschiedene Energieträger</i>	97
4.4	ANALYSE ZUM KUMULIERTEN ENERGIEAUFWAND DER HERSTELLUNG UND ENTSORGUNG	100
4.4.1	<i>Thermische Solarkollektoren</i>	100
4.4.2	<i>Wärmeerzeuger</i>	102
4.4.3	<i>Speicher</i>	106
4.4.4	<i>Warmwasser- und Wärmeverteilungssysteme, Wärmeabgabesysteme</i>	107
4.4.5	<i>Lüftungssystem</i>	107
4.4.6	<i>Lüftungskompaktgerät</i>	108
4.4.7	<i>Umwälzpumpen</i>	108
4.4.8	<i>Expansionspeicher</i>	109
4.5	ERGEBNISSE DES ENERGETISCHEN VERGLEICHS	110
4.5.1	<i>Kumulierter Energieaufwand der Herstellung (KEA_H) bzw. Entsorgung (KEA_E)</i>	110
4.5.2	<i>Kumulierter Energieaufwand der Nutzung (KEA_N)</i>	113
4.5.3	<i>Gesamter kumulierter Energieaufwand (KEA)</i>	116

4.5.4	<i>Mehraufwand durch eine Verbesserung der Wärmedämmung</i>	122
4.6	ENERGIEBEDINGTE EMISSIONEN DER NUTZUNGSPHASE	125
4.6.1	<i>Emissionen</i>	125
4.6.2	<i>Umweltindikatoren</i>	129
4.6.3	<i>Bestimmung der Emissionsfaktoren</i>	131
4.6.4	<i>Ergebnisse</i>	134
5	ÖKONOMISCHER VERGLEICH	137
5.1	AUFSTELLUNG DER KOSTEN.....	138
5.1.1	<i>Kapitalgebundene Kosten</i>	138
5.1.2	<i>Verbrauchsgebundene Kosten</i>	140
5.1.3	<i>Betriebsgebundene Kosten</i>	141
5.2	FÖRDERUNGEN.....	142
5.3	ERGEBNISSE.....	144
5.4	GEGENÜBERSTELLUNG VON KOSTEN UND ENERGIEEINSPARUNGEN	146
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	153
6.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN	153
6.2	WAS BLEIBT OFFEN?.....	154
7	ZUSAMMENFASSUNG	155
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	162
	LITERATURVERZEICHNIS	164
	ANHANG	172
ANHANG 1:	DETAILS ZUR MODELLIERUNG IN GEMIS	172
ANHANG 2:	SIMULATION MITTELS GETSOLAR	179
ANHANG 3:	DATEN ZUR ABSCHÄTZUNG DES KEA _H	180
ANHANG 4:	DATEN ZUR BERECHNUNG DES END- UND PRIMÄRENERGIEBEDARFS	187
ANHANG 5:	KEA FÜR EINEN HWB VON 50kWh/(m ² a).....	192
ANHANG 6:	DATEN ZUR EMISSIONSBERECHNUNG.....	197
ANHANG 7:	KOSTENRECHNUNG	200

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Einsatz von Energie zum Zwecke der Raumheizung/Klimatisierung und Warmwasserbereitung machte in Österreich im Jahre 2006 knapp 30% des gesamten Endenergieeinsatzes aus (Statistik Austria, 2008). Etwa 73% davon wird mittels fossilen Brennstoffen bereitgestellt (siehe Kapitel 2.3). Somit kommt diesem Sektor eine bedeutende Rolle in Hinblick auf nachhaltige Energiesysteme und eine mögliche Reduktion der Treibhausgase zu.

Niedrigenergiehäuser und vor allem Passivhäuser zeichnen sich durch einen deutlich geringeren Heizwärmebedarf gegenüber herkömmlichen Wohnhäusern aus. Bei Passivhäusern ist dieser so gering, dass auf ein separates Heizsystem verzichtet werden kann. Da durch die hohe Luftundurchlässigkeit der Gebäudehülle ein separates Lüftungssystem ohnehin beinahe unerlässlich ist, kann dieses genutzt werden um die notwendige Restwärme in den Wohnräumen bereitzustellen (Luftheizung). Sinnvollerweise kann diese mechanische Lüftungsanlage über einen Wärmetauscher verfügen, wodurch ein Großteil der in der Abluft vorhandenen Wärme zurückgewonnen werden kann. Thermische Solarkollektoren werden bereits vielfach zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Des Weiteren können sie zum Zwecke der Unterstützung der Raumheizung verwendet werden.

1.2 Zentrale Fragestellungen

Es ist unklar ob es aus ökologischer Sicht besser ist, Wohnhäuser mit niedrigem Energiebedarf noch mit Heizkesseln/Einzelöfen (mit fossilen oder regenerativen Brennstoffen befeuert) auszustatten, oder ob es sinnvoller ist diese mit Strom (Wärmepumpen) zu beheizen. Durch zusätzliche Komponenten wie Solarkollektoren und Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung kann der benötigte Wärmebedarf verringert bzw. teilweise gedeckt werden. Jedoch sind in diesem Zusammenhang der möglicherweise erhöhte Stromverbrauch und der für die Herstellung notwendige Energieaufwand noch weitgehend ungeklärt und sollen in dieser Arbeit untersucht werden.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautet:

- Welche Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssysteme weisen in Einfamilienhäusern mit Niedrigenergie- und Passivhausstandard die geringsten Primärenergieaufwände bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus auf und wie viel kosten diese Heizsysteme den Nutzern?

Davon abgeleitet ergeben sich folgende Teilfragen, die beantwortet werden sollen:

- Welche Bedeutung hat der Energieaufwand der für die Herstellung benötigt wird, verglichen mit jenem der Nutzungsphase?
- Welche Vor- und Nachteile weisen die Heizsysteme bei einem Vergleich der energiebedingten Emissionen der Nutzungsphase auf?
- Durch welche zusätzlichen Komponenten lassen sich mit minimalen Kosten maximale Primärenergieeinsparungen erreichen und in wie groß sind diese in etwa?

1.3 Wesentliche Literatur

Als wichtige Literatur zum Einstieg in diese Thematik ist die Studie „Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser“ von Streicher et al. (2004) zu nennen, welche Ergebnisse der Programmlinie „Haus der Zukunft“ dokumentiert. Eine weitere interessante Arbeit im Rahmen dieser Programmlinie, die sich mit dem technischen Status von Wohnraumlüftungen befasst, ist die von Greml, Blümel, Kapferer & Leitzinger (2004).

Von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) in München wurden mehrere Arbeiten zum Thema der ganzheitlichen Bilanzierung veröffentlicht. Darunter Bressler, Günther-Pomhoff & Saller (1996), Corradini, Hutter & Köhler (1999), Corradini & Köhler (1999), Dreier (1999), Hutter & Wedler (2002), Schmitterling, Fleißner & Geiger (1999), Schwaiger (1996) und Tzscheuschler (1999).

In der sogenannten FAWA-Studie von Erb, Hubacher und Ehrbar (2004) werden in einer umfangreichen Feldanalyse Wärmepumpenanlagen in der Schweiz untersucht. Von Wolff, Teuber, Budde und Jagnow (2004) werden Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, basierend auf einer Feldstudie, untersucht.

Bei den Büchern sind insbesondere „Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte“ von Kaltschmitt, Streicher & Wiese (2006) und „Energieeinsparung in Gebäuden“ von Joos et al. (2004) hervorzuheben.

Interessante Informationen zu diesem Themenkreis beinhaltet auch die Dissertation „Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäude unter der Annahme verschiedener Optimierungsziele“ von Schriebl (2007).

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach diesem einleitenden Teil folgt in Kapitel 2 zunächst ein Überblick über Methoden, die angewendet werden um die Umweltauswirkungen von Produkten bewerten zu können. Eine solche ist z.B. die später verwendete Methode des kumulierten Energieaufwandes. Daraufhin folgen Definitionen bzw. Erklärungen zu verschiedenen Begriffen, welche für die Thematik dieser Arbeit von Relevanz sind, bevor die Bedeutung der Heiz- und Warmwasserbereitung in Österreich kurz besprochen wird. In Abschnitt 2.3 werden zuerst verschiedene Gebäudestandards, wie das Niedrigenergiehaus und das Passivhaus, diskutiert. Danach erfolgt noch eine Beschreibung verschiedener Kriterien, welche erfüllt sein müssen, damit das Wohnraumklima im Regelfall als behaglich empfunden wird. Dieser Punkt wird behandelt, da sich Heizsysteme nur dann am Markt durchsetzen werden, wenn sie vom Nutzer als geeignet empfunden werden.

Kapitel 3 widmet sich den Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen die im Folgenden häufig auch als WBR-Systeme (Wärmeversorgung, Brauchwasserbereitung und Raumlüftung) bezeichnet werden. Dabei werden nach einer Einleitung und möglichen Einteilung verschiedene Komponenten, Techniken und Anlagen genauer beschrieben, wobei die Daten durch eine Literaturanalyse zusammengestellt wurden. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf den erreichbaren Nutzungsgraden bzw. Leistungszahlen von Wärmeerzeugern und auf dem Hilfsstrombedarf. Nach dieser Zusammenstellung, in welcher auch die in der Praxis

möglichen Parameter untersucht werden, erfolgt eine Definition von 39 Modell-WBR-Systemen, für welche im darauffolgenden Kapitel der ökologische Vergleich durchgeführt wird.

In Kapitel 4 findet der ökologische Vergleich der WBR-Systeme statt. Dazu wird zuerst die methodische Vorgehensweise näher erläutert. Daraufhin werden die benötigten Faktoren ermittelt, um anschließend in Abschnitt 4.5, den gesamten kumulierten Energieaufwand diskutieren zu können. Es folgt eine Beschreibung wichtiger Emissionen und Umweltindikatoren, bevor die energiebedingten Emissionen der Nutzung ermittelt werden.

In Kapitel 5 werden die Kosten der unterschiedlichen Heizsysteme mit Hilfe der Annuitätenmethode verglichen, bevor daraus und mit den Ergebnissen des energetischen Vergleichs, eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt wird. Dabei wird vor allem untersucht, welche Möglichkeiten zur Reduktion, der im gesamten Lebenszyklus benötigten Primärenergie, für den Nutzer die geringsten Kosten verursacht.

Im letzten Kapitel werden die Schlussfolgerungen und Kernaussagen zusammengefasst und es werden noch interessante Aspekte zu dieser Thematik erwähnt, die in dieser Arbeit nicht behandelt werden konnten, aber Ausgangspunkt für weitere Studien sein könnten.

2 Definitionen und Systemabgrenzung

Zuerst erfolgt ein Überblick über Methoden, die zur Bewertung von Umweltauswirkungen angewendet werden, um die in dieser Arbeit verwendete Methode des kumulierten Energieaufwandes einordnen zu können. Danach werden verschiedene Begriffe näher definiert, die für diese Thematik von Bedeutung sind. Bevor Wohnhäuser mit niedrigem Energiebedarf wie z.B. Niedrigenergie- und Passivhäuser näher besprochen werden, wird noch die Bedeutung der Heiz- und Warmwasserbereitung in Österreich untersucht. Am Ende dieses Kapitels werden noch kurz verschiedene Kriterien diskutiert, die erfüllt sein müssen, damit das Wohnraumklima im Regelfall als behaglich empfunden wird.

2.1 Methoden zur Bewertung von Umweltauswirkungen

In diesem Kapitel folgt ein Überblick über Methoden, die zur Bewertung von Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen angewendet werden. Bei der Literaturrecherche zu dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass Studien, welche die ökologischen Auswirkungen von Produkten untersuchen, häufig mit verschiedenen Ansätzen und vor allem unterschiedlicher Bewertungsmethoden der Ergebnisse arbeiten. Aus diesem Grund folgt hier ein kurzer Überblick, um die gewählte Methode, den kumulierten Energieaufwand, besser einordnen zu können.

Um die Umweltauswirkungen eines Produktes abschätzen zu können, ist es wichtig den gesamten Lebenszyklus zu beachten. Dazu existieren verschiedene Leitbilder und Konzepte wie z.B. das Lebenszyklusdenken (Life Cycle Thinking) im Management (Life-Cycle-Management (LCM)), die Bewertung der Öko-Effizienz, erweiterte Produktverantwortung oder Design for Environment (DfE) (Seebacher et al., 2003, Kap. 2.1).

Die Ökobilanz oder LCA (Life-Cycle-Assessment) ist eine von verschiedenen Umweltmanagementmethoden und dient somit zur Abschätzung der Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen (Merl, 2001, Kap. 1 & Kap. 4). Die Vorgehensweise zur Erstellung solch einer ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Dabei wird der Weg vom Rohstoff bis zur Entsorgung also „von der Wiege bis zur Bahre“ erfasst (Seebacher et al., 2003, Kap. 2.1). Die aktuellen entsprechenden Normen sind die ISO 14040:2006 welche die Grundsätze und Rahmenbedingungen einer LCA beschreibt, und die ISO 14044:2006 welche die Anforderungen und Richtlinien definiert¹.

Die Erstellung einer Ökobilanz wird in vier Schritten durchgeführt. Nach einer genauen Zieldefinition kommt es zur Erstellung einer Sachbilanz (Life-Cycle-Inventory (LCI)). Dabei werden alle im gesamten Lebenszyklus wirkenden Stoff- und Energieströme zusammengestellt (inkl. der Emissionen in Luft, Wasser und Boden). Anschließend werden die Auswirkungen dieser Stoff- und Energieströme abgeschätzt (Life-Cycle-Impact-Assessment (LCIA)). Im letzten Schritt erfolgt die Bewertung der Resultate (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, Kap. 2.2), (Merl, 2001, Kap. 4).

¹ www.iso.org

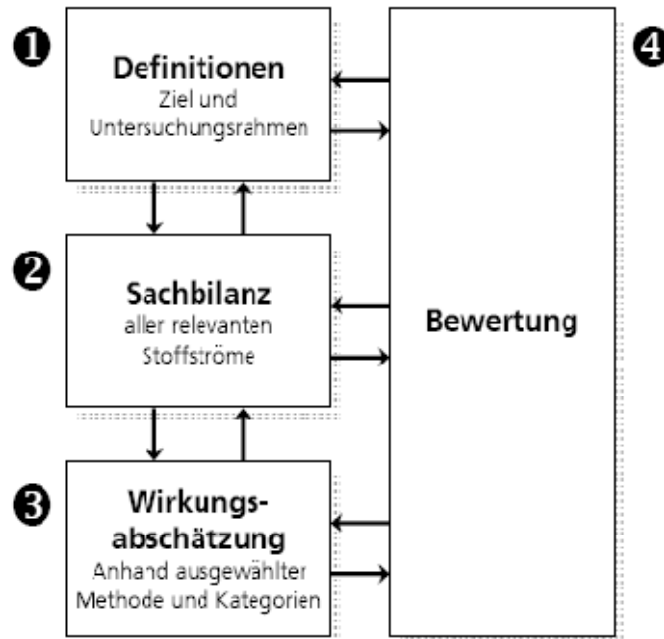


Abbildung 2-1: Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz nach ISO 14040 (Quelle: (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, S.5)).

In der Praxis ist die Erstellung von Ökobilanzen, vor allem der Sachbilanz, meist mit einem hohen Einsatz von Zeit und Geld verbunden. Eine Reduzierung dieses Aufwandes ist möglich, indem vereinfachte Methoden, die in Abbildung 2-2 dargestellt werden, zur Anwendung kommen. Dieses Diagramm zeigt unterschiedliche Vereinfachungsansätze, wobei die Kosten- und Zeitersparnis (in Vergleich zur vollständigen LCA) durch eine geringere Menge an erforderlichen Daten bzw. geringere Anforderungen an deren Qualität erreicht wird (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, Kap. 2.2).

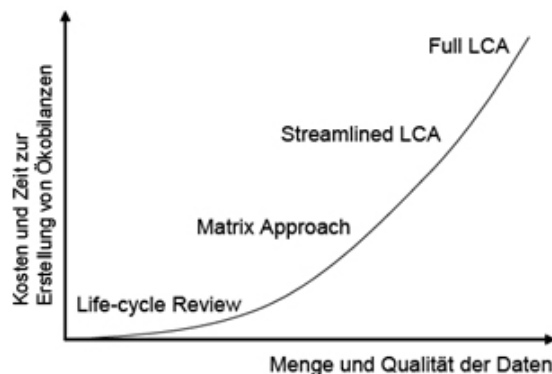


Abbildung 2-2: Vergleich von methodischen Ansätzen der Ökobilanzierung (Quelle: (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, S.7); Abszissenbeschriftung angepasst).

Bei dieser Wirkungsabschätzung gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden die angewendet werden. Aus diesem Grund ist aber eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse häufig nicht direkt möglich (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, S.5). Eine Auswahl von verschiedenen Bewertungsmethoden ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt. Man erkennt, dass sich diese oft grundsätzlich voneinander unterscheiden, wobei deren Ergebnisse von verbalen Formulierungen bis zu Umwelt-Indizes reichen. Außerdem unterscheiden sich die Methoden oft auch darin, welche Umwelteffekte überhaupt berücksichtigt werden (Frischknecht et al., 2005, Kap. 2.4.3.1).

2. Definitionen und Systemabgrenzung

Tabelle 2-1: Bewertungsmethoden für die Wirkungsabschätzung (Zusammenstellung nach (Lang-Koetz, Springer & Beucker, 2006, S.9).

Methode	Gliederung	Bewertung	Ergebnis
ABC – Methode	Sachbilanz-bezogen	Anwendungsspezifisch, Bewertungsraster	Verbal-argumentativ
Immissionsgrenzwert-Methode	Sachbilanz-bezogen	Schwellenwert, Gewichtung mit Grenzwerten	Abfall, Energie, Wasser, Luft
Stoffflussmethode	Sachbilanz-bezogen	Ökologische Knappheit	Monetärer Wert
EPS Methode	Sachbilanz-bezogen	Analyse des willingness to pay	Monetärer Wert
Tellus Methode	Sachbilanz-bezogen	Vermeidung von Kosten	Monetärer Wert
CML/MET	Wirkungs-bezogen (14 Kategorien)	Normalisierung (Welt), Umweltpolitikziele	Umwelt-Index
Eco Indicator	Wirkungs-bezogen (9 Kategorien)	Normalisierung (Europa)	Umwelt-Index
UBA Methode	Wirkungs-bezogen (10 Kategorien)	Normalisierung (Deutschland), Umweltrelevanz	Verbal-argumentativ
IKP Methode	Wirkungs-bezogen (14 Kategorien)	Anwendungsspezifische Gewichtung, Nutzenanalyse	Nutzenanalyse
MIPS	Ressourcenverbrauch	Materialinput	Materialintensität pro Serviceeinheit
KEA	Energie Verbrauch	Energieverbrauch	Energie-Input

Durch eine Analyse der vorhandenen Literatur zeigt sich, dass besonders die Methode des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für eine Bewertung von WBR-Systemen¹ angewendet wird.

¹ Eine von sechs Anlagengruppen von Gebäuden nach HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) (www.hoai.de).

2.2 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden einige Begriffe und Kennwerte näher erläutert, welche für den Inhalt dieser Arbeit von Bedeutung sind. Es wird darauf hingewiesen, dass in der Literatur besonders Acht gegeben werden muss, auf welcher Grundlage die angegebenen Daten basieren. Wenn z.B. von der Bezugsfläche die Rede ist, kann die Gebäudenutzfläche gemeint sein, oder z.B. nur die beheizte Wohnfläche. Da des Öfteren Begriffe unterschiedlich definiert und benutzt werden, ist eine eindeutige Klarstellung der Begriffsdefinition für diese Arbeit von großer Bedeutung. Dies erfolgt in diesem Kapitel. Weitere Definitionen folgen in Kapitel 3.2.3, bei der Beschreibung der Wärmeerzeuger.

Wenn von einem Bedarf gesprochen wird, handelt es sich in diesem Zusammenhang um eine rechnerische Größe. Der Verbrauch hingegen stellt eine messtechnisch ermittelte Größe dar.

2.2.1 Heiztechnische Begriffe

Heizgradtage, Heizgrenze:

Die Heizgradtage HGT [Kd] werden gebildet, indem die Differenzen der Raumlufttemperatur (meist 20°C) und der mittleren Tages-Außentemperatur über alle Heiztage aufsummiert werden. Dabei wird als Heizgrenze für die Bestimmung der Heiztage meist +12°C angesetzt. In Abbildung 2-3 wird dieser Zusammenhang dargestellt. Da diese Heizgrenztemperatur allerdings tatsächlich stark vom Dämmstandard des jeweiligen Hauses abhängt, ist der Kennwert HGT, wenn er aufgrund der standardisierten Daten gebildet wurde, nur von bedingter Aussagekraft (Stoiber, 2007e).

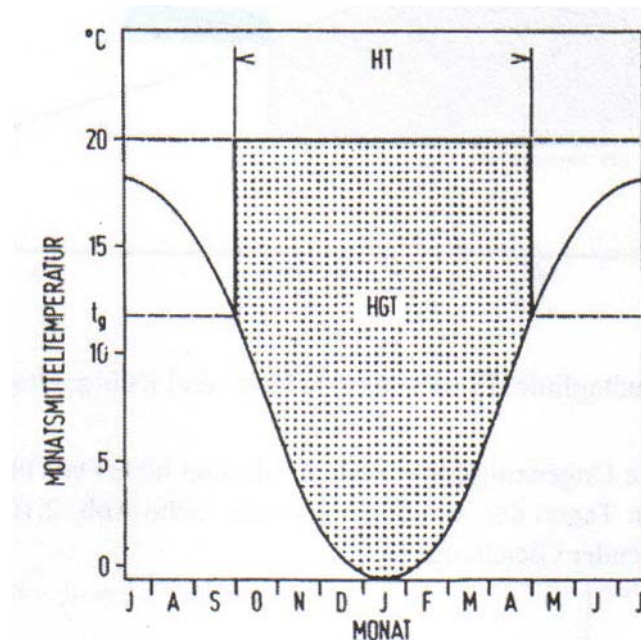


Abbildung 2-3: Darstellung einer Jahresganglinie des Monatsmittels der Außentemperatur und der Heizgradtage (Quelle: (Haas, 2006, S.2-9)).

Abbildung 2-4 zeigt typische Heizleistungen und Heizgrenzen für verschiedene Energiestandards.

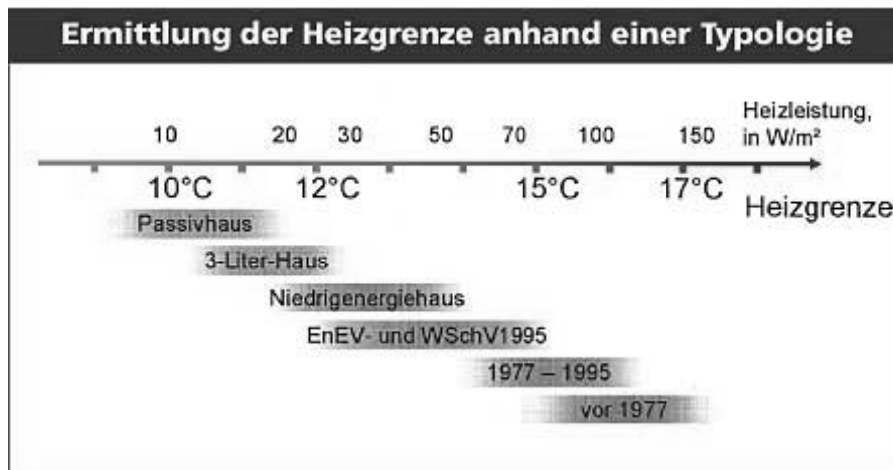


Abbildung 2-4: Typische Heizgrenzen und Heizleistungen für verschiedene Energiestandards (Quelle: (Bund der Energieverbraucher, 2007).

Heiztage:

Die Heiztage HT, welche nicht mit den HGT verwechselt werden dürfen, definieren laut Haas (2006, Kap. 2.6) die Anzahl der Tage im Jahr, bei denen die mittlere Tages-Außentemperatur die Heizgrenze erreicht bzw. unterschreitet.

Luftdichtheit, Luftdurchlässigkeit, Luftwechselrate:

Die Luftdichtheit wird meist bei einer Druckdifferenz, zwischen Wohnräumen und Außenluft, von 50 Pascal gemessen. Dabei errechnet sich die Luftwechselrate n_{50} , welche die Luftdurchlässigkeit charakterisiert, folgendermaßen: $n_{50} = V_{50} / V$. Dabei ist V_{50} der Leckage-Luftstrom und V das untersuchte Gebäudevolumen (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.4).

Eine ausreichend große Luftwechselrate n ist sowohl zur Gewährleistung guter Raumluftqualität, als auch zum Abführen der Baufeuchtigkeit erforderlich (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.4). Laut EN 832 wird ein Mindestluftwechsel von $0,5h^{-1}$ empfohlen, wenn keine nationalen Angaben vorhanden sind. Auch ÖNORM B 8135 gibt diesen mit $0,5h^{-1}$ an. In VDI 2067 Blatt 2 hingegen ist dieser in der Heizperiode in genutzten Räumen mit $0,7-1,0h^{-1}$ definiert (Streicher et al., 2004a, S. 25, Tabelle 2-17).

Eine Mindestluftwechselrate von $0,5h^{-1}$ bedeutet somit, dass jede Stunde das halbe Luftvolumen des Gebäudes erneuert werden muss. Sehr gut luftdicht gebaute Gebäude, benötigen somit im Regelfall Lüftungsanlagen.

In Tabelle 2-2 befindet sich eine Zusammenfassung der Anforderungen an die Luft- bzw. Winddichte, die sich für moderne Gebäude beim Bower Door Test etabliert haben.

Tabelle 2-2: Zusammenfassung von Luftwechselraten, die sich beim Blower Door Test¹ für Gebäude mit verschiedenen Lüftungsarten etabliert haben (Daten nach (Greml et al., 2004, Kap. 2.6)).

	Maximale Luftwechselrate
Gebäude mit Fensterlüftung	3
Gebäude mit Abluftanlage	1,5
Gebäude mit Zu- und Abluftanlage und Wärmerückgewinnung	1
Passivhäuser	0,6

¹ Dieser wird bei einer Druckdifferenz von 50Pa durchgeführt und dient zur Ermittlung der Luftdichtheit des Gebäudes.

Wärmedurchgangskoeffizient, Wärmedurchlasswiderstand, Gesamtenergiedurchlassgrad:

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird als U-Wert (früher k-Wert) bezeichnet. Er gibt jenen Wärmestrom in Watt an, der durch einen m² eines Bauteiles bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin hindurchfließt. Dieser Wert ist eine sehr wichtige Kenngröße zur Beurteilung der energetischen Qualität des entsprechenden Bauteils. Es gilt, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Kehrwert des gesamten Wärmedurchlasswiderstandes R ist ($U = 1/R$ [W/m²K]) (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.4).

Metallbedampfung werden z.B. bei Wärmeschutzverglasungen angewendet, damit ein möglichst großer Anteil der langwelligen Wärmestrahlung die aus dem Raum kommt, wieder reflektiert wird. Dabei muss beachtet werden, dass trotzdem möglichst viel der sichtbaren kurzwelligeren Strahlung von außen hindurchtreten kann. Trifft diese kurzwellige Strahlung auf Materialien im Inneren der Gebäudehülle auf, wird diese als Wärme gespeichert und als langwellige Wärmestrahlung wieder abgegeben (Volland & Volland, 2006, Ka. 0.4). Der Gesamtenergiedurchlassgrad gibt an, wie viel der auf transparente Flächen (Fenster,...) auftreffenden Sonnenstrahlung hindurchtreten kann. Bei einer üblichen 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung beträgt dieser g-Wert etwa 60% (OÖ ESV, 2007a).

Heizwärmebedarf:

Der Heizwärmebedarf ist die erforderliche Wärmemenge um das Gebäude auf der gewünschten Temperatur zu halten. Er bestimmt sich aus dem Wärmebedarf zur Deckung der Verluste abzüglich der internen Gewinne und der passiven solaren Wärmegevinne (z.B. Einstrahlung durch die Fenster, TWD, Wintergärten) (Gieseler & Heidt, 2005, Kap.2.1).

Die Wärmeverluste lassen sich dabei laut Gieseler & Heidt (2005, Kap. 2.1) in zwei Kategorien unterteilen (zur Veranschaulichung siehe Abbildung 2-5):

- Transmissionsverluste entstehen durch Wärmeströme, die durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion durch die Gebäudehülle fließen. Wärme fließt dabei immer von Gebiet höherer Temperatur (z.B. dem Wohnraum) in das Gebiet niedrigerer Temperatur (also z.B. nach draußen). Moderne Baumaterialien ermöglichen im Vergleich zu älteren eine sehr gute Wärmedämmung. Die charakteristische Größe ist die Wärmedurchgangszahl (U-Wert).
- Als Lüftungsverluste bezeichnet man jene Energie die verloren geht, wenn warme Raumluft durch kalte Außenluft ausgetauscht wird. Anders ausgedrückt ist es jene Wärmemenge die benötigt wird, um die Frischluft innerhalb des Betrachtungszeitraumes zu erwärmen. Dabei unterscheidet man zwei Arten des Luftaustausches:
 - 1) Die konstruktionsbedingten Lüftungsverluste entstehen durch Undichtheiten bei Fenster, Türen, Fugen, Anschlussstellen,... Sie sind abhängig von der Raumgeometrie und von den windgeschwindigkeitsabhängigen Druckunterschieden im Haus. Außerdem entstehen sie durch Öffnen von Türen und Fenstern ohne Lüftungsabsicht. Man nennt diese Verluste Infiltrationsverluste.
 - 2) Jene Verluste, die durch den notwendigen Luftaustausch, also durch öffnen von Fenstern und Türen mit Lüftungsabsicht, oder bei Verwendung von Lüftungsanlagen, entstehen.

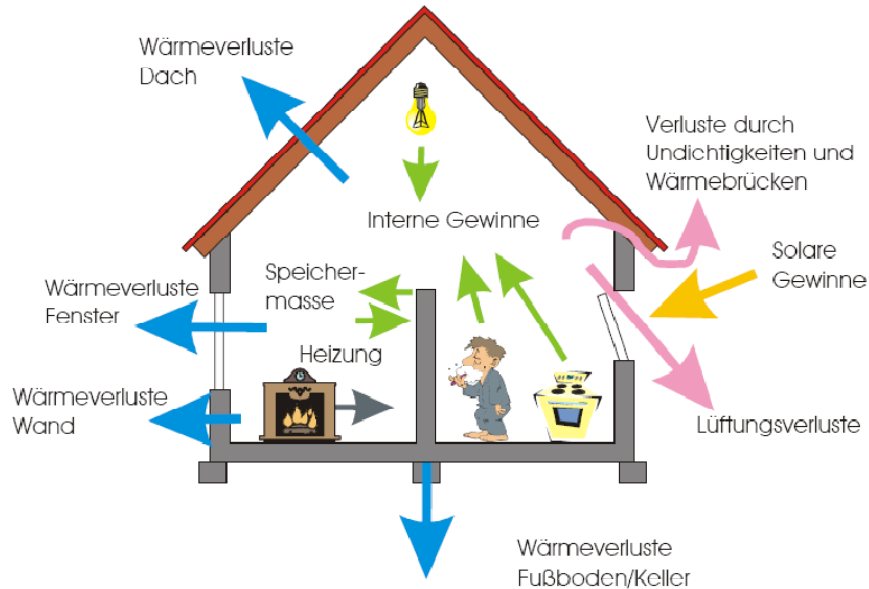


Abbildung 2-5: Energieflüsse eines Gebäudes (Quelle: (Streicher et al., 2004b), S.1).

Die internen Gewinne entstehen durch Geräte und Personen die sich im Haus befinden. Jeder Mensch heizt im Durchschnitt etwa mit 60Watt (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.4). Besonders im Sommer ist es jedoch wichtig energieeffiziente und damit energiesparende Geräte einzusetzen, um nicht das Gebäude zu sehr zu erwärmen. Das PHPP rechnet für die inneren Wärmequellen mit 2,1 W/m². Messungen im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein haben hingegen nur eine Dauerleistung an inneren Wärmequellen von 0,9 W/m² ergeben. DIN 4108/Teil 6 setzt mit 5 W/m² die inneren Gewinne somit unrealistisch hoch an (Feist, 2007b).

Um die Wohnräume auf einer konstanten Temperatur halten zu können, ist es somit notwendig die Differenzwärme aus Verlusten und Gewinnen mittels des Heizsystems zuzuführen (bzw. bei Kühlbedarf den Wohnräumen abzuführen). Die Formel (2-1) stellt diesen Zusammenhang dar, wobei V die Verluste, G die Gewinne und H den Heizwärmebedarf bezeichnen. Die Speicherfähigkeit der Gebäudehülle, für Wärme, wird dabei vernachlässigt (Gieseler & Heidt (2005, Kap. 2.1)).

$$V_{Transmission} + V_{Lüftung} - G_{Solar} - G_{Intern} = H \quad (2-1)$$

Heizenergiebedarf:

Der Begriff Heizenergiebedarf erfasst zusätzlich zum Heizwärmebedarf die Verluste der Heizungsanlage. Er entspricht somit dem Heiz-Endenergiebedarf (Gieseler & Heidt, 2005, Kap.2.1).

Heiztechnikenergiebedarf:

Beschreibt die Wärmeverluste, die bei der der Wärmeerzeugung und Verteilung auftreten (OIB-Richtlinie 6, 2007). Es gilt somit Heizendenergiebedarf = Heizwärmebedarf + Heiztechnikenergiebedarf.

Primärenergiebedarf, Anlagenaufwandszahl, Primärenergiefaktor:

Der Primärenergiebedarf kann laut EnEV 2006 auf zwei Arten berechnet werden (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.2). Die erste Möglichkeit ist die Verwendung der Anlagenaufwandszahl:

$$Q_P = (Q_h + Q_W) \cdot e_P \quad (2-2)$$

Q_P ... Primärenergiebedarf [kWh/a]
 Q_h ... Heizwärmebedarf [kWh/a]
 Q_W ... Heizwärmebedarf Warmwasser [kWh/a]
 e_P ... Anlagenaufwandszahl

Der Primärenergiebedarf ist somit die gesamte Energiemenge die, inklusive aller Verluste für die Gewinnung, Umwandlung und den Transport notwendig ist, um die Heizung und Trinkwassererwärmung zu ermöglichen. Die Anlagenaufwandszahl gibt somit das Verhältnis zwischen Primärenergie und abgegebener Nutzwärme an. Umso kleiner die Anlagenaufwandszahl ist, desto effizienter ist das Heizsystem (Volland & Volland, 2006, Kap. 6.2.4).

Der Warmwasserbedarf wird laut EnEV Anhang 1 Abs. 2.2 für Wohngebäude pauschal mit 12,5 kWh/(m²a) multipliziert mit der beheizten Nutzfläche angesetzt (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.3).

Die 2. Möglichkeit der Berechnung des Primärenergiebedarfs laut EnEV ist folgende:

$$Q_P = [(Q_{H,E} \cdot f_{P,i}) + (Q_{L,E} \cdot f_{P,i}) + (Q_{TW,E} \cdot f_{P,i})] + (Q_{H,HE,E} + Q_{TW,HE,E} + Q_{L,HE,E}) \cdot f_{P,i} \quad (2-3)$$

Q_P ... Primärenergiebedarf [kWh/a]
 $Q_{H,E}$... Heizung Endenergiebedarf [kWh/a]
 $Q_{L,E}$... Lüftung Endenergiebedarf [kWh/a]
 $Q_{TW,E}$... Trinkwasser Endenergiebedarf [kWh/a]
 $Q_{L,HE,E}$... Lüftung Endenergiebedarf, [kWh/a]
 $f_{P,i}$... zugehöriger Primärenergiefaktor
 $Q_{H,HE,E}$... Hilfs-Endenergiebedarf Heizung [kWh/a]
 $Q_{TW,HE,E}$... Hilfs-Endenergiebedarf Trinkwasser, [kWh/a]
 $Q_{L,HE,E}$... Hilfs-Endenergiebedarf Lüftung [kWh/a]

Der Primärenergiefaktor ist somit das Verhältnis aus Primär- zu Endenergie des jeweiligen Energieträgers (vgl. Bereitstellungsnutzungsgrad) (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.2).

Energiekennzahl:

Wenn von der Energiekennzahl die Rede ist, ist meistens die Nutzheiz-Energiekennzahl (NEZ) gemeint. Diese entspricht dem Heizwärmebedarf (bezogen auf die beheizte Brutto-Geschossfläche) (Stoiber, 2007b). Dabei kann vom tatsächlichen Standort oder auch von standardisierten Klimadaten ausgegangen werden. Aber Vorsicht, unter dem Begriff Energiekennzahl wird manchmal auch der Heiz-Endenergiebedarf anstelle des Heiz-Nutzenergiebedarfs verwendet.

Heizlast:

Die Heizlast ist normalerweise die Wärmeverlustleistung, die bei Normaußentemperatur entsteht. Sie ergibt sich als Summe der Transmissions- und Lüftungs- oder Zuschlagsheizlast (Haas, 2006, Kap. 4).

Normaußentemperatur:

Die Normaußentemperatur ist definitionsgemäß der niedrigste 2-Tages-Mittelwert der Lufttemperatur, der innerhalb von 20 Jahren zehnmal erreicht oder unterschritten wurde (Haas, 2006, Kap. 2.4).

LEK-Wert:

Der LEK¹-Wert kennzeichnet die Wärmeschutzqualität von Gebäuden (Haas, 2006, Kap. 6.7) und (Stoiber, 2007c). Er berechnet sich unter Berücksichtigung der Gebäudegeometrie. Der Nachteil bei Verwendung dieses Wertes zur Beurteilung der Wärmeschutzqualität liegt darin, dass sowohl solare Gewinne als auch die Lüftungsverluste keine Beachtung finden. Laut Stoiber (2007c) weisen Niedrigenergiehäuser in etwa LEK-Werte kleiner 20 und Passivhäuser kleiner 10 auf.

2.2.2 Energetische Begriffe

KEA:

Die Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) folgt der VDI-Richtlinie 4600. Der KEA gibt an, wie viel primärenergetisch bewerteter Energieaufwand nötig ist, um ein Produkt (Gut oder eine Dienstleistung) herzustellen, zu nutzen und zu entsorgen. Er berechnet somit folgendermaßen (Corradini, Hutter und Köhler, 1999, Kap.2.2):

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (2-4)$$

- KEA_H ... *Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung*
 KEA_N ... *Kumulierter Energieaufwand für die Nutzung*
 KEA_E ... *Kumulierter Energieaufwand für die Entsorgung*

Der KEA_H beinhaltet neben den primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen für die Herstellung selbst, jene, die für die Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung von Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffen und Betriebsmittel notwendig sind. Außerdem werden die notwendigen Transportaufwendungen mitberücksichtigt.

Der KEA_N entsteht durch Summation des Betriebsenergieverbrauchs, den primärenergetisch bewerteten Aufwendungen für die Herstellung und Entsorgung von Ersatzteilen, Betriebsstoffen, Hilfsstoffen und Betriebsmittel, die für den Betrieb und für die Wartung erforderlich sind. Außerdem sind auch die entsprechenden Energieaufwendungen für den Transport zu berücksichtigen.

Der KEA_E beinhaltet die primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen die für die Entsorgung des Gegenstandes selbst (bzw. Teilen davon) notwendig sind. Außerdem werden, wie beim KEA_N , die primärenergetisch bewerteten Aufwendungen für die Herstellung und Entsorgung von Betriebsstoffen, Hilfsstoffen und Betriebsmittel, die jetzt allerdings für die Entsorgung notwendig sind, berücksichtigt. Wiederum sind die entsprechenden Energieaufwendungen für den Transport einzuschließen.

Generell kann bei der Entsorgung zwischen funktionserhaltendem-, stofflichen- und energetischen (thermischen) Recycling, sowie Deponierung unterschieden werden. Wie der Name der

¹ Line of European k-values

„funktionserhaltenden Wiederverwertung“ schon sagt, werden damit Produkte oder Komponenten davon wiederverwendet. Dies ist in der Praxis aber häufig mit Schwierigkeiten verbunden. Beim „stofflichen Recycling“ müssen die Produkte zuerst soweit als möglich in die stofflichen Komponenten zerlegt (meist durch Shredderung) und getrennt werden. Diese können dann soweit möglich wiederverwertet werden (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, Kap. 7.1).

Bei der thermischen Verwertung entstehen Gutschriften in der Höhe des entsprechenden Heizwertes. Aber auch für die Stoffe die wieder- bzw. weiterverwendet werden, wird der Heizwert gutgeschrieben (Schwaiger, 1999, Kap. 3.2).

Interessant ist in diesem Zusammenhang, wie der Heizwert z.B. von Metallen entsteht und wie sich die Wiederverwertung (Verwendung von Sekundär-Metallen) auf den KEA auswirkt. Ist das Erz noch im Berg, wird der Heizwert mit Null angenommen, da die Stoffe praktisch vollkommen oxidiert sind. Durch den Abbau und die anschließende Verarbeitung „entsteht“ somit erst der Heizwert der Metalle. Werden diese Metalle nach der Nutzungsdauer wiederverwertet, gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie deren Heizwert weiter berücksichtigt wird. Die eine Möglichkeit ist, dass der Heizwert Null gesetzt wird, wodurch der KEA des Sekundär-Aluminiums nur aus den vorgelagerten Prozessen (z.B. shreddern, Transport...) entsteht. Die andere Möglichkeit ist, dass wegen der Wiederverwertung der Heizwert dem Primär-Aluminium wieder abgezogen wird (Corradini & Köhler, 1999, Kap. 2).

Eine andere mögliche Aufteilung des KEAs entsteht durch Unterscheidung des kumulierten, nichtenergetischen Aufwandes (KNA) und des kumulierten Prozessenergieaufwandes (KPA). Der KNA entspricht dem Heizwert aller Einsatzstoffe, die nicht als Energieträger genutzt werden. Somit gilt $KEA = KNA + KPA$ (Corradini & Köhler, 1999, S.144).

Mitunter kann es nützlich sein von der Definition des KEA laut VDI 4600 abzuweichen und auf den kumulierten regenerativen Energieaufwand (KRA) bzw. den kumulierten nichtregenerativen Energieaufwand (KNRA) überzugehen. Diese sind jeweils der Teil des KEA, der aus der Summe aller regenerativen Energieaufwendungen respektive der nichtregenerativen Energieaufwendungen besteht. Somit gilt $KEA = KRA + KNRA$. (Dreier, 1999, S.3)

KEV:

Der kumulierte Energieverbrauch (KEV) ist die Summe aller Primärenergien, die zur Herstellung und Nutzung eines Produktes benötigt wird, jedoch ohne die stofflich genutzten Energieträger für Bauzwecke (also ohne Holz zum Hausbau, Erdöl für verwendete Kunststoffe...). Der Energieaufwand für die Entsorgung ist auch nicht Teil des KEV (Dreier, 1999, S.3).

Graue Energie:

Grundsätzlich wird durch den Begriff der grauen Energie jene Energie definiert, die zur Herstellung, zum Transport und zur Entsorgung von Produkten (oder Dienstleistungen) benötigt wird. Dabei werden alle Vorprodukte mitberücksichtigt (Schriefl, 2007, Kap. 5.3.3.1).

Bereitstellungsnutzungsgrad:

Der Bereitstellungsnutzungsgrad dient dazu, um aus dem Energieinhalt des Brennstoffes am Einsatzort auf den gesamten Primärenergiebedarf (inklusive Energieinhalt des Brennstoffes selbst) der zur Bereitstellung nötig ist, schließen zu können (oder umgekehrt). Dieser ist in der VDI-Richtlinie 4600 definiert (Corradini, Hutter und Köhler, 1999, Kap. 2.3).

Der Bereitstellungsnutzungsgrad für die Bereitstellung der Brennstoffe (bzw. nichtenergetisch genutzte Energieträger oder andere Stoffe) wird folgendermaßen definiert (Schwaiger, 1996, Kap.2.3):

$$b_B = \frac{W_{in}}{KEA_B} \quad (2-5)$$

W_{in} ... Energieinhalt des Brennstoffes am Einsatzort
 KEA_B ... Primärenergieinhalt des Energieträgers inklusive kumulierten Energieaufwand für dessen Bereitstellung

Der Energieinhalt des Brennstoffes am Einsatzort (W_{in}) entspricht bei fossilen Energieträgern allgemein anerkannt dem Heizwert. Zur Veranschaulichung der Energieflüsse beachte man die Übersicht in Abbildung 2-6. Bei $W_{v,B}$ handelt es sich um stoffliche Verluste, die z.B. bei der Förderung anfallen. Der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung des Brennstoffes (KEA_B) enthält neben dem Primärenergieinhalt des Energieträgers sämtliche Energieaufwendungen, die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Förderanlagen benötigt werden.

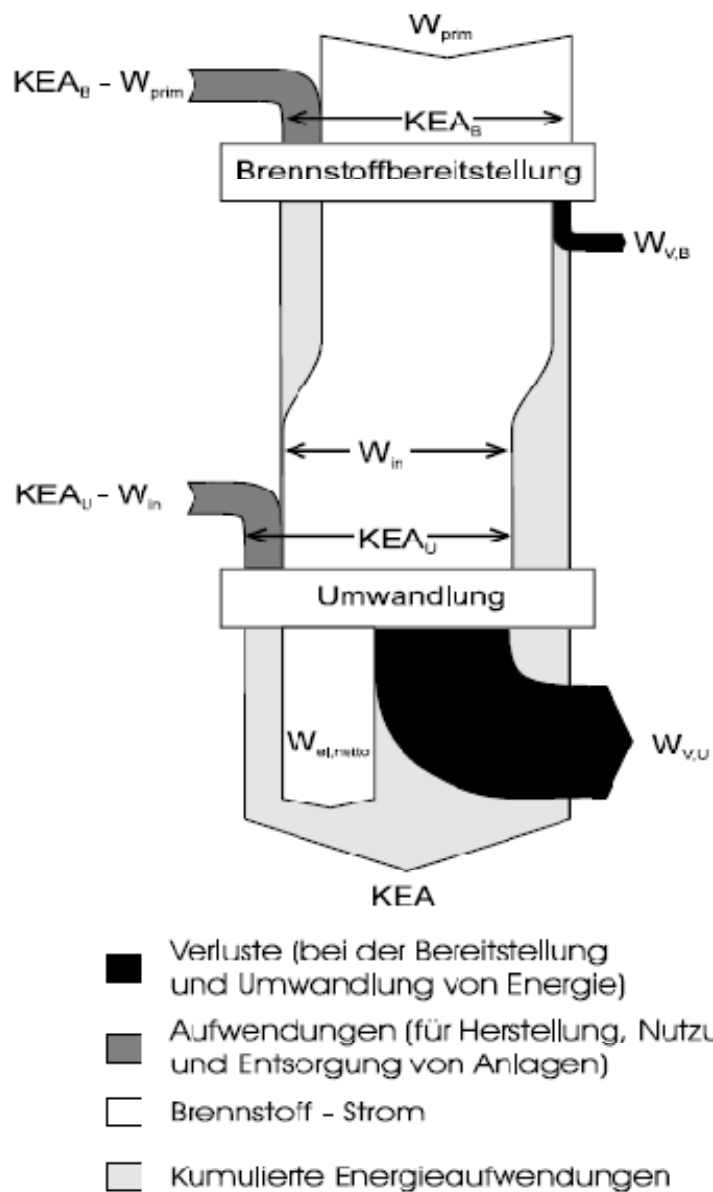


Abbildung 2-6: Übersicht zum Bereitstellungsnutzungsgrad (Quelle: (Schwaiger, 1996, S.9)).

Der Bereitstellungsnutzungsgrad für die Umwandlung der Brennstoffe in elektrische Energie ist folgendermaßen, wie aus Abbildung 2-6 leicht nachvollzogen werden kann, definiert:

$$b_U = \frac{W_{el,netto}}{KEA_U} \quad (2-6)$$

$W_{el,netto}$... Elektrische Energie die aus dem Umwandlungsprozess hervorgeht
 KEA_U ... Energieinhalt des Brennstoffes inklusive kumulierten Energieaufwand für das Kraftwerk

Der kumulierte Energieaufwand der Umwandlung (KEA_U) enthält neben dem Energieinhalt des bereitgestellten Brennstoffes sämtliche Energieaufwendungen, die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Umwandlungsanlage (Kraftwerk) benötigt werden.

Werden nun sämtliche Energieströme von der Brennstoffbereitstellung und Umwandlung betrachtet, ergibt sich der Bereitstellungsnutzungsgrad für elektrische Energie folgendermaßen:

$$b_{el} = \frac{W_{el,netto}}{KEA_B + (KEA_U - W_{in})} = \frac{W_{el,netto}}{KEA} \quad (2-7)$$

KEA ... Kumulierter Energieaufwand für die Brennstoffbereitstellung und Umwandlung

Um eine primärenergetische Bewertung der elektrischen Energie, die aus nichtfossilen Energieträgern (regenerative Energien, Abwärme, Müll, Biomasse oder nukleare Brennstoffe) gewonnen wird, durchzuführen, gibt es verschiedene Methoden, deren Eignung abhängig von der Zielsetzung ist.

- Substitutionsmethode:
 Geht wie der Name schon sagt davon aus, dass durch die Umwandlung von nichtfossilen Energieträgern in elektrische Energie ein bestimmter Teil an fossilen Energieträgern, der ansonsten zur Bereitstellung der gleichen Menge an elektrischer Energie benötigt werden würde, ersetzt, also substituiert wird. Dabei wird (oder wurde, weil diese Methode heute nicht mehr häufig angewendet wird) der mittlere Nutzungsgrad aus der in der betrachteten Region befindlichen thermischen Kraftwerke gebildet.
- Äquivalenz-Methode:
 Dabei werden wiederum zwei Ansätze unterschieden, die sich allerdings grundsätzlich unterscheiden:
 - Ansatz 1: Definiert eine energieäquivalente Umwandlung, also dass z.B. 1 kWh elektrischer Energie 3600kJ entsprechen. Dies entspricht somit einem Wirkungsgrad von 100%.
 - Ansatz 2: Dabei wird der physikalischen Qualität der Energieumwandlung Rechnung getragen. Beispielsweise ist die Grundlage für die Bewertung eines Wasserkraftwerkes die potentielle Energie, die sich aus der Fallhöhe ergibt. Dabei ergeben sich in etwa 80 – 85% Nutzungsgrad für die Strombereitstellung aus Wasserkraft. Bei Windkraftanlagen sind dies

21%, bei Photovoltaik-Anlagen 8% und bei Kernkraftwerken 33% (Schwaiger, 1996).

- Wirkungsgradverfahren:
Entspricht weitgehend dem 1. Ansatz der Äquivalenz-Methode. Es wird somit die Stromerzeugung aus erneuerbaren Umweltenergien (Wasserkraft, Windkraft, ...) mit einem Wirkungsgrad von 100% angesetzt. Dies gilt nicht für erneuerbare Brennstoffe (Biomasse).
- Ressourcenmethode:
Diese Methode berücksichtigt die Ausbeute an fossilen Ressourcen die zur Bereitstellung von Sekundärenergie notwendig sind. Daraus ergibt sich, dass regenerative Umweltenergien, Biomasse, Müll und Abwärme mit 0% und nukleare Brennstoffe mit 33% bewertet werden.

Nutzungsgrad für die Bereitstellung von Brennstoffen oder die Umwandlung in elektrischer Energie:

Diese müssen von den Bereitstellungsnutzungsgraden (b_B , b_U , b_{el}) unterschieden werden, da nun die Aufwendungen für die Anlagen selbst nicht berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich mit Zuhilfenahme der Abbildung 2-6 (Schwaiger, 1996, Kap. 2.3):

$$g_B = \frac{W_{in}}{W_{prim}} \quad (2-8)$$

W_{prim} ... Primärenergieinhalt

$$g_B = \frac{W_{el,netto}}{W_{in}} \quad (2-9)$$

2.2.3 Bezugsflächen

Wie schon erwähnt, werden bei der Angabe von Kennwerten oft unterschiedliche Bezugsgrößen verwendet. Dazu folgt nun ein kurzer Überblick:

Die genaue Definition der Wohnfläche (WF) ist international uneinheitlich. Grundsätzlich besteht sie aus den betretbaren (oder möblierbaren) Flächen (außer Abstellflächen). Es werden somit auch Flächen außerhalb der thermischen Hülle (z.B. Balkone) miteinbezogen, was hingegen bei der beheizten Wohnfläche (behWF) nicht der Fall ist. Letztere entspricht in etwa auch der treated floor area (TFA), welche im Projekt CEPHEUS eingeführt wurde. Die Bruttogeschossfläche (BGF) enthält zusätzlich zur Wohnfläche auch noch die Querschnitte sowohl der Innen- als auch der Außenwände. Die Nutzfläche, welche, wenn nicht gesondert erwähnt, in den weiteren Betrachtungen verwendet wird, berechnet sich aus dem Bruttovolumen durch $A_N = 0,32 \text{m}^{-1} \cdot V_{\text{Brutto}}$. Dies ist somit ein rein rechnerischer Wert und wird in der ENEV verwendet (Feist, 2008).

2.3 Bedeutung der Heizung und Warmwasserbereitung in Österreich

In diesem Kapitel erfolgt zuerst ein Überblick über die Energieversorgung Österreichs zum Zwecke der Raumheizung/Klimaanlagen/Warmwasserbereitung. Aufgrund der Aktualität des Themas Klimawandel/Klimaschutz wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die Treibhausgasemission im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Raumwärme gegeben. Zu weiteren Informationen, vor allem zu Ozonvorläuferstoffen, Eutrophierung und Staub wird auf „Emissionstrends 1990-2005“ (Anderl et al., 2007) verwiesen.

2.3.1 Energieeinsatz

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs der verschiedenen Sektoren, wird in Abbildung 2-7 dargestellt, wobei für diese Arbeit vor allem Raumheizung/Klimaanlagen/Warmwasser von Interesse ist.

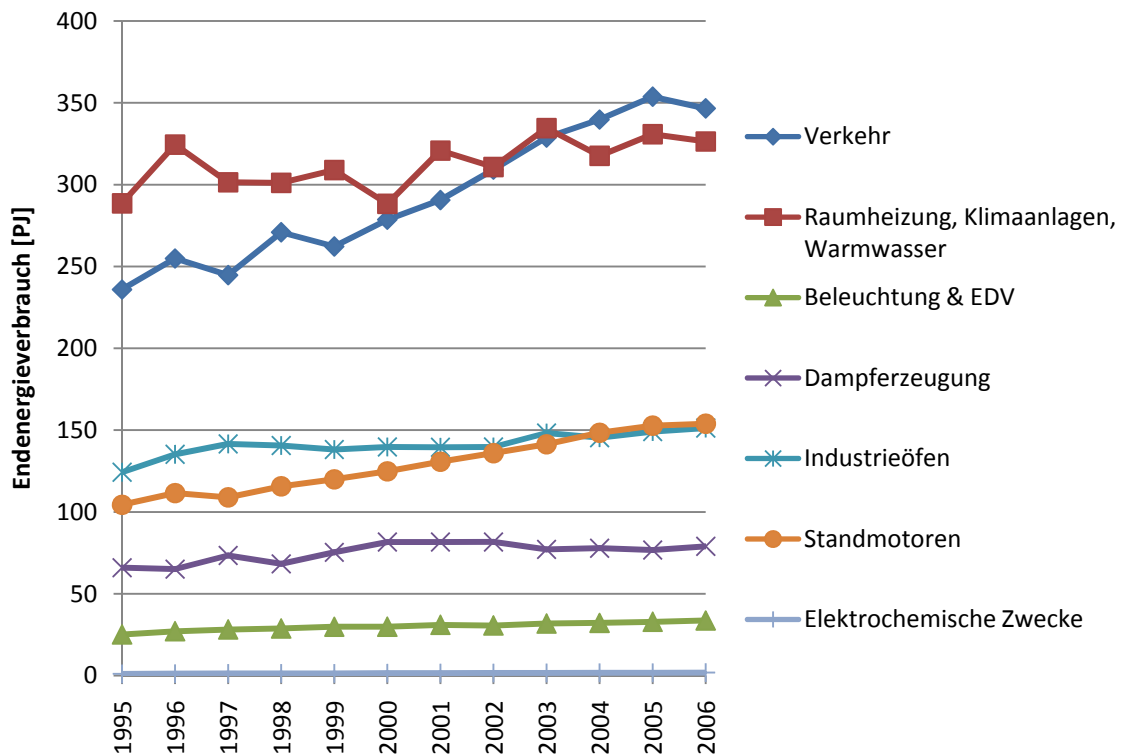


Abbildung 2-7: Entwicklung des Endenergieverbrauchs Österreichs, aufgeschlüsselt nach Sektoren (Daten ausgehend von (Statistik Austria, 2008), eigene Darstellung).

In Österreich betrug der Endenergieverbrauch im Jahr 2006 etwa 1093PJ. Mit rund 326PJ werden knapp 30% davon für den Bereich Raumheizung, Klimaanlage und Warmwasser benötigt. Somit ist dieser gleich nach dem Verkehr der zweitgrößte Verbrauchssektor. Etwa $\frac{1}{4}$ der eingesetzten Endenergie geht bei der Umwandlung in Nutzenergie zum Zwecke der Raumheizung, Klimatisierung und Warmwasserbereitung verloren (siehe Abbildung 2-8) (Daten ausgehend von (Austrian Energy Agency [AEA], 2007a) und (Statistik Austria, 2008)).

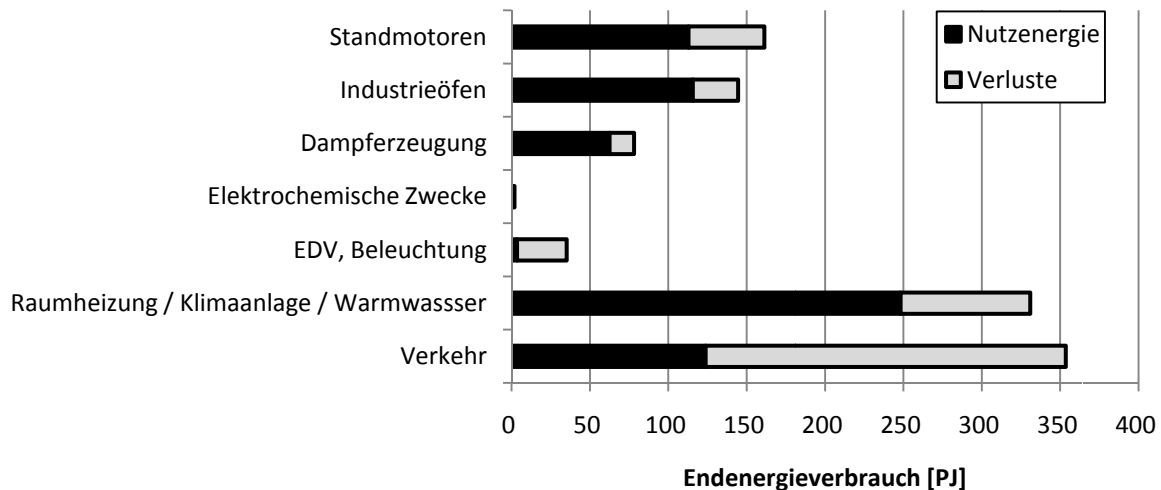


Abbildung 2-8: Gliederung des Endenergieverbrauchs in Nutzkategorien in Österreich 2005 (Daten von (AEA, 2007a) nach Statistik Austria: Nutzenergieanalyse 2005, eigene Darstellung).

Ein Großteil der für Raumheizung, Warmwasser und dem Betrieb von Klimaanlage benötigten Energie wird durch fossile Ressourcen gedeckt, wobei Gas und Öl jeweils etwa 28% ausmachen. Knapp 24% werden aus erneuerbaren Energien und knapp 14% durch Fernwärme bereitgestellt. In Kapitel 4.3 wird gezeigt, dass etwa 90% der Fernwärme¹ und rund 53% der elektrischen Energie durch fossile Energieträger gedeckt werden. Daraus ergibt sich ein Anteil von rund 73% fossiler Energieträger zum Zwecke der Raumheizung, Warmwasserbereitung und Klimatisierung (siehe Abbildung 2-9).

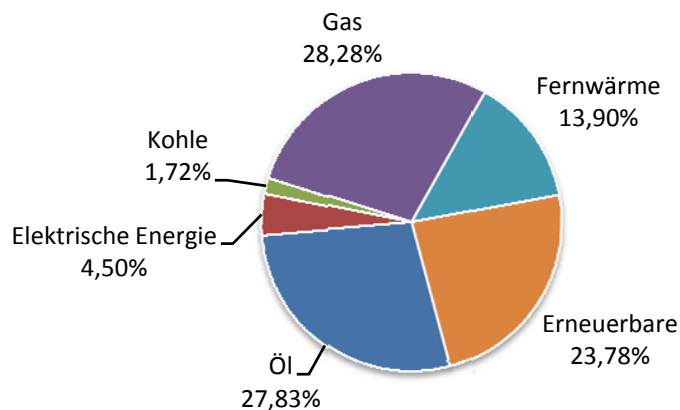


Abbildung 2-9: Endenergieeinsatz für Raumheizung, Warmwasser und Klimaanlage, aufgeschlüsselt nach Energieträgern für Österreich, 2005 (Daten nach (AEA, 2007a), eigene Darstellung).

Wenn man nun den gesamten Energieverbrauch von Haushalten betrachtet, sieht man aus Abbildung 2-10, dass im Durchschnitt 85% für Raumwärme und Warmwasser aufgewendet werden müssen. Daraus kann man schon das große Einsparpotential, das durch die Verringerung des Heizwärmebedarfs möglich ist, erkennen.

¹ Unter der Annahme von Stromimporten aus nicht regenerativen Energieträgern.

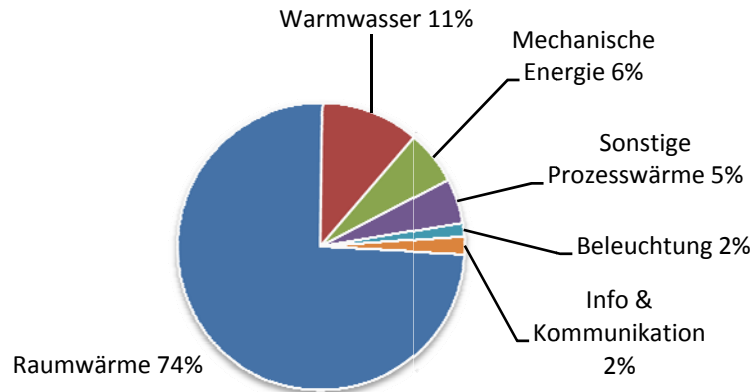


Abbildung 2-10: Aufteilung des durchschnittlichen Energieverbrauchs in Haushalten für Deutschland 2003 (Daten aus (Gross, 2005), eigene Darstellung).

2.3.2 Emissionen

Abbildung 2-13 zeigt die Abweichung der Jahrestemperaturen vom Jahre 1786 bis 2006, gegenüber dem Mittel. In Österreich kam es dabei in den letzten 150 Jahren zu einem Anstieg von etwa 1,6°C. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% sind die anthropogenen Treibhausgase am Klimawandel verantwortlich, wobei CO₂ den überwiegenden Anteil ausmacht (Umweltbundesamt, 2007, S.68; Anderl et al., 2007, S.17).

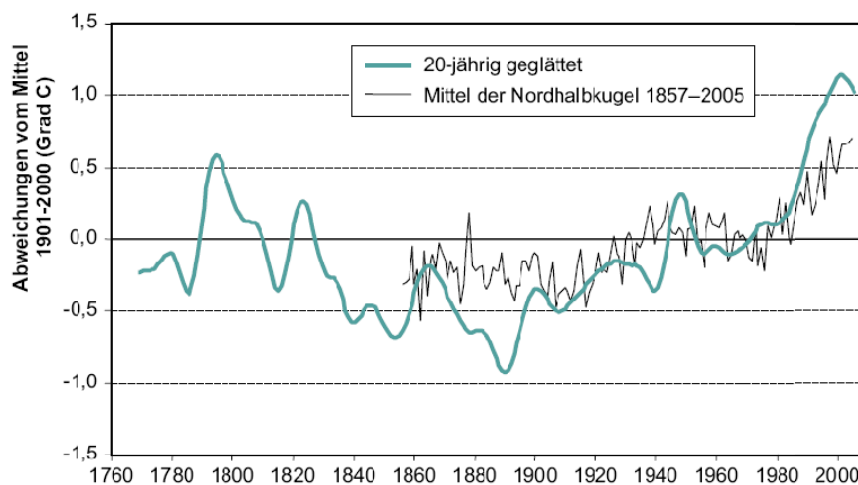


Abbildung 2-11: Abweichungen der Jahrestemperaturen Österreichs vom Mittel in den Jahren 1786-2006 (Quelle: (Umweltbundesamt, 2007, S.68)).

In Abbildung 2-12 wird gezeigt, wie sich die Treibhausgasemissionen in Österreich in den Jahren 1990 bis 2005 entwickelt haben. Zu den Verursachern der Emissionen im Sektor Kleinverbrauch gehören neben der Verbrennung in Haushalten, Kleingewerben, öffentlichen Gebäuden, der Land und Forstwirtschaft auch Geräte wie Rasenmäher oder Traktoren. Der Anteil an den verursachten Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄, N₂O) dieses Sektors betrug im Jahr 2005 etwa 16,7%. Mit 93,3 Mio. t CO₂-Äquivalent Emissionen im Jahr 2005, liegen diese etwa 36% über dem im Kyoto-Protokoll vereinbarten Wert, welcher in den Jahren 2008-2012 um 13% gegenüber dem Wert im Jahr 1990 gesenkt werden soll (68,8 Mio. t CO₂-Äquivalent) (Umweltbundesamt, 2007, Kap. 4; Anderl et al., 2007, Kap. 1.5, 2, 8.2; Gugele, Lorenz-Meyer, Pazdernik & Wappel, 2007, Kap. 2.4).

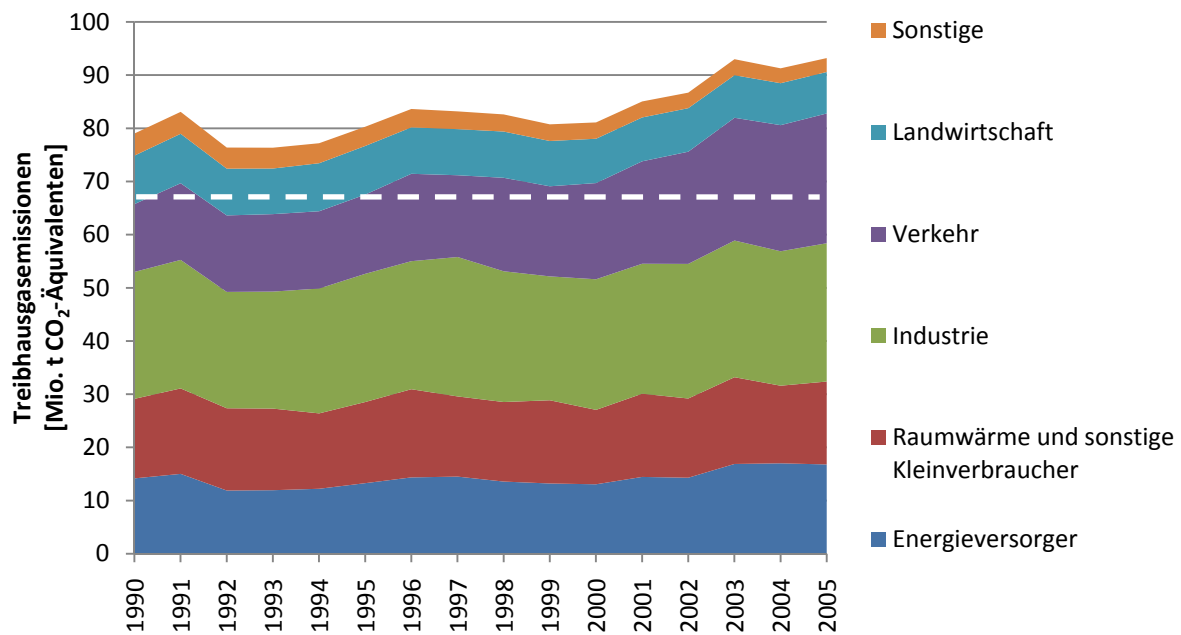


Abbildung 2-12: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Österreich 1990-2005. Die strichlierte Linie kennzeichnet jenen Wert, auf den zwischen 2008-2012 die Treibhausgase gesenkt werden sollen (Daten nach (Anderl et al., 2007, S.114, Emissionstabelle 5), eigene Darstellung).

In Abbildung 2-13 wird der Sektor Raumwärme und sonstige Kleinverbraucher nochmal separat dargestellt. Etwa 96% davon sind CO₂-Emissionen, welche durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen. Die Emissionen bleiben in diesem Zeitraum annähernd konstant, wobei 62% aus dem Jahre 2005 durch private Haushalte, hauptsächlich zum Zwecke der Raumheizung, verursacht werden. Zusätzlich wird der in der Klimastrategie 2007 festgelegte Wert in diesem Sektor für 2010 dargestellt, wobei die Treibhausgasemissionen in diesem Sektor um 20,4% gegenüber 1990, auf 11,9 Mio. t CO₂-Äquivalent, gesenkt werden sollen (Gugele, Lorenz-Meyer, Pazdernik & Wappel, 2007, Kap. 1.4, 2.4).

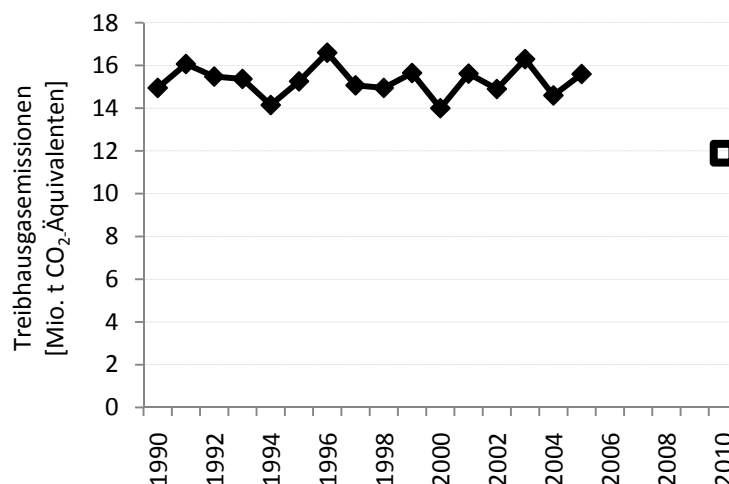


Abbildung 2-13: Entwicklung der Treibhausgasemissionen, im Sektor Raumwärme und sonstige Kleinverbraucher. Ziel im Jahre 2010 eingezeichnet, dass nach Klimastrategie 2007 erreicht werden soll (Daten nach (Anderl et al., 2007, S.114, Emissionstabelle 5; Gugele, Lorenz-Meyer, Pazdernik & Wappel, 2007, S.12, Tabelle 1), eigene Darstellung).

Abbildung 2-14 zeigt die starke Abhängigkeit der CO₂-Emissionen in diesem Sektor von den Heizgradtagen.

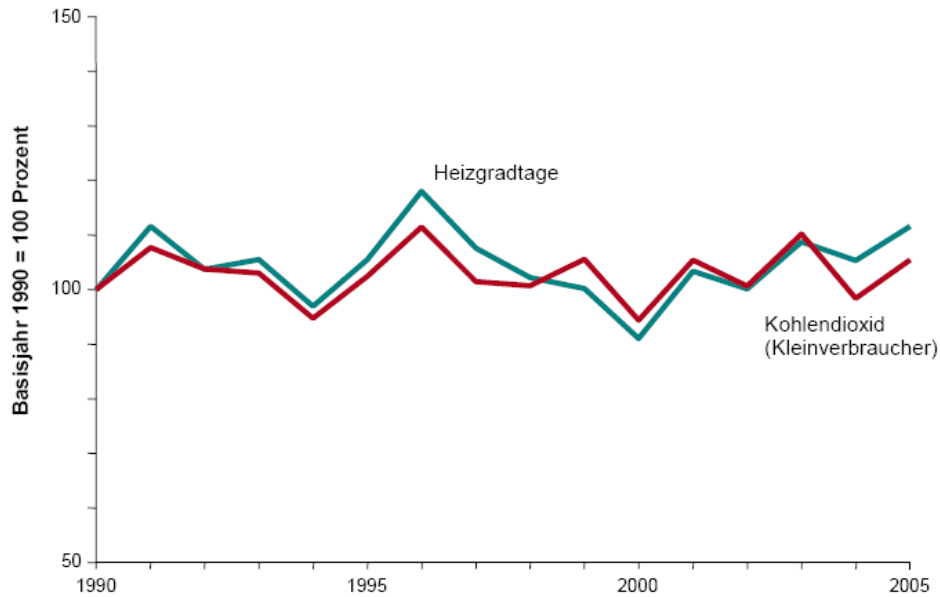


Abbildung 2-14: Darstellung der Heizgradtage in den Jahren 1990-2005 und der CO₂-Emissionen gegenüber 1990 (Quelle: (Gugele, Lorenz-Meyer, Pazdernik & Wappel, 2007, S.47)).

Abbildung 2-15 stellt nun die Entwicklung der CO₂-Emissionen, welche durch die Raumwärmebereitstellung verursacht wurden, dar. Gegenüber dem Jahr 1990 sind diese um etwa 9,1% gesunken. Dies konnte, trotz gestiegenen Wohnungsflächen und mehr Haushalten, u.a. durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien, Effizienzsteigerungen und Energiesparmaßnahmen erreicht werden.

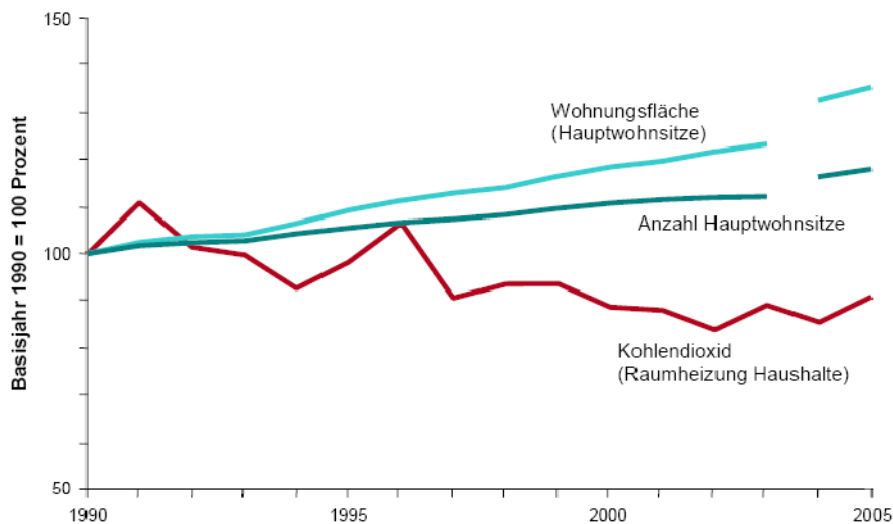


Abbildung 2-15: Entwicklung der Wohnungsfläche, der Anzahl der Hauptwohnsitze und der CO₂-Emissionen, welche durch die Raumheizung von Haushalten, gegenüber 1990, verursacht wurden (Quelle: (Gugele, Lorenz-Meyer, Pazdernik & Wappel, 2007, S.48)).

2.4 Wohnhäuser mit niedrigem Energiebedarf

In diesem Kapitel erfolgt zuerst eine Diskussion verschiedener Gebäudestandards wie dem Niedrigenergiehaus und dem Passivhaus. Danach wird auf bautechnische und nutzerabhängige Einflussparameter eingegangen, welche den Energiebedarf der Gebäude mitbestimmen.

2.4.1 Beschreibung verschiedener Gebäudetypen (Energiestandards)

Je nach Heizwärmebedarf unterscheidet man verschiedene Energiestandards. Die Wichtigsten dieser werden im Folgenden näher betrachtet. Im Allgemeinen sind folgenden Begriffe nicht einheitlich definiert oder genormt und werden somit oft unterschiedlich angewendet. Die folgenden Erklärungen dürfen somit nicht als allgemein gültig angesehen werden. Es wurde zwar versucht, die üblichen und großteils verwendeten Standards wiederzugeben, allerdings muss im konkreten Fall entsprechend nachgelesen werden. Außerdem gibt es auch noch länderspezifische Unterschiede.

In Abbildung 2-16 werden die nutzenergiebezogenen Raumheizkennzahlen nach Baualterklasse zusammengestellt. Die Datenreihen bis inklusive „ab 1991“ gelten für Einfamilienhäuser. Mehrfamilienhäuser benötigen, je nach Größe, nur etwa 53-68% davon (BMWA, 2003, S.118). Die Werte für Niedrigenergiehäuser und Passivhäuser stellen typische Energiekennzahlen dar.

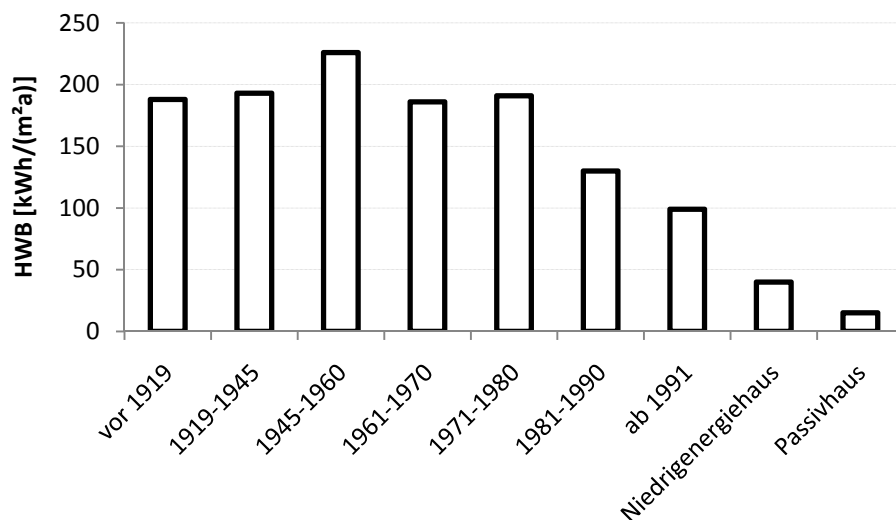


Abbildung 2-16: Heizwärmebedarf nach Baualterklassen (Daten der Kategorien bis „ab 1991“ aus (BMWA, 2003, S.118), für das Niedrigenergie und Passivhaus siehe Tabelle 2-3).

Die Begriffe Niedrigenergiehaus, Niedrigstenergiehaus und Passivhaus sind z.B. in Oberösterreich laut O.Ö. Energiesparverband [OÖ ESV] (2007a) gesetzlich definierte Energiestandards für Eigenheime.

Energiesparhaus:

Als O.Ö. Energiesparhaus bezeichnet man z.B. Wohnhäuser, deren spezifischer Heizwärmebedarf (=Energiekennzahl) kleiner als 65 kWh/(m²a) ist (OÖ ESV, .2007b).

Niedrigenergiehaus:

Ein einheitlicher Niedrigenergiehausstandard ist nicht definiert. Oft wird er laut AEA (2007d) heute aber mit einem maximalem Heizwärmebedarf von 40kWh/(m²a) festgelegt. Das O.Ö. Niedrigenergiehaus weist laut Definition in (Stoiber, 2007a) und (OÖ ESV, 2007a) einen spe-

zifischen Heizwärmebedarf von weniger als 50 kWh/(m²a) auf. Der Endenergiebedarf ist kleiner 70 kWh/(m²a) und der Primärenergiebedarf kleiner 160 kWh/(m²a). NEH können auch mit kontrollierten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet sein (wenn auch nicht üblich), welche somit nicht nur eine „Eigenheit“ von Passivhäusern sind (Stoiber, 2007a). Im Gegensatz zu PH können diese aber nicht auf ein separates Heizsystem verzichten.

Niedrigstenergiehaus:

Mit der „Wohnbauförderung neu“ (2005) wurde in Oberösterreich der Begriff Niedrigstenergiehaus eingeführt (OÖ ESV, 2007d). Ein solches Haus ist durch einen spezifischen Heizwärmebedarf von maximal 30 kWh/(m²a) definiert (OÖ ESV, 2007a).

Passivhaus:

Passivhäuser sind als konsequente Weiterentwicklung der NEH zu sehen. Der Name Passivhaus kommt daher, weil die Wärme „passiv“ durch die Eigenwärme der Personen, durch die Wärmeabgabe von Geräten und durch die eingestrahlte Sonnenenergie durch die Fenster bereitgestellt wird. Außer der Lüftungsanlage mit integrierter Nachheizung ist somit meist kein weiteres Heizsystem erforderlich. Die beiden Grundprinzipien, auf denen das Passivhauskonzept beruht, sind, zum Einen Wärmeverluste so weit als möglich zu vermeiden und zum Anderen die freien Wärmegevinne zu optimieren. Die Transmissions-Heizlast muss kleiner als 10 W/m² sein (Feist, 2007c), damit die Frischluft genügend Wärme transportieren kann. Dadurch kann das Gebäude in allen Jahreszeiten ohne separates Heiz- bzw. Klimatisierungssystem betrieben werden.

Beim Passivhausstandard gilt ein maximaler Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a). Allerdings sind die Berechnungsverfahren für den Heizwärmebedarf, z.B. um regionale Förderungen zu erhalten, oft unterschiedlich. Es kann somit sein, dass Passivhausförderungen vergeben werden, obwohl das Haus gar nicht dem Passivhausstandard entspricht. Laut (OÖ ESV, 2007a) und (Lang, 2006b) wird in Oberösterreich und Vorarlberg diesem Umstand Rechnung getragen und die Grenze des Passivhausstandards auf 10 kWh/(m²a) gesetzt. In Wien gilt HWB < 12,75 kWh/(m²a) (Lang, 2006b). Außerdem muss bei Passivhäusern der gesamte Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom unter 42 kWh/(m²a) liegen und der Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom unter 120 kWh/(m²a) (Lang, 2006b).

Bei einem Passivhaus ist eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung unverzichtbar. Ohne Wärmerückgewinnung würde der zusätzliche Heizenergiebedarf, der durch die „verschenkte“ Abluftwärme verursacht wird, unakzeptabel. Mehr als 75% der Wärme gibt die Abluft durch den Wärmetauscher wieder an die einströmende Frischluft ab. Durch reine Abluftanlagen beträgt der Wärmeverlust durch die Lüftung etwa 35 kWh/(m²a) (Feist, 2007b). Dieser Wert ist allerdings nicht als repräsentativ zu erachten, da an einer anderen Stelle¹ wiederum von nur 24kWh/(m²a) die Rede. Auch nach persönlichen Informationen² liegen die Wärmeverluste eher bei 20 bis maximal 30 kWh/(m²a). Bei einem Passivhaus, das maximal 10 bzw. 15 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf aufweisen soll, sind diese Verluste somit nicht zu tolerieren. Lediglich ein „Passivhaus“ wurde von Lang (2004, S.78) dokumentiert, in dem der Frischluftbedarf durch reine Fensterlüftung gedeckt wird, was allerdings aufgrund der dadurch bedingten Lüftungsverluste in einer Heizlast von etwa 35 W/m² resultiert und es sich daher eigentlich um kein Passivhaus mehr handelt.

¹ <http://www.ig-passivhaus.de/infos/passivhaus.htm>; Passivhaus Institut Darmstadt, Dr. Wolfgang Feist.

² Dr. Dipl.Ing. Lukas Kranzl (Energy Economics Group, TU Wien) (März, 2008).

Feist (2007d) gibt drei Forderungen an, die ein Wohnhaus erfüllen muss, damit es als Passivhaus bezeichnet werden kann:

- 1) „Ein behagliches Innenklima ist ohne separates Heizsystem und ohne Klimaanlage erreichbar: Dazu muss der Jahresheizwärmebedarf nach Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) kleiner als 15 kWh/(m²a) sein“ (Feist, 2007d).
- 2) „Die Behaglichkeitskriterien müssen in jedem Wohnraum im Winter wie im Sommer erfüllt sein“ (Feist, 2007d).
- 3) „Der spezifische Primärenergieeinsatz für alle Haushaltsanwendungen (Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom) zusammen darf nicht höher sein als 120 kWh/(m²a). Die Berechnung erfolgt nach PHPP“ (Feist, 2007d).

Ein Vorteil des Passivhaus-Energiestandards ist, dass neben den natürlich deutlich geringeren Heizkosten durch die hervorragende Wärmedämmung auch eine Komfortsteigerung durch höhere Wandtemperaturen im Haus erreicht wird. Aufgrund dessen und der Vermeidung von Wärmebrücken, wird das Risiko zur kalten Jahreszeit von Luftfeuchte Kondensation und damit Schimmelbildung sehr verkleinert. Auch die kontrollierte Wohnraumlüftung trägt ihren Teil dazu bei. Wird ein kontrolliertes Belüftungssystem eingesetzt, hat dies großen Einfluss auf die Luftqualität im Gebäude, weil diese weniger Staub und bei Verwendung entsprechender Filter auch weniger Pollen und dgl. enthält. Jedoch gilt es die Problematik der möglicherweise zu geringen Luftfeuchtigkeit im Haus zu beachten.

Österreich gilt in der Forschung und Umsetzung von Passivhäusern als Nummer 1. Es existiert die pro Kopf größte Passivhausanzahl der Welt (Bach et al., 2007, S.28).

Tabelle 2-3: Typische Energiekennzahlen (Daten nach (AEA, 2007d)).

Ziel	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Bestand <1980
HWB	≤ 15 kWh/(m ² a)	≤ 40 kWh/(m ² a)	150-250 kWh/(m ² a)
Endenergiebedarf	≤ 42 kWh/(m ² a)	≤ 70 kWh/(m ² a)	
Primärenergiebedarf	≤ 120 kWh/(m ² a)	≤ 160 kWh/(m ² a)	

Abbildung 2-17 zeigt Energiebilanzen von Wohnhäusern mit unterschiedlichen Energie-Standards. Dieses Diagramm soll an dieser Stelle nur dem grundsätzlichen Vergleich dienen.

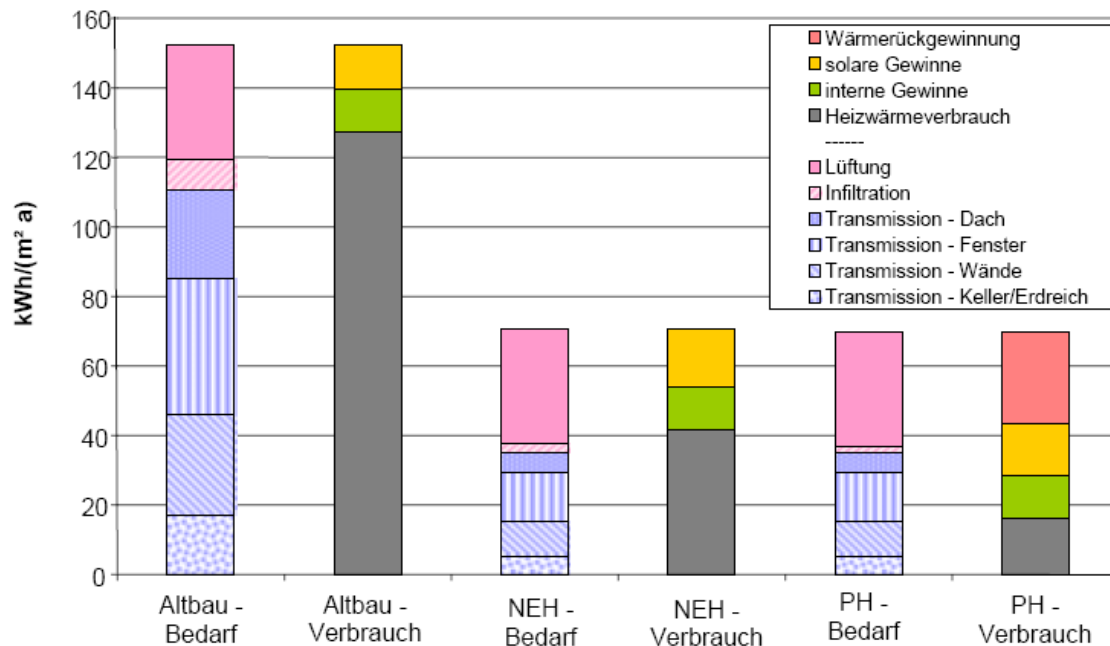


Abbildung 2-17: Energiebilanzen für verschiedene Energiestandards (Quelle: (Streicher et al, 2004, Kap. 1.5)).

Das Diagramm zeigt jeweils für einen Altbau, ein NEH und ein PH den Wärmebedarf und die Wärmeverluste. Der Wärmebedarf setzt sich aus den Transmissions- und den Lüftungsverlusten zusammen (die Infiltrationsverluste geben, wie schon erwähnt, die ungewollten Lüftungsverluste an). Das NEH und das PH weisen in diesem Vergleich die gleiche Qualität bei der Wärmedämmung auf, was an den gleichen Bedarfswerten zu erkennen ist. Auch die solaren und inneren Gewinne werden bei allen Varianten gleich hoch angesetzt. Man erkennt, dass der Heizwärmeverbrauch beim PH durch den Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung deutlich gesenkt werden kann (Streicher et al., 2004a, Kap. 1.5).

Null-Heizenergie-Haus:

Es ist in solchen Häusern keine Energie zum Heizen mehr notwendig. Möglich wird das meist durch große Solaranlagen und saisonale Wärmespeicher, wodurch die starke Sonneneinstrahlung im Sommer aktiv zur Gebäudeheizung genutzt wird. Die elektrische Hilfsenergie die über das Netz bezogen wird, darf einen Wert von 5 kWh/(m²a) nicht überschreiten (Erhorn, 2001).

Nullenergiehaus:

Das Nullenergiehaus ist energetisch autark. Es weißt meist, neben der thermischen Sonneneinstrahlung, eine umfangreiche Photovoltaik-Anlage auf (Wirth, 2002).

Die obige Beschreibung von Energiestandards ist nicht vollständig. Auf Begriffe wie Ultrahaus, Minergie[®]-Haus¹, Plusenergiehaus,... wird hier nicht weiter eingegangen.

Oft treten, vor allem in der Fachliteratur aus Deutschland, auch die Bezeichnungen KfW-60 und KfW-40 auf, wobei KfW für die Kreditanstalt für Wiederaufbau steht. Die Kennzahl danach gibt an, wie hoch der Primärenergiebedarf des Gebäudes in kWh/(m²a) sein darf (KfW, 2008).

Häufig werden auch die Bezeichnungen wie z.B. 30-Liter-Haus, 10-Liter-Haus oder 3-Liter-Haus verwendet. Zur überschlägigen Berechnung wird meist angenommen, dass 1 Liter

¹ Ist eine in der Schweiz geschützte Marke. Genauso wie Minergie-P[®] und Minergie-P+[®] (www.minergie.ch)

Heizöl rund 10kWh an Energie liefert und ein 3-Liter-Haus somit einen Heizenergiebedarf von 30 kWh/(m²a) aufweist.

In den später folgenden Untersuchungen ist vor allem das Spektrum von den Niedrigenergiehäusern bis zu den Passivhäusern interessant. Auf Null-Heizenergie-Häuser und Nullenergiehäuser wird nicht im Detail eingegangen.

2.4.2 Einflussparameter auf den Energieverbrauch

Wie zuvor schon erwähnt, sind die beiden Vorgehensweisen um den Energiebedarf von Gebäuden zu senken zum Einen die Verminderung der Wärmeverluste und zum anderen die Erhöhung der solaren Gewinne.

Großen Einfluss auf den Aufwand der nötig ist, um einen geringen Energieverbrauch von Wohnhäusern zu erreichen, hat auch dessen geografische Lage. Mit unterschiedlichen Außenlufttemperaturen, Sonneneinstrahlungs- und Windverhältnissen ändern sich auch die Anforderungen an das Gebäude. Daneben spielt auch die Orientierung, die Kompaktheit, die Architektur (Unterkellerung, thermische Zonierung,...), Qualität der Ausführung (Wärmebrücken u. dgl.) und das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle.

Lage und Orientierung des Gebäudes:

Um die solaren Gewinne zu optimieren kommt es vor allem auf die Lage und Ausrichtung des Gebäudes an. Faktoren wie die Einstrahldauer und Intensität der Sonne, deren Einfallswinkel und die vorhandenen Glasflächen im Gebäude sind entscheidend. Grundsätzlich sollten, falls es der Standort zulässt, Häuser nach Süden orientiert sein. Das bedeutet, dass Aufenthaltsräume wie das Wohnzimmer an der südlichen Außenwand, und Räume wie Schlafzimmer oder Sanitärräume nördlich angeordnet werden sollten, um hohe passive solare Gewinne zu realisieren. Diese werden durch entsprechend große Verglasungen an der Südseite (und kleine an der Nordseite) ermöglicht. Bei richtiger Planung führen diese aber im Sommer zu keiner Überhitzung der Räume (z.B. Abschattungen vorsehen) (Heidt, 2005, 4.2).

Kompaktheit:

Auch das Verhältnis der Fläche zum Volumen des Hauses (A/V-Verhältnis) hat erheblichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf (Heidt, 2005, 4.2).

Besonders wichtig, um den Energieverbrauch von Gebäuden zu senken, ist eine Verbesserung der Gebäudedämmung um die Transmissionsverluste zu minimieren. Dies geht mit erhöhter Luftdichtheit einher. Ab einer gewissen Grenze ist somit der aus hygienischen und bautechnischen Gründen erforderliche Mindestluftwechsel nicht mehr automatisch gegeben. Denn es ist absolut notwendig Gebäude zu lüften, um die „verbrauchte“ (also mit Feuchtigkeit, CO₂, Gerüchen... angereicherte) Luft auszutauschen. Außerdem kann Schimmelbildung an Wänden vermieden werden, wenn die Belüftung richtig vonstatten geht. Diese wird allerdings auch durch Wärmebrücken begünstigt, weil an kühleren Stellen im Innenraum die Luftfeuchte kondensieren kann. Um den Hygienischen Standard zu gewährleisten müssen minimale Luftwechselraten eingehalten werden (siehe Kapitel 2.2.1) (Streicher et al., 2004a, Kap. 1.5). Das bedeutet also, je geringer der Heizwärmebedarf wird (also auch je höher die Luftdichtheit wird), desto mehr entsteht die Notwendigkeit für ein Lüftungssystem. Passivhäuser müssen daher im Regelfall, wie schon zuvor erwähnt, mit einem solchen ausgestattet werden. Aber auch für Niedrigenergiehäuser sind Lüftungssysteme von Bedeutung.

Zusammengefasst muss man also, um die erforderliche hohe energetische Qualität der Gebäudehülle zu erreichen, eine sehr gute Dämmung, möglichst wenig Wärmebrücken, hohe Luftdichtheit und ausreichend solare Gewinne gewährleisten. Außerdem hilft dabei der richtige Standort mit Ausrichtung nach Süden und ein niedriges Oberflächen-Volumen Verhältnis des Gebäudes.

Die Anforderungen die an ein Passivhaus gestellt werden, damit die Behaglichkeitskriterien erfüllt sind, können folgendermaßen konkretisiert werden:

- Die „U-Werte opaker Außenbauteile müssen unter $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen“ (Feist, 2007d).
- Die „U-Werte von Fenstern und anderen transluzenten Bauteilen müssen unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen“ (Feist, 2007d).
- „Transluzente Flächen in West- oder Ostorientierung ($\pm 50^\circ$) sowie transluzente Flächen mit Neigungen unter 75° gegen die Horizontale dürfen 15% der dahinterliegenden Nutzflächen nicht überschreiten oder sie müssen einen temporären Sonnenschutz mit einem Minderungsfaktor von mindestens 75% aufweisen. Für südorientierte Fenster liegt die Grenze erst bei 25% der dahinterliegenden Nutzflächen“ (Feist, 2007d).
- „Die Zulufttemperaturen am Luftauslass im Raum dürfen 17° nicht unterschreiten. Eine gleichmäßige Durchströmung aller Räume und in allen Räumen muss gewährleistet sein (Lüftungseffizienz). Die Lüftung muss in erster Linie auf Lufthygiene ausgelegt sein (DIN 1946). Die Schallbelastung durch die Lüftungsanlage muss sehr gering sein ($< 25 \text{ dBa}$)“ (Feist, 2007d).
- Wohnhäuser müssen in jedem Wohnraum mindestens eine Außenluftöffnung, die öffenbar ist, aufweisen, damit eine Durchströmung der Wohnung mit Außenluft in Sommernächten möglich ist (freie Sommerkühlung) (Feist, 2007d).

Zusätzlich zu diesen baulich relevanten Einflussparametern, werden jetzt noch solche besprochen, die stark vom Nutzer beeinflusst werden und maßgeblichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf haben.

Raumlufttemperatur:

Zur Raumlufttemperatur, die idealerweise zwischen $19^\circ\text{-}23^\circ\text{C}^1$ liegen sollte (Greml, Blümel, Kapferer & Leitzinger, 2004, S.21), sei noch erwähnt, dass eine Absenkung dieser in einem NEH zu einer Verringerung des HWB von $6\text{-}10\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und in einem PH zu $2\text{-}4\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ führen kann. Die höheren Werte resultieren aus einem kalten Klima, einer hohen Ausgangstemperatur von 22°C und relativ hohem HWB. Die kleineren Werte ergeben sich für den Standort Mannheim, einer Ausgangstemperatur von 18°C und niedrigerem HWB (Heidt, 2005, S.66).

Warmwasserbedarf:

Es wird davon ausgegangen, dass eine Person pro Tag durchschnittlich rund 126 Liter Trinkwasser verbraucht. Dies setzt sich hauptsächlich zusammen aus dem Verbrauch für Baden, Duschen, Toilettenspülung, Wäschereinigung, Kochen.... In Ein- und Zweifamilienhäusern werden davon durchschnittlich etwa 35 bis 65 Liter pro Person und Tag als Warmwasser benötigt². In Mehrfamilienhäusern liegt der Bedarf mit etwa 30 bis 40 Liter pro Person und Tag etwas niedriger. Für die Bemessung der Warmwasserbereitungsanlage muss beachtet werden, dass dieser Warmwasserbedarf meist nicht gleichmäßig auftritt, sondern dass Bedarfsspitzen z.B. zu bestimmten Tageszeiten auftreten. Bei der Warmwasserbereitung muss besonders

¹ Bei der Berechnung des HWB wird meist von 20°C ausgegangen (Streicher et al, 2004, S.24)

² In der ENEC werden $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ definiert (Volland & Volland, 2006, Kap. 0.3).

auch auf die Problematik einer bakteriellen Verunreinigung (Legionellen) geachtet werden. Diese können bei Warmwassertemperaturen ab 60°C abgetötet werden. Für Kleinanlagen sind keine besonderen Maßnahmen nötig. Bei Anlagen mit einem Warmwasserspeicher größer 400Liter gibt es verschiedene Punkte die beachtet werden sollen, wie z.B. dass die Temperatur am Warmwasseraustritt 60°C betragen soll (Joos et al., 2004, S.254-257).

Lüftungsverhalten:

Das nutzerbedingte Lüftungsverhalten ist besonders bei Passivhäusern mit Luftheizsystemen von großer Bedeutung, da dort die Heizleistung stark begrenzt ist und somit die Wiederaufheizung Probleme bereiten kann. Eine Untersuchung von zwei Niedrigenergie und zwei Passivhäuser zeigt, dass dort eine tägliche Lüftung von 15min¹ den HWB um 3,4-3,7kWh/(m²a) (NEH) bzw. 2,5-2,9kWh/(m²a) (PH) vergrößert (Heidt, 2005, Kap. 4.5.4).

¹ Luftwechselrate = 4h⁻¹, in allen Gebäudezonen.

2.5 Behaglichkeitskriterien

Es gibt einige Kriterien, die erfüllt sein müssen, damit eine Mehrheit von Menschen das Wohnraumklima in ihrem Zuhause als behaglich empfindet. Wie gut welche dieser Kriterien erfüllt werden können, hängt u.a. von der Qualität der Gebäudehülle und den dadurch einsetzbaren Heiz-, Warmwasserbereitungs-, und Lüftungssystemen ab. Es ist nun wichtig, diese verschiedenen Behaglichkeitskriterien näher zu betrachten, denn es werden sich auf längere Zeit gesehen, ökologisch und ökonomisch geeignete WBR-Systeme nur durchsetzen können, wenn für deren Anwender ein angenehmer Wohnkomfort entsteht. Dazu werden nun verschiedene Parameter näher erläutert.

Luftgeschwindigkeit:

Die als behaglich empfundenen Luftgeschwindigkeiten hängen von den Turbulenzgraden ab und liegen zwischen 0,15 m/s (20% Turbulenzgrad) und 0,28 m/s (5% Turbulenzgrad). Dabei beschreibt der Turbulenzgrad die Schwankung der Luftbewegung an einem Ort bezogen auf den Mittelwert (Bohne, 2004, Kap. 2.2). Abbildung 2-18 stellt den Einfluss der Luftgeschwindigkeit, als Funktion der Lufttemperatur, auf den Behaglichkeitsbereich dar.

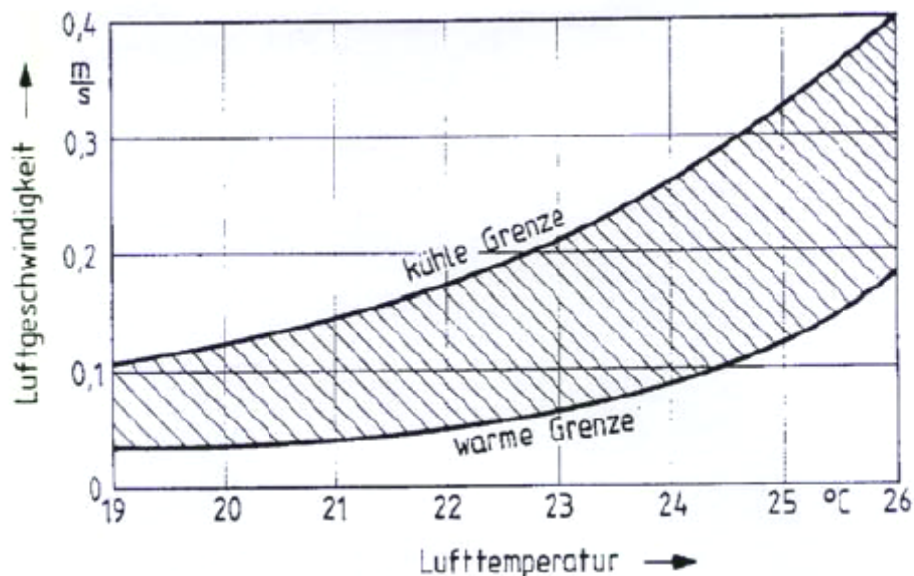


Abbildung 2-18: Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit und der Raumlufttemperatur (Quelle: (Greml et al., 2004, Kap. 2.1.3)).

Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur der Wohnrauminnenflächen:

Das vom Menschen empfundene Temperaturniveau hängt sowohl von der Lufttemperatur, als auch von der Temperatur der ihn umgebenden Flächen ab, da der Körper seine Temperatur über Wärmeleitung (mit der umgebenden Luft) und Wärmestrahlung (mit den umgebenden Flächen) reguliert. Diesen Zusammenhang stellt Abbildung 2-19 grafisch dar. Das bedeutet somit, dass bei entsprechend hohen Oberflächentemperaturen die Lufttemperatur geringer sein kann. Die Oberflächentemperaturen werden neben der Dämmung vor allem durch das verwendete Heizsystem bestimmt (z.B. Wandheizung) (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.1.1). Optimalerweise sollte das arithmetische Mittel zwischen Oberflächentemperatur und Raumtemperatur zwischen 22°C und 26°C liegen (Bohne, 2004, Kap. 2.2). Joos et al. (2004, Kap.1) definiert die Behaglichkeitsgrenze so, dass die mittlere Oberflächentemperatur nicht mehr als 2 – 3 °C unter der Raumtemperatur liegen soll.

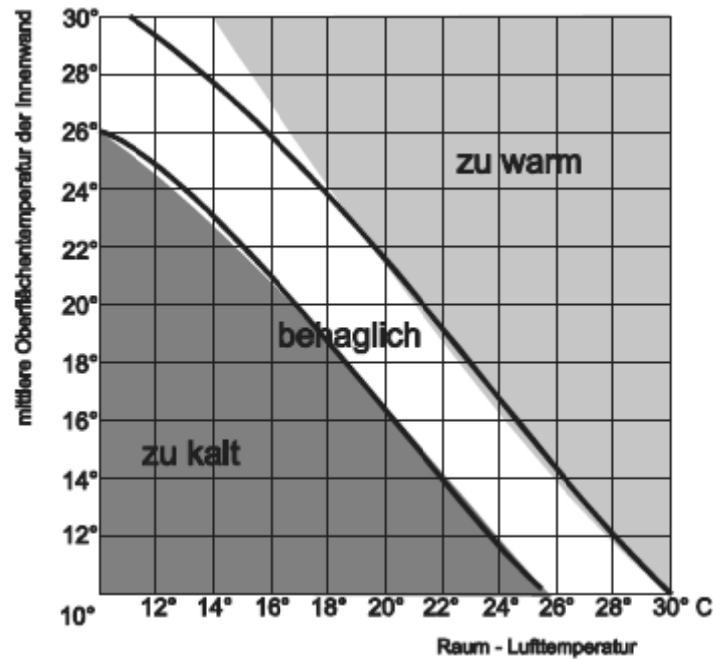


Abbildung 2-19: Darstellung der Behaglichkeit in Abhängigkeit der mittleren Oberflächentemperatur der Innenwand und der Raum-Lufttemperatur (Quelle: (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.1.1)).

Damit es zu keinen gesundheitlichen Problemen kommen kann, sollten in Daueraufenthaltsräume Oberflächentemperaturen bei Fußbodenheizungen von 27°C nicht überschritten werden (Tritthart et al., 2001, S.45).

Strahlungsasymmetrie:

Die Strahlungsasymmetrie beschreibt die Temperaturdifferenz, die zwischen den Heiz- bzw. Kühlflächen und den anderen Umgebungsflächen auftritt. Je geringer die Asymmetrie ist, desto besser. Die Behaglichkeitsgrenzen sind in der Literatur noch umstritten. Heizdecken liegen laut Bohne (2004, Kap. 2.2) bei etwa 4K.

Raumluftfeuchte:

Die relative Luftfeuchte sollte in Wohnräumen zwischen 30% und 65% liegen (Bohne, 2004, Kap. 2.2). Abbildung 2-20 stellt die Abhängigkeit der Behaglichkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur genauer dar.

Trotz genügend hoher Feuchtigkeit kann die Luft als trocken empfunden werden, wenn zu viel Staub in der Luft ist (z.B. durch Konvektion aufgewirbelt), oder es aufgrund von hohen Oberflächentemperaturen zu Staubverschmelzung kommt (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.2.1).

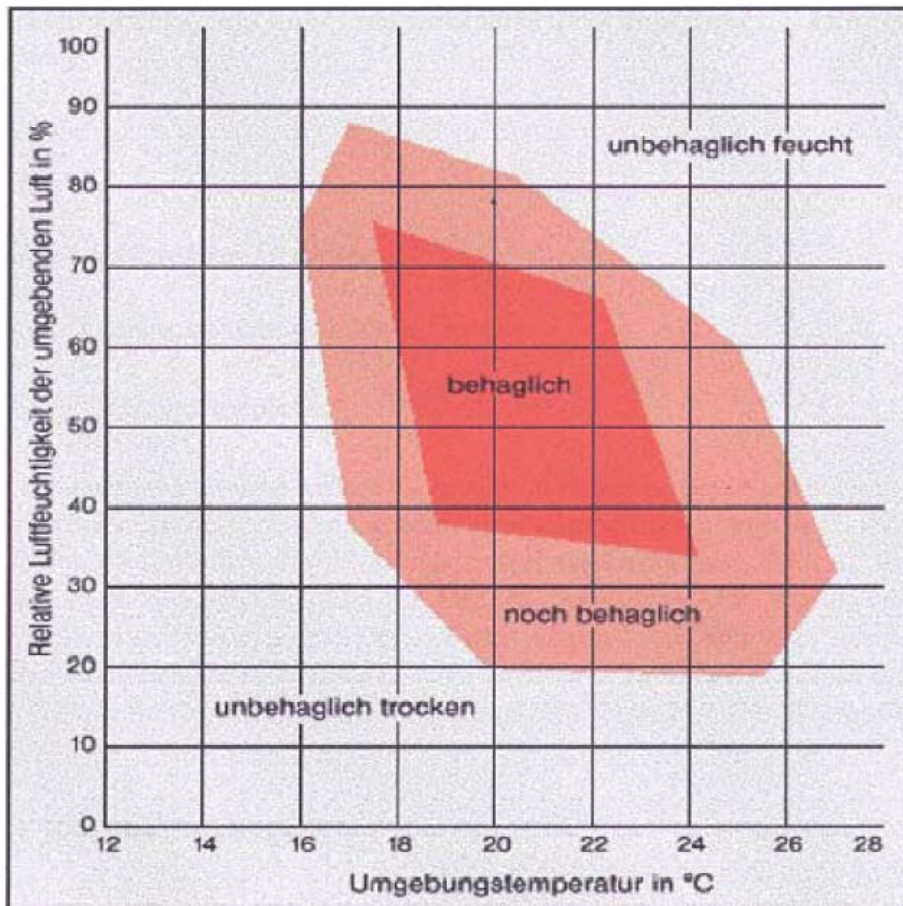


Abbildung 2-20: Behaglichkeit als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur (Quelle: (Greml et al., 2004, Kap. 2.1.2)).

Lufttemperaturgradient:

Sollte in vertikaler Richtung nicht mehr wie $2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ sein (Bohne, 2004, S.13).

Luftqualität:

Diese wird durch verschiedenste Verunreinigungen beeinflusst. Unter anderem ist der CO_2 -Gehalt der Raumluft, welcher durch die Atmung einer Person erhöht wird, von großer Bedeutung. Die Produktion liegt in etwa zwischen 12 l/h/Person bei ruhender Tätigkeit und geht bis über 30 l/h/Person bei schwerer körperlicher Arbeit. Eine hervorragende Luftqualität wird bei einem CO_2 -Gehalt von $0,1$ -Volumenprozent angegeben. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration liegt bei $0,5$ -Volumenprozent. Abhängig von der körperlichen Tätigkeit und der Vorbelastung der Frischluft werden Außenluft-Volumenströme zwischen 20 und $30 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ empfohlen (Bohne, 2004, Kap. 2.2). Auch ein Vergleich der in verschiedenen Normen angegebenen Werte deckt diesen Bereich ab. Dabei werden Mindestluftwechselraten zwischen $0,4^{\text{h}^{-1}}$ und $1^{\text{h}^{-1}}$ angegeben (Streicher et al., 2004a, S. 25).

3 Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen

Um nun Heiz- und Warmwasserbereitungssysteme hinsichtlich deren Eignung untersuchen zu können, muss, wie schon in den vergangenen Kapiteln erläutert, insbesondere bei Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf, somit grundsätzlich auch die Verwendung von Lüftungssystemen in die Betrachtung miteinbezogen werden. Um nun diesem Umstand Rechnung zu tragen, dass die Wärmeversorgungs-, Brauchwasserbereitungs- und Raumlüftungstechnik eng miteinander verknüpft sind, wird im Folgenden dieses Gesamtsystem mit WBR-Anlage bezeichnet (Wärmeversorgung, Brauchwasserbereitung und Raumlüftung). Diese Abkürzung wird fallweise in der Literatur verwendet und wurde von mir übernommen, da es meiner Meinung nach das untersuchte System gut abgrenzt. Der Begriff Haustechnik hingegen, beinhaltet häufig auch die Beleuchtungs-Einrichtungen und/oder die Sanitärinstallationen. Wenn nur von Heizungs- und Brauchwasserbereitung gesprochen wird, ist häufig nicht klar, ob damit auch die Möglichkeit der Heizung über ein Lüftungssystem eingeschlossen ist.

Nach dieser allgemeinen Einleitung folgen im nächsten Abschnitt mögliche Einteilungen und eine Beschreibung von verschiedenen Komponenten, Techniken und Anlagen. Jene Systeme die anschließend ökologisch und ökonomisch verglichen werden, werden im Detail besprochen. Vorab sei erwähnt, dass es eine große Anzahl von Möglichkeiten gibt, wie in Niedrigenergie- und Passivhäuser Wärme bereitgestellt werden kann. Daher kann sich die Untersuchung an dieser Stelle nur auf eine Auswahl beschränken.

Wie schon im vorigen Kapitel aufgezeigt, stellt der Sektor Raumwärme und Warmwasser einen bedeutenden Anteil des Endenergieverbrauchs in Österreich dar. Durch gute Wärmedämmung der Außenwände, des Kellerbodens und der Decke und durch Verwendung hochwertiger Wärmeschutzverglasungen kann der Heizwärmebedarf eines Hauses deutlich verbessert werden. Die größte Anzahl von Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs und zur Erhöhung der Energieeffizienz können natürlich bei Neubauten berücksichtigt werden. Denn wichtige Eigenschaften wie das Verhältnis Oberfläche zu Volumen (A/V-Verhältnis), die Orientierung des Gebäudes Richtung Süden und optimale Ausnutzung von solaren Gewinnen können nachträglich kaum oder nur durch unverhältnismäßig großen Aufwand verändert werden. Aber trotzdem gibt es genügend Maßnahmen, wie eine Verbesserung der Gebäudedämmung und Verwendung von effizienten WBR-Technologien, wodurch sich auch bei der Sanierung von Altbauten ökologisch optimale Eigenschaften erzielen lassen. Will man z.B. einen Altbau mit einer Wärmepumpe beheizen, dann ist nur eine Verbesserung der Wärmedämmung häufig zu wenig. Wärmepumpen erreichen nämlich bei niedrigen Vorlauftemperaturen (z.B. 35°C) eine meist deutlich bessere Effizienz (siehe Leistungsfaktor, Jahresarbeitszahl und COP-Faktor) als bei höheren Temperaturen. Entsprechender Betrieb mit niedrigen Vorlauftemperaturen kann aber durch herkömmliche Radiatoren kaum zufriedenstellend realisiert werden. Die nachträgliche Umstellung auf Fußboden- Wand-, oder Deckenheizung die dies, aufgrund der größeren Abgabeflächen, ermöglichen würde, wäre natürlich mit entsprechendem Aufwand verbunden.

Je weiter die Transmissionsverluste (durch Wärmedämmung und Verwendung neuer Wärmeschutzverglasungen) verkleinert werden, desto größeren Einfluss haben die Lüftungsverluste auf den Heizwärmebedarf. Um diesen somit weiter senken zu können, muss eine Verringerung der Lüftungswärmeverluste erfolgen, was mit Hinblick auf optimale Raumlüftungsqualität meist nur noch mit mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung erfolgen kann.

Werden nun die Verluste so stark verringert, dass die Transmissions-Heizlast kleiner als 10W/m^2 (Feist, 2007c) ist, kann die Raumheizung nur durch ein Luftheizsystem erfolgen (=Passivhauskonzept). Die benötigte Wärme wird dabei durch die Wärmerückgewinnung aus der Abluft und falls notwendig noch durch Nachheizung bereitgestellt. Bei größeren Heizleistungen sollte die Raumwärmebereitstellung nicht über das Trägermedium Luft erfolgen, da diese, verglichen mit Wasser, eine kleine spezifische Wärmekapazität besitzt und die benötigte Wärmemenge nur über große Volumenströme (Zugerscheinung) oder Erwärmung auf höhere Temperaturen bereitgestellt werden könnte. Eine Erwärmung der Zuluft auf über 55°C ist aber aus Behaglichkeitsgründen und um Verschmelzung des in der Luft vorhandenen Staubes zu vermeiden, nicht zu empfehlen (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.2.1).

Je geringer nun die benötigte Wärme für die Raumheizung ist, desto größer wird der Anteil der Warmwasserbereitstellung an der benötigten Endenergie. Eine Möglichkeit um diesen Energiebedarf, zumindest teilweise zu decken, ist die Verwendung von Solarkollektoren zur Brauchwassererwärmung wobei aber auch die teilsolare Raumwärmeerzeugung in Betracht gezogen werden sollte.

Durch die deutliche Verringerung des Heizwärmebedarfs ergeben sich andere Anforderungen und Möglichkeiten bei der Auswahl der verwendeten Heizsysteme.

Die in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnene Technologie der Wärmepumpen ist vor allem für Häuser mit niedrigem Energiebedarf von besonderem Interesse. Wärmepumpen werden in Europa, zum überwiegenden Teil, mit elektrischer Energie betrieben (Simader, Jamek, Ritter & Benke, 2007, Kap. 2.1). Soll nun ein Gebäude nur durch eine Wärmepumpe beheizt werden, hängt die benötigte Energiemenge zum Betrieb von der verwendeten Wärmequelle, den klimatischen Bedingungen, dem Nutzerverhalten und der Beschaffenheit des Hauses und der Systemtechnik ab. Da bei der Herstellung und Verteilung von Strom ein großer Teil der eingesetzten Primärenergie „verloren“ geht, ist in diesem Zusammenhang die primär-energetische Untersuchung von besonderer Relevanz.

Aufgrund der unzähligen Einflussparameter (Wünsche und Verhalten der Nutzer, Architektur, Wirtschaftlichkeit, ...) wird es im Folgenden kaum ein WBR-System geben, welches als „das Optimale“ bezeichnet werden kann. Vielmehr geht es in der Arbeit darum, grundsätzliche Vor- und Nachteile gegenüberzustellen und die Bedeutung verschiedener Einflussparameter zu analysieren, wobei das Hauptaugenmerk auf den kumulierten Energieaufwand, den energiebedingten Emissionen der Nutzung und den Kosten die für die Nutzer entstehen, liegt.

3.1 Einteilung

Damit Wohnräume auf einem konstanten, behaglichen Temperaturniveau gehalten werden können, muss ihnen Wärme, welche durch ein Heizsystem erzeugt wird, zugeführt werden. Entweder befindet sich dieses Heizsystem im zu beheizenden Raum selbst, oder die Wärmeenergie muss über ein zusätzliches Wärmeträgermedium verteilt werden, bevor sie über einen Wärmetauscher (z.B. Heizkörper) abgegeben wird. Eine Heizungsanlage kann in die Bereiche Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeabgabe eingeteilt werden. Weitere mögliche Einteilungen der Heizungsanlagen folgen nun in Anlehnung an Tritthart et al. (2001, Kap. 5.2), wurden aber nach eigenem Ermessen angepasst:

Ort der Wärmeerzeugung:

- Einzelraumheizung
- Zentralheizung
- Etagenheizung
- Fernheizung

Art der Wärmeerzeugung:

- Wärmeerzeugung durch Verbrennung
- Wärmeerzeugung ohne Verbrennung (Solarkollektoren, Elektro-Wärmepumpen,...)

Energiequelle bzw. Energieträger:

Die für die Wärmeerzeugung in Wohnhäusern relevanten Energiequellen bzw. Energieträger sind folgende:

- Fossile Brennstoffe: Öl, Gas, Kohle
- Regenerative Brennstoffe: Biomasse, insbesondere Holz (Stückgut, Hackschnitzel, Pellets)
- Fernwärme
- Strom
- Regenerative Umweltenergien (Sonnenenergie, Geothermische Energie)

Art des Übertragungsmediums des Wärmeverteilungssystems:

- Wasser
- Luft

Wärmeabgabesystems:

- Radiatoren
- Konvektoren
- Flächenheizungen (Fußboden-, Wand- und Deckenheizungen)
- Luftheizungen

3.2 Beschreibung von Komponenten, Techniken und Anlagen

Heizsysteme dienen dazu, die Temperatur im Haus konstant zu halten. Die Notwendigkeit zum Einsatz von Heizungssystemen resultiert aus den auftretenden Wärmeverlusten, welche durch den Übergang von Wärme durch Leitung, Strahlung und/oder Konvektion, von Bereichen höherer Temperatur, auf Bereiche mit niedrigerer, entstehen. Da Energie eine Erhaltungsgröße ist, kann sie weder erzeugt werden noch verloren gehen. Unter „Energieverlust“ versteht man daher den Austritt der Energie aus einem Gebiet, in dem es von Nutzen ist. Daher können Energiebilanzen nur für räumlich abgegrenzte Gebiete aufgestellt werden. Diese Grenze bezeichnet man als Hülle. Um Energiebilanzen für Gebäude aufzustellen, wird praktischerweise die Bilanzhülle meist mit der Außenseite der wärmedämmenden Außenbauteile gleichgesetzt. Diese Wärmeverluste sind durch den Einsatz von Dämmstoffen aber verkleinerbar. Andererseits wird aber aufgrund von solaren und inneren Wärmequellen auch Wärme „gewonnen“. Um ein Haus auf der gewünschten Wohntemperatur halten zu können, lautet die Energiebilanz somit, dass die Summe der Wärmeverluste gleich der Summe der Wärmegewinne sein muss (Feist, 2007a).

Wie schon besprochen ist bei Gebäuden im Passivhausstandard ein Lüftungssystem, wegen der sehr gut luftdicht gebauten Gebäudehülle im Regelfall unerlässlich. Wenn aber ohnehin ein Lüftungssystem vorhanden sein muss, kann, zur Vermeidung von höheren Investitionskosten und höherem Platzbedarf, auf ein zusätzliches konventionelles Wasserheizsystem verzichtet werden. Die Deckung des Restwärmebedarfs erfolgt dann ausschließlich über Erwärmung der Frischluft (Passivhauskonzept). Bei Passivhäusern können so Lüftungskompaktgeräte verwendet werden, die Lüftung, Nachheizung und Warmwasseraufbereitung in einem Gerät vereinen.

Die Klimatisierung, also Raumkühlungsgeräte, werden nicht explizit untersucht, da Wohnhäuser mit niedrigem Energiebedarf eine Sommertauglichkeit auch ohne den Einsatz von stromverbrauchenden Klimaanlage ermöglichen sollten (klima:aktiv haus, 2007, Kap. D.1 (Teil klima:aktiv Haus)). Tatsache ist allerdings, dass in der Praxis, aufgrund von Planungs- oder Konstruktionsfehlern, zum Teil nicht unerhebliche Kühllasten auftreten können¹.

Die Frage ist, ob es sinnvoll ist, Gebäude mit geringem Heizwärmebedarf, noch mit Heizkesseln (mit fossilen oder regenerativen Brennstoffen befeuert) auszustatten, oder ob es ökologisch sinnvoller ist mit Strom (Wärmepumpen oder direkt) zu heizen. Natürlich sollte im Hinblick auf Nachhaltigkeit das Ziel sein, den Energiebedarf soweit als möglich durch erneuerbare Energieträger zu decken. Um die ökologische Verträglichkeit besser beurteilen zu können, werden, neben den treibhausrelevanten Emissionen, auch andere Luftschadstoffe in weiterer Folge betrachtet.

Als besondere Problembereiche gelten die Wärmeverluste, die bei der Erzeugung, Verteilung und Speicherung auftreten und der Energiebedarf von Antrieben und Regelungen (Joos et al., 2004, Kap. 1.4.3).

Im Folgenden werden nun WBR-Systeme, die für den Einsatz als Zentralheizungsanlagen in NEH und PH möglich sind, näher untersucht.

¹ Persönliche Informationen von Dr. Dipl.-Ing. Lukas Kranzl (Energy Economics Group, TU Wien) (März, 2008).

3.2.1 Warmwasserbereitung

Warmwasserversorgungssysteme lassen sich unter Anderem folgendermaßen einteilen (Joos et al., Kap 4.1.1):

- Art der Wärmequelle
- Art des Wärmetauschers
- Anzahl der Warmwasserentnahmestellen
- Wasserdruck im Warmwassererzeuger
- Art des Wassererwärmungssystems
- Größe der Anlage

Bei der Anzahl der Warmwasserentnahmestellen unterscheidet man zwischen Einzel-, Gruppen- und Zentralversorgung. Eine Einzelversorgung zeichnet sich dadurch aus, dass das Wasser direkt am Ort der Entnahme erwärmt wird. Für Gruppenversorgung gilt das Gleiche, nur dass meist wenige nah beisammen liegende Entnahmestellen über kurze Verteilungsleitungen an einen dezentral aufgestellten Warmwasserbereiter angeschlossen werden. Diese beiden Arten werden auch als „örtliche Warmwasserbereitung“ bezeichnet und haben den Vorteil dass nur kurze Strichleitungen zur Verteilung benötigt werden, was insbesondere bei weit entfernten Entnahmestellen von Bedeutung ist. Außerdem kann die Größe der Anlage leicht an den erwarteten Bedarf an der entsprechenden Entnahmestelle angepasst werden. Die zentralen Warmwasserbereitungssysteme haben den Nachteil, dass längere Verteilungsleitungen zu den Entnahmestellen notwendig sind, was neben dem Materialaufwand auch weitere Wärmeverluste verursacht (Wärmedämmung notwendig). Der Vorteil ist, dass meist größere Mengen an Warmwasser konstanter Temperatur entnommen werden können. In Mehrfamilienhäusern wäre es wichtig, jede Wohnung mit einer Warmwasserverbrauch-Messung auszustatten, denn ansonsten kann es wegen Verschwendung erfahrungsgemäß zu einem bis zu 30% höheren Verbrauch kommen. Problematisch sind jedoch die Kosten solcher Messeinrichtungen (Joos et al., Kap 4.1).

Bei einer zentralen Warmwasserverteilung kann, bei Verwendung von Strichleitungen, aufgrund der Wärmeverluste in den Verteilungsleitungen nach einer längeren Nutzungspause nicht sofort warmes Wasser entnommen werden, da das kalte Wasser zuerst abfließen muss. Bei weit entfernten Entnahmestellen kann dies einen nicht unerheblichen Wasserverlust (natürlich abhängig von der Nutzungshäufigkeit der entsprechenden Entnahmestelle) verursachen. Außerdem kann es bei einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1 bis 1,5 m/s (Tritthart et al., 2001, S.50) auch zu längeren Wartezeiten kommen. Um diese Nachteile vermeiden zu können, werden mitunter sogenannte Zirkulationsleitungen eingesetzt. Dabei wird eine zusätzliche Leitung verlegt, wodurch das Wasser zirkulieren kann. Dazu werden Zirkulationspumpen eingebaut. Es wäre auch Schwerkraftzirkulation möglich, jedoch wird wegen der Legionellengefahr davon abgeraten. Da es aber natürlich auch im Zirkulations-Kreislauf zu Wärmeverlusten kommt, und zusätzlich noch elektrische Energie für den Betrieb der Kreiselpumpe anfällt, sollten diese z.B. während der Nacht automatisch abgeschaltet werden um Energie einsparen zu können. Die Verteil-Rohre bestehen aus nichtrostendem oder verzinktem Stahl, Kupfer oder vernetztem Polyethylen (Joos et al., 2004, Kap. 4.1.3.7).

3.2.2 Lüftungssysteme

Zuerst muss der Begriff der Lüftungssysteme konkretisiert werden.

Herkömmliche Lüftung wird als „natürliche Lüftung“ bezeichnet, was somit folgende Bereiche umfasst:

- Fugenlüftung
- Fensterlüftung
- Spaltlüftung
- Schachtlüftung

Dabei erfolgt der Luftaustausch durch Druckunterschied zwischen den Innenräumen und außen. Diese Druckunterschiede entstehen durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen, bzw. durch Wind. Gibt es keinen Druckunterschied, kommt es praktisch zu keinem Luftaustausch. Davon zu unterscheiden ist die mechanische Lüftung, welche den Luftwechsel durch Einsatz von Ventilatoren gewährleistet (Greml et al., 2004, Kap.2.2).

Der Begriff Raumluftechnik unterscheidet grundsätzlich die drei Bereiche (Joos et al., 2004, S. 187):

- Be- und Entlüftungsanlagen
- Teilklimatisierungsanlagen
- Vollklimatisierungsanlagen

Unter Be- und Entlüftungsanlagen werden solche verstanden, die zum Luftwechsel dienen. Eine Erwärmung der Zuluft ist möglich, eine sommerliche Kühlung hingegen nicht. Teilklimatisierungsanlagen hingegen können auch die Kühlung der Zuluft im Sommer übernehmen. Vollklimatisierungsanlagen bieten zusätzlich die Möglichkeit der Aufrechterhaltung der erwünschten Raumluftheuchte (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.1).

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt keine explizite Untersuchung von Systemen die eine Raumlufkühlung ermöglichen.

Beim Einbau der für Lüftungssysteme notwendigen Verrohrung unterscheidet man zwischen der „klassischen Luftführung“ und der Sternverrohrung, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Dabei kommt es bei der Sternverrohrung im Regelfall zu deutlich längeren Leitungen, die aber im Durchmesser wesentlich geringer sind (Greml et al., 2004, S.42).

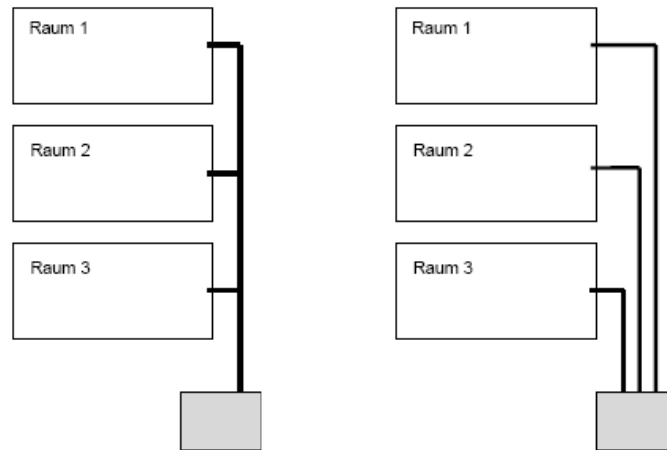


Abbildung 3-1: Darstellung der "klassischen Luftführung" (links) und der Sternverrohrung (Quelle: (Greml et al., 2004, S.42)).

Im Folgenden werden nun mechanische Lüftungsanlagen im Allgemeinen (mit und ohne Wärmerückgewinnung) betrachtet. Die Möglichkeit, die Zuluft zusätzlich zur Wärmerückgewinnung zu erwärmen, um z.B. die komplette Wärmeversorgung eines Gebäudes zu ermöglichen, wird im Kapitel 3.2.5 untersucht.

1) Abluftanlagen

Bei zentralen Abluftanlagen wird, in besonders mit Feuchtigkeit oder Geruchsstoffen belasteten Räumen wie der Küche, Bad oder Toilette, die Luft mechanisch abgesaugt. Über Öffnungen strömt durch den erzeugten Unterdruck Frischluft von außen nach. Diese Öffnungen befinden sich meist in Räumen wie dem Wohnzimmer oder dem Schlafzimmer. Damit die Luft in die anderen Räume überströmen kann, sind geeignete Schlitze oder Öffnungen vorzusehen. In Mehrfamilienhäusern sind zentrale Abluftanlagen problematisch, weil eine Geräusch- und Geruchsübertragung zwischen den verschiedenen Wohnungen möglich ist. Daher kommt es dort eher zur Anwendung von dezentralen Systemen, wobei dann jede Wohnung über ein eigenes System verfügt. Die abgesaugte, warme Luft kann z.B. als Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt werden, die wiederum zur Warmwasserbereitung wie in Abbildung 3-2, oder zur Unterstützung der Heizung, verwendet wird (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.4).

Die Nachteile dieser Technik liegen vor allem an der unkontrollierten und ungleichmäßigen Zuluftverteilung und dass kalte Frischluft nachströmt (Komfort-Einbußen). Außerdem können Geräusche von außen, auch bei Verwendung von (einfachen) Schalldämmungen, durch die Lufteinlässe nur sehr schlecht gedämmt werden. Wesentlich besser hinsichtlich dieser Nachteile sind Zu- und Abluftsysteme (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2).

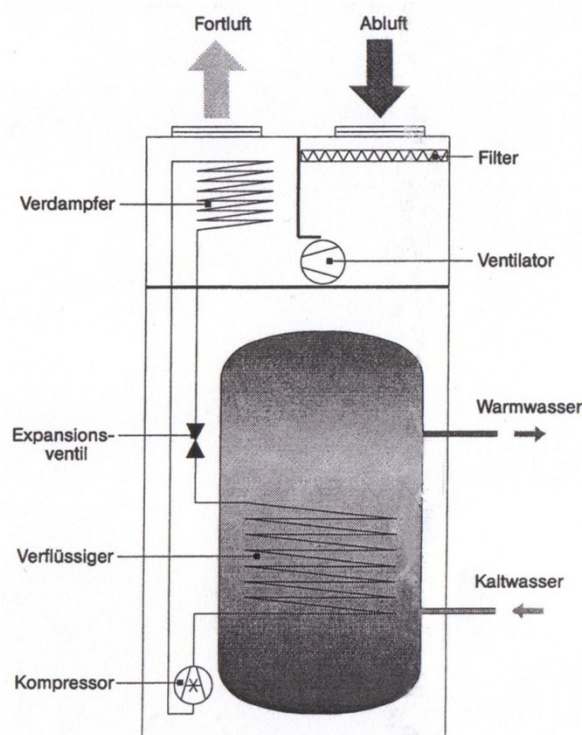


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Abluft-Gerätes mit Warmwasserspeicher und Wärmepumpe zur Erwärmung (Quelle: (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.4)).

2) Zu- und Abluftanlagen

Anders als beim den eben besprochenen Abluftanlagen, wird nun die Frischluft, anstelle von Öffnungen in den Außenwänden, über Luftleitungen den entsprechenden Räumen zugeführt. Dies hat nun den Vorteil, dass neben einer Filterung der Zuluft auch eine Wärmerückgewinnung, also eine Erwärmung der Zuluft, erfolgen kann. Zusätzlich kann die zugeführte Frischluft auch noch weiter über ein Nachheizregister erwärmt werden.

In Zu- und Abluftsystemen kann die Frischluft, bevor sie zum Lüftungsgerät gelangt, über einen Erdwärmetauscher geführt werden. Das hat den Vorteil, dass bei kalten Temperaturen eine Vereisung des Luft/Luft-Wärmetauschers vermieden werden kann. Im Sommer kann dadurch eine zusätzliche Erwärmung der Innenräume vermieden werden. Durch einen Luft/Luft-Wärmetauscher wird dann der verbrauchten Abluft, die mittels Ventilatoren aus Räumen wie Küche und Bad abgesaugt wird, Wärme entzogen und auf die Frischluft übertragen. Dabei sind Wärmerückgewinnungsraten von 75 – 90% möglich, was natürlich einen großen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz liefern kann (Streicher et al, 2004. Kap 5.2.4).

Ein weiterer Vorteil dieses Systems besteht darin, permanent frische Luft in den Wohnräumen vorhanden ist, die auch von Pollen u. dgl. gefiltert werden kann. Besonders im Winter besteht jedoch die Gefahr, dass die Raumluft zu trocken wird, da die Außenluft bei kalten Temperaturen nur sehr wenig Feuchte aufnehmen kann und die erwärmte Frischluft somit eine geringe relative Luftfeuchtigkeit besitzt. Diesem Problem kann allerdings mit dem Vorhandensein von Pflanzen in der Wohnung entgegengewirkt werden. Die extra Verwendung eines Raumluftbefeuchters ist aufgrund des zusätzlichen Stromverbrauchs im Regelfall nicht zu empfehlen. Bei Vorhandensein einer mechanischen Zu- und Abluftanlage kann und soll auf die Fensterlüftung verzichtet werden, was somit auch zu einer Verminderung der Lärmbelastigung von außerhalb beitragen kann (Streicher et al., 2004a, Kap. 6.4.2).

Abbildung 3-3 zeigt eine schematische Darstellung des Zentralgerätes einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung über einen Kreuzstromwärmetauscher. Kreuzstromwärmetauscher haben den Vorteil, dass sie sehr kompakt sind. Daneben sind Ventilatoren, die Regeleinrichtung, Filter, das wärmeisolierte Gehäuse und ein eventuell vorhandener Nacherwärmer wichtige Komponenten eines Zentralgerätes (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.4).

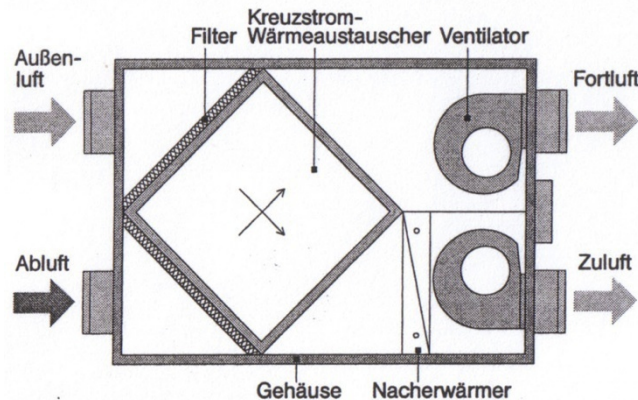


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des Zentralgerätes einer mechanischen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung über einen Kreuzstromwärmetauscher (Quelle: (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.4)).

Die Lüftungsgeräte sollten, um eine Lärmbelästigung zu vermeiden, nicht in Aufenthaltsräumen, sondern eher in Keller, Dachboden, Küche oder Bad aufgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass, wenn der Aufstellungsort außerhalb der thermisch-gedämmten Hülle liegt, die Wärmeverluste des Lüftungsgerätes nicht genutzt werden können. Bezüglich Mehrfamilienhäusern gilt das gleiche wie zuvor geschildert (Joos et al., 2004, Kap. 3.4.4).

Anlagen die nur für die Be- und Entlüftung eines Raumes verwendet werden, bezeichnet man als Einzelraumlüftung. Der Vorteil dieser liegt in der nachträglichen Montierbarkeit. Nachteilig wirken sich allerdings die Laufgeräusche aus, die somit im entsprechendem Raum entstehen und nicht wie bei zentralen Systemen z.B. am Dachboden (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2).

„Der Wärmerückgewinnungsgrad wird nach VDI 2071 als Verhältnis der ein- und austretenden Enthalpieströme interpretiert“ (Greml et al., 2004, Kap. 2.3.4.2). Die erreichbaren Wärmerückgewinnungsgrade hängen besonders vom Typ des Wärmetauschers ab. Lüftungsgeräte mit Kreuzstromwärmetauscher (wie in Abbildung 3-3) sind am einfachsten aufgebaut, weisen aber auch geringe Rückgewinnungsgrade auf. Eine Verbesserung ist durch die Verwendung von Kreuzgegenstromwärmetauschern oder Gegenstromwärmetauschern möglich, welche die Luftströme gegenläufig zwischen Platten führen. Gegenstrom-Kanalwärmetauscher verwenden hingegen einzelne Kanäle, die gegenläufig durchströmt werden. Rotationswärmetauscher sind relativ neu und ermöglichen einen Austausch der Luftfeuchtigkeit zwischen Ab- und Zuluft. Eine Zusammenstellung typischer Wärmerückgewinnungsgrade folgt in Tabelle 3-1 (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2.4).

Tabelle 3-1: Übersicht über typische Wärmerückgewinnungsgrade von mechanischen Lüftungsanlagen mit verschiedenen Wärmetauschern (Daten außer dem gekennzeichneten Wert aus (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2.4)).

Lüftungsgerät mit	Wärmerückgewinnungsgrad
Kreuzstromwärmetauscher	65%
Kreuzgegenstromwärmetauscher	75%
Gegenstromwärmetauscher	85%
Gegenstrom-Kanalwärmetauscher	95%
Rotationswärmetauscher	85% ¹

Mechanische Zu- und Abluftanlagen benötigen elektrische Energie für die Ventilatoren. Wie sehr dieser Bedarf an elektrischer Energie aber, verglichen mit den durch Wärmerückgewinnung verringerbaren Lüftungsverlusten, primärenergetisch ins Gewicht fällt, wird später untersucht.

Messungen an Lüftungsgeräten in einer Normalbetriebsstufe ergeben im Schnitt eine Leistungsaufnahme von knapp unter 0,45 W/(m³/h), wobei sehr gute Anlagen sogar Werte unter 0,3W/(m³/h) ergeben. Am schlechtesten schnitten Anlagen mit Wechselstrommotoren ab, die aber kaum mehr am Markt verfügbar sind. Besonders effiziente Anlagen sparen in dieser Untersuchung über 15-mal mehr Heizenergie ein, als durch die Ventilatoren Strom benötigt wird (Greml et al., 2004, S.189, 237).

Zusammenfassende Vor- und Nachteile von mechanischen Lüftungsanlagen:

Vorteile	Nachteile
Erhöhung der Luftqualität	Investitionskosten (im Passivhaus jedoch durch Vermeidung von anderen Heizsystemen sogar eine Verkleinerung möglich)
Vermeidung von Bauschäden	Höherer Planungsaufwand und Platzbedarf ²
Außenlärm wird ferngehalten	Luftdichte Gebäudehülle ist Voraussetzung ³
Verringerung der Lüftungsverluste (bei Verwendung von Wärmerückgewinnung)	Hilfsstrombedarf

¹ http://www.villavent.de/main/produkte/kwl/wrg/modul.php?linkseite=RWT_u

² (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2.4)

³ (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2)

3.2.3 Wärmeerzeuger

Wichtige Kenngrößen zur Beurteilung der Energieeffizienz von Anlagen sind die Wirkungsgrade bei Voll- und Teillast und der Hilfsstrombedarf (Hoffmann, Weiß & Hirschl, 2003, Kap. 4.2.2). Zunächst werden noch verschiedene Begriffe näher definiert, bevor auf verschiedene Wärmeerzeuger, die als Zentralheizungsgeräte eingesetzt werden können, näher eingegangen wird.

1) Begriffsdefinitionen

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad:

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad kann entsprechend Gleichung (3-1) berechnet werden. Dabei erfolgt eine Berücksichtigung der Abgasverluste in Form der thermischen und chemischen Verluste. Diese werden auf die mit dem Heizwert bewertete Energiemenge des Brennstoffes bezogen, wodurch sich die in der Formel ersichtlichen relativen Verluste ergeben. Die thermischen Verluste beschreiben die fühlbare Wärme der Abgase. Die chemischen Verluste entstehen durch eine unvollständige Verbrennung des Brennstoffes. Die Abgasverluste können, z.B. aus dem in Abbildung 3-4, exemplarisch für Holz, dargestellten Nomogramm, abgeschätzt werden (Kaltschmitt & Hartmann, 2001, Kap. 8.1.3).

$$\eta = 1 - V_{thermisch} - V_{chemisch} \quad (3-1)$$

η ... *Feuerungstechnischer Wirkungsgrad*

$V_{thermisch}$... *Relative thermische Abgasverluste*

$V_{chemisch}$... *Relative chemische Abgasverluste*

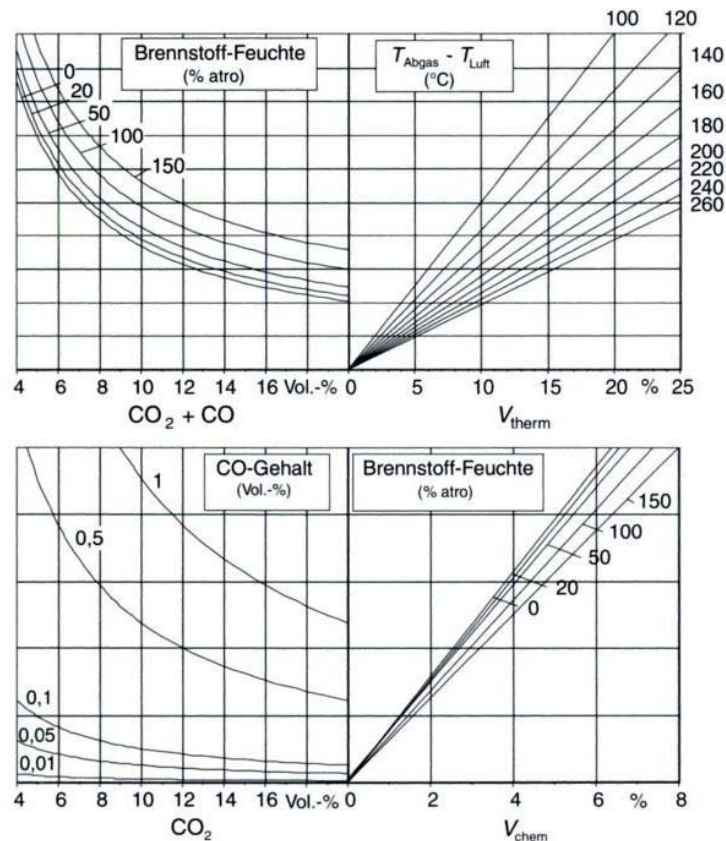


Abbildung 3-4: Exemplarisches Nomogramm für Holz, zur Bestimmung der thermischen und chemischen Verluste zur Ermittlung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades (Quelle: (Kaltschmitt & Hartmann, 2001, S. 247)).

Kesselwirkungsgrad:

Der Kesselwirkungsgrad ist definiert als Verhältnis der vom Wärmeträgermedium abgeführten Wärmeenergie zur zugeführten Brennstoffenergie. Dabei werden somit zusätzlich zu den beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad berücksichtigten Abgasverlusten, auch noch die Strahlungs- und Rostverluste berücksichtigt. Letztere entstehen durch unverbrannte Rückstände in der Asche (Kaltschmitt & Hartmann, 2001, Kap. 8.1.3).

Nutzungsgrad:

Es muss zwischen dem Nutzungsgrad des Kessels (bei Teil- bzw. Volllast) und dem Nutzungsgrad der gesamten Anlage unterschieden werden. Der Nutzungsgrad ist definiert als Verhältnis der abgeführten Wärmeenergie zur zugeführten Brennstoffenergie. Dabei wird ein längerer Zeitraum (z.B. ein Kalenderjahr) betrachtet. Es werden somit nicht nur die Betriebsverluste, sondern auch die Bereitschaftsverluste und gegebenenfalls die Speicher- bzw. Wärmeverteilungsverluste berücksichtigt (Kaltschmitt & Hartmann, 2001, Kap. 8.1.3).

Normnutzungsgrad:

Die Ermittlung des Normnutzungsgrades erfolgt auf Prüfständen, wobei die Kessel über einen längeren Zeitraum mit genormten Prüfbedingungen betrieben werden. Der Normnutzungsgrad ermöglicht somit eine gute Vergleichbarkeit verschiedener Kessel (Holz, 2006, S.18, S.19).

Leistungszahl, Heizzahl, COP von Wärmepumpen:

Die Leistungszahl von Wärmepumpen ϵ beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Nutzwärmeleistung zur benötigten elektrischen Antriebsleistung (bei Elektromotorwärmepumpen). Werden Absorptions- oder Verbrennungsmotorwärmepumpen verwendet, wird die Heizzahl definiert, welche den Energieinhalt des eingesetzten Energieträgers berücksichtigt. Großen Einfluss auf die Leistungszahl hat die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. Die Leistungszahl beschreibt nur bestimmte Betriebsbedingungen. Im Englischen wird der „Coefficient of Performance“ (COP) benutzt (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.402-404).

Arbeitszahl, Jahresheizzahl, SPF von Wärmepumpen:

Die Arbeitszahl β für elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen definiert das Verhältnis der in einem bestimmten Zeitraum abgegebenen Nutzwärme, zur in diesem Zeitraum aufgenommenen elektrischen Antriebsenergie. Dabei wird neben der Antriebsenergie des Kompressors auch die Energie von zusätzlichen Komponenten (z.B. Pumpen) berücksichtigt. Diese Kenngröße ist daher besonders aussagekräftig, wenn es um die Effizienzbewertung von Wärmepumpenanlagen geht. Entsprechend der Jahresarbeitszahl wird die Jahresheizzahl für Absorptions- bzw. Verbrennungsmotorwärmepumpen definiert. Im Englischen wird der „Seasonal Performance Factor“ (SPF) benutzt (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.402-404).

Die Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen (JAZ) (bzw. auch der Jahresnutzungsgrade von Heizsystemen) kann mit verschiedenen Systemgrenzen durchgeführt werden. Abbildung 3-5 zeigt beispielsweise die in der FAWA-Studie definierten Systemgrenzen. Die JAZ1 bestimmt sich dabei aus der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmemenge, dividiert durch die innerhalb der Systemgrenze liegenden Stromverbraucher. JAZ2 geht von der vom Speicher abgegebenen Wärmemenge aus, womit die Speicherverluste berücksichtigt werden. Wird kein Speicher verwendet, gilt $JAZ1 = JAZ2$. Bei JAZ3 werden somit auch die evtl. vorhandenen elektrische Zusatzheizung und alle Hilfsaggregate (wie z.B. die Umwälzpumpe) berücksichtigt. In den meisten Fällen wird JAZ2 verwendet (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, Kap. 2.3.3).

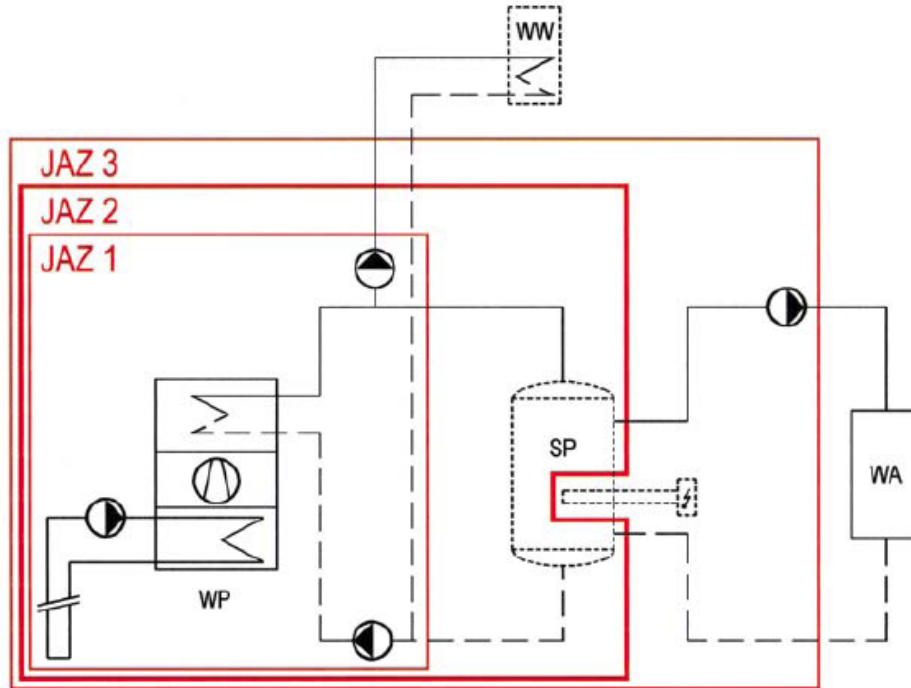
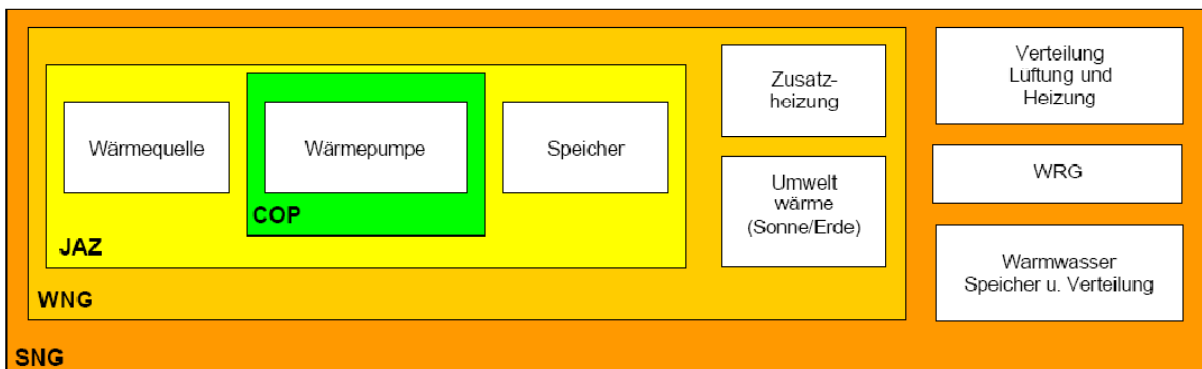


Abbildung 3-5: Darstellung von verschiedenen Systemgrenzen zur Berechnung der JAZ1, JAZ2 bzw. JAZ3 für Heizungs- bzw. Warmwasserbereitungssysteme (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.12)).

Systemnutzungsgrad, Wärmeerzeugernutzungsgrad:

Besonders geeignet für die Beurteilung von Heizsystemen ist der Systemnutzungsgrad (SNG). Bei der Definition verschiedener Systemgrenzen und Kennzahlen in Abbildung 3-6, welche zur Bewertung von Wärmepumpen dienen, sieht man, dass durch den SNG auch der Hilfsstromverbrauch sämtlicher Komponenten der Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung berücksichtigt wird. Der Wärmeerzeugernutzungsgrad entspricht bei dieser Definition dem Jahresnutzungsgrad bei fossilen Heizkesseln (Afjei et al., 2000, Kap. 3.1.1).



- Coefficient of Performance COP
- Wärmeerzeugernutzungsgrad WNG
- Jahresarbeitszahl JAZ
- Systemnutzungsgrad SNG

Abbildung 3-6: Definition von verschiedenen Systemgrenzen und Kennzahlen (Quelle: (Afjei et al., 2000, S.17)).

Betriebsweise:

Bei der Betriebsweise kann man grundsätzlich zwischen taktend und modulierend unterscheiden. Taktend bedeutet, dass man eine variable Leistung damit erzielen kann, dass der Wärmeerzeuger mit konstanter Leistung Ein- bzw. Ausgeschaltet wird (Streicher, 2005, S.53). Von modulierender Betriebsweise spricht man, wenn die Leistung kontinuierlich an den Wärmebedarf angepasst wird, indem die Brennstoffzufuhr dosiert wird (Holz, 2006, S.38-39).

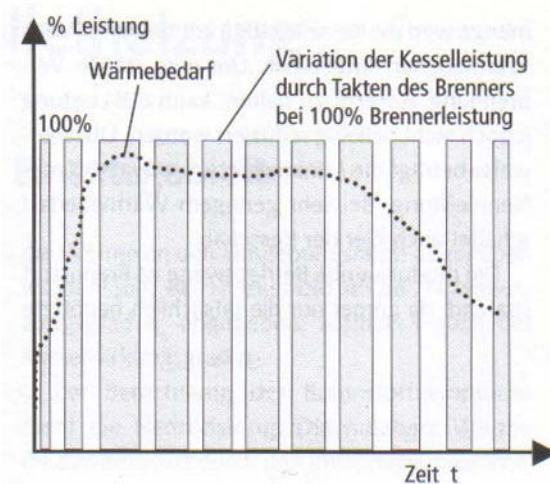


Abbildung 3-7: Darstellung der Leistungsregelung mittels Takten oder durch geregelte Brennstoffzufuhr (modulierend). Dabei wird die Leistung kontinuierlich dem Wärmebedarf angepasst (Quelle: (Holz, 2006, S.37-38)).

Monovalent / bivalent / multivalent:

Diese Begriffe definierten laut Bohne (2004, Kap. 4.2.1) früher die Anzahl der Wärmeerzeugungsarten, stehen aber heute für die Anzahl der verwendeten Energiearten. Monovalent bedeutet somit, dass alle Wärmeerzeuger z.B. mit Gas angetrieben werden (z.B. Gas-Heizkessel und Gas-Wärmepumpe). Bivalente Systeme verwenden zwei und multivalente Systeme mehrere Energiearten.

Simader, Jamek, Ritter und Benke (2007, Kap. 2.1) sprechen jedoch von monoenergetischem Betrieb, wenn zwei Wärmeerzeuger mit dem gleichen Energieträger betrieben werden.

2) Gas-Brennwertkessel

Bei der Untersuchung von Heizsystemen auf Basis von fossilen Brennstoffen muss man grundsätzlich zwischen konventioneller-, Niedertemperatur und Brennwerttechnik unterscheiden. Bei den ersten Beiden kann nur der Heizwert des Brennstoffes genutzt werden. Durch die Brennwerttechnik hingegen kann auch die in den Abgasen vorhandene (latente) Wärme nutzbar gemacht werden¹. Die prinzipielle Funktionsweise kann mit Hilfe von Abbildung 3-8 erklärt werden (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, Kap. 5.1).

¹ Für Erdgas: Heizwert = 10,00kWh/m³; Brennwert = 11,09kWh/m³; Verhältnis Brennwert/Heizwert = 1,11 (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, S.32)

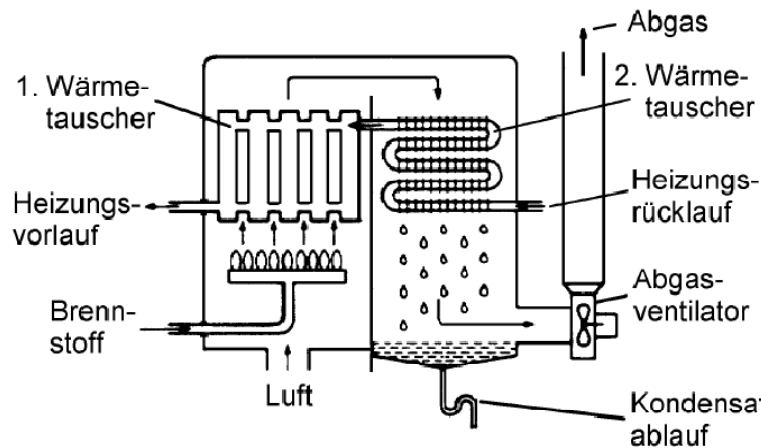


Abbildung 3-8: Funktionsschema eines Brennwertkessels (Quelle: (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, S.32)).

Der Bereich in dem der Brennstoff unter Luftzufuhr verbrannt und mit der entstehenden Wärme über den 1. Wärmetauscher das Heizwasser erwärmt wird, entspricht auch dem eines konventionellen Kessels. Zusätzlich wird nun aber ein 2. Wärmetauscher verwendet, der vom Heizungsrücklauf-Wasser durchströmt wird. Dadurch wird es möglich, die Abgase auf eine Temperatur unter den Kondensationspunkt von etwa 55°C (Erdgas) zu bringen. Durch die dadurch nutzbare latente Wärme kann das Heizwasser vorgewärmt werden. Der Abgasventilator wird notwendig, da bei den geringen Abgastemperaturen (bis zu 25°C) der natürliche Auftrieb nicht mehr ausreicht. Das Kondensat (Wasser bildet mit den im Abgas vorhandenen Stickoxiden Säuren) muss abgeführt werden (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, Kap. 5.1).

Grundsätzlich kann bei Brennwertkesseln in drei Generationen unterschieden werden. Bei der 1. Generation, wie sie in Abbildung 3-8 dargestellt ist, wird ein Kondensationswärmetauscher an einen konventionellen Gas-Spezialheizkessel verbunden. Dieser 2. Wärmetauscher besteht aus korrosionsbeständigem Material. Bei der 2. Generation wird nicht mehr zwischen dem 1. und dem 2. Wärmetauscher unterschieden, sondern diese gehen ineinander über. Bei manchen Brennern solcher Bauweise ist auch eine modulierende Betriebsweise möglich, wodurch die Takthäufigkeit reduziert werden kann. Geräte der 3. Generation sind speziell für Niedrigenergiehäuser entwickelt worden. Sie besitzen einen integrierten Warmwasserspeicher und weisen eine relativ geringe Leistung auf. Generell gilt für Brennwertgeräte, wie schon erwähnt, dass ein Ventilator zur Gewährleistung der Verbrennungsluft-Zuführung und Abgasabführung erforderlich ist. Wie Abbildung 3-9 zeigt, wird der Kesselwirkungsgrad umso höher, je niedriger die Rücklauftemperatur wird. Aus diesem Grund sind Brennwertkessel besonders für den Einsatz von Niedertemperaturheizsystemen geeignet. Bei richtiger Auslegung können Jahresnutzungsgrade des Wärmeerzeugers, bei kombiniertem Heiz- und Warmwasserbetrieb erreicht werden, die zumindest im Bereich von 100-105% liegen (Joos et al., 2004, Kap. 3.2.3, 3.2.7).

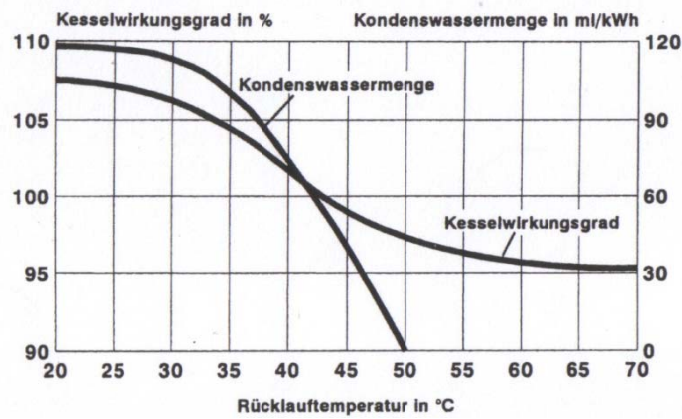


Abbildung 3-9: Verlauf des Wirkungsgrades (und der Kondenswassermenge) als Funktion der Rücklauftemperatur (Quelle: (Joos et al., 2004, S.134)).

In einer Feldstudie werden etwa 60 Gas-Brennwertkessel untersucht. Im Abschlussbericht wird auf den deutlichen Unterschied von den gemessenen Jahresnutzungsgraden und den von den Herstellern angegebenen hingewiesen. Die Messergebnisse liegen im Mittel bei 86,2% (bezogen auf den Brennwert) bzw. etwa 95,7% (bezogen auf den Heizwert). Dies liegt etwa 13% unter den von Herstellern gegebenen Normnutzungsgraden (Wolff et al., 2004, Kap. 6.1.1). Abbildung 3-10 stellt die Ergebnisse dieser Studie in Abhängigkeit der flächenbezogenen Heizleistung dar. Es zeigt sich, dass der Nutzungsgrad mit kleinerem Wärmeverbrauch sinkt, wobei aber die absoluten Wärmeverluste zurückgehen (Diefenbach, Loga & Born, 2005, Kap. 3.11).

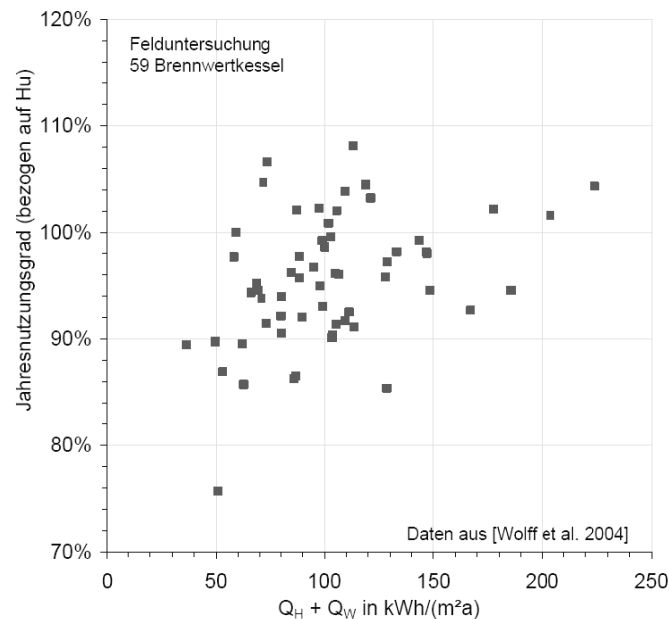


Abbildung 3-10: Aus einer Felduntersuchung von 59 Gas-Brennwertkesseln stammende Jahresnutzungsgrade (Quelle: (Diefenbach, Loga & Born, 2005, S.42)).

Abbildung 3-11 zeigt den (theoretischen) Verlauf des Nutzungsgrades (auf den Heizwert bezogen) für verschiedene Technologien in Abhängigkeit der Auslastung. Durch Niedertemperatur- und Brennwertkessel kann der Nutzungsgrad, besonders auch im Teillastbereich, verglichen mit den früher verwendeten Konstanttemperatur-Kesseln, deutlich verbessert werden. Der Grund gelten die Verringerung der Abgasverluste im Teillastbetrieb und die sehr geringen Auskühl- und Oberflächenverluste (VdZ, 2003, S.2).

Der in einer Studie tatsächlich gemessenen Nutzungsgrad-Verlauf (nun auf den Brennwert bezogen) zeigt, dass die Wirkungsgradverbesserung im Teillastbetrieb im Regelfall nicht auftritt (Abbildung 3-12) (Wolff et al., 2004, Kap. 6.1.1).

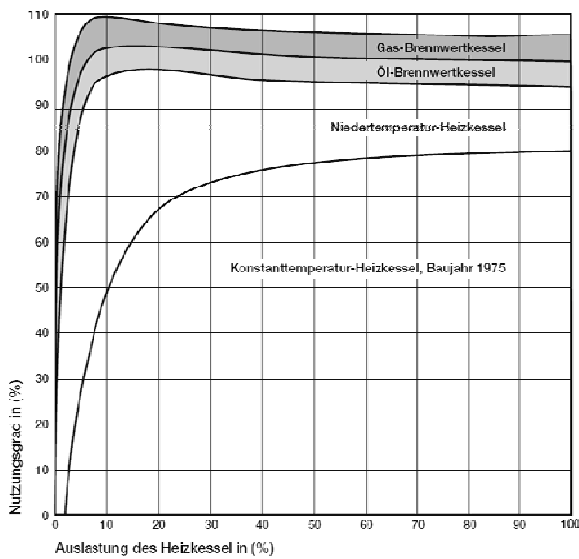


Abbildung 3-11: Verlauf des Nutzungsgrades (auf den Heizwert bezogen) für verschiedene Technologien in Abhängigkeit der Auslastung (Quelle: (VdZ, 2003, S.2)).

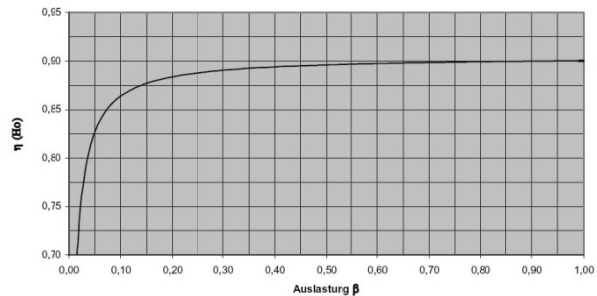


Abbildung 3-12: Nutzungsgradverlauf (auf den Brennwert bezogen) von 60 untersuchten Gas-Brennwert-Anlagen in Abhängigkeit der Auslastung (Quelle: (Wolff et al., 2004, S.41)).

Werden die Brennwertkessel außer zur Erzeugung der Raumwärme auch zur Warmwasserbereitung eingesetzt, kommt es u.a. durch die höheren Vorlauftemperaturen zu einer Verschlechterung des Nutzungsgrades. Die höheren Vorlauftemperaturen bewirken nämlich, dass die Rücklauftemperaturen evtl. nicht mehr über dem Abgastaupunkt liegen. Besonders im Sommer, wenn die Kessel nur zur Trinkwassererwärmung benötigt werden, kommt es aufgrund der Bereitschaftsverluste zu deutlich niedrigeren Nutzungsgraden (siehe Abbildung 3-13). Wie sehr sich nun der Warmwasseranteil auf den Jahresnutzungsgrad auswirkt, kann aus Abbildung 3-14 abgelesen werden (Wolff et al., 2004, Kap. 6.1.3 - 6.1.5).

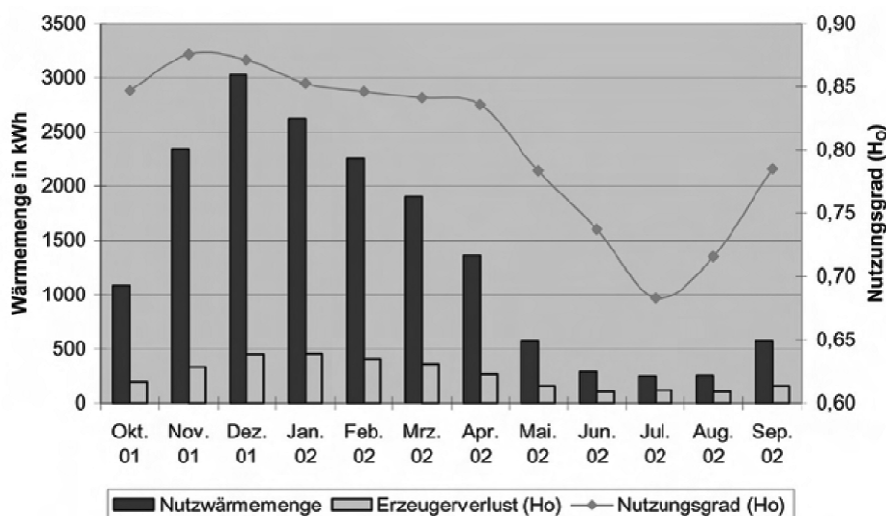


Abbildung 3-13: Darstellung eines Jahresverlaufes der Nutzwärmemengen, Erzeugerverlusten und des entsprechenden Nutzungsgrades (Quelle: (Simader et al., 2007, S.44)).

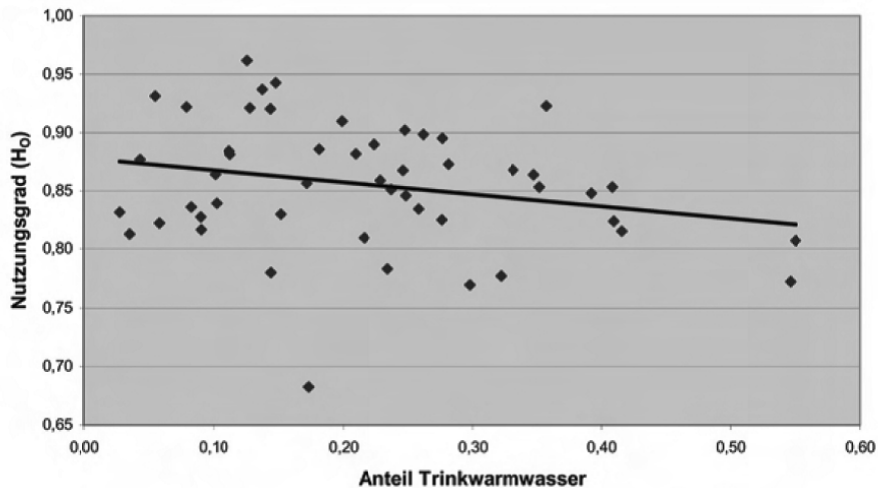


Abbildung 3-14: Verlauf des Jahresnutzungsgrades als Funktion des Warmwasseranteils (Quelle: (Simader et al., 2007, S.45)).

Auch in den Sommermonaten wird der Kessel trotz ausreichender, von einem evtl. vorhandenen Solarkollektor bereitgestellter Wärme, in der Praxis häufig in Bereitschaft gehalten. Der durchschnittliche Betriebsbereitschaftsverlust wird mit 0,468% der Kesselleistung angegeben. Wird die Warmwasserbereitung mittels Solarkollektoren unterstützt, kommt es somit bei den untersuchten Systemen zu einer Verminderung des durchschnittlichen Jahresnutzungsgrades um 1,8% (Wolff et al., 2004, Kap. 6.1.4 & Kap. 6.2.9).

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass bei einem geringen Wärmebedarf die Verluste absolut gesehen zwar abnehmen, der Nutzungsgrad aber ebenfalls abnimmt (Wolff et al., 2004, Kap. 6.1.4).

3) Biomassekessel

Unter Biomasse, die zur Wärmeerzeugung genutzt wird, kann grundsätzlich in feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe unterschieden werden. Im Folgenden soll auf Wärmeerzeuger, die den Brennstoff Holz verwenden, näher eingegangen werden.

Zur Erreichung besserer Verbrennungsgüte und Brennstoffausnutzung werden heute keine „Allesbrenner“ mehr angeboten, sondern es erfolgt eine Spezialisierung auf Pellets, Hackschnittel oder Stückholz (Tritthart et al., 2001, S.37).

Im Folgenden werden nun handbeschickte Stückholzkessel und automatisch beschickte Pellets- und Hackgutkessel betrachtet.

Grundsätzlich kann man bei den Feuerungssystemen zwischen Durchbrandkessel und Kessel mit oberem bzw. unterem Abbrand unterscheiden. Bei letzteren Beiden wird die Verbrennung in einen Primärbrennbereich (Schwelgasentwicklung) und einen Nachbrennbereich (Schwel-Spaltgasverbrennung) geteilt. Dadurch kann über gezielte Anpassung der Primär- und Sekundärluft eine Leistungsregelung erfolgen (Joos et al., 2004, S.224).

Stückholzkessel (bzw. Scheitholz oder Holzvergaserkessel), die als Durchbrandkessel ausgeführt sind, werden heute kaum mehr verwendet. Dabei brennt die Flamme durch die komplette im Kessel befindliche Holzfüllung. Der Vorgang ist schwer zu kontrollieren und es kommt zu hohen Abgasverlusten. Bei Kessel mit unterem Abbrand hingegen ist nur der untere Teil der Holzfüllung am Verbrennungsprozess beteiligt. Es wird somit eine langsamere Ausgasung des Holzes erreicht. Am Abgasstutzen ist ein entsprechender Unterdruck erforderlich. Seit den

80er Jahren können Unterbrandkessel mit einem Saugzug- bzw. Druckgebläse ausgestattet werden. Dadurch wird der benötigte Über- bzw. Unterdruck im Brennraum erzeugt (Lasselsberger, 2000, Kap. 2.1). Heute arbeiten die meisten Anlagen nach dem Sturzbrandprinzip (ebenfalls mit Verbrennungsluftgebläse) (Joos et al., 2004, S.230). Sturzbrandkessel arbeiten ebenfalls nach dem Prinzip des unteren Abbrandes, wobei jedoch die Flamme nur durch mechanisch zugeführte Verbrennungsluft nach unten gerichtet wird. Es ist somit ein Zuluft- bzw. Saugzugventilator erforderlich (Liebi, 2003, Kap. 5.3).

Die Regelung von händisch beschickten Kesseln kann nur über Anpassung der Verbrennungsluftmenge erfolgen. Bei automatisch beschickten Pellets- oder Hackgutkesseln kann zusätzlich auch die zugeführte Brennstoffmenge verändert werden. Dadurch kann insbesondere das Teillastverhalten deutlich verbessert werden (Lasselsberger, 2000, S.32).

Diese Leistungsanpassung kann als modulierende Betriebsweise bezeichnet werden. Um eine stabile Verbrennung zu gewährleisten, kann eine solche aber nur bis zu einer Minimalleistung von etwa 30% der Nennleistung durchgeführt werden. Ist der Wärmebedarf noch geringer, muss der Kessel abschalten (Holz, 2006, S.38-39). Bei kleinen Nennleistungen kann es im Teillastbetrieb zu Schwierigkeiten kommen, da bei einer Wärmeleistung von <2kW keine stabile Verbrennung mehr möglich ist (Hoffmann, Weiß & Hirschl, 2003, Kap. 4.2.1).

Die Zündung der Hackschnitzel bzw. Pellets erfolgt entweder über eine Gebläsezündung oder eine Zündpatrone. Erstere hat eine Leistungsaufnahme von etwa 1-15kW. Die Zündung des Holzes erfolgt dabei über ein Heißluftgebläse. Bei der anderen Möglichkeit wird ein elektrischer Widerstand soweit erhitzt bis eine Zündung erfolgt. Die Leistungsaufnahme beträgt dabei etwa 250W. Nachteilig ist dabei, dass der Widerstand meistens auch nach der Zündung direkt der Flamme ausgesetzt bleibt (Klima & Grebe, 2001, S.20).

Aber auch bei Holzvergaserkesseln kann die Zündung automatisch über ein Heißluftgebläse erfolgen¹.

In Abbildung 3-15 bis Abbildung 3-17 wird die Entwicklung der Kesselwirkungsgrade von Stückholz-, Hackgut- und Pelletsfeuerungen dargestellt.

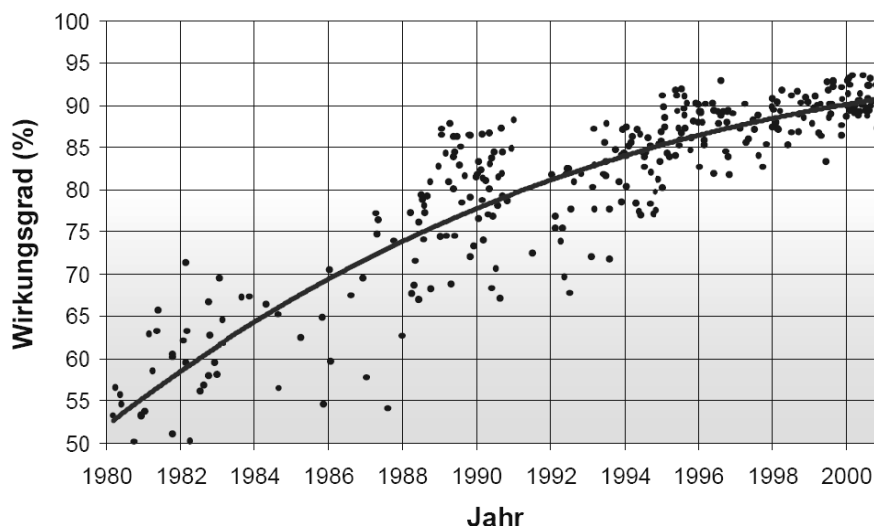


Abbildung 3-15: Wirkungsgrade von Stückholzkesseln (Quelle: (Lasselsberger, 2000, S.65)).

¹ Z.B. Holzvergaserkessel „therminator II“ (02/2007), www.solarfocus.at

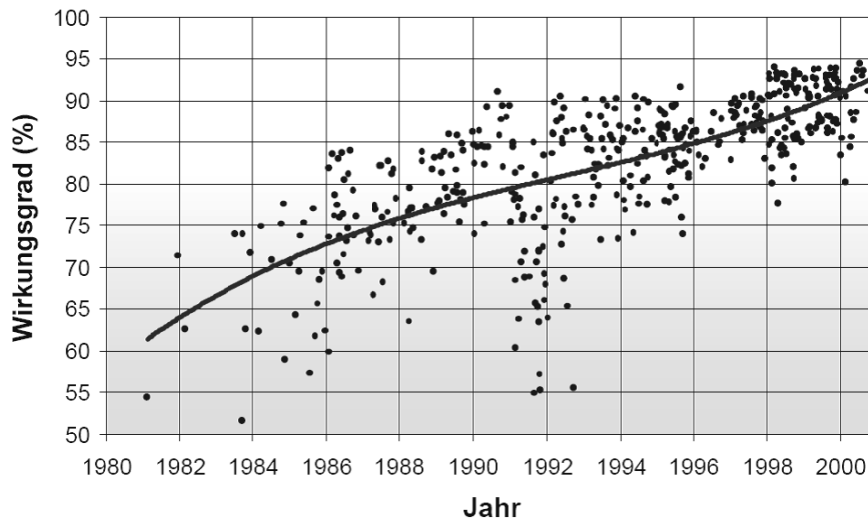


Abbildung 3-16: Wirkungsgrade von Hackgutfeuerungen (Quelle: (Lasslsberger, 2000, S.68)).

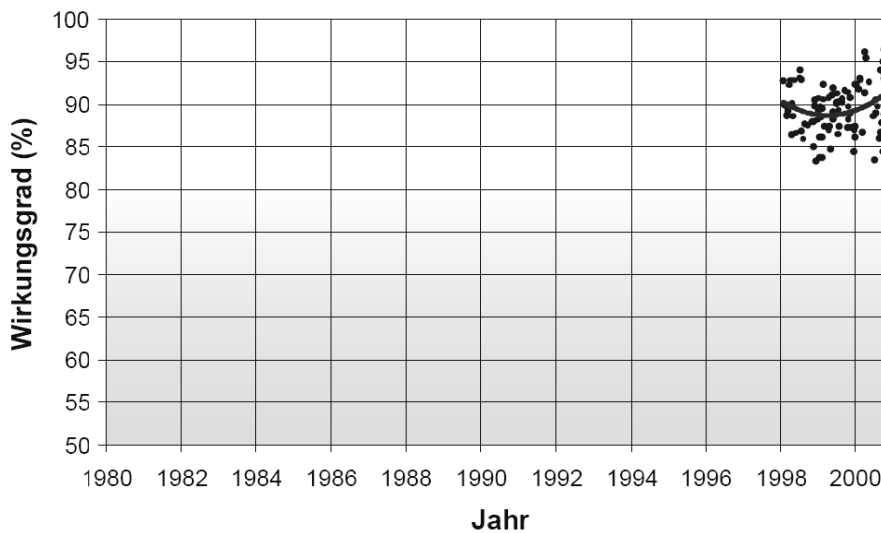


Abbildung 3-17: Wirkungsgrade von Pelletsfeuerungen (Quelle: (Lasslsberger, 2000, S.71)).

Laut Holz (2006, S.18) können Pelletskessel einen feuerungstechnischen Wirkungsgrad bis zu 95%, einen Kesselwirkungsgrad bis zu 92% und einen Jahresnutzungsgrad von 85-90% erreichen.

Die in Abbildung 3-18 dargestellten Kesselwirkungsgrade als Funktion der Nennleistung ergaben sich, aufgrund einer Herstellerbefragung, für 32 (bzw. 26 bei kleinster Leistung) Pelletskessel. Die Werte für die Nennleistung liegen im Bereich von 85,2-94,3% (Mittelwert 90,6%). Die Teillastwirkungsgrade ergeben durchschnittlich 89,4%. Sie liegen somit in einem Bereich von 92,3-103,7% des Wirkungsgrades bei Nennleistung (Hoffmann, Weiß & Hirschl, 2003, Kap. 4.2.2.1).

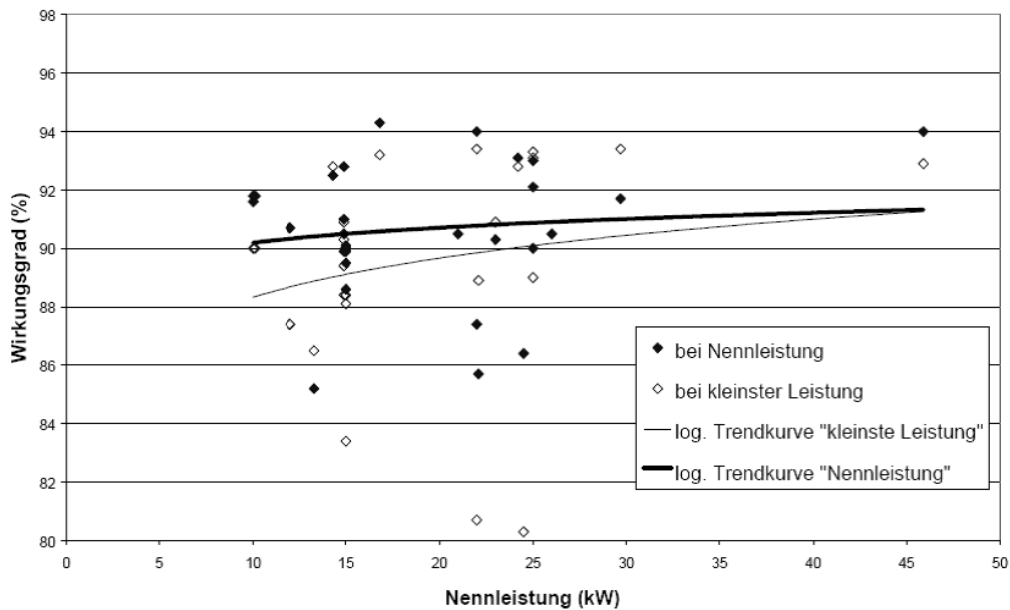


Abbildung 3-18: Kesselwirkungsgrade von Pelletskessel, ermittelt durch eine Herstellerbefragung (Quelle: (Hoffmann, Weiß & Hirschl, 2003, S.31)).

4) Wärmepumpen

Da Wärmepumpen mitunter als besonders geeignet für den Einsatz in Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf erscheinen, wird auf diese besonders eingegangen.

Wärmepumpen werden entweder mit elektrischer Energie, Gas- oder Dieselmotoren betrieben. Im für Wohnhäuser interessanten, vergleichsweise niedrigem, Leistungsbereich sind in Europa beinahe ausschließlich elektrisch angetriebene Wärmepumpen im Einsatz, im Gegensatz zu den USA oder Japan. Die Einteilung der elektrisch betriebenen Wärmepumpen erfolgt so, dass an 1. Stelle das Wärmeträgermedium für den Außenwärmetauscher auf Seiten der Wärmequelle, und an 2. Stelle das Wärmeträgermedium für den Innenwärmetauscher auf der Wärmenutzungsseite steht (z.B.: Luft/Wasser, Sole/Wasser, Wasser/Wasser, Luft/Luft...) (Simader et al., 2007, Kap. 2.1).

Zusätzlich zur Benennung der Wärmeträgermedien, die meist nach deren englischen Bezeichnungen abgekürzt werden (Air, Water und Brine (Sole)), folgen die entsprechenden Temperaturen wie z.B. W10/W35. Die erste Zahl bezeichnet die Verdampfer-Eintrittstemperatur und die zweite Zahl die Vorlauftemperatur der Wärmesenke. Zur besseren Vorstellung werden diese Punkte in Abbildung 3-21 eingezeichnet (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.22).

Die verwendeten Wärmequellen für Wärmepumpen in Österreich der letzten Jahre werden in Abbildung 3-19 dargestellt. Mit 71% wurden im Jahr 2006 hauptsächlich Erdreich/Wasser-Wärmepumpen verwendet. Dabei haben die Direkt-Verdampfer in den letzten Jahren gegenüber den Sole/Wasser-Wärmepumpen große Marktanteile verloren (siehe Abbildung 3-20). Luft/Wasser- und Waser/Wasser-Wärmepumpen werden zu 18,3% bzw. 10,7% verwendet (Faninger, 2007, Kap. 4).

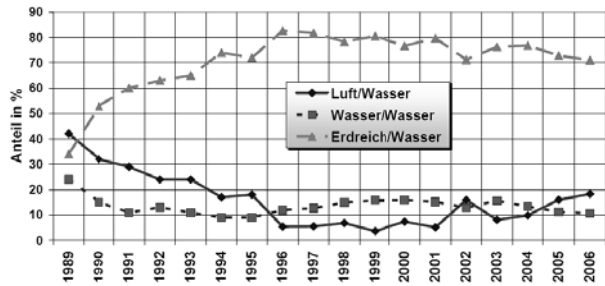


Abbildung 3-19: Anteile der Wärmequellen für Heizungs-Wärmepumpen in Österreich 1989-2006 (Quelle: (Faninger, 2007, S.14)).

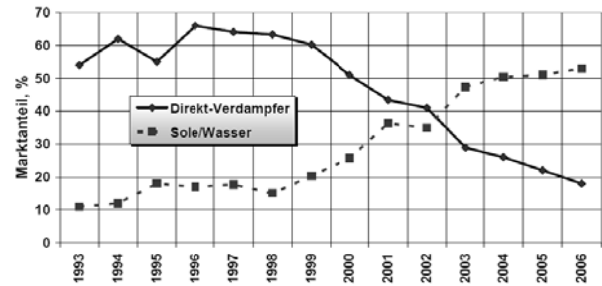


Abbildung 3-20: Marktanteile der Erdreichgekoppelten Heizungs-Wärmepumpen (Quelle: (Faninger, 2007, S.14)).

a) **Prinzipielle Funktionsweise**

Bei Wärmepumpen kann grundsätzlich zwischen Kompressions- und Sorptionswärmepumpen unterschieden werden. Der Antrieb des Verdichters bei Kompressionswärmepumpen erfolgt entweder über Elektro- oder über Verbrennungsmotoren. Auf Sorptionswärmepumpen, die in Absorptions- und Adsorptionswärmepumpen unterteilt werden können, wird nun nicht näher eingegangen. Erwähnt sei nur soviel, dass Absorptionswärmepumpen, anstelle des bei Kompressionswärmepumpen vorhandenen mechanischen, einen thermischen Verdichter (Austreiber) aufweisen. Diese Energie stammt dabei üblicherweise aus der Verbrennung von Gas oder Öl oder es wird die Abwärme aus industriellen Prozessen genutzt. Neu ist die Nutzung von mit Solarkollektoren erzeugter Wärme. Zum Betrieb wird zwar auch elektrische Energie benötigt (Lösungsmittelpumpe), welche allerdings relativ gering ist (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, Kap. 8.1).

Eine Kompressionswärmepumpe besteht grundsätzlich aus einem Verdampfer, einem Verdichter, einem Kondensator (Verflüssiger) und einem Expansionsventil (Drosselorgan) (siehe Abbildung 3-21). Der dazugehörige Kreisprozess wird im $\log(p)$ - h -Diagramm (Abbildung 3-22) dargestellt. Beginnt man mit Punkt-4, erfolgt eine Erhöhung der Enthalpie, indem der Verdampfer Wärme dem Kältemittel zuführt. Da der Siedepunkt dieses geringer liegt, erfolgt eine Verdampfung. Als Wärmequelle wird dabei entweder Luft, Wasser oder das Erdreich verwendet. Danach erfolgt eine Verdichtung des Dampfes durch den Kompressor. Anschließend wird die Wärme im Kondensator an die Wärmesenke abgegeben und es erfolgt eine Verflüssigung. Der Kreislauf wird durch das Expansionsventil geschlossen, wodurch eine Reduzierung des Drucks erfolgt. Dabei wird das Kältemittel teilweise verdampft (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, Kap. 4.1).

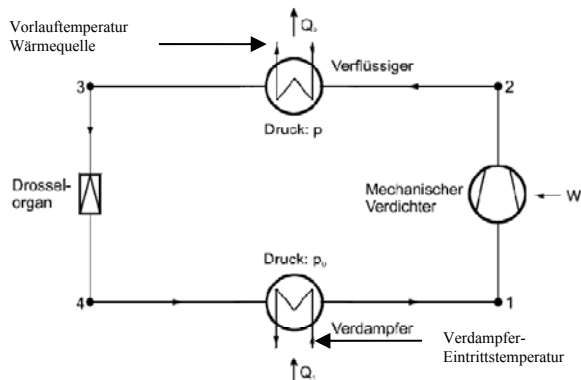


Abbildung 3-21: Schematische Darstellung eines Wärmepumpenkreislaufes (Kompressionswärmepumpe) (Quelle: (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.17), zusätzliche Punkte eingetragen).

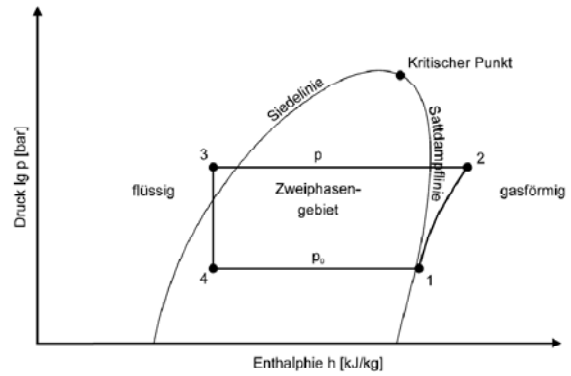


Abbildung 3-22: Kreisprozess einer Wärmepumpe ($\log(p)$ - h -Diagramm) (Quelle: Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.18).

Wärmepumpenheizungen werden üblicherweise taktend betrieben (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.429).

b) **Wärmequellenanlagen und Techniken**

Wärmequellenanlagen dienen dazu, um den entsprechenden Medien die Wärme zu entziehen. Zunächst werden die Wärmequellen Umgebungsluft und oberflächennahes Erdreich (inkl. Grundwasser) näher betrachtet. Die Wärme in der Umgebungsluft und in der oberflächennahen Erdschicht resultiert hauptsächlich aus der Sonneneinstrahlung. Je tiefer die Erdschichten sind, desto größer wird der Anteil der geothermischen Energie (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, Kap. 8).

Luft als Wärmequelle hat einige Nachteile. Zum Einen ist die spezifische Dichte und Wärmekapazität relativ gering, wodurch große Volumenströme notwendig werden, um die benötigte Wärme bereitzustellen. Des Weiteren sind die Außenlufttemperaturen großen Schwankungen unterzogen. Besonders dann, wenn ein hoher Heizwärmebedarf herrscht (also niedrige Außentemperaturen), weist die Luft-Wärmepumpe, aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, eine kleine Leistungszahl auf. Der Luftdurchsatz sollte bei etwa $300\text{-}500\text{m}^3/\text{kW}_{\text{Verdampferleistung}}$ liegen (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.404-408).

Bei Anlagen, welche die Wärme aus oberflächennahem Erdschichten entziehen, kann prinzipiell zwischen geschlossenen und offenen Systemen unterschieden werden (siehe Tabelle 3-2). Unter Systemen die nicht in diese Einteilung passen sind die Luftvorheizung bzw. Kühlung, Koaxialbrunnen und Gruben-/Tunnelwasser-Nutzung zu nennen.

Tabelle 3-2: Zusammenstellung verschiedener Wärmequellenanlagen zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme (in Anlehnung an (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.409).

Geschlossene Systeme	Erdwärmekollektoren (horizontal)
	Direktverdampfung (horizontal)
	Erdwärmesonden
	-gerammt (vertikal oder schräg)
	-gebohrt (vertikal)
	Energiepfähle (horizontal oder vertikal)
Offene Systeme	Grundwasserbrunnen

Im Folgenden werden nun ausgewählte Wärmequellenanlagen näher beschrieben.

Erdwärmekollektoren:

Erdwärmekollektoren werden horizontal, meist in einer Tiefe von 1-1,5m verlegt. Die Rohre befinden sich dabei in einem Abstand von etwa 0,5-1m. Ist das Wärmeträgermedium nicht Sole, sondern das Arbeitsmittel der Wärmepumpe selbst, dann handelt es sich um einen Direktverdampfer. Der Vorteil dabei ist, dass weniger Komponenten zum Aufbau benötigt werden, und dass höhere Jahresarbeitszahlen möglich sind. Nachteilig ist, dass deutlich höhere Arbeitsmittel-Füllmengen benötigt werden, und dass höhere Ansprüche an die Ausführung gestellt werden. Handelt es sich um keinen Direktverdampfer, wird der sogenannte Zwischenkreis von Sole durchflossen. Die davon vom Erdreich aufgenommene Wärme wird am Verdampfer wieder abgegeben. Die Rohre dieses Systems sind meist aus Kunststoff ausgeführt. Bei Direktverdampfung hingegen aus beschichtetem Metall. Die Wärmeleistung, die dem Erdreich entzogen werden kann, liegt im Bereich von 10-40W/m². Dadurch können in der Heizperiode etwa 360MJ/m² gewonnen werden. Die Rohre können auch als Grabenkollektor oder als Spiralkollektor verlegt werden, wodurch der Flächenbedarf verkleinert werden kann. Dabei ist die Wärmereneration allerdings problematischer (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.408-411).

Erdwärmesonden:

Diese Wärmequellenanlage wurde bisher kaum nach der Methode der Direktverdampfung ausgeführt. Das Problem war u.a. die große Füllmenge, welche früher oft aus ozonschädigendem Arbeitsmittel bestand. Neuerdings ist die Direktverdampfung wieder vermehrt im Gespräch, wobei nun Ammoniak als Arbeitsmittel verwendet wird. Als Vorteil von Erdwärmesonden ist hauptsächlich der geringere Flächenbedarf zu nennen. Abbildung 3-23 zeigt unterschiedliche Varianten. Die gebohrten Sonden können bis über 250m tief in den Boden reichen. Sie werden dabei meist als Einfach- bzw. Doppel-U-Sonden, oder Koaxial ausgeführt. Die Rohre sind meist aus HDPE und weisen, bis zu einer Tiefe von 60m, häufig eine Dimension von 25x2,3mm und darüber von 32x2,9mm auf. Bei der im Bild rechts dargestellten Anordnung werden die Sonden (meist Metall-Koaxialsonden) etwa 30m tief gerammt (oder auch gebohrt). Die Entzugsleistungen die damit realisiert werden können, liegen etwa zwischen 20-100W/m, was stark von den lokalen Gegebenheiten abhängt. Dabei darf eine jährliche Wärmemenge zwischen 180-650MJ/(m a) nicht überschritten werden, damit das Erdreich nicht zu stark abkühlt und es somit zu einer Verschlechterung der Arbeitszahl kommt (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.411-415).

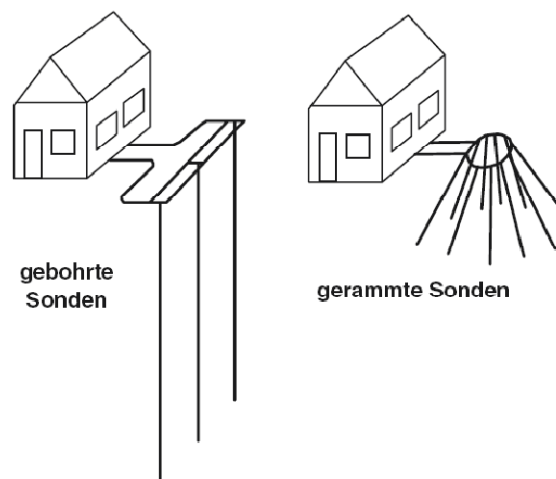


Abbildung 3-23: Schematische Darstellung von gebohrten oder gerammten Erdwärmesonden (Quelle: (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.412)).

Energiepfähle:

Dabei werden üblicherweise Wärmeübertragrohre in Gründungspfähle¹ eingebracht, was nur geringe Mehrkosten verursacht, wenn solche Pfähle ohnehin benötigt werden. Des Weiteren können aber auch andere Betonbauteile wie Kellerwände oder Fundament-Platten als Wärmeübertrager benutzt werden. Dabei ist eine gut Isolierung zu den Innenräumen hin notwendig, damit die Wärme nicht von dort entzogen wird (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.415-416).

Grundwasserbrunnen:

Der Vorteil an der Wärmequelle Grundwasser ist vor allem das etwa auf 9-10°C befindliche, konstante Temperaturniveau. Nachteilig ist, dass die Verwendung nicht überall möglich bzw. erlaubt ist. Zur Nutzung sind ein Förderbrunnen und ein Schluckbrunnen erforderlich, welche sich nicht zu knapp aneinander befinden sollen. Es sind etwa 0,2-0,3m³/h Durchfluss für ein kW Verdampferleistung notwendig (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.416-418).

Luftvorheizung bzw. -kühlung:

Davon spricht man, wenn Luft über Rohre im Erdreich angesaugt wird, um eine Temperierung zu erreichen. Besonders bei Lüftungssystemen in NEH und PH wird dieses wieder vermehrt angewandt (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.419-420).

c) ***Neue Techniken***

CO₂-Erdsonde:

Bei dieser relativ neuen Variante einer Erdwärmesonde befindet sich in einem Kupfer- oder Edelstahlrohr, welches einen Durchmesser von etwa 15cm aufweist, CO₂ unter einem Druck von etwa 45bar. In der Sonde findet der sogenannte Heatpipe-Prozess statt. Dabei läuft das flüssige CO₂ an der Rohr-Innenwand hinunter und nimmt Wärme aus dem Erdreich auf, wodurch ein Teil verdampft wird. Da eine Sonde etwa 70-100m hat, wird bis unten das gesamte nach unten laufende CO₂ verdampft und steigt im Rohrinernen nach oben auf. Oben befindet sich der Verdampfer, wodurch wieder Wärme abgegeben wird und Kondensation erfolgt. Der Vorteil dieser Technik ist vor allem, dass keine zusätzliche Energie zur Förderung benötigt wird. Außerdem werden wassergefährdende Frostschutzmittel vermieden. In Niedrigenergiehäusern können damit Jahresarbeitszahlen von 5,5 erreicht werden (Faninger, 2007, S.22) & (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.415).

Magnetische Wärmepumpen:

Wärmepumpen, die auf dem magnetokalorischen Effekt beruhen, befinden sich noch im Forschungsstadium. Zur Nutzung dieses Effektes wird ein magnetokalorisches Material einem Magnetfeld ausgesetzt, wodurch sich dieses erwärmt. Wird die Wärme entzogen, kann sie für Heizzwecke genutzt werden. Umgekehrt kühlt das Material wieder ab, wenn es aus dem Magnetfeld entfernt wird. Es existieren dazu schon verschiedene Konzepte um diesen Effekt zur Herstellung von Wärmepumpen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitung zu ermöglichen. Berechnungen und Messungen an Prototypen zeigen, dass es durchaus in Zukunft auch in der Praxis möglich sein könnte, damit höhere Leistungszahlen als mit der konventionellen Technik zu erreichen. Als Nachteil können u.a. die starken Magnetfelder angeführt werden (Egolf, Gendre, Kitanovski & Sari, 2006, Kap.1, 3, 4, 9, 11, 12) & (Egolf, Gendre, Kitanovski, Sari & Besson, 2005).

¹ Werden bei Bauwerken auf schlechten Untergrundverhältnissen benötigt.

Integrierte Solarthermische Wärmepumpe:

Bei diesem ebenfalls relativ neuen Konzept wird eine solarthermische Anlage mit einer Wärmepumpe gekoppelt. Abbildung 3-24 zeigt eine schematische Darstellung wie eine solche Anlage aufgebaut sein könnte. Dabei sind zwei Speicher vorhanden. Der Inhalt des Primärspeichers soll dabei auf jener Temperatur gehalten werden, die für die Raumheizung und das Warmwasser notwendig ist. Dieser Speicherinhalt wird, wenn möglich, über den Solarkollektor erwärmt. Wenn zu viel Wärme von diesem geliefert wird, kann der Sekundärspeicher als Kapazitätserweiterung dienen. Reicht die vom Kollektor gelieferte Energie nicht aus um den Primärspeicher auf Soll-Temperatur zu halten, erfolgt eine Erwärmung mittels Wärmepumpe. Diese benutzt dann, im Regelfall, als Wärmequelle den Sekundärspeicherinhalt oder direkt die Wärme die vom Kollektor geliefert wird. Reicht dies nicht aus, kann die Wärmepumpe der Erde über einen Erdkollector Wärme entziehen. Dieser kann durch die nur fallweise Verwendung entsprechend einfacher ausgeführt sein. Auf den Sekundärspeicher kann evtl. auch verzichtet werden, wenn das Erdreich als zusätzlicher Wärmespeicher benutzt wird. Generell gilt, dass dieses System steuerungstechnisch anspruchsvoll ist. Da aus energetischen Gründen eine Primärspeichertemperatur von etwa 40°C nicht überschritten werden soll, kann dies evtl. zu Einbußen beim Trinkwasser-Komfort führen. Durch die, aufgrund des Solarkollektors möglichen, höheren Temperaturen der Wärmequelle der Wärmepumpe, kann die Leistungszahl verbessert werden. Eine beispielhafte Berechnung für ein EFH¹ ergibt, dass durch die Nutzung dieser Technologie der Stromverbrauch etwa um 10% gesenkt werden kann (Quelle: (Schmidt, 2006) & (Soltex, 2007)). Leider konnten noch keine Messergebnisse zur Effizienz dieses Konzeptes gefunden werden.

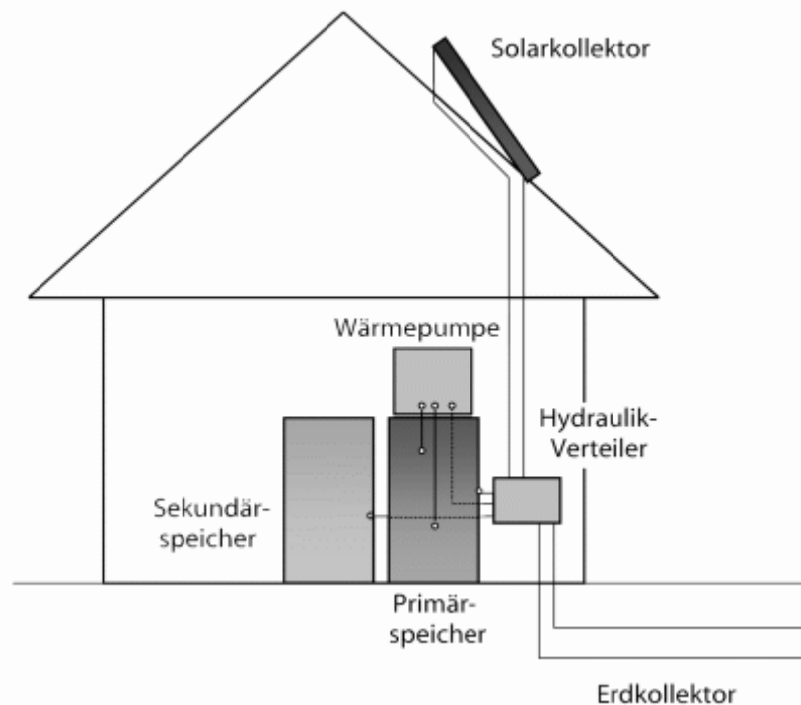


Abbildung 3-24: Schematische Darstellung einer integrierten Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe (Quelle: www.soltex-net.de).

¹ HWB=41kWh/(m²a); 160m²; WW-Bedarf=16kWh/d; 9,6m² Solarkollektor;

d) **Effizienz**

Die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen-Anlagen wird hauptsächlich durch die Wärmequellen- und die Nutzwärmetemperatur bestimmt. Je geringer die Wärmesenken-Temperatur und je größer die Wärmequellentemperatur ist, desto höher wird die Leistungs- bzw. Arbeitszahl ausfallen. In Abbildung 3-25 wird der Verlauf der JAZ für Wärmepumpen mit verschiedenen Wärmequellen in Abhängigkeit der maximalen Heizungsauslegungs-Temperatur dargestellt. Man sieht deutlich, dass niedrige Wärmesenken-Temperaturen vorteilhaft sind, was im Regelfall für Flächenheizsysteme spricht. Abbildung 3-26 zeigt die Verbesserungen der Jahresarbeitszahlen, die in den letzten Jahren erreicht werden konnten. Heute lassen sich in Niedrigenergiegebäuden mit Erdreich-Wärmepumpen schon Jahresarbeitszahlen über 4 erzielen. Luft/Wasser-Wärmepumpen in Passivhäusern (Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Verwendung eines Erdreichwärmetauschers zur Luftvorwärmung) erreichen Jahresarbeitszahlen von 3 (Zusammenstellung der Jahresarbeitszahlen siehe Tabelle 3-3) (Faninger, 2007, Kap. 7). Es wird laut Rognon (2007, Abs. 4) erwartet, dass in den nächsten 20 Jahren die Jahresarbeitszahlen für die Wärmquellen Erdreich bzw. Luft noch auf 6 bzw. 4 gesteigert werden können.

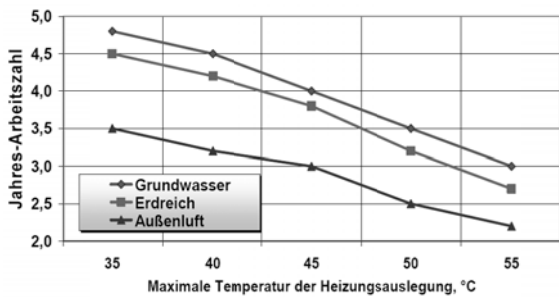


Abbildung 3-25: Darstellung der Jahres-Arbeitszahlen für Heizungswärmepumpen in Österreich in Abhängigkeit der maximalen Temperatur der Heizungsauslegung (Quelle: (Faninger, 2007, S. 24)).

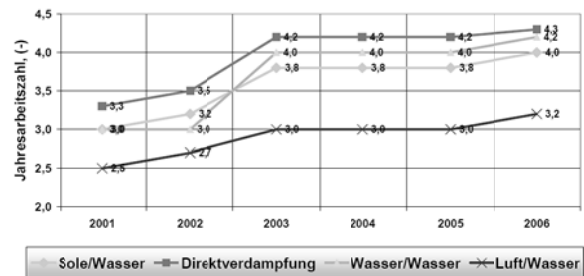


Abbildung 3-26: Darstellung der Entwicklung der Jahresarbeitszahlen von Heizung-Wärmepumpen in Österreich in den vergangenen Jahren (Quelle: (Faninger, 2007, S.24)).

Wie schon erwähnt, ist zur Erreichung hoher Leistungszahlen von Wärmequellen eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke notwendig. Abbildung 3-27 zeigt, welchen Einfluss die Vorlauftemperaturen und die Wärmequellentemperaturen auf die Leistungszahl haben können. Die Leistungszahlen für die Sole/Wasser-Wärmepumpe liegen grundsätzlich über den denen der Luft/Wasser-Wärmepumpen. Außerdem erkennt man, wie wichtig es ist, Wärmepumpen mit Niedertemperaturheizsystemen zu betreiben (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.432-433).

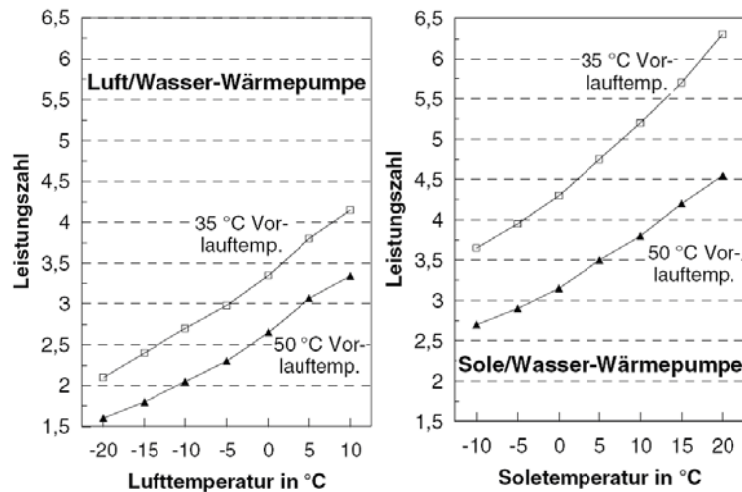


Abbildung 3-27: Verlauf der Leistungszahlen von Luft/Wasser- bzw. Sole/Wasser-Wärmepumpen als Funktion der Wärmequellentemperatur für unterschiedliche Vorlauftemperaturen (Quelle: (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.433)).

Interessant ist, ob die energetische Qualität der Anlagen im Laufe der Nutzungsdauer abnimmt. In Abbildung 3-28 und Abbildung 3-29 werden die Ergebnisse einer Studie für Luft/Wasser-, bzw. Sole/Wasser-Anlagen dargestellt. Man erkennt, dass bei den Luft/Wasser-Anlagen im 6. Und 7. Jahr die Jahresarbeitszahl etwas zurückgeht. Da diese aber in den darauffolgenden beiden Jahren wieder höher liegt, kann von keinem Trend gesprochen werden. Auch bei Sole/Wasser-Anlagen kommt es in den untersuchten neun Nutzungsjahren zu keiner Auskühlung der Sonden-Umgebung bzw. dem dadurch verursachten Rückgang der JAZ (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.51).

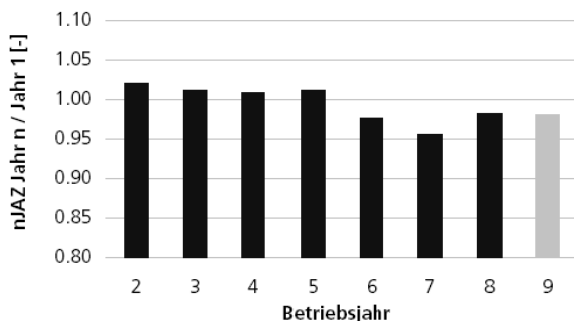


Abbildung 3-28: Relative Änderung der klimanormierten JAZ gegenüber dem ersten Betriebsjahr für Luft/Wasser-Anlagen (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.51)).

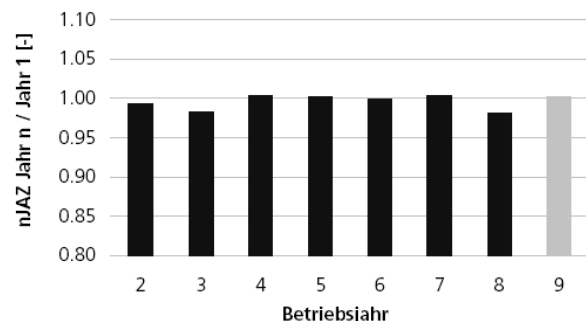


Abbildung 3-29: Relative Änderung der klimanormierten JAZ gegenüber dem ersten Betriebsjahr für Sole/Wasser-Anlagen (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.51)).

Wird die Wärmepumpe neben der Raumheizung auch zur Warmwasserbereitung eingesetzt, wird im Regelfall eine Temperatur von etwa 50°C für den Speicher benötigt. Aufgrund dieser relativ hohen Temperatur kommt es beim Ganzjahresbetrieb zu einer Reduzierung der Jahresarbeitszahl von etwa 0,5 (Simader, Jamek, Ritter & Benke, 2007, Kap. 3.3).

In einer anderen Studie wird dies nicht bestätigt. „Vergleicht man nun die JAZ von Anlagen mit und ohne WW-Bereitung, so zeigt sich im Durchschnitt über alle Anlagentypen, dass je grösser der Anteil der WP an der WW-Bereitung, desto besser die JAZ. Wird der Effekt der unterschiedlichen energetischen Qualität der Wärmepumpen durch Normierung eliminiert, schneiden alle Kategorien etwa gleich ab“ (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.56). Bei den untersuchten Systemen ist es aber wichtig zu beachten, dass der Wärmeanteil zur Warmwasserbereitung nur etwa 20% des gesamten Wärmebedarfs ausmacht. Der Systemnutzungsgrad

kann bei Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe, gegenüber rein elektrischer Bereitung, deutlich gesteigert werden (siehe Abbildung 3-30) (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.56).

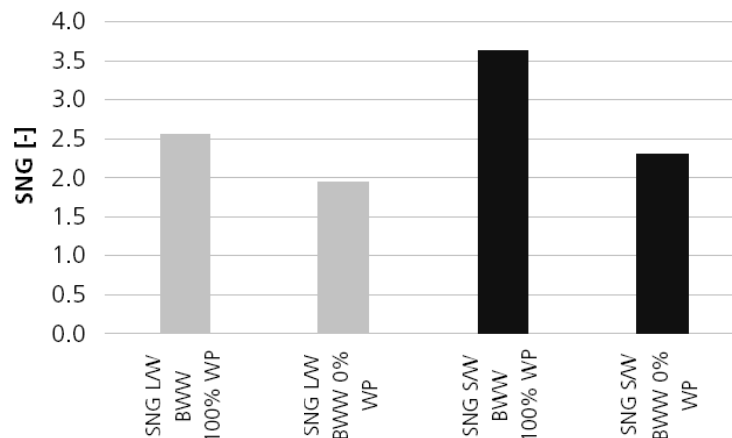
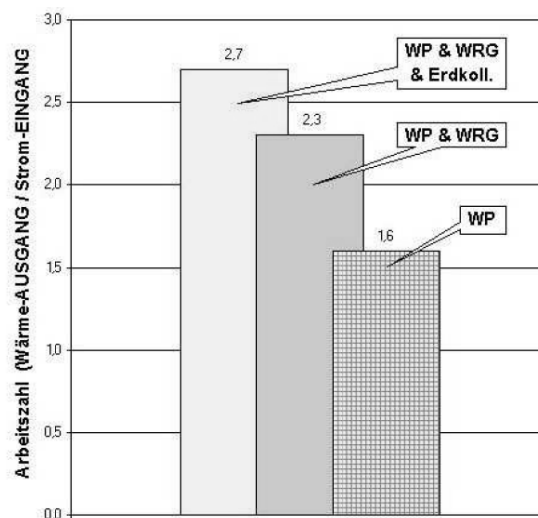


Abbildung 3-30: Systemnutzungsgrade für Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen mit 100- bzw. 0%iger (Elektroboiler) Warmwasserbereitung (Quelle: Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.57).

In einer Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen in den Jahren 1996-2003 wurden in der Schweiz etwa 235 Anlagen bis 20kW untersucht. 60% sind in Neubauten und 40% in renovierten Gebäuden installiert. 92% der Neubauten weisen eine Fußbodenheizung auf (teilweise mit Radiatoren ergänzt). Bei den renovierten Objekten sind dies nur 53%. Der Mittelwert der Energiekennzahlen der Gebäude liegt etwa bei 75kWh/(m²a). Für 221 Anlagen wurden die Jahresarbeitszahlen untersucht, wobei bei 50% der Wärmepumpen zumindest teilweise auch die Warmwassererwärmung realisieren (bei 22% wird diese vollständig von der WP übernommen). Der Rest erwärmt das Trinkwasser über Elektroboiler. Die Jahresarbeitszahlen die dabei ermittelt wurden, entsprechen der Systemgrenze JAZ2 (siehe Abbildung 3-5), berücksichtigen somit nicht den Strombedarf der Umwälzpumpe. Die Mittelwerte werden in Tabelle 3-3 zusammengestellt (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.I, 11, 12, 39-40, 43-45).

In einer weiteren 2-jährigen Feldstudie liegen die Ergebnisse des ersten Messjahres 2006/07 vor. Dabei konnten in Deutschland 33 Heiz- und 5 Warmwasserwärmepumpen in Ein- und Zweifamilienhäusern untersucht werden. Darunter ist auch ein Passivhaus mit einer Luft-Kompakt-Wärmepumpe, Vorerwärmung der Luft durch einen Erdreichwärmetauscher und Wärmerückgewinnung. Die mittleren gemessenen Jahresarbeitszahlen (ohne Umwälzpumpe) sind ebenfalls in Tabelle 3-3 zusammengestellt. Dabei wurden 7 Luft-Wasser-Wärmepumpen vermessen. Lediglich zwei davon weisen dabei eine JAZ >3 auf, und zwar 3,1 und 3,3. Die Werte für die Grundwasser-Wärmepumpen sind, verglichen mit den Erdreich-Wärmepumpen, relativ gering. Unter Anderem wird der Grund darin gesehen, dass die Leistung der Grundwasser-Förderpumpen mit 250-300W mindestens das Doppelte der Erdreich-Sole-Pumpen beträgt und dass aufgrund von zu geringen Bohrlochdurchmessern kein ausreichendes Fördervolumen realisiert werden kann. Die gemessene Bandbreite liegt dabei zwischen 1,9 und 4,2. Bei der Radiatorheizung konnte der Messwert lediglich für ein Objekt ermittelt werden, wodurch es nicht repräsentativ ist, dass dieser über dem Durchschnitt der Werte bei Fußbodenheizung liegt. Bei den Erdreichwärmepumpen besitzen 11 vertikale und 2 horizontale Erdregister. Es wird angegeben, dass, wenn auch zusätzlich evtl. vorhandene Warmwasser- bzw. Pufferspeicher vorhanden sind, sich die JAZ (Systemarbeitszahl) im Mittel um 0,34 vermindert. Außerdem zeigt sich, dass die Warmwasserbereitung mit einer zusätzlichen Kleinwärmepumpe, anstelle der kombinierten Wärmepumpensysteme, keine energetischen Vorteile bringt. Wie zu erwarten, stellt die Warmwasserbereitung mit Elektro-Standspeicher, im Vergleich, die ökologisch schlechteste Variante dar. Die Ergebnisse für das Passivhaus mit

Luft/Luft-Wärmepumpe sind in Abbildung 3-31 dargestellt. Dabei wird gezeigt, welche Verbesserungen durch den Einsatz einer zusätzlichen Wärmerückgewinnung und eines Erdreichwärmetauschers erreicht werden können (Auer & Schöte, 2007).



3: PASSIVHAUS - Luft/Luft-Heiz - Kompakt-Wärmepumpe, Leistungsaufnahme 500 W-el.

Abbildung 3-31: Ermittelte Jahresarbeitszahlen für ein Passivhaus mit Luft/Luft-Kompaktwärmepumpe und Steigerung bei zusätzlich vorhandener Wärmerückgewinnung und Erdreichwärmetauscher (Quelle: (Auer & Schöte, 2007, S.11)).

Bei einem Feldtest der E.ON Energie und Partnerunternehmen werden laut Diefenbach, Loga und Born (2005, S.40) Messergebnisse für 18 Wärmepumpenanlagen veröffentlicht. Diese werden in Neubauten (Ein-/Zweifamilien- bzw. Reihenhäuser) hauptsächlich mit Fußbodenheizungen eingesetzt. Die in Abbildung 3-4 angegebene JAZ resultiert aus 14 Solewärmepumpen. Sechs davon werden in Niedrigenergiehäusern eingesetzt. Für diese gilt ein Mittelwert von 3,5. Außerdem zeigt sich in den Ergebnissen, dass eine evtl. vorhandene elektrische Zusatzheizung so gut wie keinen Einfluss hat, da der Deckungsgrad weit unter 1% liegt (Diefenbach, Loga & Bern, 2005, S.40).

Weitere Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass zwei Wasser/Wasser-Wärmepumpen mit integrierter Warmwasserbereitung untersucht wurden, die mit einer Vorlauftemperatur von 32°C bzw. 35°C betrieben werden. Die gemittelte Arbeitszahl beträgt 3,76. Luft/Wasser-Wärmepumpensysteme erreichen Arbeitszahlen zwischen 2,68 bis 3,44. Die höchste Arbeitszahl gilt dabei für eine Vorlauftemperatur von 35°C und einer Heizleistung von 7,5kW. Die Warmwasserbereitung erfolgt getrennt. Des Weiteren wird das zuvor erwähnte Ergebnis für die Sole/Wasser-Wärmepumpen hier genauer analysiert. Interessant ist vor allem die gemittelte Arbeitszahl aus drei Sole/Wasser-Wärmepumpen mit einer Vorlauftemperatur von etwa 54°C und integrierter Warmwasserbereitung. Diese liegt bei 3,79 (Kruse, 2007, Folie 10-11)

Da allgemein Wärmepumpen umso effizienter arbeiten können, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Vorlauftemperatur ist, soll letztere wenn möglich entsprechend klein sein. Auch bei den Abluft/Zuluft-Wärmepumpen (Passivhauskonzept) reichen bei nicht allzu kalten Tagen Vorlauftemperaturen von 35-40°C aus, woraus typische Leistungszahlen von 3,5 resultieren. Zur Brauchwassererwärmung muss die Wärmepumpe aber eine Temperatur von mindestens 45°C liefern, was im Sommer zu einer Leistungszahl von etwa 2,5 und im Winter zu etwa 3 führt. Insgesamt führt dies zu einer typischen Jahresarbeitszahl von knapp über 3 (Streicher et al. (2004, Kap 5.2.1)).

3. Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen

Tabelle 3-3: Zusammenstellung von Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmepumpen (Quellen sind der Tabelle zu entnehmen; in Anlehnung an Simader, Jamek, Ritter & Benke, 2007, S.11).

Quelle	Wasser / Wasser	Erdreich / / Wasser (Sole)	Erdreich / Wasser (Di- rektver- dampfer)	Außenluft / Wasser	Abluft / Zuluft
(Faninger, 2007, S.25) ¹	3,8-4,5	3,3-4,0	3,5-4,2	2,6-3,5	2,5-2,9 ²
(Steicher et al., 2004, S.134, 148)	-	3,5-4,0	-	-	3
(Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.434)	4,0-4,5	3,8-4,3	4,18-4,95 ³	-	-
(Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.43-45) ⁴	3,4	3,4	3,7 ⁵	2,6	-
(Auer & Schote, 2007, Kap. 5) ⁶	3,0 (3,4)	3,38 (3,3)	-	2,83 (2,3)	2,7
Studie von E.ON Energie AG und Partner (2001-2003) (Quelle: (Kruse, 2007, Folie 10-11), außer gekennzeichnet)	3,59-3,92	3,6 ⁷ 3,7-4,0 ⁸	-	2,68-3,44	2,73
GEMIS 4.42	4,25 ⁹	3,9 ¹⁰		3,25 ¹¹	-
Mindestwerte für Förderung ¹²	3,8 (4,3)	3,6 (4,3)		2,8 (4,3)	
Mindestwerte für klima:aktiv ¹³ (Quelle: Simader, Jamek, Ritter & Benke, 2007, S.11)	3,7-4,2	3,5-4,0		3,0-3,5	

¹ Niedrigere Werte ergeben sich aus Mittelwert aller Ende 2005 betriebenen Wärmepumpen (in Österreich); Maximale Werte für optimale Einsatzbedingungen (Niedrigenergiehäuser und Heizungsauslegung <40°C/30°C.

² Werte gelten für Passivhäuser mit Erdreichwärmetauscher

³ Werte resultieren daraus, weil gegeben ist, dass die Jahresarbeitszahlen etwa 10-15% über jenen ohne Direktverdampfung liegen.

⁴ Mittelwerte der klimanormierten JAZ2

⁵ Gilt als nicht repräsentativ.

⁶ Werte ohne Klammer gelten für Fußbodenheizungen, mit Klammer für Radioatoren.

⁷ Gesamter Hilfsstrom (auch Umwälzpumpen) wurde mitberücksichtigt. (Quelle: Diefenbach, Loga & Born, 2005, S.40)

⁸ Hilfsstromverbrauch der Umwälzpumpen wurde herausgerechnet. (Quelle: Diefenbach, Loga & Born, 2005, S.40)

⁹ Z.B. Prozess El-Wärmepumpe-mono-Wasser-DE-2000-mix; gilt für Niedertemperatur-Heizsysteme.

¹⁰ Z.B. Prozess: El-Wärmepumpe-mono-Erdreich-DE-2000-mix; es wird nicht zwischen Sole und Direktverdampfer unterschieden; gilt für Niedertemperatur Heizsysteme.

¹¹ Z.B. Prozess: El-Wärmepumpe-mono-Luft-DE-2000-mix; gilt für Niedertemperatur-Heizsystem; elektrische Nachheizung bei kalten Tagen.

¹² Laut Oö. Energiesparverordnung 42/2004 (Quelle: (OÖ ESV, 2008b)); Werte gelten für Neubauten; der Wert ohne Klammer gilt für die Förderung von 1500€, der in Klammer für 2200€; ohne integrierter Brauchwasserbereitung wird die Mindestanforderung um 0,2 erhöht.

¹³ Die unteren Grenzen gelten, wenn die Wärmepumpe außer zur Raumwärmeerzeugung ebenfalls zur Warmwasserbereitung verwendet wird. Ansonsten sind die Mindestwerte um 0,5 höher anzusetzen.

In Abbildung 3-32 wird der COP für verschiedene Sole/Wasser-Wärmepumpen mit jeweils drei Messpunkten dargestellt. Diese Messpunkte sind bei den Wärmesenktemperaturen 35°C, 45°C und 55°C. Die Werte wurden nach EN 14511 ermittelt. Dargestellt werden nur die Werte für eine Soletemperatur von 0°C. In diesem Vergleich (wie auch im nächsten) werden nur Wärmepumpen mit relativ niedriger Heizleistung ausgewählt. Die Heizleistung die für B0/W35 gilt, wird in der Legende in Klammer, neben der Prüfprotokollnummer, angegeben (WPZ, 2007).

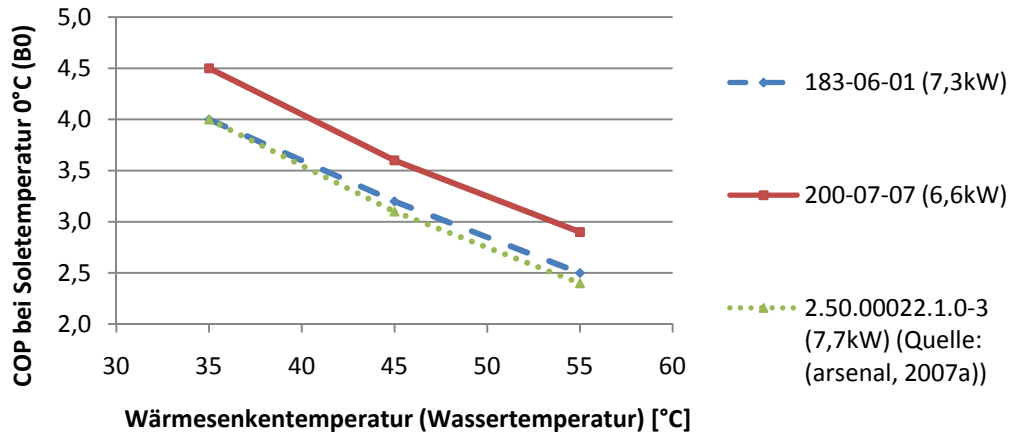


Abbildung 3-32: Zusammenstellung von verschiedenen Messergebnissen des COP für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei einer Wärmequellentemperatur von 0°C. Ermittelt nach EN 14511 (Quelle: (WPZ, 2007), außer gekennzeichnet).

Auch in Abbildung 3-33 werden Messwerte des COP dargestellt, welche nun allerdings auf EN 255 beruhen. Man erkennt zwei Bereiche im Diagramm, wobei sich die höheren COP-Werte aus einer Wärmesenktemperatur von 35°C und die niedrigeren für 50°C ergeben (WPZ, 2007).

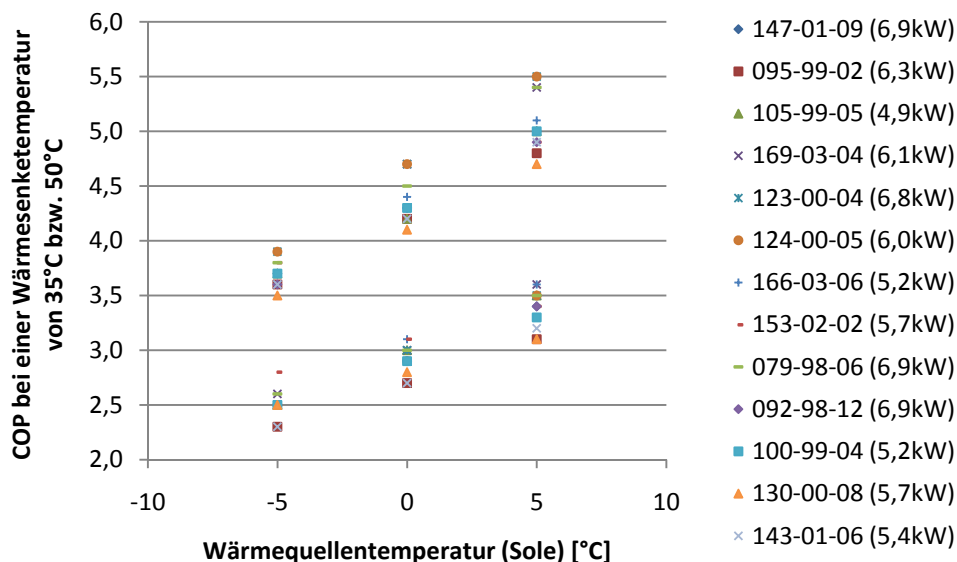


Abbildung 3-33: Zusammenstellung von Messergebnissen des COP für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei einer Wärmesenktemperatur von 35°C bzw. 50°C. Ermittelt nach EN 255 (Quelle: (WPZ, 2007)).

Auch Luft/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen werden von den genannten Prüfstellen getestet. Auf die Resultate wird nun nicht extra eingegangen. Aktuelle Ergebnisse sind auf www.wpz.ch und www.arsenal.ac.at zu finden.

5) Fernwärme

Fernwärme steht vor Allem in Großstädten und Ballungszentren zur Verfügung, da es dort möglich ist, mit relativ kurzen Wegen viel Energie zu verteilen. Diese kürzeren Distanzen bieten natürlich den Vorteil von weniger Energieverlusten und geringerem Aufwand zur Verteilung. Dabei können die gleitende, konstante und konstant/gleitende Betriebsweise unterschieden werden. Am häufigsten wird Letztere angewandt. Dabei liegt die kleinste Vorlauftemperatur (des Fernwärmenetzes) bei etwa 60 bis 70°C, um auch im Sommer die Trinkwassererwärmung zu gewährleisten. Bei kalten Außentemperaturen wird die Vorlauftemperatur weiter erhöht. Die rein gleitende Betriebsweise ist somit nicht zur Trinkwasserbereitung geeignet, da die Vorlauftemperatur immer an die Außentemperatur angepasst wird. Heute werden meist nur noch Heizwassernetze verwendet (Dampfnetze nur in Sonderfällen) (Richter et al., 2002, Kap. 3.8).

Soll ein Gebäude an ein Fern- (bzw. Nahwärmenetz) angeschlossen werden, können die in Abbildung 3-34 schematisch dargestellten Bestandteile unterschieden werden. Vom Fernwärmenetz ausgehend wird die Hausstation über eine Hausanschlussleitung verbunden.

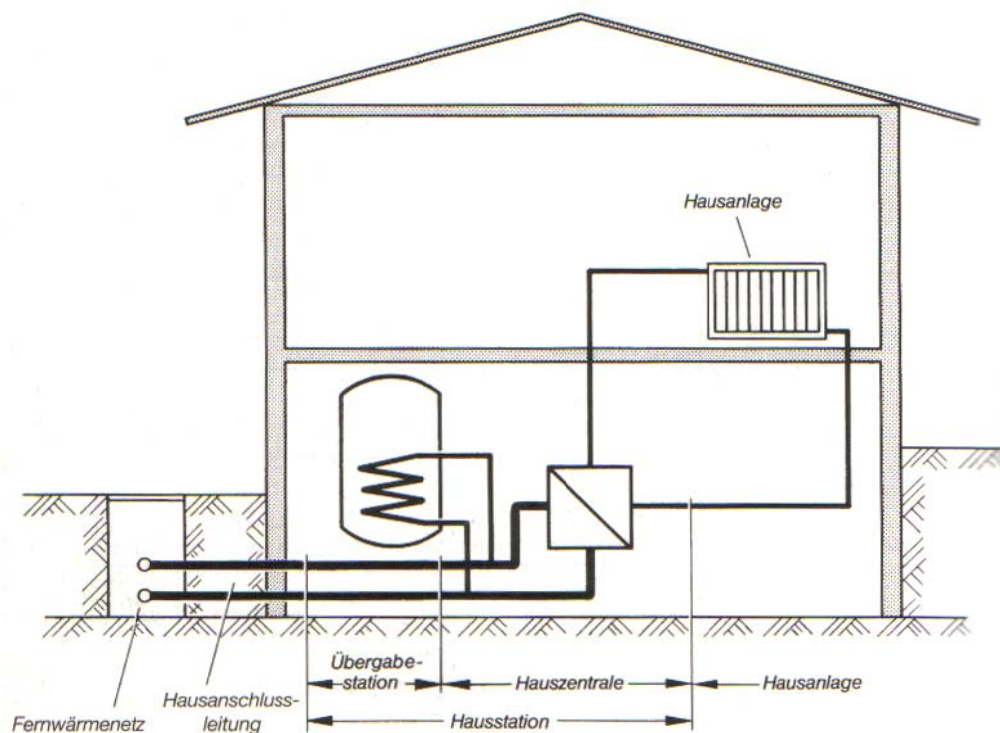


Abbildung 3-34: Bestandteile eines Fernwärmeanschlusses (Quelle: (Richter et al., 2002, S.414)).

Die Hausstation besteht aus Übergabestation und Hauszentrale. Innerhalb dieser Hausstation verläuft die Eigentumsgrenze, bis dorthin die Anlage im Besitz des FVU ist und somit auch von diesem geliefert, montiert und gewartet wird.

Der Anschluss der Hausanlage kann entweder direkt oder indirekt erfolgen. Von einem direkten Anschluss spricht man, wenn die Hausanlage direkt vom Fernheizwasser durchströmt wird. Mehr Vorteile bietet aber der indirekte Anschluss, wobei ein Wärmetauscher zwischen den beiden Heizkreisen verwendet wird. Somit ist die Hausheizung unabhängig von den Druck- und Temperaturverhältnissen im Fernwärmenetz (Richter et al., 2002, Kap. 3.8).

6) Thermische Solarkollektoren

Das traditionelle Einsatzgebiet von thermischen Solarkollektoren ist neben der Schwimmbad-Erwärmung die Warmwasserbereitung (Tritthart et al., 2001, S.49). Sie können aber auch zur Raumheizung (bzw. Unterstützung dieser) verwendet werden. Sowohl bei der solarunterstützten Warmwasserbereitung als auch bei der teilsolaren Raumheizung gilt der solare Deckungsgrad (SD) als wichtige Kenngröße. Dieser hängt neben dem Energiebedarf (für Raumheizung und Warmwasser) und der Kollektorfläche auch besonders von der/den verwendeten Speichergröße/n ab. Der solare Deckungsgrad kann wie in Formel

(3-2) definiert werden. Dabei werden sämtliche auftretende Verluste der Solaranlage zuge-rechnet, was somit für die Effizienzbewertung dieser den ungünstigsten Fall darstellt. Korrek-terweise müssten die Speicherverluste um jenen Anteil vermindert werden, der durch die Nachheizung verursacht wird. Die Bestimmung ist allerdings oft mit großem Aufwand ver-bunden (Streicher, 2007, Kap. 3.1, 3.6).

$$SD = 1 - \frac{Q_{K,ab} + Q_{EP}}{Q_{RW} + Q_{BW}} \quad (3-2)$$

$Q_{K,ab}$...	Vom Kessel jährlich abgegebene Wärmemenge [kWh/a]
Q_{EP}	...	Von der Elektro-Heizpatrone jährlich abgegebene Wärmemenge [kWh/a]
Q_{RW}	...	Zur Raumheizung jährlich benötigte Wärmemenge [kWh/a]
Q_{BW}	...	Für das Brauchwasser jährlich benötigte Wärmemenge [kWh/a]

Die Funktion von Solarkollektoren beruht auf dem Prinzip der photothermischen Wandlung, also der Umwandlung von kurzwelliger Sonnenstrahlung in thermische Energie (Wärme). Es existiert eine große Anzahl an Kollektorbauarten. Abbildung 3-35 stellt einige davon schematisch dar, wobei eine Unterteilung in konzentrierende und nicht konzentrierende Kollektoren erfolgt. Grundsätzlich kann bei beiden zwischen Luft- und Flüssigkeitskollektoren unterschieden werden. Im Folgenden werden allerdings nur Flachkollektoren, welche am Häufigsten verwendet werden, näher untersucht. Zu den konzentrierenden Kollektoren sei nur erwähnt, dass diese die direkten Sonnenstrahlen durch Spiegelflächen auf Absorberflächen konzentrieren, wodurch hohe Temperaturen möglich sind. Dabei kann in feststehende und nachgeführte Kollektoren unterschieden werden. Nicht konzentrierende Luftkollektoren können, besonders wenn ein Gebäude nur durch eine Luftheizung beheizt werden soll, geeignet sein (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, Kap. 4.1.1, S.147-152) & (Streicher, 2005, Kap. 3.1, 3.2).

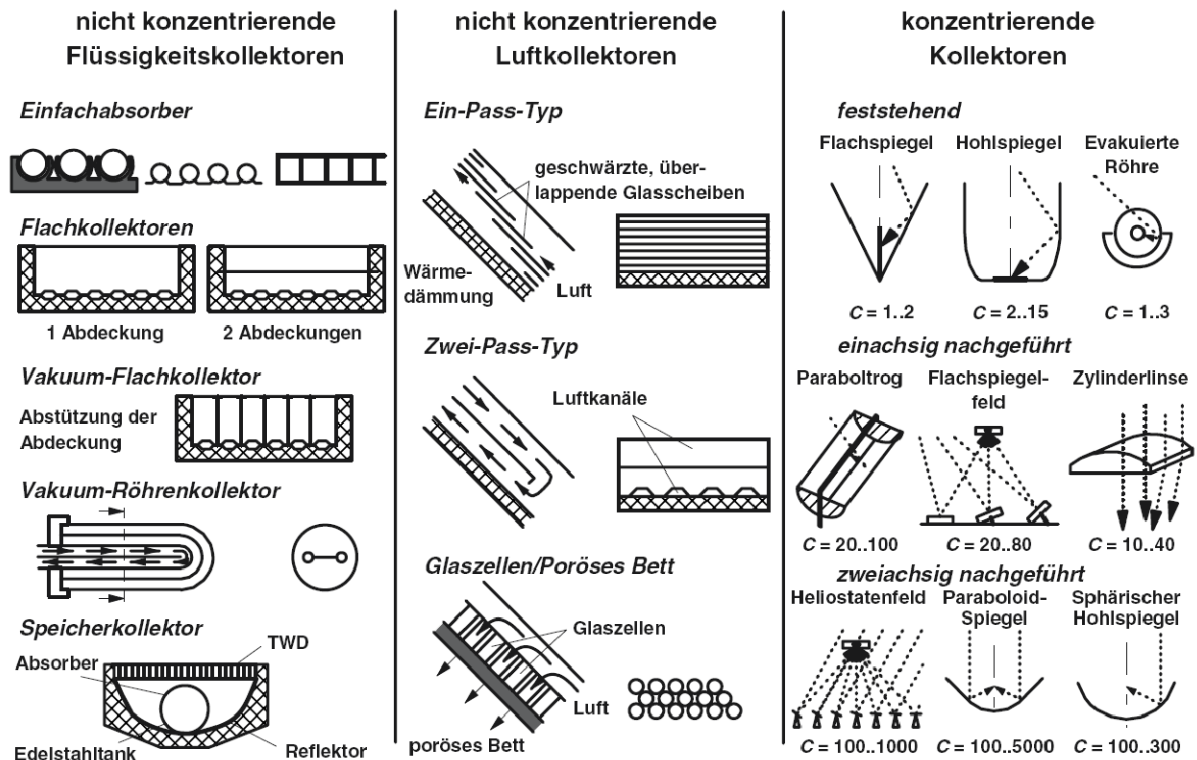


Abbildung 3-35: Schematische Darstellung verschiedener Kollektorbauarten (Quelle: (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.148)).

Abbildung 3-36 zeigt den Aufbau eines Flachkollektors und die hauptsächlich verwendeten Materialien. Die wichtigsten Bestandteile sind der Absorber, die Abdeckung und das Gehäuse. Der Absorber dient dazu, die kurzwellige Strahlung zu absorbieren und die Wärme an das Wärmeträgermedium abzugeben. Üblicherweise treten dabei Temperaturen bis 200°C auf. Um möglichst viel Strahlung absorbieren zu können, wird der Absorber schwarz angestrichen oder selektiv beschichtet. Die Abdeckung wird aus Robustheitsgründen meist Sicherheitsglas verwendet. Um möglichst viel kurzwellige Strahlung durchzulassen, langwellige Strahlung vom Absorber aber zurückzuhalten, kann an der Abdeck-Innenseite eine Infrarot-absorbierende Schicht angebracht sein (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, Kap. 4.2.1).

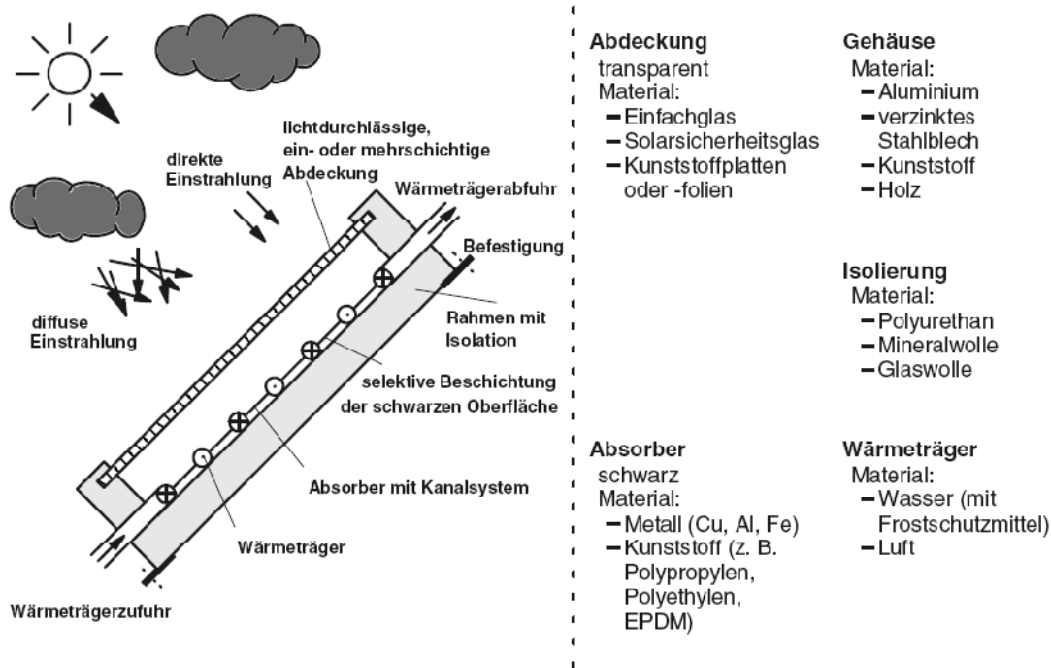


Abbildung 3-36: Aufbau eines nichtstrahlungskonzentrierenden Flüssigkeitskollektors (Flachkollektor) und Auflistung der hauptsächlich verwendeten Materialien (Quelle: (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.145)).

Der Wirkungsgrad eines Solarkollektors ist definiert als Verhältnis der Nutzleistung zur Einstrahlungsleistung und wird häufig folgendermaßen definiert (Streicher, 2005, Kap. 3.2.1.1):

$$\eta = C_0 - C_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{S} - C_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{S} \quad (3-3)$$

η	...	Wirkungsgrad
C_0	...	Konversionsfaktor [1]
C_1	...	Wärmeverlustkoeffizient [W/m^2K]
C_2	...	Quadratisches Glied [W/m^2K]
T_a	...	Außentemperatur [$^{\circ}C$]
T_m	...	Mittlere Flüssigkeitstemperatur im Absorber [$^{\circ}C$]
S	...	Flächenbezogene Strahlungsleistung [W/m^2]

Der Konversionsfaktor ist der maximal mögliche Wirkungsgrad. Dieser tritt auf, wenn die Kollektortemperatur gleich der Umgebungstemperatur ist ($T_m = T_a$) und ist somit ein Maß für die optischen Verluste (siehe Abbildung 3-37). Diese werden durch das Material bestimmt und sind näherungsweise unabhängig von der Temperatur und der Einstrahlung. In diesem Diagramm sind auch die thermischen Verluste zu erkennen, welche mit steigender Temperaturdifferenz ansteigen. Der Wirkungsgrad wird im dargestellten Diagramm über der einstrahlungsbezogenen Temperaturdifferenz ($\kappa = (T_m - T_a)/S$) dargestellt. Die thermischen Verluste (inkl. sonstiger) hängen näherungsweise linear von der strahlungsbezogenen Temperaturdifferenz ab. Insbesondere bei höheren Temperaturdifferenzen kommt es jedoch aufgrund der nichtlinearen Zunahme der Wärmeabstrahlung zu größeren Abweichungen, weshalb die Näherung über einen quadratischen Term erfolgt (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.150-152) & (Streicher, 2005, Kap. 3.2.1.1).

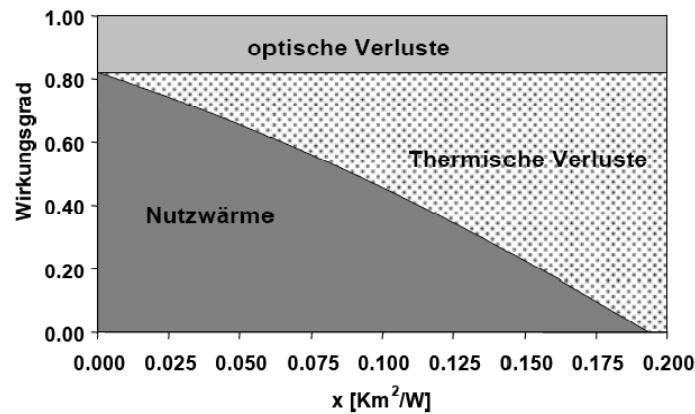


Abbildung 3-37: Wirkungsgradlinie und Verlustanteile eines Solarkollektors (Quelle: (Streicher, 2005, S.25)).

7) Hilfsstrombedarf der Wärmeerzeuger

Je kleiner der Heizwärmebedarf von Häusern ist, desto wichtiger wird die Berücksichtigung der zum Betrieb des WBR-Systems notwendigen elektrischen Hilfsenergie. Aus diesem Grund soll diese nun näher untersucht werden.

Neben den Wärmeerzeugern selbst (inkl. Regelung), sind als Verbraucher von elektrischer Energie vor allem die benötigten Pumpen zu nennen. Ist ein mechanisches Lüftungssystem vorhanden, ist natürlich auch der Strombedarf dessen zu berücksichtigen.

Durchschnittlich beträgt der jährliche Strombedarf einer Heizungs-Umwälzpumpe etwa 300-400kWh/a. Durch neue Umwälzpumpen mit Drehstromsynchronmotoren kann der untere Leistungsbereich jedoch von 25W auf etwa 6W verringert werden. Da viele Pumpen überdimensioniert sind, kann dadurch eine Energieeinsparung von ca. 60% je Pumpe ermöglicht werden. Die Kosten für solche Pumpen betragen etwa 300€ (AEA, 2007b).

Pelletsesseln (bzw. auch Hackschnitzelkessel) weisen, abhängig vom Fabrikat, deutliche Unterschiede in der Anschlussleistung und in den Laufzeiten auf, was somit zu rel. großen Unterschieden im Hilfsstrombedarf führen kann. Die elektronische Zündvorrichtung benötigt häufig eine Leistung von etwa 1kW und hat somit oft die größte Leistungsaufnahme. Ist kein Wärmespeicher vorhanden, kann es zu häufigen Zündungen kommen, was sich somit negativ auf den Hilfsstrombedarf auswirkt. Aber auch andere Komponenten wie der Brennstofftransport, Gebläse, automatische Wärmetauscherreinigung, automatische Ascheaustragung oder der Bewegungs-Antrieb des Rostes benötigen elektrische Energie (Krapf, 2002, Kap. 6.5.3).

Anhand einer Herstellerbefragung wird von Hoffmann, Weiß & Hirschl (2003, Kap. 4.2.2.2) ermittelt, dass der Hilfsstrombedarf von Pelletsfeuerungen bei Nennleistung im Durchschnitt bei 0,7% (115,5W) liegt. Die Spannbreite reicht dabei von 50-500W. Im Teillastbetrieb (ca. 30% der Nennleistung) beträgt der Hilfsstrombedarf etwa 60% des Wertes bei Nennleistung.

In Tabelle 3-4 werden exemplarisch die elektrischen Leistungsaufnahmen, verschiedener Komponenten der Pelletsfeuerung „pelletstar biocontrol 10“¹, aufgelistet. Die Werte stammen aus einem Prüfbericht der Bundesanstalt für Landtechnik (BLT, 2006a)².

¹ Von Herz Armaturen Ges.m.b.H., Sebersdorf, Leistungsbereich 2,9-12kW.

² BLT-Aktzahl: 030/05; BLT-Protokollnummer: 003/06.

Tabelle 3-4: Elektrische Leistungsaufnahme einer Pelletsfeuerung mit einer Nenn-Wärmeleistung von 12kW (pelletstar biocontrol 10) (Daten nach (BLT, 2006a, Kap. 2.8.2)).

Verbraucher	P _{elektrisch} [W]
Saugzuggebläse	53
Antriebsmotor – Rostentaschung	71
Antriebsmotor – Wärmetauscherreinigung	74
Antriebsmotor – Stokerschnecke	88
Antriebsmotor – Auftragschnecke	103
Zündgebläse	1635

In einer Feldstudie von Wolff, Teuber, Budde und Jagnow (2004, Kap.6.2.10) wurde der Stromverbrauch von Gas-Brennwertkesseln (inkl. Verteilung) untersucht. Dabei sind u.a. zwei Systeme gegeben, die eine thermische Nutzwärmemenge von 5194 kWh/a bzw. 5877kWh/a bereitstellen. Der Stromverbrauch dieser beläuft sich auf 108kWh/a bzw. 271kWh/a, was somit etwa 2,08% bzw. 4,61% der Nutzwärmemenge beträgt.

Richtwerte für den Hilfsstromverbrauch (inkl. Betrieb des Wärmeerzeugers, Pumpen für die Wärmeverteilung und eine evtl. vorhandene Brennstoffzufuhr) werden in Tabelle 3-5 gegeben.

Tabelle 3-5: Richtwerte für den Hilfsstromverbrauch von verschiedenen Heizsystemen (Quelle: (Schriefl, 2007, S.62)).

	Hilfsstromverbrauch [kWh/a]
Gas-Brennwertkessel	200
Fernwärme	100
Pelletsessel	450
Hackgutkessel	600
Stückholzkessel	200
Wärmepumpe Sole/Wasser (Tiefenbohrung)	120

3.2.4 Wärmespeicher

Es gibt verschiedene Variationen wie Wärmespeicher in Heiz- und Warmwasserbereitungssystemen eingesetzt werden. In Hinblick auf die Einbindung von solarthermischen Kollektoren sind sie vor allem zum Ausgleich der Schwankungen zwischen der Wärmebereitstellung und der Wärmenachfrage notwendig. Prinzipiell kann man die Speicher hinsichtlich ihrer Speicherdauer in Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher unterteilen. Der Nachteil von letzteren sind die hohen Anforderungen an die Wärmedämmung und die Temperaturschichtung, was zu dazu führt, dass sie kaum wirtschaftlich konkurrenzfähig sind. Man kann die Speicher auch in aktive bzw. passive Wärmespeicher einteilen. Aktive Speicher sind solche, die zumindest eine geregelte Entladung (meist auch eine geregelte Beladung) ermöglichen (z.B. Warmwasserspeicher). Passive Speicher werden hingegen unregelmäßig entladen (z.B. Außenwände eines Hauses. Beim Speichermedium muss man zwischen sensiblen und latenten¹ unterscheiden) (Streicher, 2005).

¹ Änderung des Aggregatzustands

Im Folgenden werden Konzepte von Kurzzeitspeichern mit dem sensiblen Wärmespeichermedium Wasser, näher untersucht, um die Vor- und Nachteile, die beim Einsatz in Wohnhäusern von Bedeutung sind, aufzuzeigen.

Um die Wärme einem Speicher über einen Wärmetauscher zuzuführen, kann dieser intern oder extern angeordnet sein. Abbildung 3-38 zeigt einen (internen) Glattrohrwärmetauscher im oberen Bereich zur Nachheizung, und einen (internen) Rippenrohrwärmetauscher zur Einbindung im unteren Teil, zur Einbindung eines solarthermischen Kollektors. Außerdem sind noch zwei Temperaturfühler und eine E-Patrone zur Nachheizung eingezeichnet. Von besonderer Bedeutung ist die vertikale Anordnung der Wärmetauscher und die dadurch ermöglichbare Schichtung, also die Unterteilung in das Bereitschaftsvolumen der Nachheizung, das Volumen welches nur für die Solaranlage nutzbar ist und das „Totvolumen“. Diese Unterteilung in einzelne Zonen kann dadurch entstehen, dass die zugeführte Wärme hauptsächlich das Speichermedium darüber erwärmt. Voraussetzung dafür ist u.a., dass die Zu- und Abflussmengen in Relation zur Speichergröße gering sind, da es ansonsten zur Durchmischung kommt. Schichtung ist hauptsächlich für Speicher von Bedeutung, die mit hohen Temperaturunterschieden arbeiten, wie z.B. Kombinationen aus Frischwasserzufuhr, solarthermischer Einbindung, Brauchwasser- und Heizwärmeverteilung (Streicher, 2005, Kap3.4).

Damit Solarkollektoren einen hohen Wirkungsgrad erreichen können, ist es notwendig, den entsprechenden Wärmetauscher möglichst weit unten (also im Bereich niedriger Temperaturen) anzuordnen. Diese Anordnung besitzt allerdings den Nachteil, dass die Erwärmung des Speichermediums nur langsam, gleichmäßig von unten bis oben stattfindet. Somit ist es möglich, dass, trotz ausreichender Wärmeerzeugung im Kollektor, die benötigte Temperatur oben nicht schnell genug bereitgestellt werden kann und somit Nachheizung erforderlich wird. Diese kann dabei wie dargestellt durch einen konventionellen Wärmeerzeuger und/oder einer E-Patrone erfolgen. Alternativ kann darauf, bei Verwendung eines nachgeschalteten Durchlauf-erhitzers, verzichtet werden (Streicher, 2005, Kap3.4).

Das Bereitschaftsvolumen der Nachheizung hängt vom erwarteten Warmwasserbedarf ab (z.B. Badewannenfüllung). Erfolgt die Nachheizung nur in der Nacht (Nachtstrom), ist das Bereitschaftsvolumen am Tagesbedarf zu orientieren. Insbesondere bei der Verwendung von Festbrennstoffkesseln sollte darauf geachtet werden, dass das Volumen ausreicht, um stets den vollen Abbrand einer Kesselladung zu ermöglichen und somit unnötig hohe Emissionen zu vermeiden (Streicher, 2005, Kap3.4).

Das Volumen, welches praktisch für die Solarwärmespeicherung genutzt werden kann, hängt von der Temperatur im oberen Bereitschaftsvolumen der Nachheizung ab. Ist diese höher als die am Solarwärmetauscher, kann nur das Volumen unterhalb erwärmt werden. Um auch den oberen Teil mit Solarenergie aufheizen zu können, muss der Solarspeicher zuerst eine höhere Temperatur aufweisen (Streicher, 2005, Kap. 3.4.4).

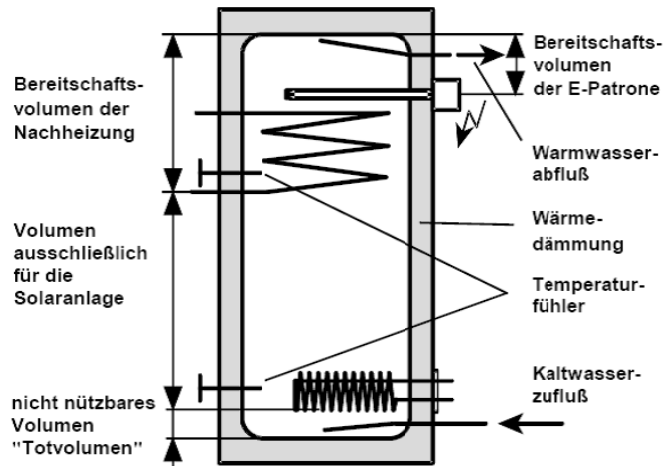


Abbildung 3-38: Schematische Darstellung eines solaren Brauchwasserspeichers mit Schichtung (Quelle: (Streicher, 2005, S.62)).

Bei Verwendung eines externen Wärmetauschers kann die zuvor erwähnte Trägheit bei der Aufheizung teilweise verbessert werden, indem der Zufluss weiter oben angeordnet wird. Allerdings kann dies bei zu hoher Anbringung dazu führen, dass bereits erwärmtes Wasser im oberen Teil wieder abgekühlt wird (näheres siehe (Streicher, 2005, Kap. 3.4.4)).

Abbildung 3-39 zeigt verschiedene Speichersysteme. Die ersten beiden Systeme, welche häufig angewendet werden, sind reine Brauchwasserboiler, wobei sie sich in der Lage des Wärmetauschers (intern bzw. extern) unterscheiden. Die anderen beiden Systeme stellen Kombispeicher dar, welche eine zusätzliche Einbindung von einem weiteren Wärmeerzeuger andeuten. System drei wird auch als „Rossnagel“-Kombispeicher bezeichnet. Dabei befindet sich der Boiler im oberen Teil des Speichers. System vier oder „Spiraboiler“ besitzt einen spiralförmigen Rippenrohrwärmetauscher. Bei den Kombispeichern wird das Brauchwasser somit durch sie umgebende Wasser erhitzt (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, Kap. 5.3.6).

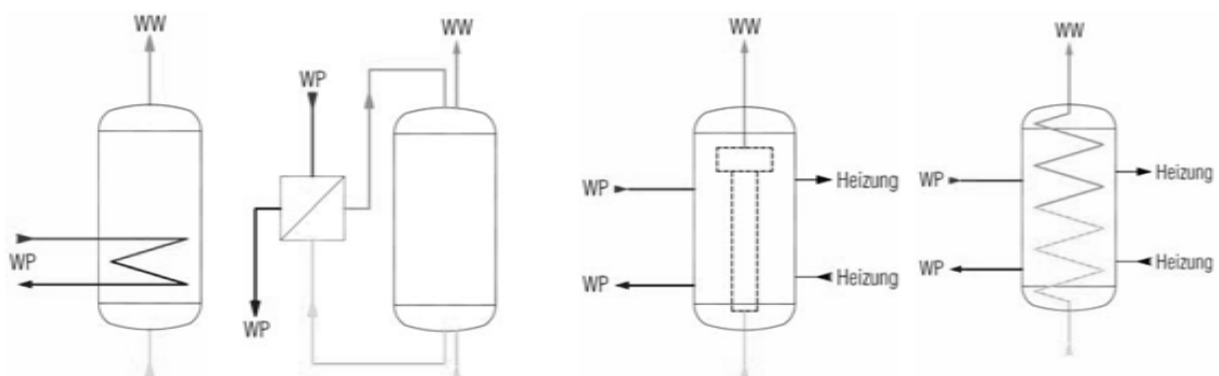


Abbildung 3-39: Verschiedene Speichersysteme zur Warmwasserbereitung mit Einbindung einer Wärmepumpe (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.58)).

3.2.5 Wärmeabgabe- und Wärmeverteilungssysteme

Grundsätzlich muss zuerst zwischen den Wärmeträgermedien Wasser und Luft unterschieden werden. Wasser besitzt eine deutlich höhere spezifische Wärmekapazität als Luft, wodurch zur Übertragung einer bestimmten Wärmeleistung viel kleinere Volumenströme notwendig sind (näheres dazu im Unterpunkt „Wärmeträgermedium Luft“) was Auswirkung auf die Abmessungen der Verteilungsleitungen hat.

1) Wärmeträgermedium Wasser

Wärmeabgabesysteme können vor allem durch die mögliche, spezifische Heizleistung und der Regelbarkeit unterschieden werden. Je größer die Heizflächen sind, desto kleiner müssen die Vorlauftemperaturen gewählt werden, um die gleiche Gesamtheizleistung zu erbringen. Umgekehrt gesprochen bedeutet dies, dass, wenn niedrige Vorlauftemperaturen erwünscht sind, größere Heizflächen notwendig werden um die gleiche Gesamtheizleistung in einen Raum einzubringen. Die thermische Trägheit und somit Regelbarkeit hängt wesentlich von den Massen der Bauteile ab (Tritthart et al., 2001, Kap. 5.2.5).

Durch die höheren Oberflächentemperaturen in gut gedämmten Wohnhäusern wird es möglich die Heizflächen an den Innenwänden (anstelle von üblicherweise an den Außenwänden) des Gebäudes anzubringen, was zu einer Reduzierung der Wärmeverteilungsleitungen und der Kosten beitragen kann (Joos et al., 2004, Kap. 1).

Die herkömmlichen Wärmeabgabesysteme Radiatoren (Glieder- oder Plattenheizkörper) geben zwischen 20-50% über Strahlung, den Rest über Konvektion ab. Sie bestehen meist aus Grauguss oder Stahl. Konvektoren hingegen, geben, wie der Name schon sagt, die Wärme hauptsächlich über Konvektion ab. Abbildung 3-40 zeigt die schematische Darstellung eines Konvektors, der aus Heizrohren mit Lamellen besteht (Tritthart et al., 2001, S.45).

Bei Flächenheizungen unterscheidet man zwischen Fußboden-, Wand-, und Deckenheizungen, wobei die Wärmeabgabe vorwiegend über Strahlung erfolgt (Tritthart et al., 2001, S.45).

Die Ergebnisse einer Studie zeigen, dass die Wärmeabgabesysteme für Wärmepumpen im Neubau zu 92% als Fußbodenheizung (teilweise mit Radiatoren ergänzt) realisiert werden. Bei Sanierungsobjekten liegt der Anteil lediglich bei etwa 53% (siehe Abbildung 3-41) (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, Kap. 4.1).

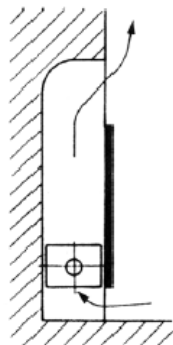


Abbildung 3-40: Konvektor (Quelle: (Tritthart et al., 2001, S.45)).

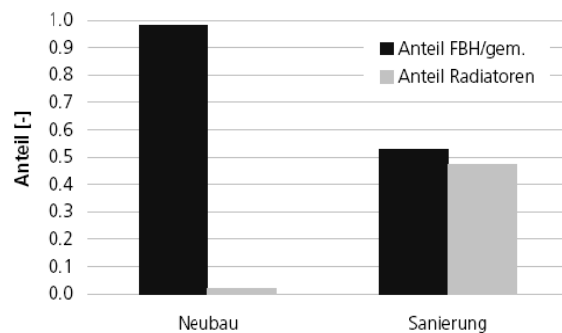


Abbildung 3-41: Anteile der Wärmeabgabesysteme für Neubauten und Sanierungen (Quelle: (Erb, Hubacher, & Ehrbar, 2004, S.40)).

Die Erwartung, dass die geplanten Vorlauftemperaturen bei Wärmepumpenheizungen mit kleiner werdenden Energiekennzahlen ebenfalls abnehmen, wird, nach den in Abbildung 3-42 und Abbildung 3-43 dargestellten Untersuchungsergebnissen, nicht erfüllt. Die geplanten Vorlauftemperaturen bei Neubauten liegen im Durchschnitt mit etwa 41°C rund 5°C unter jenen bei Sanierungen (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, Kap. 5.3.5).

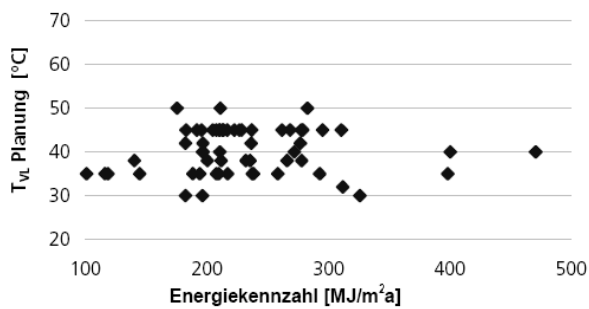


Abbildung 3-42: Geplante Vorlauftemperaturen für Neubauten in Abhängigkeit der Energiekennzahl (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.55).

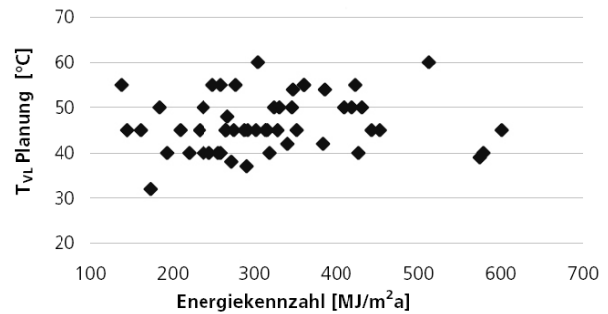


Abbildung 3-43: Geplante Vorlauftemperaturen für Sanierungen in Abhängigkeit der Energiekennzahl (Quelle: (Erb, Hubacher & Ehrbar, 2004, S.55).

2) Wärmeträgermedium Luft

Wie im Kapitel 3.2.2 erwähnt, kann neben der Wärmerückgewinnung die Zuluft auch über Wärmeheizregister erwärmt werden, damit die benötigte Heizwärme alleine dadurch bereitgestellt wird. In diesem Konzept ist kein anderer Wärmeerzeuger mehr notwendig. Man spricht vom „Passivhauskonzept“ (Streicher et al., 2004a, S.158).

Um Luftheizungssysteme verwenden zu können, ist eine Gebäudehülle mit sehr guter Luftdichtheit und Heizlasten von maximal 10 – 12 W/m² (Streicher et al, 2004, Kap. 5.2.1) notwendig. Eine Evaluierung von bestehenden Wohnraumlüftungsanlagen (Greml et al., 2004, Kap. 2.2.2.4) ergibt, dass dieser Wert deutlich unter 10W/m² liegen sollte.

Luft hat nämlich mit 0,000361kWh/(m³K), verglichen mit Wasser (1,16kWh/(m³K)), eine deutlich niedrigere spezifische Wärmekapazität und sollte nicht höher als 55°C erwärmt werden, weil es sonst zu Behaglichkeitseinbußen und einer Verschmelzung des in der Luft vorhandenen Staubes kommen würde (Streicher et al, 2004, Kap. 5.1.2). Um somit eine größere Wärmemenge transportieren zu können müssten die Strömungsgeschwindigkeiten bzw. die Rohrquerschnitte vergrößert werden, was aber zu anderen Problemen wie Zugerscheinung oder Lärmbelästigung führen würde. Aus diesem Grund ist das Luftheizsystem ein sehr träges System, wenn es um die Wiederaufheizung der Wohnräume nach einer Abkühlung geht.

Im Folgenden wird nun das „klassische“ Passivhauskonzept besprochen. Dabei erfolgt die Raumheizung nur über das Lüftungssystem, womit somit kein herkömmliches Heizsystem benötigt wird. Wie schon erwähnt, kann damit allerdings nur eine maximale Heizlast von 10-12W/m² gedeckt werden. Dieses System verfügt somit über eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die restliche Wärme, die nach der WRG noch im Abluftstrom vorhanden ist, kann, mit Hilfe einer Abluft-Zuluft-Wärmepumpe (Kleinstwärmepumpe), verwendet werden, um die Raumheizung und (zumindest teilweise) die Warmwasserbereitung durchzuführen. Abbildung 3-44 zeigt eine schematische Darstellung. Man sieht, dass der Zuluft nach der WRG, noch über den Kondensator Wärme zugeführt werden kann. Der Verdampfer ist nach der WRG im Abluftstrom angeordnet. Der Kompressor der Wärmepumpe wird im Zuluftstrom angeordnet, damit die Abwärme ebenfalls genutzt werden kann. Zusätzlich wird im dargestellten Bild auch ein Solarkollektor zur Warmwasserbereitung eingebunden. Für sehr kalte Tage bzw. längere kalte und bewölkte Perioden kann der Zuluftstrom wie auch das Warmwasser elektrisch nachgeheizt werden. Es ist notwendig, eine Abtauschaltung im Lüftungsgerät vorzusehen um eine Vereisung zu verhindern. Denn trotz eines evtl. vorhandenen Erdreichwärmetauscher, der die Frischluft auf zumindest 0°C vorwärmen sollte, kann die Abluft durch die Wärmepumpe so stark abgekühlt werden, dass es zur Eisbildung kommt. Im Sommer sollte die Warmwasserbereitung in der Nacht stattfinden, indem der Ab-

luftstrom über den Verdampfer geführt wird, wodurch die Wärmepumpe arbeiten kann. Um das Gebäude dabei nicht zusätzlich durch die Abwärme des Kompressors zu erwärmen sollte die Zuluft nicht über das Lüftungssystem, sondern über z.B. gekippte Fenster, zugeführt werden. Außerdem kann im Sommer tagsüber der Wärmetauscher zur WRG umgangen werden, damit keine Erwärmung der Zuluft erfolgt. Alternativ könnte nur Frischluft mechanisch zugeführt und die Abluft über Fenster abgeführt werden. Damit wäre auch eine unerwünschte zusätzliche Erwärmung vermieden (Kaltschmitt, Streicher & Wiese, 2006, S.427-428) & (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.2.1)).

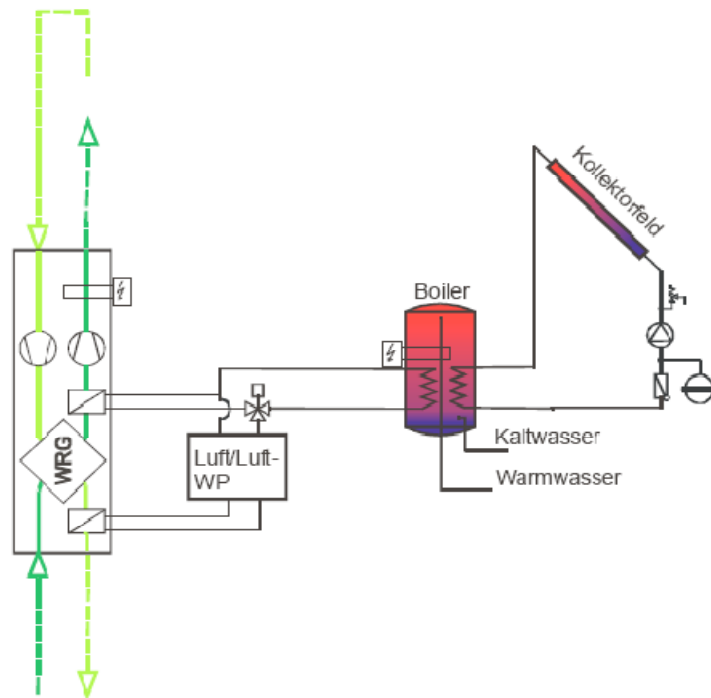


Abbildung 3-44: Solarunterstützte Abluftwärmepumpe mit Luftheizung (Streicher et al, 2004).

3.3 Beschreibung der Modell-Varianten

Nachdem nun die Eigenschaften verschiedener Komponenten, Techniken und Systeme besprochen wurden, werden nun einige WBR-Systeme ausgewählt, für die anschließend eine Untersuchung des kumulierten Energieaufwandes und der Emissionen durchgeführt wird. Die Auswahl der näher zu untersuchenden Systeme erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Da der benötigte Heizwärmebedarf für neugebaute Wohnhäuser in den letzten 30 Jahren stetig gesenkt werden konnte, gehören heute Niedrigenergie- und Passivhäuser bereits zum Stand der Technik und stellen aus heutiger Sicht höchstwahrscheinlich auch die Zukunft des Wohnbaus dar. Möglicherweise geht die Entwicklung soweit, dass energieautarke Gebäude zum Standard werden. Davon kann allerdings aus vom gegenwärtigen Stand der Dinge (noch?) nicht ausgegangen werden. In welche Richtung die tatsächliche, zukünftige Entwicklung gehen wird, hängt von vielen Faktoren ab. Natürlich wird die Thematik rund um fossile Energieträger (Ressourcenknappheit, Politik, Preis) eine entscheidende Rolle spielen. Außerdem werden unter anderem aber auch die Forderungen an eine weitere Senkung der treibhausrelevanten Gase, sonstige ökologische Anforderungen und die Entwicklung neuer Technologien (Brennstoffzelle, Wärmedämmungen...) großen Einfluss haben.

Aus diesem Grund werden nun WBR-Systeme näher untersucht, die für eine Anwendung in Niedrigenergie- und Passivhäusern als vorteilhaft erscheinen. Die gute Wärmedämmung der Gebäudehülle bewirkt, dass die Heizlast gegenüber Altbauten deutlich gesenkt wird und somit geringere Vorlauftemperaturen möglich werden. Dadurch können Wärmepumpen und/oder Solarkollektoren besonders effektiv eingesetzt werden. Aufgrund des geringen Heizwärmebedarfs tritt der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung stärker in den Vordergrund. Da die 100%ige Warmwasserbereitung mittels des Wärmeerzeugers als Standard vorausgesetzt werden kann (Simader et al., 2007, Kap. 3.3), wird dies auch bei den in weiterer Folge ausgewählten WBR-Systemen der Fall sein.

Um den Heizwärmebedarf von Wohnhäusern aber weiter senken zu können müssen die Lüftungsverluste verkleinert werden. Dazu eignen sich besonders mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Um z.B. die in Österreich relevante Bezeichnung „klima:aktiv Haus“ zu erhalten, ist u.a. der Einsatz von Frischluftanlagen, oder Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung notwendig. Letztere ist für „klima:aktiv Passivhäuser“, Voraussetzung (klima:aktiv haus, 2007, Kap. D.2 (Teil klima:aktiv Haus) und D.2 (Teil klima:aktiv Passivhaus)).

- In Hinblick auf eine ökologisch nachhaltige Entwicklung soll vor allem die Nutzung erneuerbarer Energien im Vordergrund stehen. Um einen Vergleich zu der Verwendung fossiler Brennstoffe zu ermöglichen, wird die aktuell ökologisch günstigste Technik der Erdgas-Brennwertnutzung ausgewählt.

In Hinblick auf die eben besprochenen Punkte werden nun einige Systeme ausgewählt und näher untersucht.

Grundsätzlich werden, bei allen Wasserheizsystemen, für jeden Wärmeerzeuger verschiedene Varianten gegenübergestellt:

- Variante1: Dabei wird kein mechanisches Lüftungssystem oder Solarkollektor vorgesehen.
- Variante2: Verwendung einer solarthermischen Anlage mit einem selektiven Flachkollektor zur Warmwasserbereitung (Fläche = 6m²).
- Variante3: Verwendung einer mechanischen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung¹.
- Variante4: Heizungssystem mit solarthermischer Einbindung zur Warmwasserbereitung und Verwendung eines Lüftungssystems mit WRG (Kombination aus Variante 2 und 3).
- Variante5: Die solarthermische Anlage dient nun neben der Unterstützung der Warmwasserbereitung auch zur teilsolaren Raumheizung. Dafür wird eine Kollektorfläche von 15m² verwendet.
- Variante6: Zusätzlich zu Variante 5 wird jetzt noch ein Lüftungssystem mit WRG verwendet, um die möglichen Einsparungen dadurch untersuchen zu können.

Bei den untersuchten Luftheizsystemen ist das Vorhandensein einer Lüftungsanlage Voraussetzung. In Variante 2 wird ein zusätzlicher Solarkollektor zur Warmwasserbereitung vorgesehen und in Variante 3 findet die Warmwasserbereitung dezentral, mittels elektrischen Durchlauferhitzern statt.

Folgende Abkürzungen werden im Folgenden häufig verwendet:

BW	Brennwertkessel
FW	Fernwärme
WP(Sonde)	Erdsonde-Wärmepumpe
WP(LL)	Luft/Luft-Wärmepumpe
+ S	zusätzlicher Solarkollektor zur Warmwasserbereitung (Solarkollektor = 6m ² , Trinkwasserspeicher=400l)
+ S(RH)	zusätzlicher Solarkollektor zur Warmwasserbereitung und zur teilsolaren Raumheizung (Solarkollektor = 15m ² , Trinkwasserspeicher = 400l, Pufferspeicher = 500l)
+ LS	zusätzliches Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung (WRG = 85%)
+ dez.WW	dezentrale Warmwasserbereitung mit elektrischen Durchlauferhitzern

Generell gilt im Folgenden für Parameter, auf die nicht näher eingegangen wird, dass dies Standardwerte sind, die durch die Software² ermittelt wurden.

Bei den definierten Mustergebäuden handelt es sich um Einfamilienhäuser in massiver Bauweise, welche einen Heizwärmebedarf von 25kWh/(m²a) bzw. 50kWh/(m²a) aufweisen sollen. Diese Werte definieren die Qualität der Gebäudehülle und gelten somit unabhängig davon, ob ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung vorgesehen wird oder nicht. Wird ein solches verwendet, kommt es durch die Wärmerückgewinnung zu einer Verringerung des

¹ Es wird eine Luftwechselrate von 0,6h⁻¹ vorausgesetzt. Die Anlagenluftwechselrate beträgt 0,4h⁻¹ und jene durch Undichtheiten 0,2h⁻¹.

² B52 von Solar-Computer

Heizwärmebedarfs. Wird das EFH nun mit einem HWB von 25kWh/(m²a) definiert, resultiert dies, bei Berücksichtigung eines Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung in nur etwa 6,9kWh/(m²a). Dieser Wert entspricht somit einem sehr guten Passivhaus.

Die Wohnfläche wird mit 130m² und das Gebäudevolumen mit 500m³ definiert. Daraus ergeben sich ein beheiztes Luftvolumen von 380m³ und eine Gebäudenutzfläche¹, welche als Bezugsfläche verwendet wird, von 160m². Der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung wird mit 12,5kWh/(m²a) entsprechend ENEC vom Programm festgelegt.

Zur Bestimmung des Endenergiebedarfs in weiterer Folge müssen diverse Voraussetzungen und Annahmen festgelegt werden. Es wird versucht, Randbedingungen zu definieren, die möglichst repräsentativ für derzeit verwendete Anlagen sind. Da es unzählige Kombinationen, herstellungsbedingte Unterschiede und lokale Gegebenheiten gibt, kann es sich dabei aber nur um eine prinzipielle Abschätzung handeln.

Es werden nun die verschiedenen, zu untersuchenden Varianten näher beschrieben.

3.3.1 Warmwasserheizsysteme

Sowohl der Wärmeerzeuger als auch die Wärmeverteilungsleitungen das Wärmeabgabesystem und die Speicher werden innerhalb der thermischen Hülle angeordnet. Das Wärmeabgabesystem wird als Fußbodenheizung ausgeführt. Die Verteilung der Heizwärme erfolgt mittels einer geregelten Umwälzpumpe, die eine Leistung von 30W aufweist. Der Standardwert ist allerdings, laut Software, eine Leistung von 104W. Wie in Kapitel 3.2.3-(7) beschrieben wurde, handelt es sich dabei allerdings um einen relativ hohen Wert. Da sich bei der Berechnung gezeigt hat, dass die Umwälzpumpe auf den gesamten Hilfsstrombedarf einen großen Einfluss hat, erfolgt die Bestimmung des Endenergiebedarfs in Kapitel 4.2 mit beiden Leistungswerten, um den zu erwartenden Bereich besser abschätzen zu können.

Die Vorlauf- und Rücklauftemperatur werden mit 35/28°C (HWB=25kWh/(m²a)) bzw. 45/38°C (HWB=50kWh/(m²a)) definiert. Es erfolgt dabei eine Unterteilung in Verteil- Strang und Anbindeleitungen. Aufgrund der gewählten Innenverteilung² ergeben sich die Leitungslängen von 31,5m, 12m und 88m. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) dieser beträgt 0,255W/(mK) und die Umgebungstemperatur der Leitungen beträgt 20°C. Die Regelung der Wärmeübergabe erfolgt elektronisch optimiert.

Die Warmwasserverteilung wird ohne Zirkulation und Rohrbegleitheizung realisiert. Dabei sind laut Berechnung 14,6m Verteil-, 6,08m Strang- und 12m Strichleitungen notwendig. Der Wärmedurchgangskoeffizient dieser Leitungen beträgt 0,2W/(mK).

Wird ein Lüftungssystem verwendet, wird es immer mit Wärmerückgewinnung ausgeführt. Die Verrohrung der Lüftungsanlage verläuft auch innerhalb der thermischen Hülle und weist, wie schon erwähnt, einen Anlagenluftwechsel von 0,4 1/h auf. Die Luftwechselrate durch Undichtheiten beträgt 0,2/h. Der U-Wert der Verteil- und Anbindeleitungen beträgt 0,85W/(mK). Es erfolgt eine Einzelraumregelung. Es werden keine zusätzlichen Ventilatoren vorgesehen. Der Wärmerückgewinnungsgrad des Wärmetauschers wird mit 85% festgelegt.

¹ „Die Nutzfläche ist eine vom Bezugsvolumen abgeleitete Grundfläche eines Gebäudes. Sie dient im öffentlichen Nachweis als Bezugsfläche und ist lediglich eine fiktive Größe. Sie kann im Einzelfall erheblich abweichen von der nach DIN 277 ermittelten Nutzfläche eines Gebäudes“ (B52 Online Hilfe).

² Bei der Innenverteilung liegen die Strangleitungen überwiegend im Inneren des Gebäudes.

Um Frostbildung zu vermeiden, wird eine Ansaugung über einen Erdreichwärmetauscher vorgesehen.

Abbildung 3-45 zeigt nun das Referenzgebäude mit einem Gas-Brennwertkessel. Außer dass kein Kamin benötigt wird, gilt diese Darstellung auch für die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpe oder Nutzung von Fernwärme. Dargestellt wird die Variante-4, also mit Einbindung einer solarthermischen Anlage und einem Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung. Die Varianten 1 bis 3 werden nicht dargestellt, da es lediglich Vereinfachungen davon sind.

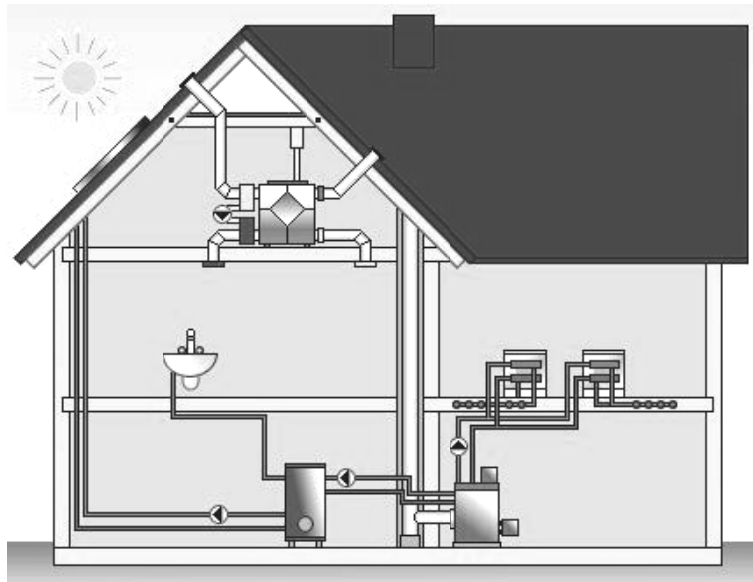


Abbildung 3-45: Schematische Darstellung des Referenzgebäudes mit der Variante 4 des WBR-Systems mit einem Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger (Abbildung aus B52¹).

Als thermischer Solarkollektor wird ein Flachkollektor mit 6m² für die reine Brauchwassererwärmung (Abbildung 3-45) verwendet. Es wird angenommen, dass der Kollektor 30° gegenüber der Horizontalen und genau Richtung Süden ausgerichtet wird². Daraus resultiert ein solarer Deckungsanteil von 67% am Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung³ (siehe Tabelle 3-6). Die Länge der Leitungen zwischen Kollektor und Speicher beläuft sich auf 40m. Die Solarpumpe weist eine Standard-Leistung von 38W auf.

Das WBR-System verfügt über einen Trinkwasserspeicher von 400 Litern (Volumen in Verbindung mit am Markt üblichen Speichergrößen gewählt). 200 Liter davon sind als Bereitschaftsvolumen vorgesehen. Der Rest dient als Solarspeicher. Wird, wie in den Varianten 1 und 3, kein Solarkollektor verwendet, wird lediglich ein 200 Liter-Speicher verwendet. Die Bereitschafts-Wärmeverluste des Trinkwasserspeichers werden mit 1,36kWh/d angegeben. Neben der evtl. vorhandenen solarthermischen Einbindung erfolgt eine indirekte Erwärmung des Trinkwassers über den Wärmeerzeuger. Die vorhandene Speicherladepumpe besitzt eine Leistung von 53W.

¹ Solar-Computer GmbH, Göttingen; Version 4.03.02 - Stand April 2007; freie Testversion; www.solar-computer.de

² Der Konversionsfaktor des definierten Solarkollektors beträgt 0,77. Die Wärmedurchgangskoeffizienten sind $k_1=3,5\text{W/m}^2\text{K}$ und $k_2=0,02\text{W/m}^2\text{K}$. Die effektive Wärmekapazität des Kollektors beträgt $6,4\text{kJ/m}^2\text{K}$ und der Einstrahlwinkelkorrekturfaktor ist 0,9.

³ Berechnet mit B52.

Erfolgt die Wärmeerzeugung anstelle eines Gas-Brennwertkessels, Fernwärme oder Wärmepumpe mit einem Pellets-, Hackschnitzel oder Stückholzkessel, wird ein Pufferspeicher von 300-Litern verwendet (siehe Abbildung 3-46). Dies ist wichtig, um häufiges Takten des Brenners und somit die Emissionen zu minimieren und die Lebensdauer der Zündeinrichtung zu verlängern (Streicher et al., 2004a, S.153). In Holz (2006, S.38) wird davon ausgegangen, dass ein Pufferspeicher erst ab einer Nennleistung von 15kW (besonders bei Stückholz-Heizungen) notwendig wird.

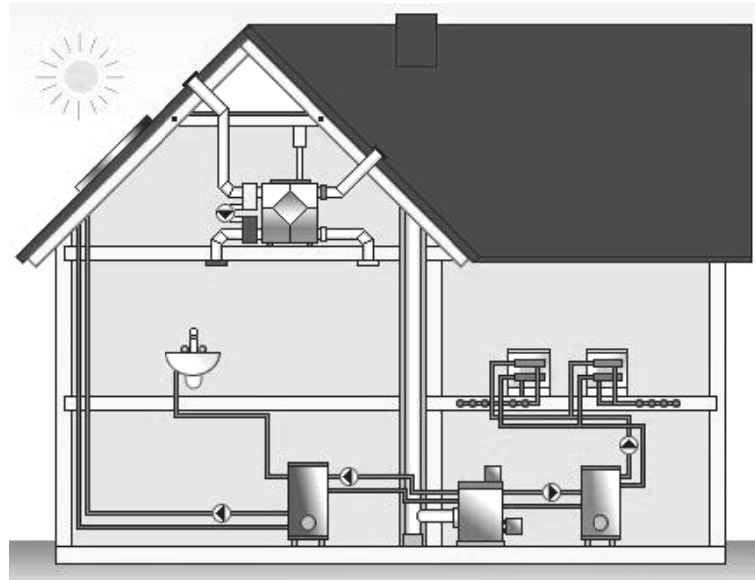


Abbildung 3-46: Schematische Darstellung des Referenzgebäudes mit der Variante 4 des WBR-Systems mit einem Biomassekessel als Wärmeerzeuger (Abbildung aus B52).

Der Großteil der Anlagenkomponenten der Varianten mit teilsolarer Raumheizung (Variante-5 und 6) entspricht den bereits beschriebenen. Wichtige Änderungen sind, dass der thermische Solarkollektor nun eine Fläche von 15m² (gleiche Ausrichtung) aufweisen soll. Zusätzlich zum 400-Liter Warmwasserspeicher wird jetzt noch ein 500-Liter Pufferspeicher verwendet. Zur Einbindung des Pufferspeichers wird eine zusätzliche Speicherladepumpe von 45W vorgesehen.

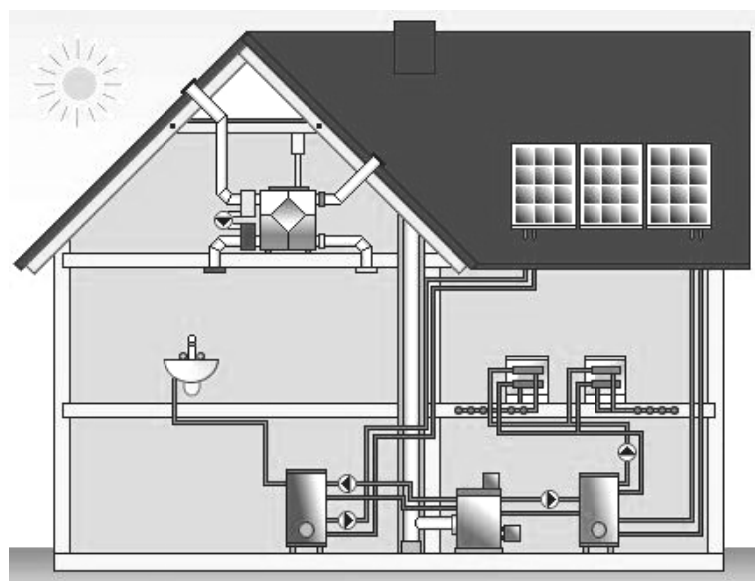


Abbildung 3-47: Schematische Darstellung des Referenzgebäudes mit der Variante 6 des WBR-Systems mit einem Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger (Abbildung aus B52).

Die solaren Deckungsgrade die sich ausgehend von den verwendeten Komponenten ergeben, sind in Tabelle 3-6 zusammengefasst. Eine genauere Untersuchung erfolgt in Kapitel 3.3.3. Die Werte für die Systeme ohne teilsolare Raumheizung ergeben sich aus der Berechnung mit B52 (Referenzklima Deutschland). Dienen die Solarkollektoren neben der Warmwasserbereitung auch zur Heizungsunterstützung, wird der solare Deckungsgrad der Warmwasserbereitung mit dieser Software bestimmt, der solare Deckungsgrad der Raumheizung wird allerdings entsprechend DIN 4701-10 konstant mit 10% angenommen¹. Um dafür nun genauere Werte verwenden zu können, erfolgt eine zusätzliche Simulation mit Hilfe der Software GetSolar² (genauerer dazu siehe Anhang 2: Simulation mittels GetSolar).

Tabelle 3-6: Solare Deckungsgrade für verschiedene Varianten des Einfamilienhauses mit einem HWB von 25 bzw. 50kWh/(m²a) (Werte ermittelt durch Modellierung der Systeme in der Software B52 bzw. GetSolar).

HWB=25kWh/(m ² a)			HWB=50kWh/(m ² a)		
	SD _{WW}	SD _{RH}		SD _{WW}	SD _{RH}
Wärmeerzeuger + S	0,67	-	Wärmeerzeuger + S	0,67	-
Wärmeerzeuger + S + LS	0,67	-	Wärmeerzeuger + S + LS	0,67	-
Wärmeerzeuger + S(RH)	0,76	0,12	Wärmeerzeuger + S(RH)	0,76	0,06
Wärmeerzeuger + S(RH) + LS	0,76	0,48	Wärmeerzeuger + S(RH) + LS	0,76	0,10

Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49 zeigen die Simulationsergebnisse aus GetSolar für den solaren Deckungsgrad der Warmwasserbereitung, den gesamten solaren Deckungsgrad und den Wirkungsgrad. Dabei wird einmal das EFH mit einem HWB von 25kWh/m² und einem Lüftungssystem mit WRG untersucht, und einmal jenes mit 50kWh/(m²a) ohne Lüftungssystem. Der Wirkungsgrad errechnet sich dabei aus Solarertrag/Einstrahlung wobei sich der Solarertrag aus der vom Kollektor gelieferten Wärme (zur Erhöhung der Speichertemperatur oder zum Zwecke der Raumheizung) abzüglich der Solarleitungsverluste bestimmt. Die Deckungsrate bestimmt sich durch Solarertrag/Wärmebedarf wobei beim Wärmebedarf auch die Speicherverluste berücksichtigt werden³.

¹ B52 Online-Hilfe

² Ingenieurbüro „solar energie information“, Axel Horn, Sauerlach; Version 9; Freie Testversion; www.getsolar.de;

³ GetSolar Hilfe

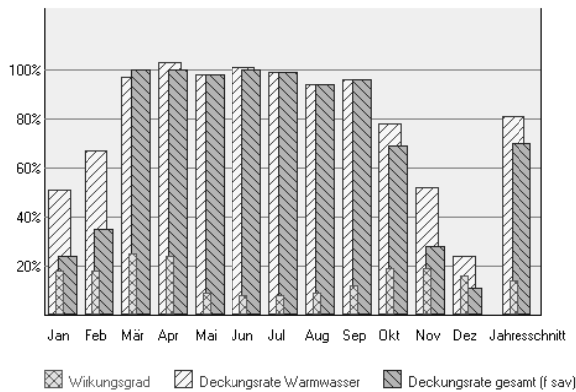


Abbildung 3-48: Darstellung der aus der Simulation ermittelten Deckungsgrade und des Wirkungsgrades für einen jährlichen HWB von 1104kWh (Solarkollektorfläche 15m², 300l Trinkwasser- und 500l Pufferspeicher) (Bild aus GetSolar).

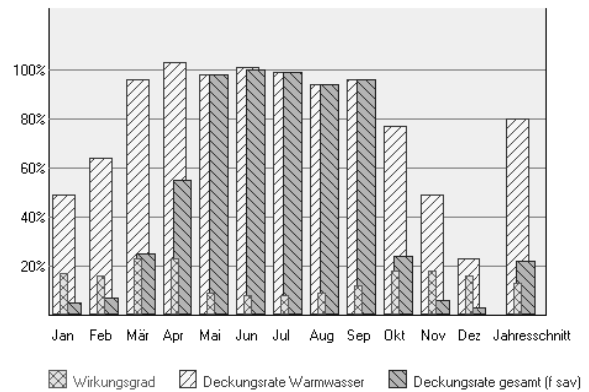


Abbildung 3-49: Darstellung der aus der Simulation ermittelten Deckungsgrade und des Wirkungsgrades für einen jährlichen HWB von 8000kWh (Solarkollektorfläche 15m², 300l Trinkwasser- und 500l Pufferspeicher) (Bild aus GetSolar).

Im Folgenden werden die Eigenschaften der verwendeten Wärmeerzeuger näher beschrieben:

Da das Referenzgebäude aufgrund der guten Wärmedämmung eine geringe Heizlast aufweist, sollten die Wärmeerzeuger entsprechend darauf ausgelegt werden. In der Praxis ist hierzu eine Heizlastberechnung für den konkreten Fall von Bedeutung. Es werden nun die Leistungsbe- reiche und die erwarteten Wirkungsgrade (bzw. Leistungszahlen bei Wärmepumpen) zusam- mengefasst (näheres dazu wurde bereits in Kapitel 3.2 besprochen). Diese werden dabei an am Markt verfügbaren Anlagen angepasst (Daten basierend auf (Schriebl, 2007, Kap. 5.2.1, 5.2.2 und S.81) und Herstellerangaben (Vaillant, 2007), (Hoval, 2007)).

Dient als Wärmeerzeuger ein Gas-Brennwertkessel, wird dieser in der Berechnung mit einem Nennwärmeleistungsbereich von 3,2 bis 13kW hat definiert (verfügbar lt. Herstellerangaben). Der Wirkungsgrad des Kessels bei 30% Teillast (Heizungsbetrieb) wird standardmäßig von der verwendeten Software B52 mit 104,17% definiert. Bei Nennleistung (Trinkwasserbe- trieb) weist der Gas-Brennwertkessel einen Wirkungsgrad von 95,17% auf. Die Prüftempera- tur der Messung des Teillastwirkungsgrades wird mit 30°C und bei Volllastmessung mit 70°C angegeben. Die elektrische Leistungsaufnahme des Kessels im Heizungsbetrieb wird mit 54W und beim Trinkwasserbetrieb mit 163W definiert.

Zur Wärmeerzeugung aus regenerativen Brennstoffen werden Pellets-, Hackgut- und Stück- holzkessel untersucht. Aus Komfortgründen wird angenommen, dass sowohl die Pellets als auch das Hackgut über eine automatische Fördereinrichtung dem Wärmeerzeuger zugeführt werden sollen. Die Berechnung der benötigten Endenergie dieser Anlagen erfolgt auch unter Berücksichtigung eines Ventilators/Zündhilfe. Die elektrische Leistungsaufnahme des Pellets- und des Hackschnitzelkessels im Grundzyklus wird mit 0,47kWh von der Software B52 als Standardwert definiert. Die vom Wärmeerzeuger im Grundzyklus abgegebene Nutzwärme beträgt 13,19kWh. Die ebenfalls relevante Wassermenge im Leitungsnetz beträgt 128Liter. Der Pellets-Kessel wird mit einem Wirkungsgrad von 86% im Grundzyklus und 94% im sta- tionären Betrieb modelliert. Hackschnitzel- bzw. Stückholzkessel werden mit 84/92% bzw. 82/90% definiert. Der verwendete Pelletskessel weist einen Leistungsbereich von 3,4-13kW und der Hackschnitzelkessel von 15kW auf. Die Heizleistung des Stückholzkessels beträgt 10kW wobei auch hier ein Ventilator/Zündhilfe vorausgesetzt wird.

Die Untersuchung der Verhältnisse bei Verwendung einer Wärmepumpe erfolgt am Beispiel einer Tiefenbohrung als Wärmequelle. Die verwendete Arbeitszahl (B0/W35) (nach EN 255) beträgt dabei 4,4 (vergleiche Kapitel 3.2.3 (Wärmepumpen)). Die Temperaturdifferenz (zwischen Vorlauf- und Rücklaufemperatur) bei der Prüfstandsmessung wird dabei mit 7K angegeben. Die Leistungsaufnahme der Förderpumpe für die Wärmequelle beträgt 116W. Die Nennleistung der Förderpumpe bei B0/W35 beträgt 5,9kW.

3.3.2 Luftheizsystem

Da dieses Heizsystem eine maximale Heizlast von 10-12W/m² decken kann (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.2.1), kann es nur im Referenzgebäude mit einem HWB=25kWh/m² (Wert gilt für Gebäude ohne Lüftungssystem) eingesetzt werden, da in jenem mit HWB=50kWh/(m²a) die Heizlast im Regelfall nicht gedeckt werden kann. Abbildung 3-50 zeigt nun die schematische Darstellung des Referenzgebäudes mit dem Luftheizsystem und teilsolarer Warmwasserbereitung. Zusätzlich zeigt das Bild die Verwendung eines Heizstabes, der zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden kann. Im Falle der rein dezentralen Warmwasserbereitung dient die Wärmepumpe nur zur Lufterwärmung. In diesem Fall wird auch kein zentraler Warmwasserspeicher benötigt, da nur Elektro-Durchlauferhitzer verwendet werden.

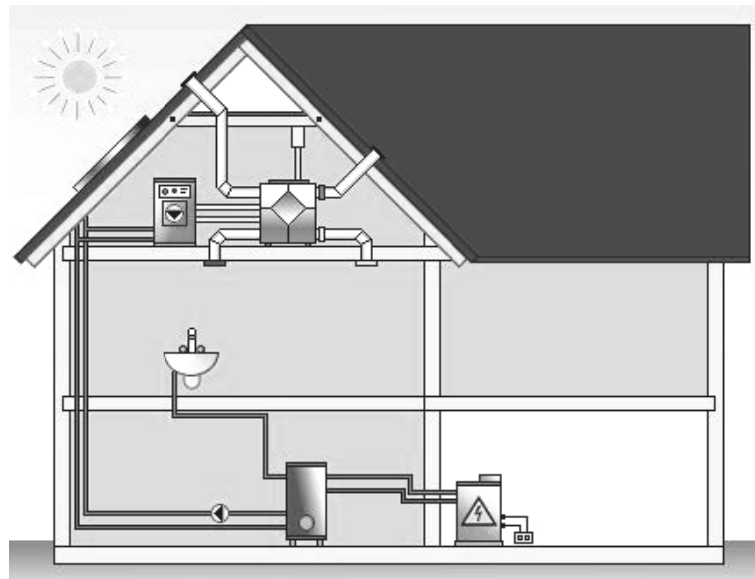


Abbildung 3-50: Schematische Darstellung des Referenzgebäudes mit einem Luftheizsystem und teilsolarer Warmwasserbereitung (Abbildung aus B52).

Das Lüftungssystem wird mittels der Standardwerte definiert, wobei die Nennleistung der Abluft-/Zuluft-Lüftungswärmepumpe bei 70% des maximalen Betriebsvolumenstromes und -3°C Außentemperatur 0,83kW beträgt. Die Leistungszahlen der Abluftwärmepumpe in verschiedenen Betriebspunkten werden entsprechend Tabelle 3-7 definiert.

Tabelle 3-7: Bei der Berechnung des Endenergiebedarfs verwendete Leistungszahlen in verschiedenen Betriebspunkten der Abluftwärmepumpe (Standardwerte aus der Software B52).

-3°C	3,0
4°C	3,3
10°C	3,8
Abluft 20°C und Außenluft 4°C	3,8
Trinkwasserbetrieb	3,8

Der maximale Betriebsvolumenstrom der Lüftungsanlage beträgt 229m³/h. Die Deckungsgrade, die sich sowohl mit als auch ohne Solarkollektor ergeben sind in Tabelle 3-8 zusammengefasst.

Tabelle 3-8: Solare Deckungsgrade für verschiedene Varianten des Luftheizsystems des Einfamilienhauses mit einem HWB von 25 kWh/(m²a) (Werte ermittelt mit B52).

	SD _{WW}	DG _{WW, LL-WP}	DG _{WW, Heizstab bzw. Durchlauferhitzer}
WP(LL) + LS	-	0,95	0,05
WP(LL) + LS + S	0,73	0,26	0,01
WP(LL) + LS + dez. WW	-	-	1

3.3.3 Einfluss der Dimensionierung auf den SD

Die für die Abschätzung des benötigten Endenergiebedarfs verwendete Software B52 kann zwar den Deckungsgrad für solare Brauchwassererwärmung bestimmen, setzt aber, wenn ebenfalls teilsolare Raumheizung erfolgt, entsprechend DIN 4701-10¹ den solaren Deckungsgrad der Raumwärme stets auf 10%. Um genauere Werte zu erhalten, erfolgt eine Simulation mit Hilfe der Software GetSolar².

Weitere Details zur Simulation sind dem Anhang zu entnehmen.

Abbildung 3-51 zeigt, wie sich eine Variation der Kollektorfläche auf den solaren Deckungsgrad auswirkt. Um den Einfluss des Heizwärmebedarfs untersuchen zu können, werden links die Werte für ein EFH mit einem Heizwärmebedarf von 6,9kWh/(m²a) (HWB=25kWh/(m²a) – Wärmerückgewinnung) und rechts für einen HWB von 50kWh/(m²a), dargestellt. Der höhere HWB hat keinen Einfluss auf den solaren Deckungsgrad der Warmwasserbereitung, jedoch verringert sich der SD der Raumheizung, bei der verwendeten 15m² Solarkollektor-Fläche, von 48% auf 6%.

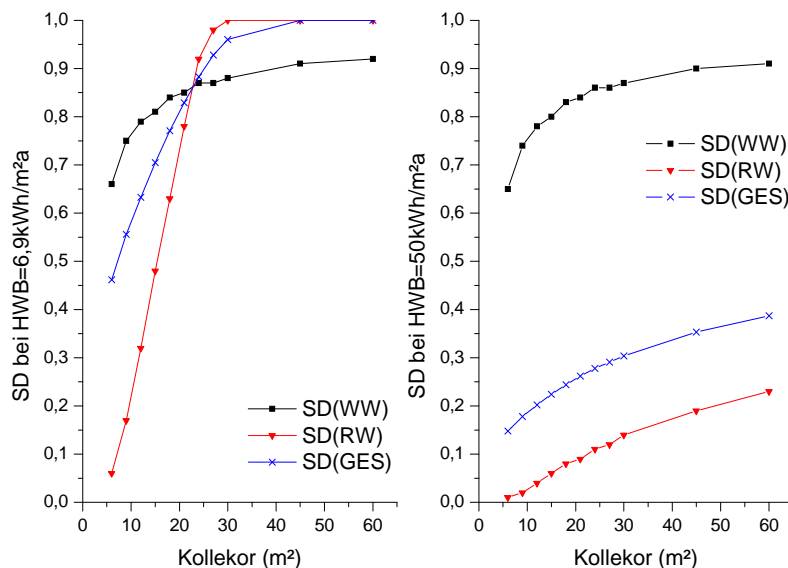


Abbildung 3-51: Auswirkung der Fläche des selektiven Flachkollektors auf die solaren Deckungsgrade für ein Wohnhaus mit einem HWB=6,9kWh/(m²a) (links) und HWB=50kWh/(m²a) (kein LS vorhanden) (rechts). Simuliert mit GetSolar.

Die Simulationsergebnisse zur Bestimmung des Einflusses des Solarspeichervolumens werden in Abbildung 3-52 dargestellt. Wird, zur Vergrößerung des solaren Deckungsgrades der Warmwasserbereitung, das Solarspeichervolumen vergrößert, kommt es schon ab einem Volumen von etwa 100Liter zu einer Verkleinerung des solaren Deckungsgrades der Raumheizung, die besonders beim sehr kleinen HWB deutlich ausfällt.

¹ Entsprechend Online Hilfe für B52

² Version 9 (Demo auf http://www.getsolar.info/bins/getsolar_9-0_setup.exe verfügbar (Stand 01.01.2008))

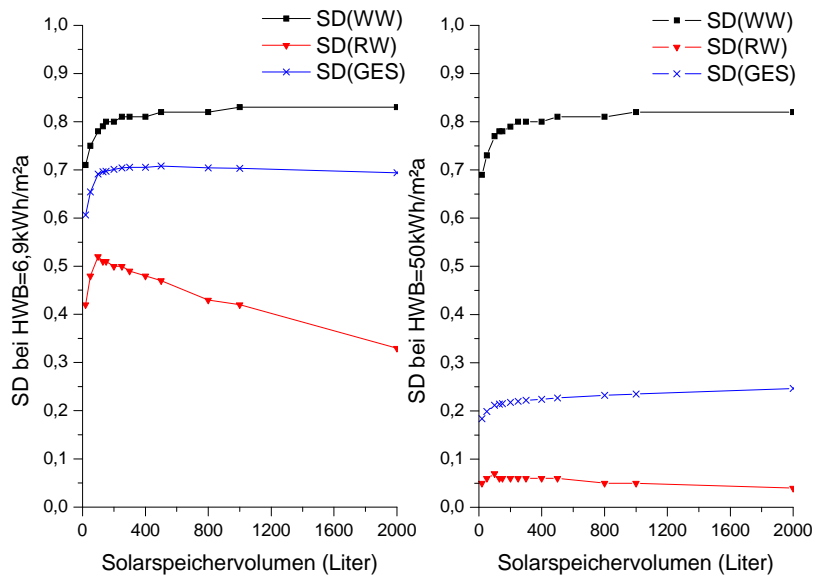


Abbildung 3-52: Auswirkung des Solarspeichervolumens auf die solaren Deckungsgrade für ein Wohnhaus mit einem $HWB=6,9kWh/m^2a$ (links) und $HWB=50kWh/m^2a$ (kein LS vorhanden) (rechts). Simuliert mit GetSolar.

Eine Variation des Pufferspeicher-Volumens resultiert im in Abbildung 3-53 dargestellten Verlauf. Wiederum ist die deutliche Verringerung des solaren Deckungsgrades der Raumheizung bei einem höheren HWB zu erkennen.

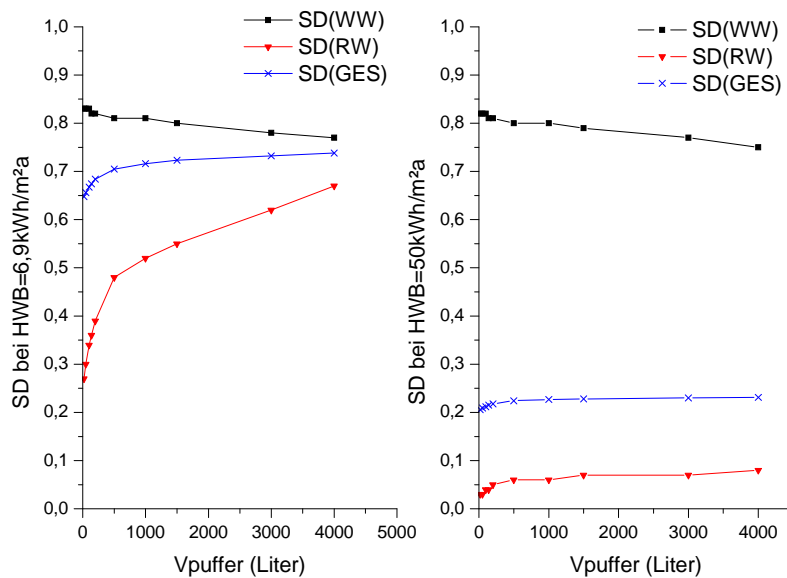


Abbildung 3-53: Auswirkung des Pufferspeichervolumens auf die solaren Deckungsgrade für ein Wohnhaus mit einem $HWB=6,9kWh/m^2a$ (links) und $HWB=50kWh/m^2a$ (kein LS vorhanden) (rechts). Simuliert mit GetSolar

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses des Heizwärmebedarfs, der Heizgrenze, der Vorlauf-/Rücklauftemperatur (konstante Differenz $7^{\circ}C$) und der Nennleistung wird in Abbildung 3-54 dargestellt. Diese Parameter haben kaum Auswirkung auf den solaren Deckungsgrad der Warmwasserbereitung. Vor allem die sich ergebende Heizgrenze und der Heizwärmebedarf bewirken eine starke Änderung des solaren Deckungsgrades der Raumwärme.

3. Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen

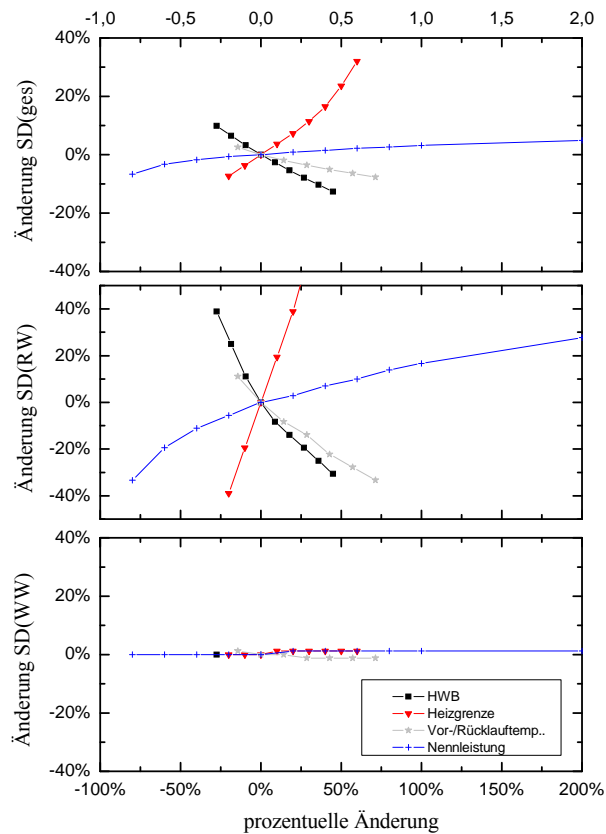


Abbildung 3-54: Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter auf den solaren Deckungsgrad. Simuliert mit GetSolar.

Wie sich die Orientierung des Solarkollektors auf den solaren Deckungsgrad auswirkt, wird in Abbildung 3-55 dargestellt.

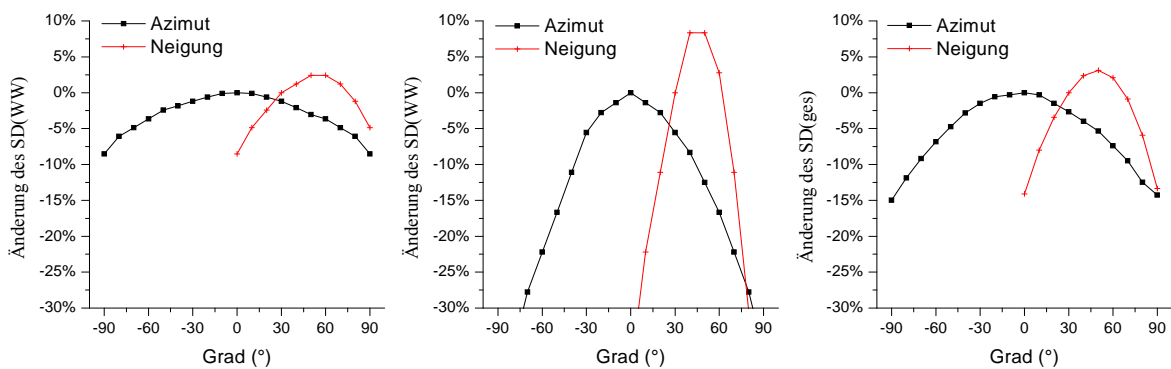


Abbildung 3-55: Darstellung der Auswirkung der Ausrichtung des Solarkollektors auf den Solaren Deckungsgrad (Daten aus Simulation mittels GetSolar).

4 Ökologischer Vergleich

Das Ziel der ökologischen Bewertung von Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssystemen ist ein energetischer Vergleich des gesamten Lebenszyklus und eine Gegenüberstellung energiebedingter Emissionen der Nutzungsphase. Zunächst wird dazu die methodische Vorgehensweise näher besprochen, bevor in den weiteren Abschnitten dann die Durchführung und die Ergebnisse behandelt werden.

4.1 Methodische Vorgehensweise

Die prinzipielle Vorgehensweise zur ökologischen Gegenüberstellung verschiedener WBR-Systeme wird in Abbildung 4-1 dargestellt. Wie schon im Kapitel 2.1 und 2.2.2 analysiert wurde, ist der kumulierte Energieaufwand (KEA) ein geeigneter Indikator, um einen energetischen Vergleich von Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen durchzuführen. Ausgangsbasis für alle weiteren Untersuchungen bildet eine Literaturanalyse. Strichliert angedeutet wird die Bestimmung des KEA, der für die Herstellung des Gebäudes (ohne WBR-System, also nur für die Gebäudehülle) notwendig ist. Die Ermittlung dessen soll kein Hauptbestandteil dieser Arbeit sein, allerdings wird in Abschnitt 4.5.4 eine einfache Abschätzung, die den KEA der Herstellung der Gebäudehülle in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs angibt, aus vorhandenen Untersuchungen abgeleitet. Dadurch lässt sich genauer abschätzen, ob Passivhäuser, welche höhere Anforderungen an die Gebäudedämmung stellen, auch bei Berücksichtigung des Energieaufwandes für die Herstellung noch primärenergetische Vorteile bei einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus haben. Der Mehraufwand für z.B. noch bessere Wärmeschutzverglasungen wird dabei nicht untersucht.

Durch eine Auswertung der Daten und Ergebnisse verschiedener Studien werden die kumulierten Energieaufwände für die Herstellung und soweit vorhanden auch für die Entsorgung für verschiedene Komponenten von WBR-Systemen zusammengestellt (Kapitel 4.4). Davon ausgehend wird der KEA der Herstellung, für die in Kapitel 3.3 definierten 39 Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssysteme, abgeschätzt (Abschnitt 4.5.1). Aufgrund der relativ großen Bandbreite und der geringen Anzahl der Studien die sich damit befassen, kann dabei nicht zwischen dem KEA_H von WBR-Systemen für NEH bzw. PH unterschieden werden.

Durch eine umfangreiche Literaturanalyse zu Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlagen, worauf Kapitel 3 basiert, können die Parameter der in der Arbeit verglichenen 39 WBR-Varianten definiert werden. Dabei wird ein Hauptaugenmerk auf die in der Praxis erreichbaren Nutzungsgrade bzw. Leistungszahlen der Wärmeerzeuger und den Hilfsstrombedarf gelegt. Davon ausgehend werden mit Hilfe der Software B52¹ diese, in Kapitel 3.3 definierten, 39 bzw. 36 WBR-Systeme, in zwei Referenzgebäuden, modelliert. Bei den Referenzgebäuden handelt sich um Einfamilienhäuser, die mit einem Heizwärmebedarf von 50 bzw. 25kWh/(m²a) definiert werden. Der Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitung wird mit 12,5kWh/(m²a) entsprechend EnEV fix vorgegeben. Durch eine Variation der Parameter kann der zu erwartende Bereich des Endenergiebedarfs bestimmt werden (Kapitel 4.2). Entsprechen EnEV² wird bei Verwendung von Solarkollektoren, die neben der Warmwasserbereitung auch zur Raumheizung eingesetzt werden, der solare Deckungsgrad der Raumheizung fix mit 10% definiert. Um genauere Werte für den solaren Deckungsgrad zu erhalten, erfolgt eine

¹ Solar-Computer GmbH, Göttingen; Version 4.03.02 - Stand April 2007; freie Testversion; www.solar-computer.de

² Online-Hilfe B52.

Simulation der entsprechenden Varianten mit der Software GetSolar¹. Die dadurch ermittelten solaren Deckungsgrade (Sensitivitätsanalyse siehe Kapitel 3.3.3), werden wiederum zur Bestimmung des Endenergiebedarfs mittels B52 verwendet.

Basierend auf einer Literaturanalyse können in GEMIS Prozesse modelliert werden, welche, soweit nicht bereits vorhanden, an die österreichischen Verhältnisse weitgehend angepasst werden, mit dem Zweck der Ermittlung der Primärenergie- und Emissionsfaktoren für Öl, Gas, Kohle, Pellets, Hackschnitzel, Stückholz, Fernwärme und drei verschiedene Stromerzeugungsmixe (siehe Kapitel 4.3 und 4.6.3).

Aus diesen mittels GEMIS ermittelten Faktoren und den Endenergie-Werten können der KEA der Nutzung und die energiebedingten Emissionen der Nutzung berechnet werden (siehe Kapitel 4.5.2 und 4.6.4).

Als Summe des KEA der Herstellung, Entsorgung und Nutzung wird in Kapitel 4.5.3 der gesamte kumulierte Energieaufwand gebildet. Die Ergebnisse, bei zusätzlicher Berücksichtigung des KEA der Herstellung der Gebäudedämmung, werden in Kapitel 4.5.4 zusammengestellt.

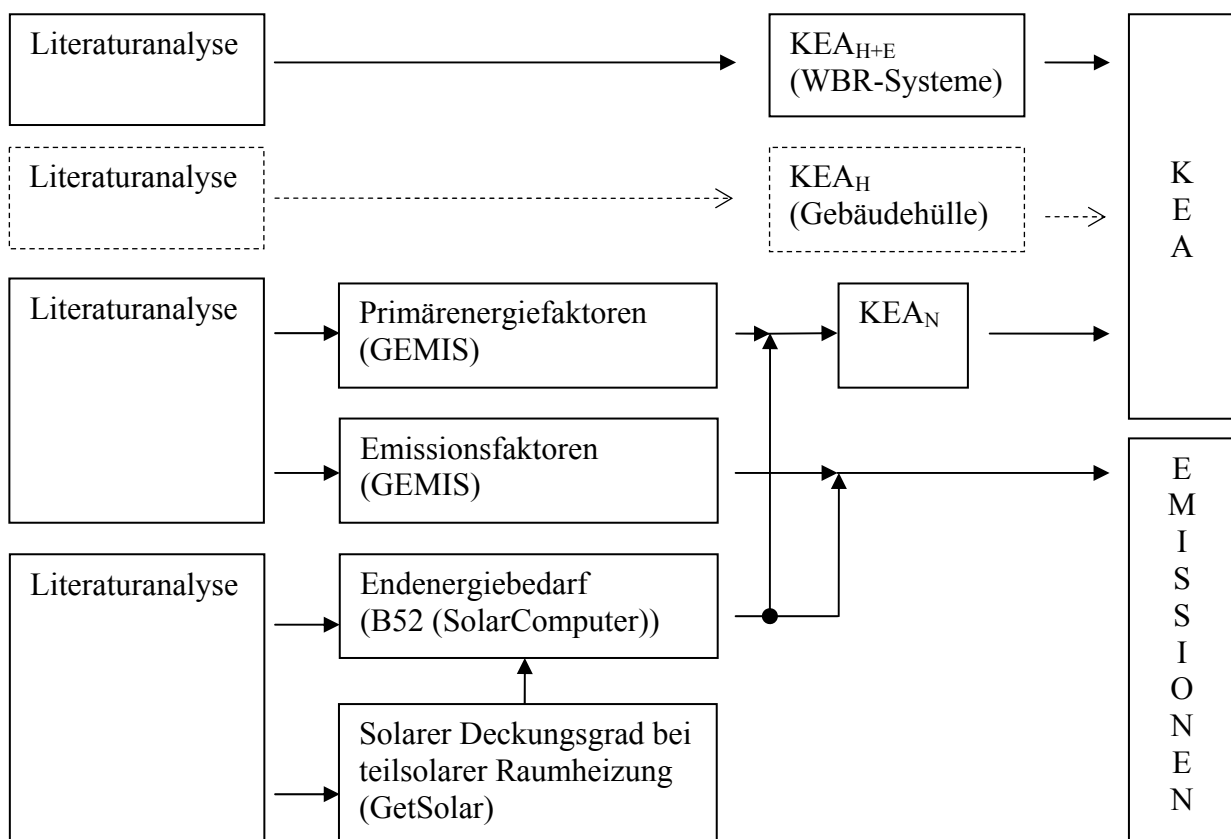


Abbildung 4-1: Schematische Vorgehensweise beim ökologischen Vergleich der Wärmebereitstellungs-, Brauchwasserbereitungs- und Raumlufsysteme. Zusätzlich ist strichliert die Abschätzung des KEA_H der Gebäudedämmung angedeutet.

¹ Ingenieurbüro „solar energie information“, Axel Horn, Sauerlach; Version 9; Freie Testversion; www.getsolar.de;

4.2 Berechnung des Endenergiebedarfs

Ziel der Berechnung ist die Ermittlung des Endenergiebedarfs für verschiedene WBR-Systeme, die jeweils im selben Haus „eingebaut“ werden, um die Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten. Dabei wird der Haustechnikstrom extra ausgewiesen. Der Haushaltsstrom wird nicht betrachtet, da es um einen Vergleich der WBR-Systeme geht.

Die Berechnung erfolgt unter Zuhilfenahme der Software B52 von Solar-Computer. Diese dient zum Erstellen von Energieausweisen für Wohngebäude, wobei eine freie Testversion verfügbar ist, welche verwendet wurde (Solar-Computer, 2007).

Die „theoretische Grundlage des Programms B52 bilden die „Arbeitshilfe für die Ausstellung von Energiepässen“ der dena (Deutsche Energie Agentur GmbH, Ausgabe 2004) inkl. Anlagen 3 und 6 und Verweisen auf EnEV / DIN V 4108-6 Anhang D mit modifizierten dena-Randbedingungen, DIN V 4701/12 und PAS 1027. Ferner die EnEV 2002 in novellierter Fassung 2004 mit Verweis auf DIN V 4701-10 inkl. Beiblatt 1“ (B52-Hilfe, 2007).

Im Folgenden werden nun die Berechnungsergebnisse, für die 39 verschiedene Varianten von WBR-Systemen, die in Kapitel 3.3 beschrieben wurden, diskutiert.

4.2.1 Endenergiebedarf ohne Hilfsstrom

Die Berechnungsergebnisse für die benötigte Endenergie (ohne Hilfsstrom) werden in Abbildung 4-2 dargestellt. Die dargestellten Bereiche ergeben sich für einen HWB von 25 kWh/(m²a) (schwarz umrandeter Bereich) bzw. 50kWh/(m²a) (staffiert dargestellt). Die zu erwartenden Bereiche aller Heizsysteme, deren Wärmeerzeugung durch einen Verbrennungsvorgang stattfindet (Gas-Brennwert-, Pellets-, Hackschnitzel- und Stückholzkessel) resultieren daraus, dass die Berechnung, neben den in Kapitel 3.3 definierten, auch mit um 5% kleineren Wirkungsgraden erfolgte. Der Wirkungsgrad der Fernwärmenutzung kann in der Software nicht verändert werden. Der worst-case für die Wärmepumpensysteme wird dadurch ermittelt, dass die, auch in Kapitel 3.3 definierten, Leistungszahlen um 0,5 verringert wurden. Die Varianten des Luftheizsystems zeigen nur Werte für einen HWB von 25kWh/(m²a) an, da dieses Heizsystem, wie schon erwähnt, nur für Heizlasten <10-12W/m² angewendet werden kann, und somit nur im Passivhaus möglich ist. Die erwarteten Bereiche sind für den höheren HWB größer, da sich eine Änderung des Wirkungsgrades (bzw. Leistungszahl) des Wärmeerzeugers umso stärker auswirkt, je größer die zu bereitstellende Wärmemenge ist.

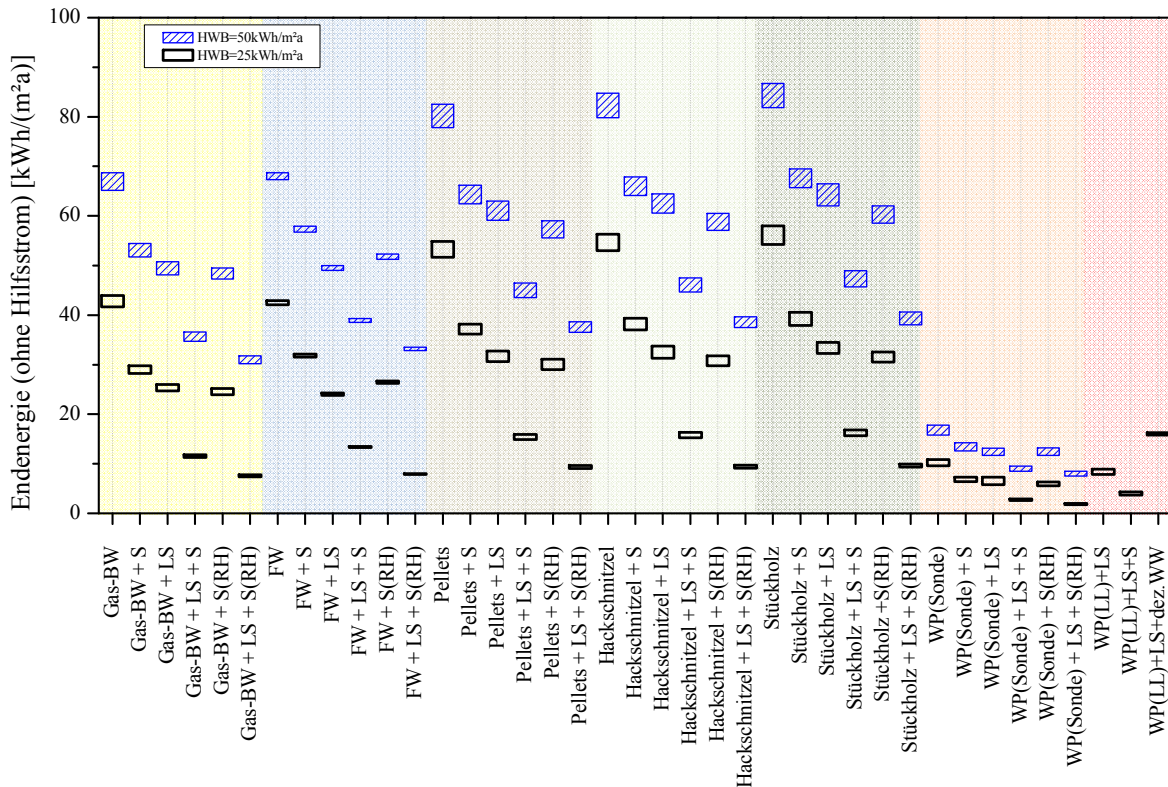


Abbildung 4-2: Darstellung der Ergebnisse für den Endenergiebedarf (ohne Hilfsstrom) für verschiedene WBR-Systeme in EFH mit einem HWB von 25 bzw. 50 kWh/(m²a) (Daten siehe Anhang, Tabelle A-20) (die Abkürzungen werden Kapitel 3.3 erläutert bzw. sind sie im Abkürzungsverzeichnis zusammengestellt).

Zunächst erkennt man, dass für den gewählten Fall, die Endenergieeinsparungen (ohne Hilfsstrom), welche durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erreicht werden können, größer sind, als die durch den gewählten Solarkollektor zur Warmwasserbereitung erreichbaren. Durch teilsolare Raumheizung lassen sich zwar gegenüber der reinen Warmwasserbereitung Verbesserungen erzielen, insbesondere bei der Erdsonde-Wärmepumpe fallen diese aber relativ gering aus. Hier ist es interessant, ob sich der zusätzliche Mehraufwand in der Herstellung, energetisch gesehen, lohnt. Die Wärmepumpensysteme weisen den geringsten zu erwartenden Endenergiebedarf auf. Besonders hier ist aber der Vergleich auf Primärenergieebene wichtig und interessant. Findet die Warmwasserbereitung bei einem Luftheizsystem dezentral mit elektrischen Durchlauferhitzern statt, verdoppelt sich insgesamt der Endenergiebedarf (siehe Abbildung 4-2) verglichen mit der Warmwasserbereitung durch die Wärmepumpe.

4.2.2 Hilfsstrombedarf

Neben dem Hilfsstrombedarf der Wärmeerzeuger selbst, sind auch die in Kapitel 3.3 bereits besprochenen Pumpen, und natürlich das evtl. vorhandene Lüftungssystem von Bedeutung. Zusammenfassen sei nochmal erwähnt, dass die Solar-Pumpe mit 38W, die Warmwasserspeicherungspumpe mit 53W und die evtl. vorhandene Pufferspeicher-Ladepumpe mit 45W definiert werden. Die Heizungs-Umwälzpumpe wird grundsätzlich mit 30W definiert, jedoch ergeben sich die in Abbildung 4-3 dargestellten worst-cases durch die Berechnung mit der, von der Software B52 definierten, Standardleistung von 104W.

4. Ökologischer Vergleich

In Tabelle 4-1 wird nun, anhand des WBR-Systems mit dem Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger, der Hilfsstrombedarf für die verschiedenen Varianten näher untersucht. Auch bei den anderen Systemen weisen die berechneten Werte für den Betrieb der Pumpen (und des Lüftungssystems) keine merklichen Abweichungen auf, weshalb diese nicht extra aufgelistet werden. Somit resultieren die Unterschiede im Hilfsstrombedarf hauptsächlich aus dem der Wärmeerzeuger selbst. Die Komponente mit dem höchsten Strombedarf stellt das Lüftungssystem dar. Die Einsparungen die dabei allerdings durch die Wärmerückgewinnung erzielt werden können, sind, wie aus Abbildung 4-2 zu erkennen ist, deutlich größer. Bei Verwendung eines Solarkollektors, kommt es, aufgrund der geringeren Deckung des Wärmeerzeugers am Wärmebedarf, zu einer Verringerung des Hilfsstrombedarfes dessen. Eine Darstellung der Werte, verglichen mit jenen der anderen WBR-Systeme, folgt in Abbildung 4-3.

Tabelle 4-1: Analyse des Hilfsstrombedarfs für die Varianten des Gas-Brennwert-Kessels im EFH mit einem HWB von 25kWh/(m²a).

		Hilfsstrombedarf [kWh/m ² a]					
		Gas-BW	+S	+LS	+LS +S	+S(RH)	+LS +S(RH)
WW-Sp.-Ladeppe. (53W)		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Umwälzpumpe (30W)		0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Solarpumpe (38W)			0,42		0,42	0,42	0,42
Puffersp.-Ladeppe. (45W)						0,41	0,41
LS mit WRG				1,70	1,70		1,70
Gas-BW-Kessel	Heizungsbetrieb	0,32	0,32	0,07	0,07	0,25	0,02
	WW-Betrieb	0,24	0,03	0,24	0,03	0,01	0,01
SUMME		1,29	1,49	2,74	2,94	1,82	3,29

Der Hilfsstrombedarf, der sich für den jeweiligen Wärmeerzeuger im Heiz-, bzw. Warmwasserbetrieb ergibt, ist Tabelle 4-2 zu entnehmen. Die Werte gelten jeweils für die untersuchte Variante 1. Bei zusätzlicher Verwendung eines Solarkollektors oder Lüftungssystems, kommt es zu einer entsprechenden Verringerung. Auffällig ist der vergleichsweise hohe Hilfsstrombedarf der Biomasseheizungen, die sich hauptsächlich aus den benötigten Gebläsen und der elektrischen Zündungen ergeben. Die Pellets und Hackschnitzelheizung weisen im Grundzyklus, ohne automatische Fördereinrichtung, Gebläse und elektrische Zündung, einen Hilfsenergiebedarf von 0,05kWh auf. Verfügen die Anlagen zusätzlich jedoch über einen Ventilator, elektrische Zündhilfe und Fördereinrichtung erhöht sich dieser Wert auf 0,47kWh. Wie schon erläutert, weist der in der Berechnung verwendete Stückholzkessel auch eine automatische Zündung auf. Dabei ergibt sich ein Hilfsenergiebedarf von 0,31kWh im Grundzyklus (Werte aus der Software B52).

Die Berechnung der Laufzeiten, aus den in Tabelle 4-1 zusammengestellten Hilfsstrombedarfs-Werten, ergibt, dass die Warmwasserspeicherungspumpe (53W) etwa 242h/a, die Umwälzpumpe (30W) etwa 3467h/a, die Solarpumpe (38W) etwa 1769h/a und die Pufferspeicher Ladepumpe (45W) etwa 1458h/a laufen.

Tabelle 4-2: Hilfsstrombedarfe für verschiedene Wärmeerzeuger für die Variante 1 (ohne Lüftungssystem und Solarkollektor) im EFH mit HWB=25 bzw. 50 kWh/(m²a).

	Hilfsstrombedarf [kWh/(m ² a)]			
	HWB = 25kWh/(m ² a)		HWB = 50kWh/(m ² a)	
	Heizungsbetrieb	WW-Betrieb	Heizungsbetrieb	WW-Betrieb
Gas-BW	0,32	0,24	0,67	0,24
Fernwärme	0	0,4	0	0,4

4. Ökologischer Vergleich

Pellets	1,93	0,52	2,38	0,37
Hackschnitzel	1,93	0,52	2,38	0,37
Stückholz	1,27	0,34	1,57	0,24
Erdsonde-WP	0,45	0,37	0,95	0,37

In Abbildung 4-3 werden nun die erwarteten Hilfsstrombedarfe der verschiedenen WBR-Systeme dargestellt. Dabei werden sämtliche Komponenten der Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungsanlage berücksichtigt. Die schwarz umrandeten Bereiche gelten für einen HWB von 25kWh/(m²a) und die schraffierten für 50kWh/(m²a). Wie schon erwähnt, ergeben sich die höchsten Werte bei den Wasserheizsystemen daraus, dass eine Heizungs-Umwälzpumpe mit 104W verwendet wird und die niedrigsten von einer mit 30W. Man sieht, dass der Hilfsstrombedarf bei höherem Heizwärmebedarf nicht Wesentlich größer wird. Bei den Fernwärme-Heizvarianten liefert die Berechnung exakt den gleichen Hilfsstrombedarf. Die Verwendung einer solarthermischen Anlage kann, bei den Biomasse-Heizvarianten, sogar eine Verringerung des Hilfsstrombedarfs, trotz des zusätzlichen Energieaufwandes der Solarpumpe (evtl. Speicherladepumpe), bewirken, da, die Hilfsenergie, die durch die geringere Deckung des Wärmeerzeugers eingespart wird, überwiegt.

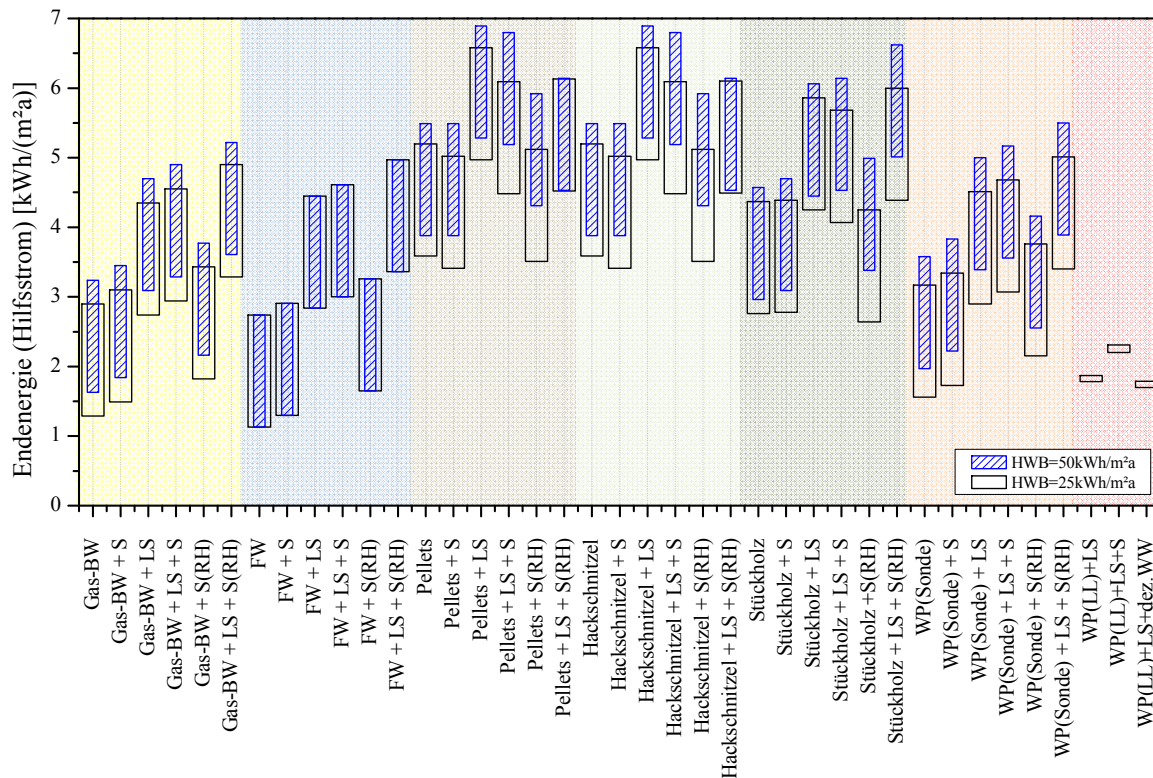


Abbildung 4-3: Darstellung der Ergebnisse für den Endenergiebedarf (Hilfsstrom) für verschiedene WBR-Systeme in EFH mit einem HWB von 25 bzw. 50 kWh/(m²a) (Daten siehe Anhang, Tabelle A-20).

Wie vorhin besprochen, kommt, bei der Bestimmung des Nutzungsgrades bzw. der Arbeitszahl, der Wahl der verwendeten Systemgrenzen große Bedeutung zu, weshalb im Folgenden die Berechnung für die sechs verschiedenen WBR-Systeme (in der Variante 1, also ohne Lüftungssysteme und Solarkollektoren) auf drei Arten erfolgt. Zum Einen erfolgt die Berechnung Nutzenergiebedarf (Heizung + Warmwasser) dividiert durch den Endenergiebedarf ohne Hilfsstrom. Die 2.Systemgrenze berücksichtigt zusätzlich den Hilfsstrombedarf der Wärmeer-

4. Ökologischer Vergleich

zeuger und der Pumpen, jedoch exklusive Heizungs-Umwälzpumpe. Letztere wird bei der Bestimmung des Systemnutzungsgrades miteinbezogen. In Tabelle 4-3 werden nun die Nutzungsgrade, die aus den zuvor ermittelten besten und ungünstigsten Werten für das EFH mit dem HWB von 25kWh/(m²a) resultieren, zusammengestellt. Im Hilfsstrombedarf, wie er in Abbildung 4-3 dargestellt wird, werden sämtliche Verbraucher des Heiz-, Warmwasserbereitungs-, und Lüftungssystems berücksichtigt.

Tabelle 4-3: Resultierende Jahresnutzungsgrade (bzw. Jahresarbeitszahl) für verschiedene Wärmeerzeuger mit Wasserheizsystem im EFH mit einem HWB von 25 kWh/(m²a).

	JNG/JAZ (ohne HS)		JNG/JAZ (mit HS, ohne UWP)		SNG	
	max	min	max	min	max	min
Gas-BW	90,04%	85,32%	88,67%	84,10%	87,33%	80,04%
Fernwärme	89,12%	87,37%	88,11%	86,40%	86,79%	82,13%
Pellets	72,55%	68,38%	68,64%	64,90%	67,84%	62,46%
Hackschnitzel	70,81%	66,57%	67,08%	63,27%	66,31%	60,95%
Stückholz	69,16%	64,63%	66,57%	62,36%	65,81%	60,11%
Erdsonde-WP	3,91	3,45	3,57	3,19	3,36	2,67

Die berechneten Jahresarbeitszahlen bzw. die Systemnutzungsgrade für die Luftheizsysteme (ohne Solarkollektor) werden in Tabelle 4-4 zusammengestellt. Die Jahresarbeitszahl die den Hilfsstrombedarf (jedoch ohne Lüftungssystem) berücksichtigt, ist nicht oder kaum kleiner als die JAZ ohne Hilfsstrom, da, neben dem Lüftungssystem, nur die evtl. vorhandene Speicherladepumpe als Verbraucher auftritt. Der Systemnutzungsgrad resultiert wiederum unter Berücksichtigung des gesamten Hilfsstrombedarfs.

Tabelle 4-4: Resultierende Jahresarbeitszahlen (bzw. Systemnutzungsgrad) für die Luftheizsysteme (ohne Solarkollektoren) für das EFH mit HWB 25kWh/(m²a) (abzüglich WRG).

	JAZ (ohne HS)		JAZ (mit HS, ohne LS)		SNG	
	max	min	max	min	max	min
Abluft-WP + LS	2,47	2,18	2,45	2,14	2,02	1,80
Abluft-WP + LS + dez.WW	1,23	1,19	1,23	1,19	1,11	1,08

Bei den folgenden Berechnungen des KEAs und der Emissionen wird, wenn nicht extra erwähnt, von jenen Endenergiewerten ausgegangen, die sich bei optimalen Bedingungen ergeben. Es werden somit die aus Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 ersichtlichen Untergrenzen der zu erwartenden Bereiche verwendet (optimale Nutzungsgrade/Leistungszahlen und minimaler Hilfsstrombedarf).

4.3 Bestimmung der Primärenergiefaktoren

Um für die, aus den für die unterschiedlichen WBR-Systemen, berechneten Endenergiebedarfs-Werten, die benötigte Primärenergie ermitteln zu können, werden mit Hilfe der Software GEMIS¹ (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme), die notwendigen Primärenergiefaktoren berechnet.

4.3.1 Elektrische Energie

Um im Folgenden die Primärenergiefaktoren von verschiedenen Stromerzeugungsmixen bestimmen zu können, wird zuerst untersucht, wie sich der Strom in Österreich über das gesamte Jahr 2006 bzw. nur während der Heizperiode (Oktober-April (Simader et al., 2007)) zusammensetzt. Dazu werden aktuelle Daten von e-control (Datenstand Juli 2007) verwendet.

In Abbildung 4-4 ist die gesamte, monatliche Bilanz Österreichs des Jahres 2006 (ohne Exporte) dargestellt. Dabei wird die Stromerzeugung außer in die Bereiche Wasserkraft und Wärmekraft aufgeschlüsselt in Wind + Sonne + Geothermie, sonstige Erzeugung und physikalische Stromimporte. Man erkennt, dass in den Sommermonaten Mai bis August in etwa doppelt so viel Energie aus Wasserkraft gewonnen wird als in den Wintermonaten Dezember bis Februar. Sonstige regenerative Energiequellen weisen noch einen geringen Anteil auf.

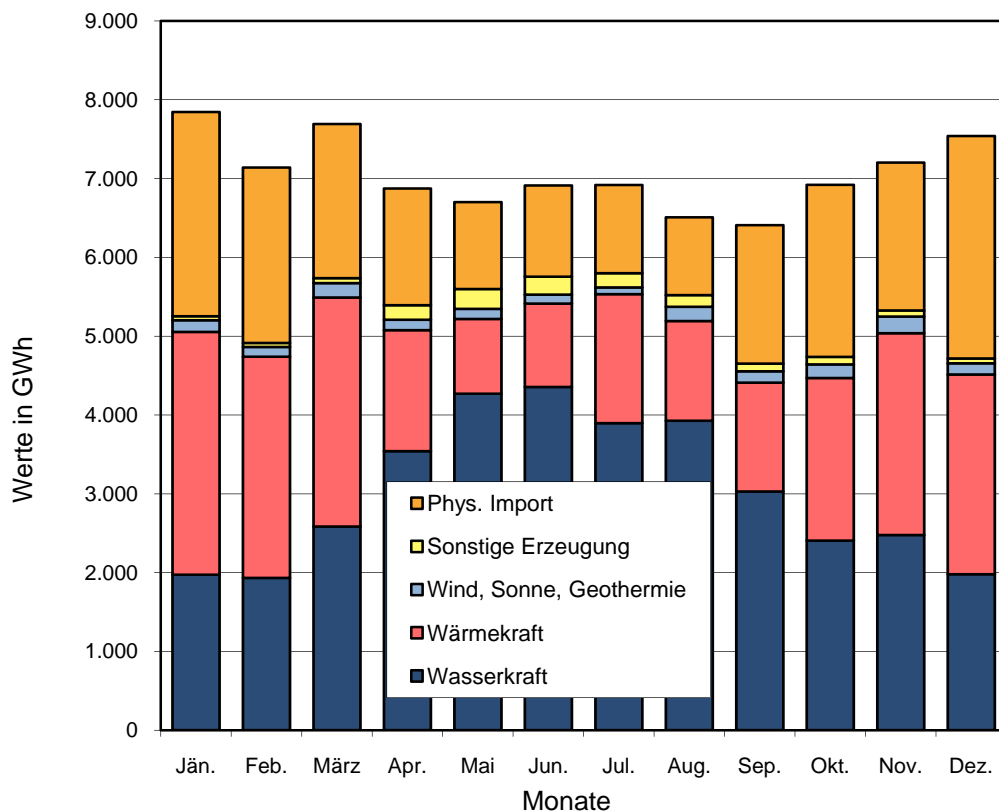


Abbildung 4-4: Gesamte, monatliche Versorgung Österreichs im Jahr 2006 (QUELLE: (e-control, 2007a), Darstellung angepasst).

¹ Version 4.42, <http://www.oeko.de/service/gemis/>

4. Ökologischer Vergleich

Die soeben besprochenen Stromerzeugungsbereiche werden nun nach deren prozentuellen Anteilen, über das gesamte Jahr betrachtet, dargestellt. Der meiste Strom kommt in Österreich aus Wasserkraft, gefolgt von thermischen Kraftwerken und Stromimporten. Wenn man nur die heimischen Kraftwerke betrachtet, also ohne die Zusammensetzung der Stromimporte, dann ergibt sich ein Wasserkraftanteil von knapp 60% (eigene Berechnungen auf Basis von (e-control, 2007a)).

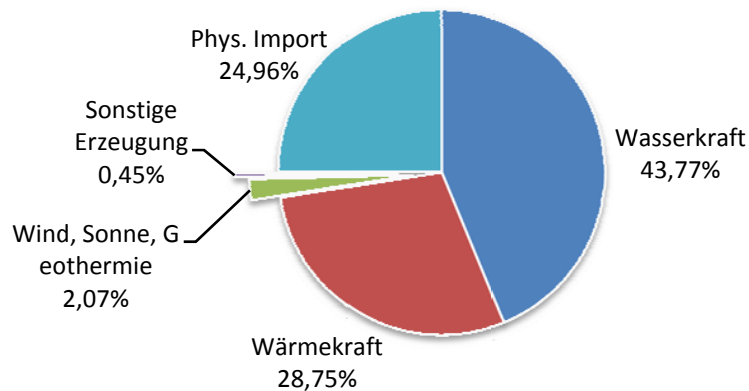


Abbildung 4-5: Darstellung der gesamten Elektrizitätsversorgung Österreichs im Jahr 2006 (Jahresmix) (eigene Berechnung, basierend auf Daten von (e-control, 2007a)).

Um den Stromerzeugungsmix in GEMIS modellieren zu können ist es noch wichtig zu analysieren, aus welchen Anteilen sich die Wärmekraft zusammensetzt und aus welchen Ländern die Importe stammen.

Die Elektrizitätsversorgung mittels Wärmekraftwerken setzt sich im Jahr 2006 folgendermaßen zusammen:

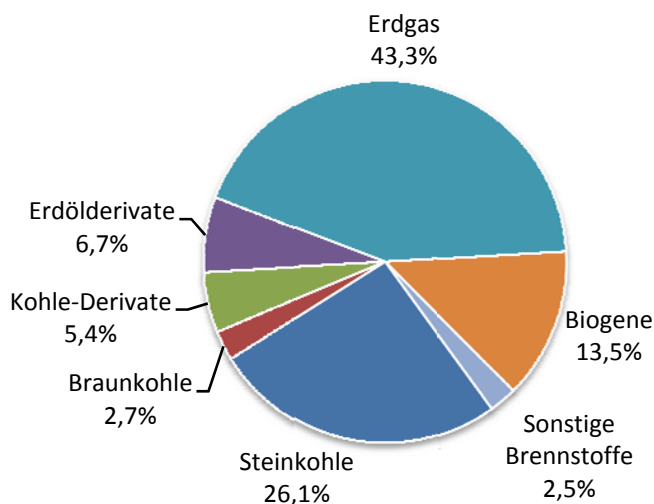


Abbildung 4-6: Zusammensetzung der Wärmekraftwerke im Jahr 2006 (gerundet) (eigene Berechnung, basierend auf Daten von (e-control, 2007c)).

Die physikalischen Stromimporte stammen zu 60,73% aus Deutschland, 28,88% aus Tschechien, 5% aus Ungarn, 4,99% aus Slowenien und der Rest aus der Schweiz, Italien und Lichtenstein (siehe Abbildung 4-7).

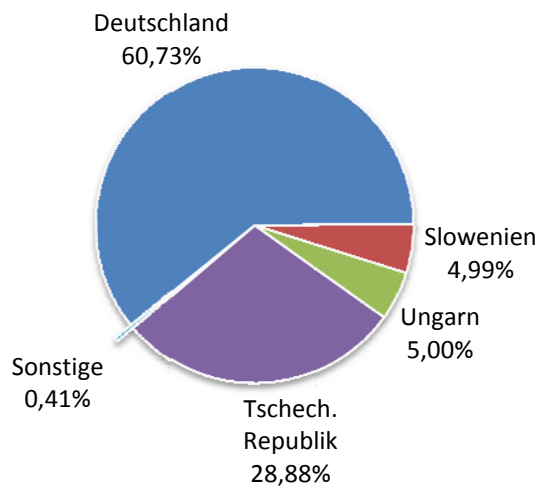


Abbildung 4-7: Physikalische Stromimporte Österreichs im Jahre 2006 (eigene Berechnung, basierend auf Daten von (e-control, 2007b)).

Drei verschiedene Stromerzeugungsmixe werden nun, mittels GEMIS modelliert (näheres dazu im Anhang 1: „Details zur Modellierung in GEMIS“):

- Ausgehend von den eben diskutierten Daten wird der „Jahresstrommix“ definiert, wobei die Erzeugungsstruktur an den Kraftwerkspark Österreichs 2006 angepasst wird (basierend auf Daten von e-control (2007c)). 44% davon wird durch heimische Wasser-, 13% durch Gaskraftwerke und 25% durch Stromimporte (Stichwort UCTE-Mix) gedeckt (genauer im Anhang).
- Bei Strom-Mix Nr.2 („Ökostrommix“) wird angenommen, dass die gesamte elektrische Energie zu 50% aus Kleinwasserkraft, 49% aus Wind und 1% durch Photovoltaik gewonnen wird. Dieser Erzeugungsmix wurde bewusst so gewählt, da sich aus dem sehr hohen Anteil aus regenerativen Umweltenergien eine besonders vorteilhafte Bewertung hinsichtlich des KEA in GEMIS ergibt. Würde anstelle der Wind- oder Wasserkraftwerke die Stromerzeugung durch Biomassekraftwerke modelliert werden, wäre der KEA deutlich höher. Der Grund ist, dass im Regelfall die Ressourcennutzung mit 100% stattfindet, was bedeutet, dass bei Prozessen die Strom aus Erdwärme, Sonne, Wasserkraft oder Wind erzeugen, der Nutzungsgrad mit 100% festgelegt wird. Dies kann zwar geändert werden, wird aber aus Gründen, welche von Fritsche, Jenseit und Hochfeld (1999) diskutiert werden, empfohlen. Der Erzeugungsmix beinhaltet 1% Photovoltaik-Strom, da die Bezeichnung „grüner Strom“ mit dem Umweltzeichen dieses fordert. Außerdem dürfen die dabei verwendeten Wasserkraftwerke eine Leistung von maximal 10MW besitzen (Lechner, 2005).
- Variante Nr.3 stellt den sogenannten „Winterstrommix“ dar, welcher einer Grenzbetrachtung in der kalten Jahreszeit entspricht. Dieser ist der, verglichen mit den anderen, ökologisch ungünstigste Fall. Dabei wird angenommen, dass jede zusätzlich benötigte Einheit an elektrischer Energie durch das entsprechende Grenzkraftwerk bereitgestellt werden muss, welches im Winter im Regelfall durch ein Wärmekraftwerk gebildet wird. Der Er-

zeugungsmix der zur Modellierung in GEMIS verwendet wird, ist im Anhang genauer definiert und besteht zu über 90% aus Gas/GuD- und Kohlekraftwerken.

Um die aus der Modellierung resultierenden Primärenergiefaktoren besser verstehen zu können, wird zuerst kurz auf die Thematik der Bewertung von erneuerbaren Energien eingegangen. Der Energieinhalt von fossilen Brennstoffen und Biomasse wird über den Heizwert (unteren Heizwert) oder den Brennwert (oberen Heizwert) definiert, wobei im Folgenden der Bezug auf den Heizwert erfolgt. Bei der Bewertung von regenerativen Umweltenergien¹ gibt es nun unterschiedliche Ansätze, wie die eingesetzte Energie bewertet werden kann (siehe dazu auch: Definition des Bereitstellungsnutzungsgrades (Kapitel 2).

Abbildung 4-8 zeigt nun, ausgehend von den eben besprochenen Daten, welche Primärenergiemenge für die Bereitstellung einer kWh elektrischer Energie (Endenergie) notwendig ist. Dabei erfolgt eine Aufschlüsselung in nicht erneuerbare, erneuerbare und „andere“ Anteile. Letzteren entstehen durch energetisch genutzten Reststoffe (Fritsche, Jenseit & Hochfeld, 1999, S.3).

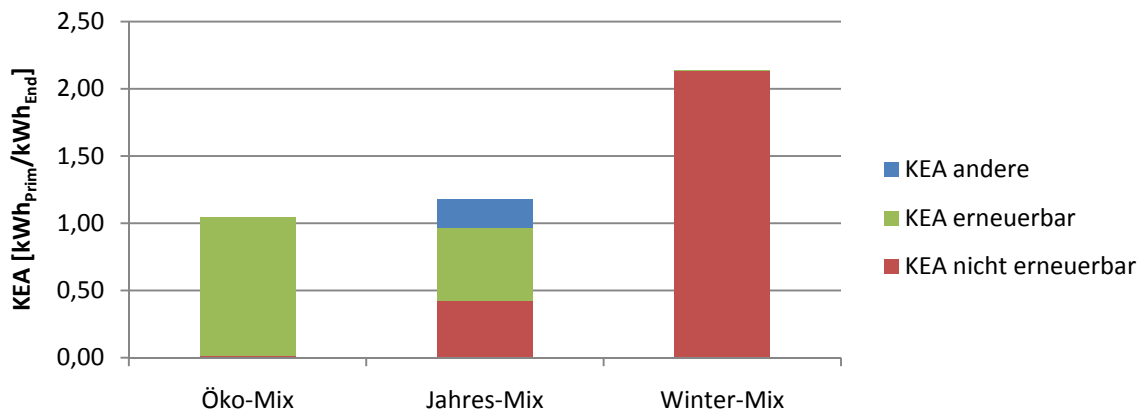


Abbildung 4-8: Darstellung des kumulierten Energieaufwandes für die Bereitstellung einer kWh elektrischer Endenergie, ausgehend von verschiedenen Strom-Erzeugungsmixen. Modelliert in GEMIS, ausgehend von Daten für Österreich 2006 (siehe Anhang, Tabelle A-1).

Der Primärenergiefaktor für den Winterstrommix ergibt sich somit zu etwa 2,14, für den Jahresmix zu 1,18 und dem Ökostrommix zu lediglich 1,04. Der Primärenergiefaktor für den Jahresstrommix fällt aufgrund der österreichischen Erzeugungsstruktur (hoher Wasserkraftanteil), verglichen mit vielen anderen Ländern, deutlich besser aus.

4.3.2 Verschiedene Energieträger

In Abbildung 4-9 wird der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung einer kWh Erdöl, Erdgas, Pellets, Hackschnitzel, Stückholz und Fernwärme (Endenergie) dargestellt. Auf die Fernwärme, für welche sich ein Primärenergiefaktor von etwa 0,54 ergibt, wird anschließend näher eingegangen, da es dabei, je nach Voraussetzung, zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen kommen kann. Warum die Berechnung für Pellets einen Primärenergiefaktor etwas kleiner wie 1 ergibt, kann nicht im Detail nachvollzogen werden. Es wird aber angenommen, dass dies durch Gutschriften aus Nebenproduktentsorgungen resultiert.

Bei der Berechnung, mit den im Anhang näher beschriebenen Prozessketten, wird für Pellets und Hackschnitzel ein Transportweg von 100km verwendet². Stückholz wird über 50km an-

¹ Umwandlungstechnologien Windkraftwerk, Wasserkraftwerk, Photovoltaik oder geothermische Kraftwerke.

² Prozess: LKW-DE-2000-Solo-16,5t

4. Ökologischer Vergleich

geliefert¹. In der Darstellung ist auch leichtes Heizöl dargestellt, obwohl es bei den ausgewählten Heizsystemen keinen Ölkessel gibt. Der Wert dient lediglich zum Vergleich.

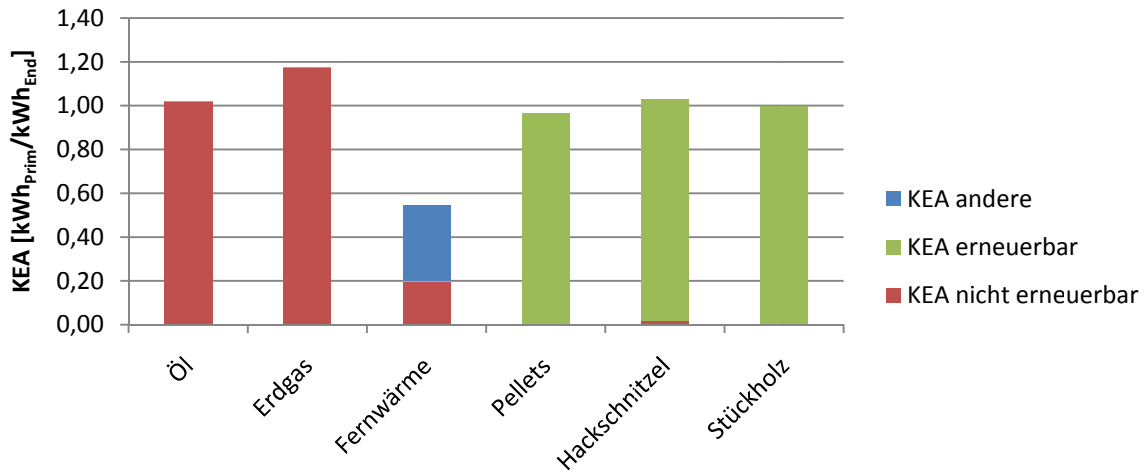


Abbildung 4-9: Darstellung des kumulierten Energieaufwandes für die Bereitstellung einer kWh Endenergie verschiedener Energieträger (Werte siehe Anhang, Tabelle A-2; Berechnung mittels GEMIS).

Da der für Fernwärme resultierende Wert einer genaueren Diskussion bedarf, wird auf diesen nun näher eingegangen: Die Modellierung der Fernwärme findet in Anlehnung an Abbildung 4-10 statt. Dieses Diagramm zeigt, dass die Nah-/Fernwärmebereitstellung in Österreich zum Großteil auf Erdgas beruht (etwa 55%). Insgesamt erfolgt der Brennstoffeinsatz zu 90% aus fossilen Energieträgern und zu 10% aus erneuerbaren, worin auch die Müllverbrennung enthalten ist². Der Anteil der Nah- und Fernwärme die durch Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird, liegt in Österreich in den letzten 5 Jahren zwischen 70 und 74% (FGW, 2007). Der Rest stammt aus Heizwerken.

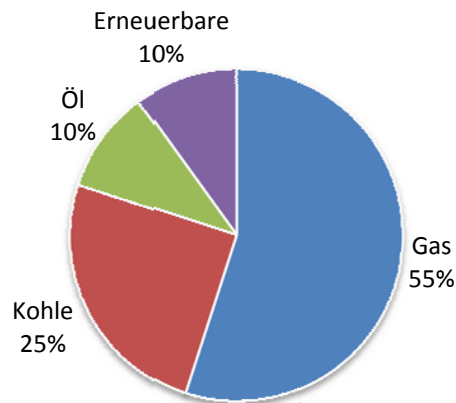


Abbildung 4-10: Brennstoffeinsatzstruktur zur Nah- /Fernwärmeerzeugung im Jahr 2006 (Quelle: (FGW, 2007), eigene Darstellung).

Wichtig zu erwähnen ist an dieser Stelle auch, dass in GEMIS Kraft-Wärme-Kopplungs-Prozesse unter Zuhilfenahme von Gutschriften berechnet werden. Das bedeutet folgendes: Wenn angenommen ein HKW hauptsächlich Strom erzeugt, dann tritt als Nebenprodukt

¹ Prozess: LKW-DE-2000-Solo-7,5t

² Nach persönlicher Mitteilung von Mag. Katalin-Andrea Griessmair, Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen (Nov. 2007).

Fernwärme auf. Für dieses Nebenprodukt wird nun eine Gutschrift angesetzt, die somit beschreibt, welcher kumulierte Energieaufwand bzw. Emissionen dadurch eingespart werden können, dass eine gewisse andere Technologie, die ansonsten für die Wärmeerzeugung notwendig wäre (z.B. Öl-Heizungen), substituiert werden kann. Ist umgekehrt der Hauptzweck eines Heizkraftwerkes die Wärmeproduktion, dann entsteht eine Gutschrift für den erzeugten Strom. Diese Gutschriften können, in Abhängigkeit vom substituierten Prozess, bewirken, dass gewisse Emissionen des Gesamtprozesses HKW somit auch negativ werden. Diese Funktion der Gutschriftenanrechnung kann in GEMIS bei Bedarf auch deaktiviert werden. Dabei werden KWK-Prozesse bei denen keine Gutschrift berücksichtigt wird mit brutto, andernfalls mit netto bezeichnet (Fritsche & Schmidt, 2007, S. 48 - Abs. 3, S.55 - Abs.2, S. 144-145, 154-171).

Werden Gutschriften verwendet, hängt das Ergebnis vom gewählten, substituierten Prozess ab. Im betrachteten Fall wird eine Substitution des deutschen Kraftwerks-Mixes untersucht. Um die mögliche Bandbreite der Resultate besser abschätzen zu können, zeigt Abbildung 4-11 den kumulierten Energieaufwand für die Bereitstellung einer kWh Endenergie mittels Fernwärme, für die Fälle mit bzw. ohne Berücksichtigung der Gutschriften. Details zur Modellierung sind wieder dem Anhang zu entnehmen.

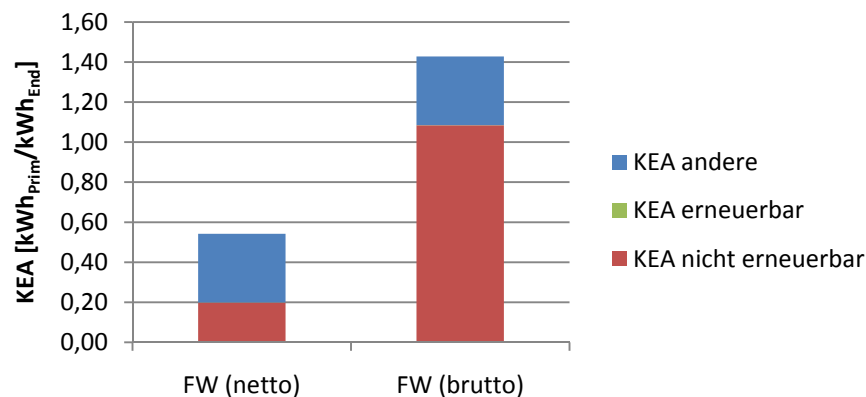


Abbildung 4-11: Darstellung des Vergleichs des berechneten KEA für Fernwärme mit und ohne Gutschriften (Daten siehe Anhang, Tabelle A-3; Berechnung mittels GEMIS).

Deutlich kann man erkennen, in welchem großen Ausmaß sich die Berücksichtigung der Gutschriften auswirkt (analoges siehe beim Vergleich der Emissionen im Kapitel 4.6). Man muss daher beim Vergleich der unterschiedlichen Heizsysteme stets berücksichtigen, auf Grundlage welcher Daten und Modellierung man ausgeht.

Besonders bei dem Anschluss von Niedrigenergie- und Passivhäusern an Wärmenetze muss beachtet werden, dass der geringere Wärmebedarf Auswirkungen auf die Konkurrenzfähigkeit der Wärmenetze selbst hat. Da die Effizienz von Wärmenetzen von der Wärmedichte im Versorgungsgebiet abhängt, kann, insbesondere in zersiedelten Gebieten, der flächendeckende Einsatz von energiesparenden Gebäuden, zur Unwirtschaftlichkeit der Wärmenetze, führen. Die geringere Wärmedichte erfordert, neben weitere Investitionen in das Netz, auch einen zusätzlichen Brennstoffeinsatz, aufgrund der höheren Wärmeverluste im Netz (Haas & Müller, 2007, Kap. 4.7).

4.4 Analyse zum kumulierten Energieaufwand der Herstellung und Entsorgung

In den folgenden Unterpunkten erfolgt nun eine Zusammenstellung und Auswertung von Daten verschiedener Studien, welche sich mit dem kumulierten Energieaufwand von Komponenten für WBR-Systeme, beschäftigen.

4.4.1 Thermische Solarkollektoren

1) Kollektor

Die unterschiedlichen Arten und Eigenschaften von thermischen Solarkollektoren wurden in Kapitel 3.2.36) näher erläutert. Um nun zu untersuchen welcher kumulierte Energieaufwand für deren Herstellung notwendig ist, wird u.a. auf eine Studie von Handke, Knoll, Hartmann und Spitzmüller (2003) zurückgegriffen. Darin wurde ermittelt, dass der Marktanteil der schwarzchrombeschichteten Absorber, durch die Verwendung von hochselektiven Beschichtungen auf 15% zurückgegangen ist. Die Studie untersucht u.a. den kumulierten Energieaufwand, der für die Herstellung von Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren (inklusive der benötigten Komponenten) notwendig ist. Für die Untersuchung wurden Flach- und Vakuumröhrenkollektoren mit Schwarzchrombeschichtung und jeweils einer mit Sputter- bzw. TiNOX-Beschichtung betrachtet.

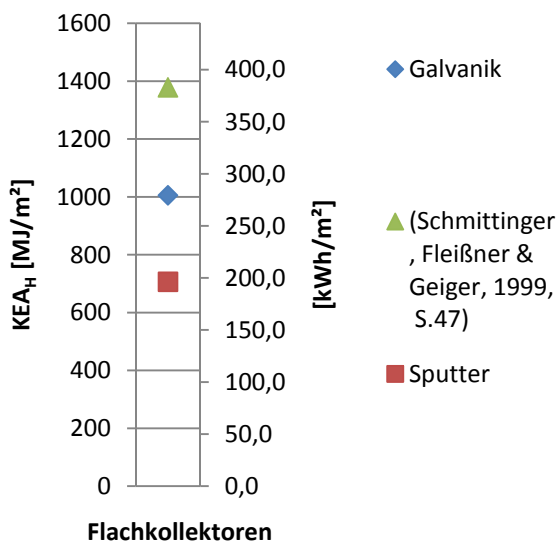


Abbildung 4-12: KEA_H für einen Quadratmeter Flachkollektor (Daten basierend auf (Handke, Knoll, Hartmann & Spitzmüller, 2003, Kap. 4) außer gekennzeichnete, ergänzt mit eigenen Berechnungen) (siehe Tabelle A-11).

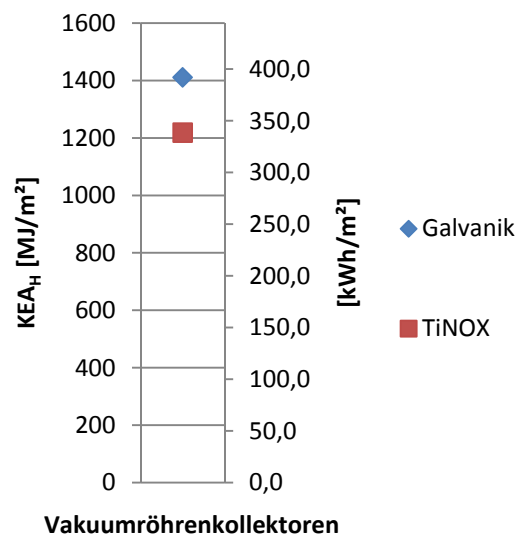


Abbildung 4-13: KEA_H für einen Quadratmeter Vakuumkollektor (Daten basierend auf (Handke, Knoll, Hartmann & Spitzmüller, 2003, Kap. 4) außer gekennzeichnete, ergänzt mit eigenen Berechnungen) (siehe Tabelle A-11).

Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 zeigen nun einen, auf den Daten dieser Studie basierenden KEA_H -Vergleich, für verschieden beschichtete Flach- bzw. Vakuumröhrenkollektoren gemeinsam mit einem Ergebnis aus einer anderen Studie. Da die jeweiligen Beschichtungen im μm -Bereich liegen, ist deren Masseanteil vernachlässigbar und nicht aufgeführt. Es zeigt sich, dass der KEA_H -Anteil der Beschichtungen am Komplettsystem der thermischen Solaranlage nur zwischen 0,4 und 0,9% liegt und somit nicht weiter ins Gewicht fällt. Die Unterschiede entstehen somit durch die unterschiedlichen Konstruktionsweisen und dadurch ver-

wendeten Massen (vor allem von Metallen und Glas). Generell weisen Vakuum-Kollektoren einen höheren KEA_H auf. Die Entsorgung wurde in dieser Studie nicht betrachtet.

2) **Montage**

Zur Montage eines 5m^2 großen Solarkollektors wird angegeben, dass 19kg hochlegierten Stahl benötigt werden, was einem KEA_H von knapp 1000MJ entspricht (Edelstahl, hochlegiert = 52,00 MJ/kg) (Handke, Knoll, Hartmann & Spitzmüller, 2003, Kap. 4). Geht man nun davon aus, dass sich der Materialeinsatz für das Montagematerial entsprechend der Kollektorgröße ändert, kann der KEA_H für Solarkollektoren und deren Montageset mit $910\text{MJ}/\text{m}^2$ abgeschätzt werden¹.

Zur Validierung dieses Ergebnisses wird nun der KEA_H , ausgehend von den in GEMIS gegebenen Materialaufwendungen, für die Herstellung von Kollektoren, berechnet². Die dazu notwendigen Energieaufwendungen zur Bereitstellung der Materialien werden, ebenfalls mittels GEMIS ermittelt, und sind in Tabelle A-16 zusammengestellt. Man erkennt, dass die Herstellung von Aluminium besonders energieintensiv ist. Neben den Materialaufwendungen für den Flach- bzw. Vakuumkollektor selbst sind, bei den in den Prozessen gegebenen Werten, auch noch jene für Pumpe und Speicher berücksichtigt. Die Montage wird mit einem Aufschlag von 10% und die Wartung mit 5% berücksichtigt. Der Materialaufwand, der somit für die Herstellung von 1kW notwendig ist, wird in Tabelle A-17 gemeinsam mit dem berechneten KEA_H zusammengestellt. Das Ergebnis lautet, dass etwa $5000\text{kWh}/\text{kW}$ für die Herstellung benötigt werden. Da für die Erzeugung dieser Leistung 8m^2 angesetzt werden, ergibt sich ein KEA_H von rund $2.25\text{GJ}/\text{m}^2$ (inklusive Montage, Wartung, Speicher und Pumpe). Die Materialaufwendungen zur Herstellung eines Vakuumkollektors in GEMIS ergeben, aufgrund der deutlich niedrigeren Menge an eingesetztem Aluminium und Kupfer, ein KEA_H von nur $924\text{MJ}/\text{m}^2$, obwohl auch hier Montage, Wartung, Speicher und Pumpe berücksichtigt wurden. Diese Abschätzung liefert somit ein deutlich besseres Ergebnis für den Vakuumkollektor als die Studie von Handke, Knoll, Hartmann und Spitzmüller (2003).

Diese Ergebnisse zeigen, dass der KEA_H , je nach Konstruktionsweise und den davon abhängigen Materialien, deutlichen Schwankungen unterliegt.

3) **Solarkomplettstation**

Eine Station zur Steuerung eines Solarkollektors in einem Einfamilienhaus wirkt sich mit einem KEA_H von 870MJ aus (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47).

4) **Verrohrung**

Für die für eine Solaranlage notwendige Verrohrung wird ein KEA_H von 1,19GJ berechnet (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47).

Auch Handke et al. (2003) untersuchten den KEA_H eines Rohrleitungssystems zur Einbindung eines thermischen Solarkollektors. Die dazu notwendigen Materialien und der daraus berechnete KEA_H ist in Tabelle A-14 zusammengestellt. Man sieht, dass diese Verrohrung in diesem Fall vorwiegend aus Stahl und Kupfer besteht. Als Ergebnis ergibt sich für ein Einfamilienhaus (Rohrleitung = 40m) ein KEA_H von etwa 1,79GJ.

¹ Montage etwa $200\text{MJ}/\text{m}^2$ und Flachkollektor(Galvanik) etwa $710\text{MJ}/\text{m}^2$

² Prozesse in GEMIS: SolarKollektor-Flach-2000 und SolarKollektor-Vakuum-Röhre

4.4.2 Wärmerezeuger

1) Verbrennungskessel

Um den KEA für die Wärmerezeuger abschätzen zu können, wird von Untersuchungsergebnissen, die in der Arbeit von Hutter und Wedler (2002) dargestellt werden, ausgegangen. Diese basieren auf einem Einfamilienhaus mit einem Heizwärmebedarf von $102\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und einer Wohnfläche von 102m^2 . Da davon ausgegangen werden kann, dass, für Niedrigenergie- und insbesondere Passivhäuser, der KEA_H aufgrund der niedrigeren benötigten Heizleistung, geringer ausfallen wird, werden diese Werte als Obergrenze angesehen. Aus den in dieser Arbeit vorhandenen Informationen können die nun folgenden Daten zusammengestellt werden.

Eine zentrale Gastherme mit Warmwasserbereitung im Durchlaufverfahren weist einen KEA_H von etwa 5GJ auf. Genauso der Gas-Brennwertkessel. Der Öl-Niedertemperaturkessel, der zwar im Rahmen dieser Arbeit bei der Untersuchung des kumulierten Energieaufwandes der Nutzung nicht weiter beachtet wird, weist einen KEA_H von etwa 11GJ auf (inkl. Öltank). Für eine Hackschnitzelfeuerung ergibt sich ein KEA_H von $\sim 26\text{GJ}$ (inkl. Lagerraum) (siehe Abbildung 4-14). Die Berücksichtigung der Entsorgung erfolgt unter Annahme eines kontrollierten Rückbaus. Durch Gutschriften auf wiederverwertbare Komponenten wird der KEA_E vermindert und liegt bei allen Systemen bei weniger als einem Prozent des gesamten KEAs. Bei dieser Studie überwiegt allerdings der KEA_N über 20 Jahre deutlich (Hutter & Wedler, 2002).

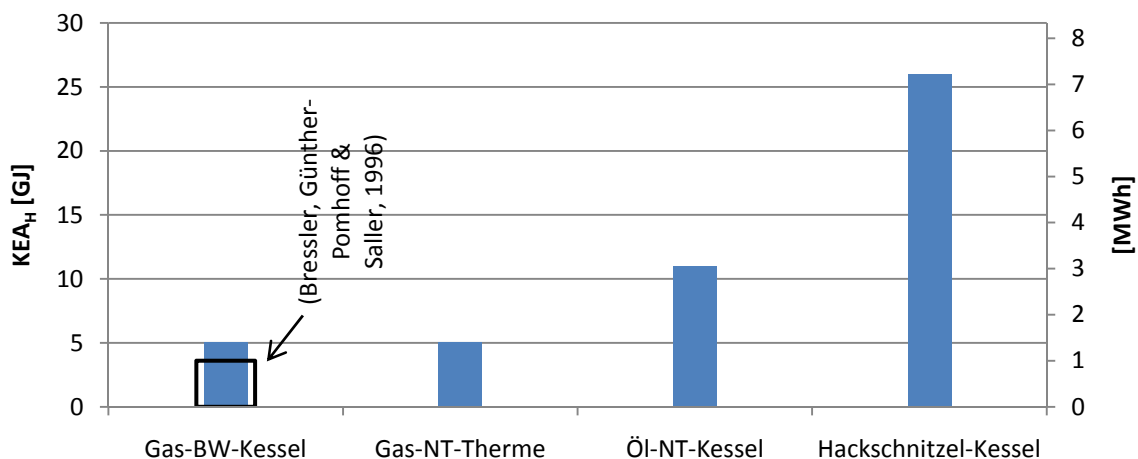


Abbildung 4-14: Darstellung des KEAs der Herstellung für unterschiedliche Heizsysteme in einem Einfamilienhaus mit einem HWB von $102\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Daten basierend auf (Hutter & Wedler, 2002, außer gekennzeichnete, teils eigene Berechnungen).

Eine einfache Abschätzung des KEAs für einen Gas-Brennwertkessels mit einem Nennwärmeleistungsbereich von 7-11kW basiert auf dessen Gesamtmasse im Vergleich zu einer Wärmepumpe. Dabei ergibt sich ein Herstellungsaufwand von 3,6GJ (siehe Abbildung 4-14) und Entsorgungsgutschriften in der Höhe von 812MJ, was somit einem KEA_{H+E} von etwa 2.8GJ entspricht (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, Kap. 7.3)

In GEMIS werden die Materialaufwendungen für verschiedene Heizkessel häufig in Kombination mit dem Wärmeverteilungssystem angegeben¹, wodurch nicht auf die einzelnen Anlagenteile geschlossen werden kann. Da z.B. der Materialaufwand für die Herstellung eines zentralen Stückholzkessels und der Wärmeverteilung mit lediglich 5kg/kW Stahl angegeben

¹ Z.B. Prozesse Gas-Heizung-Brennwert-DE-2005 oder Holz-Stücke-Heizung-DE-2000 (Endenergie)

wird¹, die Herstellung einer Zentralheizung für Holz-Hackschnitzel hingegen mit 25kg/kW (ohne Angabe eines Wärmeverteilungssystems)², werden die Werte als nicht repräsentativ erachtet.

2) Sole/Wasser-Wärmepumpen und Wärmequellenanlagen

In einer Studie von Bressler, Günter-Pomhoff & Saller (1996) wird ein mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe beheiztes Einfamilienhaus, welches einen HWB von 71 kWh/(m²a) und eine Normheizlast von 5,7kW (42W/m² bei 134m² Wohnfläche) aufweist, untersucht. Es wird mit einer Fußbodenheizung im Auslegungsfall mit 40°C im Vorlauf und 30°C im Rücklauf beheizt. Die verwendete, elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpe (monovalent) besitzt eine Heizleistung (B0W35) von 7,8kW und eine elektrische Leistungsaufnahme (B0W35) von 1,9kW. Die Leistungszahl in diesem Punkt ist somit 4,15. Die Wärmepumpe wird nicht zur Warmwasserbereitung verwendet. Die Berechnung des KEA für die Herstellung dieser Wärmepumpe liefert 9GJ. Wird auch die Entsorgung berücksichtigt, verkleinert sich dieser Wert durch die Gutschriften auf etwa 7,1GJ³ (Bressler, Günter-Pomhoff & Saller, 1996, S.47).

Zusätzlich zu diesem Ergebnis wird in Abbildung 4-15 noch das Ergebnis einer KEA-Berechnung einer 7,8kW-Sole/Wasser-Wärmepumpe von Schmittinger, Fleißner und Geiger (1999, S.47) eingezeichnet.

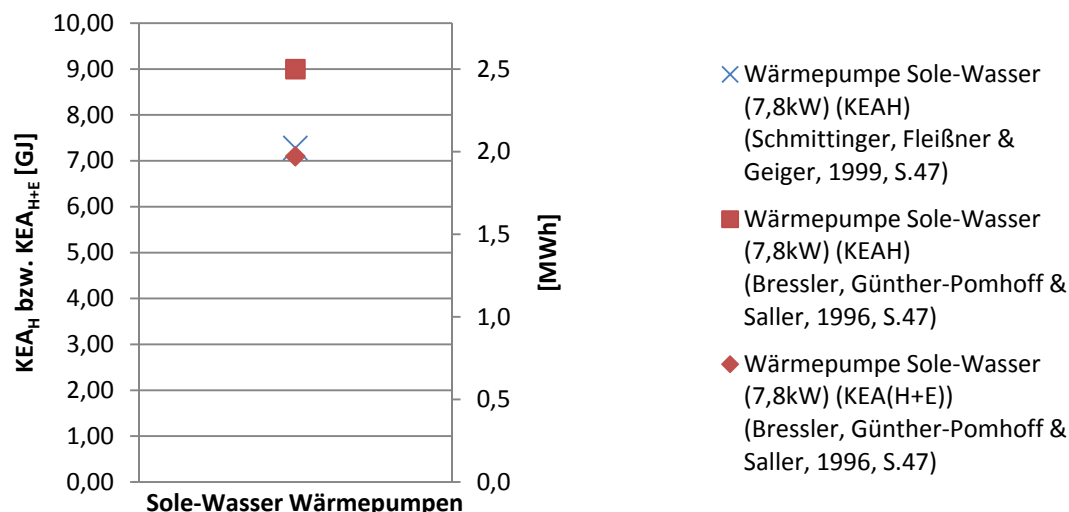


Abbildung 4-15: Vergleich des KEAs für die Herstellung und Entsorgung von Sole/Wasser-Wärmepumpen (Werte siehe Tabelle A-12).

Für die Wärmepumpenquelle werden zwei Doppel-U-Erdsonden (PE-HD-Doppel-U-Rohre) mit einer Länge von je 40 Meter eingesetzt. Die Berechnungsergebnisse (Abbildung 4-16) zeigen deutlich, dass die Installation dieser beiden Erdsonden mit etwa 14,5GJ den Großteil des gesamten KEAs der Herstellung ausmacht. Dieser Wert hängt aber äußerst stark von den Gesteinsformationen ab, in die gebohrt werden muss. Im untersuchten Fall war das hauptsächlich Kalkstein. Die dazu notwendige „Imlochhammermethode“ benötigt Druckluft, deren Herstellung besonders energieintensiv ist. Es wird angegeben, dass für jeden Meter der Bohrung

¹ Prozess: Holz-Stücke-Heizung-DE-2000 (Endenergie)

² Prozess: Holz-HS-Waldholz-Heizung-10 kW-2000 (Endenergie)

³ Wird der gesamte KEA_E in der Höhe von 2,9GJ (welcher hauptsächlich aus Gutschriften für die Wärmepumpe entsteht, da die Sonden im Boden verbleiben) entsprechend der Massenbilanz der Entsorgung aufgeteilt, ergibt sich ein KEA_E von etwa 1,9GJ für die Wärmepumpe. Daraus resultiert KEA_{H(WP)} = 9 – 1,9 = 7,1GJ.

selbst, 1 Liter Diesel aufzubringen ist. Die zusätzliche Erzeugung der notwendigen Druckluft benötigt noch einmal 3,25 Liter Diesel je Meter. Das bedeutet somit, dass im konkreten Fall, sollte der Einsatz energiesparender Techniken möglich sein, der kumulierte Energieaufwand beträchtlich verringert werden kann (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, Kap. 7).

Abbildung 4-16 zeigt die Anteile der jeweiligen Teilbereiche am gesamten kumulierten Energieaufwand der WQA (ohne WP) von 26,8 GJ, wobei noch keine Entsorgung berücksichtigt wurde.

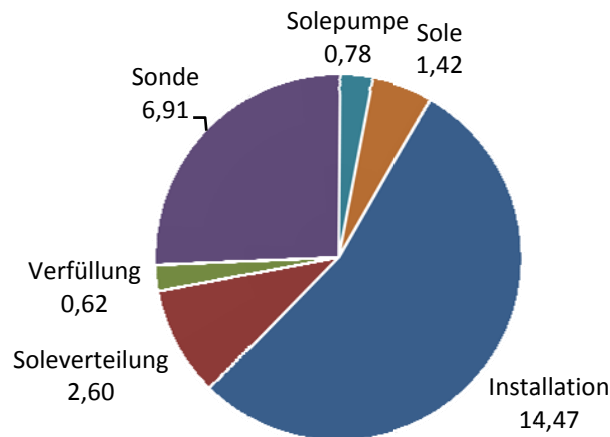


Abbildung 4-16: Darstellung der Anteile am gesamten KEA der Herstellung einer WQA mit 2 Erdsonden mit je 40m. Zahlenwerte in GJ (Daten aus (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.53)).

Zur Berechnung der Energieaufwendungen und Gutschriften bei der Entsorgung der Anlage, wird angenommen, dass die Erdwärmesonden im Boden verbleiben. Alle anderen Komponenten wie Sole, Soleverteilung, Solepumpe werden wiederverwertet bzw. entsorgt, indem sie zuerst zu einer Shredderanlage transportiert, zerkleinert und soweit wie möglich getrennt. Die metallischen Bestandteile werden wiederverwendet, wodurch energetische Gutschriften entstehen. Die anderen Stoffe werden thermisch verwertet (was ebenfalls mit Gutschriften berücksichtigt wird) und die Reststoffe davon deponiert. Dabei entstehen Gutschriften von etwa 3100MJ und Aufwendungen von lediglich 190MJ. Teilt man diese Gutschriften jetzt entsprechend der Massebilanz auf, kann der KEA_E der WQA (ohne Sonden) abgeschätzt werden (siehe Abbildung 4-17 und Tabelle A-13) (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, Kap. 7.2.3).

Um die Bandbreite besser abschätzen zu können, wird an dieser Stelle erwähnt, dass in dieser Studie, für das eben beschriebene Einfamilienhaus, die Berechnung auch mit einer Variation des Dämmstandards durchgeführt wurde. Dabei werden auch die KEA Werte für die Herstellung der Wärmequellenanlage für eine Norm-Heizleistung von 53W/m^2 ($HWB = 96\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) und 77W/m^2 ($HWB = 145\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) berechnet. Die Wärmequellenanlagen mit 3 bzw. 4 Doppel-U-Erdsonden ergeben einen KEA der Herstellung von 38,6GJ bzw. 52,3GJ. Die Entsorgung wird wieder mittels der Massebilanz der Entsorgung abgeschätzt (siehe Abbildung 4-17 und Tabelle A-13).

In der Studie von Hutter & Wedler (2002) wird auch eine Elektrowärmepumpe mit Erdwärmesonde untersucht. Diese wird ebenfalls nur für die Raumheizung eingesetzt. Dabei verursacht diese Wärmepumpe, vor allem wegen der energieintensiven Installation der Erdsonden, einen KEA von rund 43GJ. Aus dem verfügbaren Kurzbericht zu dieser Studie ist nicht er-

kennbar wie sich dieser Wert zusammensetzt. Wird angenommen, dass sich die Wärmepumpe wie im gerade zuvor besprochenen Fall mit etwa 7,1GJ auswirkt, ergibt das für die Wärmequellenanlage (Sonden-Installation...) einen KEA von 35,9GJ. Die eben besprochenen KEA-Werte sind ebenfalls in Abbildung 4-17 dargestellt. Daraus lässt sich auch gut ein Wert abschätzen, der z.B. bei WBR-Anlagen entstehen würde, die nur eine Erdsonde benötigen.

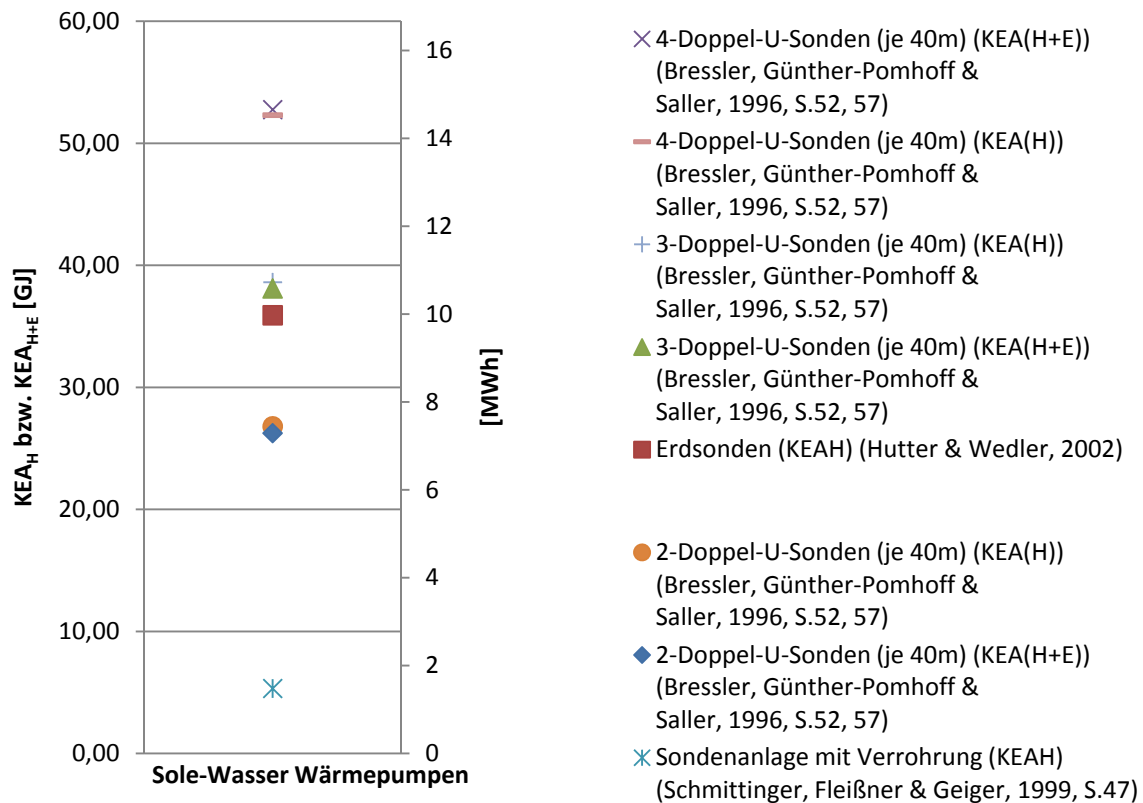


Abbildung 4-17: Vergleich des KEAs für die Herstellung und Entsorgung von Wärmequellenanlagen (Installation der Erdsonden...) (siehe Text) (Werte siehe Tabelle A-13).

Zusätzlich ist in diesem Diagramm ein Wert eingezeichnet, der ebenfalls für ein Einfamilienhaus (Wohnfläche 120m², HWB=100kWh/(m²a)) berechnet wurde. Dabei wurden 5 Erdspieße mit je 25m verwendet. Das berechnete Ergebnis liegt, im Vergleich zu den anderen, bei äußerst niedrigen 5,32GJ. Unter welchen Bedingungen dieser Wert zustande kommt, ist leider nicht nachvollziehbar (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47).

3) Abluftwärmepumpe

Der KEA_H für eine Abluftwärmepumpe, welche 1,6kW Heizleistung erbringen kann, wird mit 3,76GJ berechnet (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Kap. 1.2 & S.47).

4) Durchlauferhitzer

Ein Durchlauferhitzer hat einen KEA_H von etwa 580MJ (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47)

4.4.3 Speicher

Der Mantel von Speichern besteht im Regelfall aus Stahl. Werden sie zur Brauchwasserspeicherung verwendet, müssen diese innen mit Emailierung, PTFE oder Hydrosinterglas beschichtet sein, um Korrosion vorzubeugen. Zusätzlich ist eine Opferanode oder Fremdanode notwendig. Alternativ können sie komplett aus rostfreiem Edelstahl aufgebaut sein. An Heizwasserspeicher hingegen, werden keine besonderen Anforderungen an den Korrosionsschutz gestellt, da im Regelfall kein Sauerstoff zugeführt wird (Streicher, 2005, Kap. 3.4.3).

Werden Speicher (Heiz-, Warmwasser-, oder Kombispeicher) eingesetzt, ist aufgrund des dazu benötigten Materials, natürlich die Größe für den KEA von entscheidender Bedeutung. Handke et al. (2003) untersuchen im Zuge einer Studie über die Umweltbelastungen von thermischen Solaranlagen auch den KEA von Warmwasserspeichern um diese einzubinden. Diese bestehen hauptsächlich aus Stahl (St 37), Chromstahl und Glaswolle zur Dämmung. Aufgrund der in dieser Studie angegebenen Materialeinsätzen und dem KEA für die unterschiedlichen Materialien wurde der in Abbildung 4-18 dargestellte Speichervolumen-abhängige KEA_H berechnet (siehe Tabelle A-8). Ebenfalls im Diagramm eingezeichnet sind Werte für einen 400Liter Brauchwasserspeicher (der nach persönlicher Auskunft¹ auf Daten von (Wagner H. J., 1995) basiert) und einen 700Liter Speicher nach Schmittinger, Fleißner und Geiger (1999, S.47).

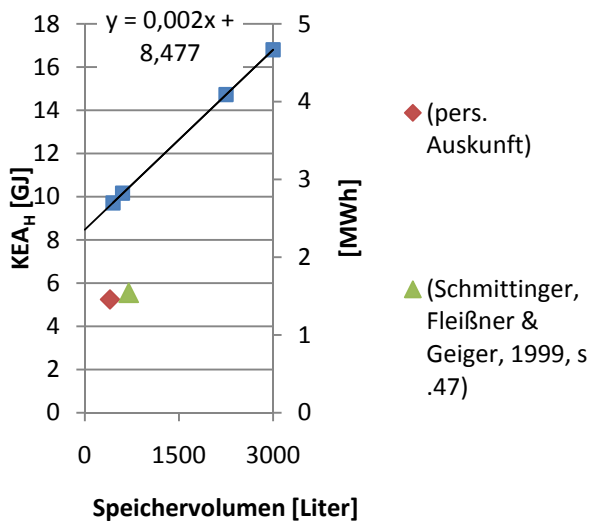


Abbildung 4-18: Darstellung des KEAs der Herstellung von Speichern in Abhängigkeit der Größe (Daten auf Basis von (Handke et al., 2003) (außer gekennzeichnete, mit eigenen Berechnungen ergänzt)) (siehe Tabelle A-8).

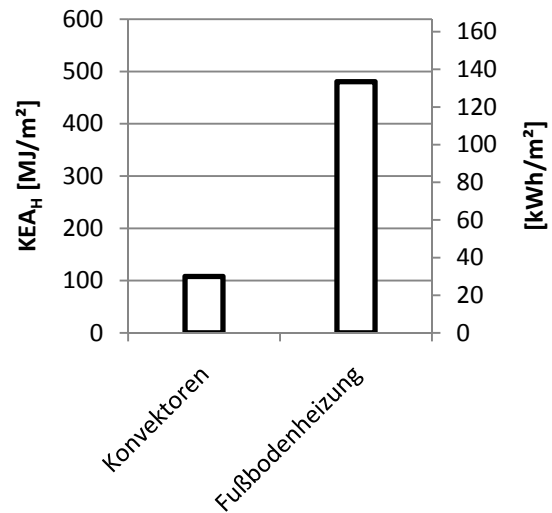


Abbildung 4-19: Darstellung des KEA_H für Wärmeabgabesysteme (inkl. Verteilung, bezogen auf einen Quadratmeter Wohnfläche (Daten basierend auf (Hutter & Wedler, 2002), ergänzt durch eigene Berechnungen).

¹ FfE, München, Okt. 2007.

4.4.4 Warmwasser- und Wärmeverteilungssysteme, Wärmeabgabesysteme

Für Wärmeverteilungs- und Abgabesysteme ergeben sich, in Anlehnung an die Arbeit von Hutter und Wedler (2002), die Werte dargestellt in Abbildung 4-19 (bezogen auch einen Quadratmeter Wohnfläche). Man sieht, dass Fußbodenheizungen in der Herstellung deutlich energieaufwendiger sind (Hutter & Wedler, 2002).

Eine Aufstellung, der für die Herstellung benötigten Materialien, ergibt für ein Einfamilienhaus mit 180m² Wohnfläche, dass etwa 290kg Feiblech für die Herstellung von Niedertemperatur-Heizkörpern benötigt werden. Für die Heizungsrohre ergeben sich 120kg und für die dazugehörige Dämmung 40kg. Für die Wasserleitungen (ohne Abwasserrohre) werden etwa 110kg und 10kg Dämmmaterial benötigt. Setzt man voraus, dass etwa der gleiche Materialaufwand an Metall für die Herstellung der Verteilung des Warmwassers und des kalten Wassers benötigt wird, ergibt sich, dass etwa 55kg Metall für Warmwasserleitungen und 10kg Dämmmaterial benötigt werden. Diese Unterteilung wird an dieser Stelle vorgenommen, da in Folge die Verteilung des kalten Wassers (sowie der Abwasserrohre) nicht berücksichtigt wird, da diese auch in Wohnhäusern mit dezentraler Warmwasserbereitung benötigt wird. Tabelle A-15 stellt die Ergebnisse für verschiedene Komponenten dar (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999).

Für Wand- und Deckenheizungen liegen keine spezifischen Daten vor, es wird aber angenommen dass sie sich nicht merklich von der Fußbodenheizung unterscheiden werden.

4.4.5 Lüftungssystem

Wie in Kapitel 3.2.2 besprochen, gibt es verschiedene Konzepte der Verrohrung. Da die Stern-Variante zwar längere, dafür aber dünnere, Lüftungsrohre benötigt, wird bei der Abschätzung des KEAs dabei nicht unterschieden. Wesentlich ist, ob es sich nur um ein Abluft- oder um ein Zu- und Abluftsystem handelt. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass Letzteres in etwa den doppelten Materialaufwand (und somit KEA) für die Verrohrung benötigt.

Für ein Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 180m² ergeben die Berechnungen des kumulierten Energieaufwandes für die Herstellung einer Verrohrung (inklusive notwendiger Ventile) einer Abluftanlage 2,19GJ (Schmittinger, Fleißner und Geiger, 1999, S.109).

Bezogen auf die Wohnfläche bedeutet dies somit einen Verrohrungsaufwand von knapp 25MJ/m² für ein Zu- und Abluftsystem wie es z.B. in Passivhäusern notwendig ist.

4.4.6 Lüftungskompaktgerät

Der kumulierte Energieaufwand der Herstellung eines, wie in Abbildung 4-20 dargestellten, Lüftungskompaktgerätes wird mit 8,22GJ berechnet (Schmittinger, Fleißner und Geiger, 1999, S.109).

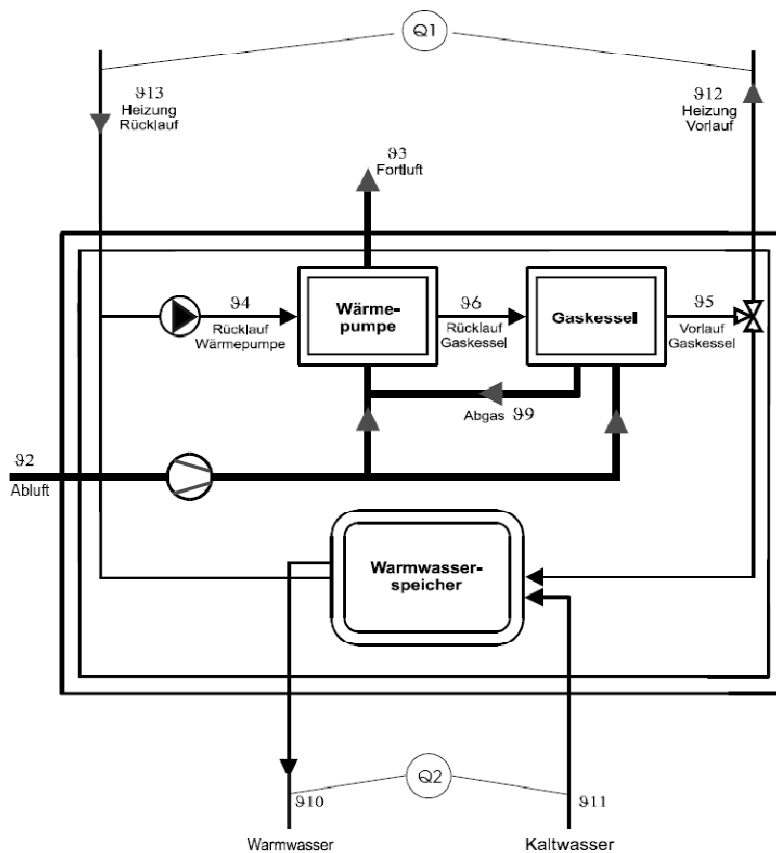


Abbildung 4-20: Schematische Darstellung eines Kombigerätes (Quelle: (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.91).

4.4.7 Umwälzpumpen

Die Untersuchung des KEA_H einer Umwälzpumpe mit 40 Watt liefert etwa 107MJ. Die Materialbilanz und dazugehörigen KEA -Werte befinden sich in Tabelle A-10 und basieren auf Daten von Handke et al. (2003). Zusätzlich zu diesem Wert sind in Abbildung 4-22 noch Berechnungen aus anderen Studien zum Vergleich eingetragen, um die Bandbreite besser abschätzen zu können.

Der für eine Umwälzpumpe mit 65 Watt berechnete Wert beruht nach persönlicher Auskunft¹ auf einer Untersuchung von Wagner H. J. (1995). Der Unterschied entsteht durch Massenunterschiede in der Annahme. Eine weitere Umwälzpumpe² weist einen KEA_H -Wert von 170MJ auf (Schmittinger, Fleißner, Geiger, 1999, S.47).

¹ Von FfE München, Okt. 2007.

² Wilo E25/1-5; Leistungsangabe laut Hersteller (www.wilo.at).

4.4.8 Expansionspeicher

Eine Darstellung des KEAs der Herstellung, der für Wasserkreisläufe notwendigen Expansions speichern, befindet sich in Abbildung 4-21. Diese Darstellung beruht auf einer Bilanz der Materialeinsätze und der entsprechenden kumulierten Energieaufwände von Handke et al. (2003). Zusätzlich ist im Diagramm ein Wert für ein 110Liter Druckausdehnungsgefäß eingezeichnet, das im Rahmen einer Studie über ein Einfamilienhaus mit 120m² Wohnfläche und einem HWB von 100kWh/(m²a) berechnet wurde (Schmittinger, Fleißner und Geiger, 1999, S.47).

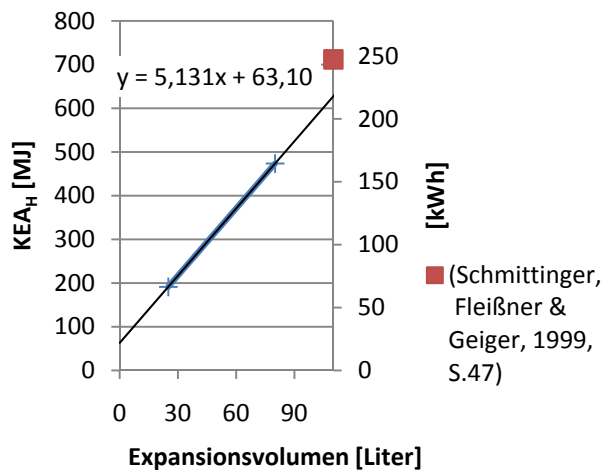


Abbildung 4-21: Darstellung des KEAs der Herstellung von Expansions speichern in Abhängigkeit der Größe (Daten auf Basis von (Handke et al., 2003), außer gekennzeichnete, ergänzt mit eigenen Berechnungen) (siehe Tabelle A-9).

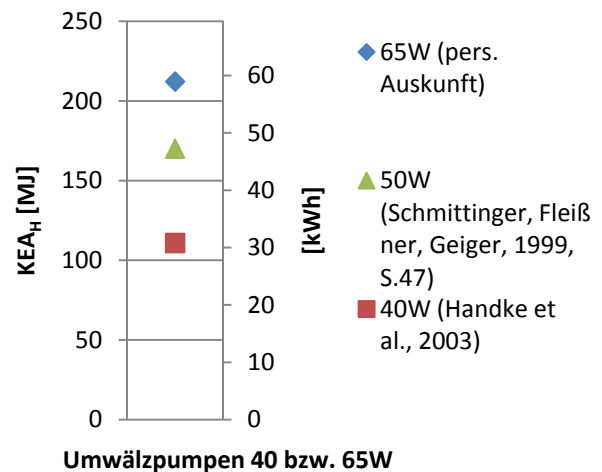


Abbildung 4-22: Darstellung des KEAs der Herstellung einer Umwälzpumpe mit einer Leistung von 40Watt (Daten auf Basis von (Handke et al., 2003), ergänzt mit eigenen Berechnungen) (siehe Tabelle A-10).

4.5 Ergebnisse des energetischen Vergleichs

4.5.1 Kumulierter Energieaufwand der Herstellung (KEA_H) bzw. Entsorgung (KEA_E)

Aufgrund der in vorangegangenen Abschnitt behandelten Punkte, wird nun der KEA_H bzw. KEA_{H+E} der ausgewählten WBR-Systeme abgeschätzt. Da diese Werte in Abhängigkeit der Bauart, der verwendeten Materialien und der Untersuchungsmethode eine große Bandbreite aufweisen, dürfen diese nur als grobe Richtwerte angesehen werden. Jene Untersuchungen, die den kumulierten Energieaufwand der Entsorgung berücksichtigt haben, zeigen, dass aufgrund von Materialgutschriften der KEA_E vernachlässigbar klein, oder meist sogar negativ wird. Des Öfteren werden in der Literatur auch Werte für den KEA angegeben, wobei aber nicht nachzuvollziehen ist, ob die Entsorgung tatsächlich berücksichtigt wurde oder nicht. Aus diesen Gründen, und weil kaum Studien dazu gefunden werden konnten, wird auf eine explizite Berücksichtigung des KEA_E verzichtet und vorausgesetzt, dass der im Folgenden bestimmte KEA_H im Wesentlichen mit dem KEA_{H+E} übereinstimmt bzw. eher den worst-case darstellt.

Die Solarkollektoren, inklusive Montageset, werden mit $910\text{MJ}/\text{m}^2$ angesetzt. Die dazugehörige Verrohrung mit $1,19\text{GJ}$, die Solarpumpe mit 110MJ und die Solarkompaktstation mit 870MJ . Der Werte des KEA_H für die benötigten Pumpen wird, wie auch alle weiteren verwendeten Komponenten, in Tabelle A-18 aufgelistet und in Abbildung 4-23 dargestellt. Das Lüftungssystem wird mit $25\text{MJ}/\text{m}^2$ angesetzt. Die Definition des KEA_H für einen Durchlauf-erhitzer folgt dem zuvor besprochenen Wert von 580MJ . Die Abluftwärmepumpe wird wie vorhin besprochen mit $3,76\text{GJ}$ abgeschätzt. Der KEA der Speicher wird mittels der in Abbildung 4-18 definierten Funktion, die verglichen mit den anderen Untersuchungsergebnissen den worst-case darstellt, abgeschätzt. Die Warmwasserverteilung wird mit etwa $7,22\text{GJ}^1$ und die Fußbodenheizung (inkl. Wärmeverteilung) mit $62,4\text{GJ}^2$ angesetzt. Wie man sieht, ist Letztere besonders energieintensiv.

Die Bestimmung des kumulierten Energieaufwandes für die Herstellung eines Gas-Brennwertkessels und einen Hackschnitzelkessels folgt Abbildung 4-14. Da für Pellets- bzw. Stückholzkessel keine Daten gefunden werden konnten, werden diese, davon ausgehend, abgeschätzt. Da Pelletskessel mit geringeren Nennleistungen als bei Hackschnitzelkessel verfügbar sind, wird ein KEA von 22GJ angesetzt. Der Aufwand für eine automatische Brennstoffzufuhr entfällt beim Stückholzkessel, weshalb der KEA mit 20GJ abgeschätzt wird. Die Sole/Wasser-Wärmepumpe wird ausgehend von Abbildung 4-15 mit 5GJ definiert. Die Wärmequellenanlage wird unter Berücksichtigung einer geringen benötigten Heizleistung mit 15GJ abgeschätzt (vergleiche Abbildung 4-17). Die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wird in Anlehnung an die Lüftungswärmepumpe mit etwa $3,7\text{GJ}$ abgeschätzt. Für den Anschluss an das Gas-, bzw. Fernwärmenetz, die Fernwärme-Hausstation und den Kamin konnten keine Studien gefunden werden. Diese Werte werden somit abgeschätzt.

Die Werte des kumulierten Energieaufwandes der Herstellung, die sich somit für die verschiedenen Komponenten ergeben, werden in Abbildung 4-23, bezogen auf die Gebäudenutzfläche (160m^2) und die vorausgesetzten Nutzungsdauern³, dargestellt. Es wird bei den Komponenten nicht zwischen dem KEA der Herstellung für Niedrigenergiehäusern und Passivhäusern unterschieden, da hierzu keine ausreichenden Daten vorhanden sind und die Unsicherheit bei den abgeschätzten Werten ohnehin als relativ groß angesehen werden muss.

¹ $(49,44\text{MJ}+6,11\text{MJ})\cdot 130\text{m}^2$

² $0,48\text{GJ}\cdot 130\text{m}^2$

³ Siehe Tabelle A-18.

4. Ökologischer Vergleich

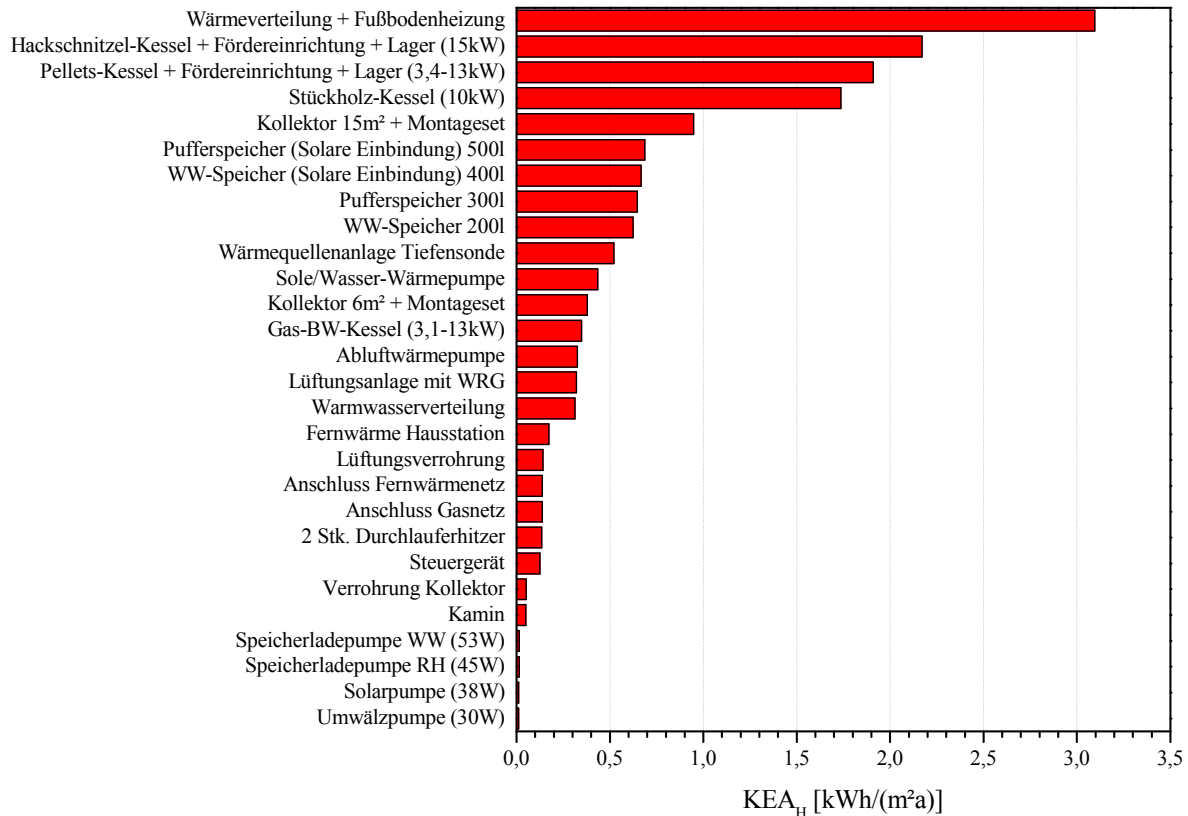


Abbildung 4-23: Abschätzung des KEA_H von verschiedenen Komponenten der WBR-Systeme (Werte gelten für die Gebäudenutzfläche von 160m² und den vorausgesetzten Nutzungsdauern (Daten siehe Tabelle A-18)).

Die Fußbodenheizung mit Wärmeverteilung erweist sich als energieaufwändigste Komponente. Zur Herstellung der Biomassekessel wird, im Vergleich der Wärmeerzeuger, am meisten Energie benötigt, wobei Hackschnitzelkessel kaum im niedrigen Leistungsbereich verfügbar sind. Diese Werte werden lediglich auf Grundlage einer Studie abgeschätzt, da keine weiteren gefunden werden konnten.

Davon ausgehend ergibt sich der in Abbildung 4-24 dargestellte Vergleich für die verschiedenen Varianten der WBR-Systeme. Besonders deutlich fallen die Einsparungen bei den Luftheizsystemen auf, da dort keine Fußbodenheizung benötigt wird. Die Biomasseheizsysteme weisen deutlich höhere Werte auf, die neben der Fußbodenheizung, hauptsächlich aus dem KEA_H des Heizkessels resultieren (zusätzlich wurde bei diesen Systemen auch noch ein 300-Liter Pufferspeicher vorgesehen).

Beim Gas-Brennwert, Fernwärme- und Erdsonden-Wärmepumpen-Heizsystem kommt es bei Verwendung von Solarkollektoren die auch zur Raumheizung benutzt werden, zu einer relativ deutlichen Steigerung ($\sim 1,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) des KEA_H gegenüber der reinen Warmwasserbereitung. Der Grund liegt darin, dass bei diesen Systemen ein zusätzlicher Pufferspeicher vorgesehen wird. Bei den Biomasseheizsystemen ist dieser Unterschied geringer ($\sim 0,75 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), da hier das Pufferspeichervolumen nur um 200 Liter gegenüber der Grundvariante vergrößert wird.

4. Ökologischer Vergleich

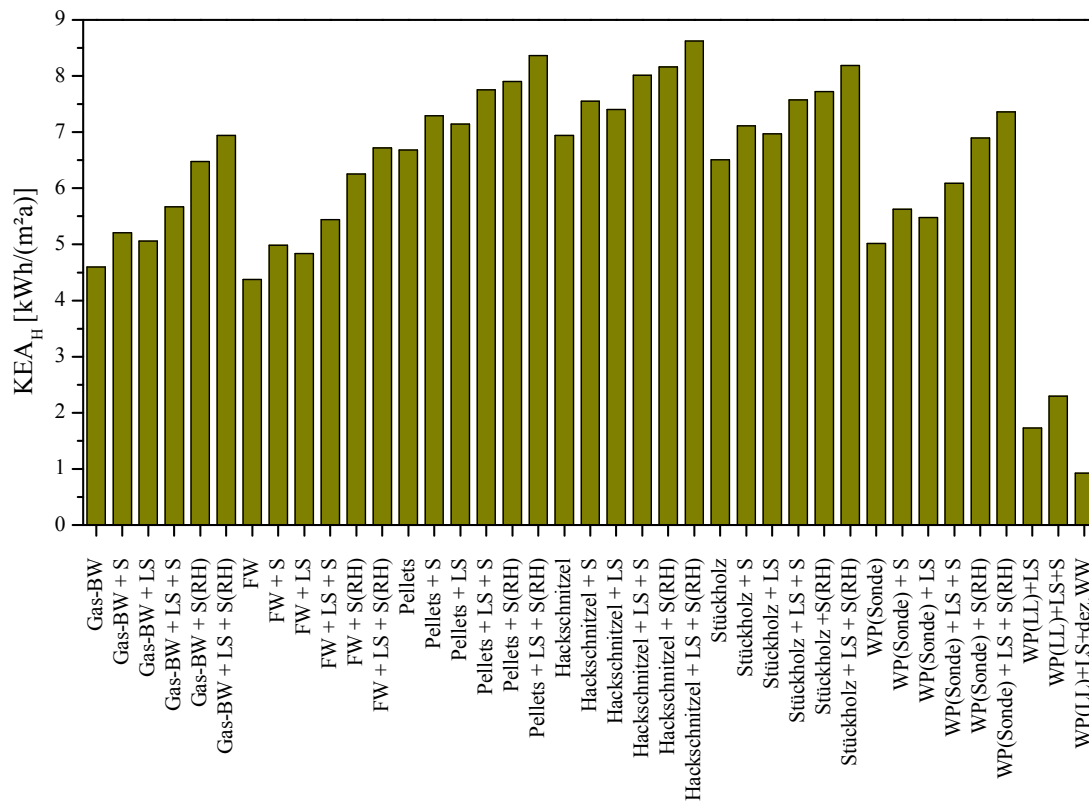


Abbildung 4-24: Abschätzung des kumulierten Energieaufwandes der Herstellung der untersuchten WBR-Systeme (Werte siehe Tabelle A-19).

4.5.2 Kumulierter Energieaufwand der Nutzung (KEA_N)

Abbildung 4-25 zeigt den kumulierten Energieaufwand der Nutzung, ausgehend vom berechneten, optimalen Endenergiebedarf (siehe Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3) und den Primärenergiefaktoren. Die zu erwartenden Bereiche entstehen durch die Berechnung mit verschiedenen Strom-Erzeugungsmixen. Die Obergrenzen der Bereiche des nicht erneuerbaren KEAs ergeben sich somit durch den Winterstrommix. Die in den jeweiligen Intervallen gekennzeichneten Markierungen stellen das Resultat unter Voraussetzung des Jahresstrom-Mixes dar. Natürlich ist der Einfluss des gewählten Stromerzeugungsmixes umso stärker, je größer der Anteil der benötigten elektrischen Energie am Endenergiebedarf ist (vor allem gut an den Wärmepumpensystemen zu erkennen).

Wie in Kapitel zuvor beschrieben wurde, werden regenerative Umweltenergien (Wasserkraft, Wind...) mit einem Nutzungsgrad von 100% definiert, was vor allem beim Öko-Mix (50% Klein-Wasserkraft, 49% Wind, 1% Solar), aber auch beim Jahres- (44% Wasserkraft und 2% Wind) von Bedeutung ist.

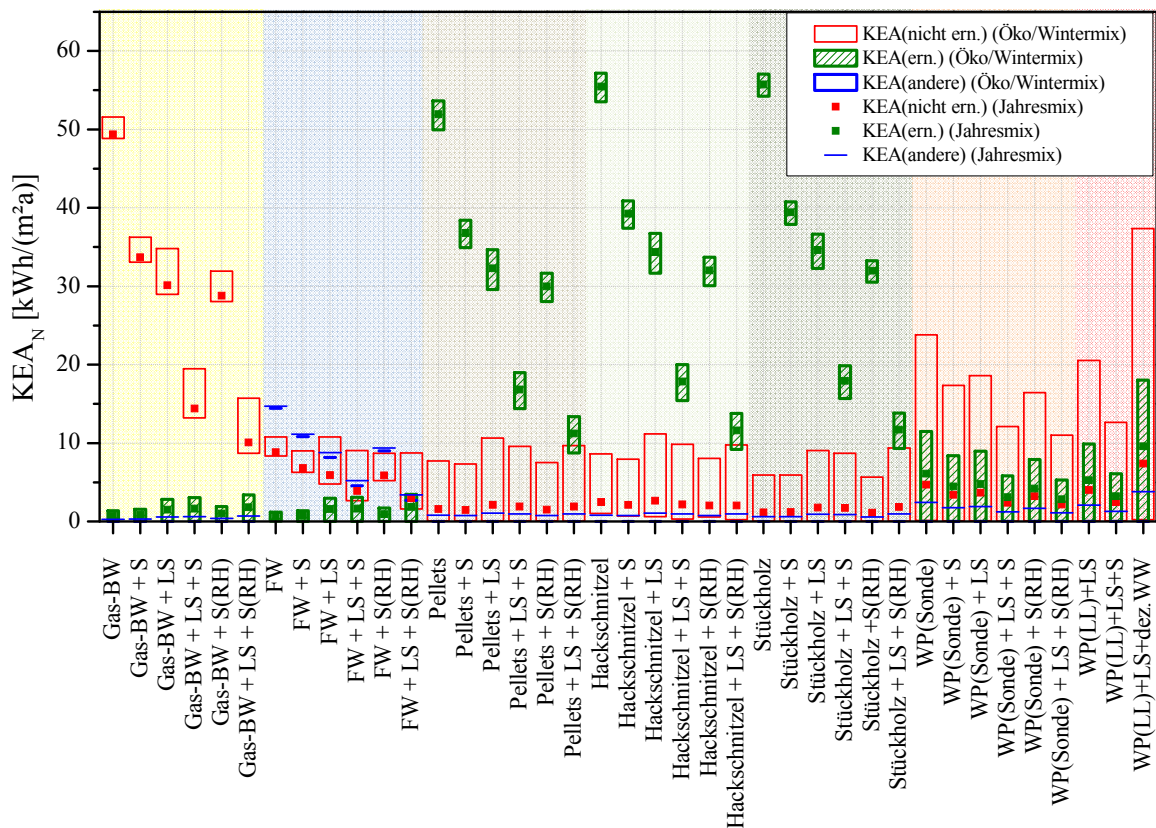


Abbildung 4-25: Darstellung des KEA(N) für verschiedene WBR-Systeme in einem EFH mit einem HWB von 25kWh/(m²a) (ohne LS). Getrennte Darstellung von nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen (vor allem Müllverbrennung) Anteilen (Daten siehe im Anhang Tabelle A-21, Tabelle A-22 und Tabelle A-23).

Fernwärmeheizungen weisen einen hohen Anteil KEA(andere) aus, der hauptsächlich durch Müllverbrennungsanlagen resultiert. Beim vergleichsweise geringen KEA der Nutzung von Fernwärmeheizsystemen ist vor allem auf die vorhin besprochenen Bewertungsgrundlagen zu achten. Das Verhältnis Primärenergie zu Endenergie beträgt im verwendeten Netto-Fall etwa 0,54 (siehe Abbildung 4-11).

Man erkennt, welche positive Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf, die Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe und Einbindung eines Solarkollektors, gegenüber einer mit dezentralen Durchlauferhitzern besitzt (siehe WBR-Varianten WP(LL) + LS + S und WP(LL) + LS + dez.WW).

Der nicht erneuerbare Anteil des KEA der Biomasseheizsysteme resultiert beinahe ausschließlich aus dem Hilfsstrombedarf (der Anteil der Energieaufwendungen für den Transport der Biomasse ist äußerst gering (Vergleich: Abbildung 4-9)).

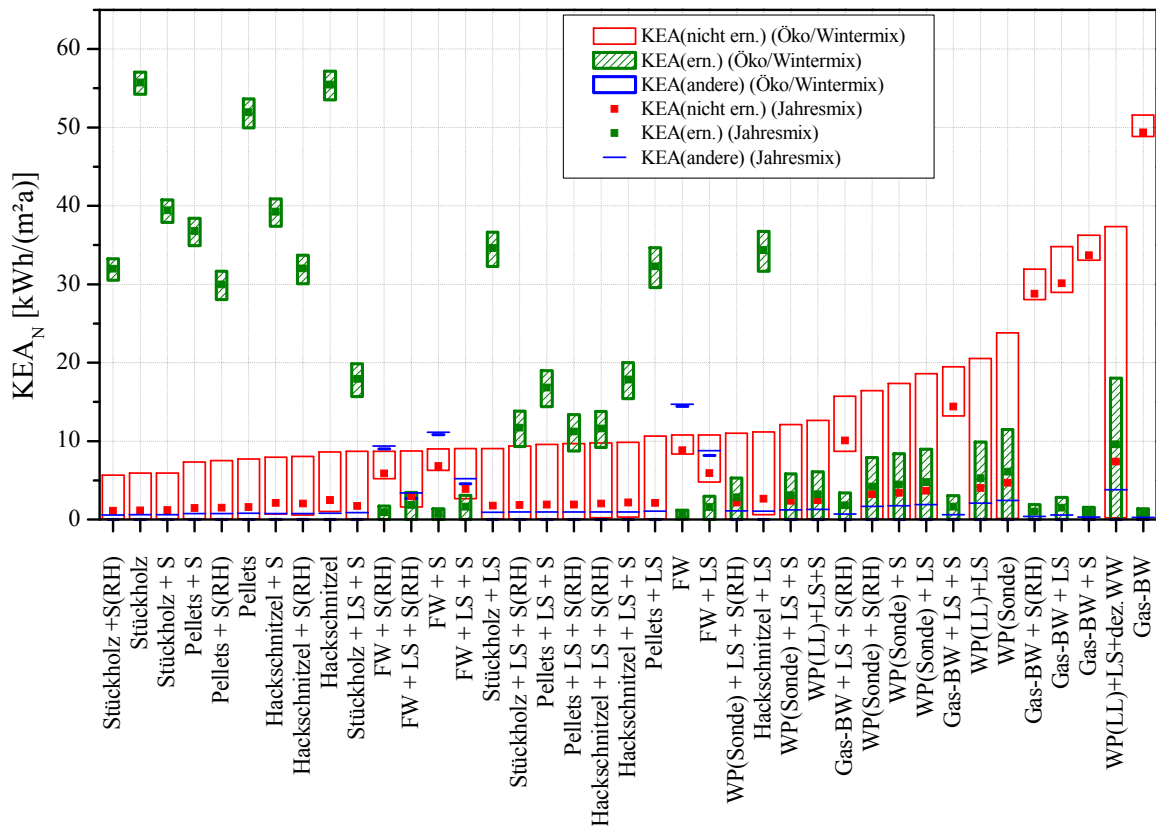


Abbildung 4-26: Darstellung der Daten aus Abbildung 4-25, aufsteigend geordnet nach dem KEA(nicht erneuerbar).

Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 stellen nun den zu erwarteten Bereich des kumulierten Energieaufwandes der Nutzung (ohne Unterteilung in erneuerbar, nicht erneuerbar und andere dar). Die Markierung in den Intervallen kennzeichnet wieder das Berechnungsergebnis unter Verwendung des Jahresstrom-Mixes. Man erkennt die Problematik, die sich bei einer Bewertung der Heizsysteme über den aggregierten KEA-Wert ergibt. Hier schneiden die Biomasseheizsysteme am Schlechtesten ab, da sie den geringsten Jahresnutzungsgrad aufweisen (Kapitel 4.2.2). Wird allerdings der nicht erneuerbare KEA als Kriterium herangezogen (Abbildung 4-26), sind diese im Regelfall als optimal anzusehen. Bei Betrachtung des aggregierten KEAs weisen, selbst bei Winterstrommix, die Wärmepumpen- und Fernwärmesysteme die geringsten Werte auf. Ob dies auch bei Berücksichtigung des Primärenergiebedarfs für die Herstellung dieser zusätzlichen Komponenten gilt, wird in den folgenden Kapiteln untersucht.

Auf eine gesonderte Betrachtung für den Fall der ungünstigeren Endenergiebedarfswerte wird aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet. Diese sind ohnehin im Zuge der Untersuchung des gesamten KEAs (Kapitel 4.5.3) ersichtlich.

Die Untersuchung dieser verschiedenen WBR-Systeme am Beispiel des EFH mit einem HWB von 50kWh/(m²a) liefert im Wesentlichen die gleichen Erkenntnisse. Die dazugehörigen Diagramme sind im Anhang 5: „KEA für einen HWB von 50kWh/(m²a)“ vorhanden.

4. Ökologischer Vergleich

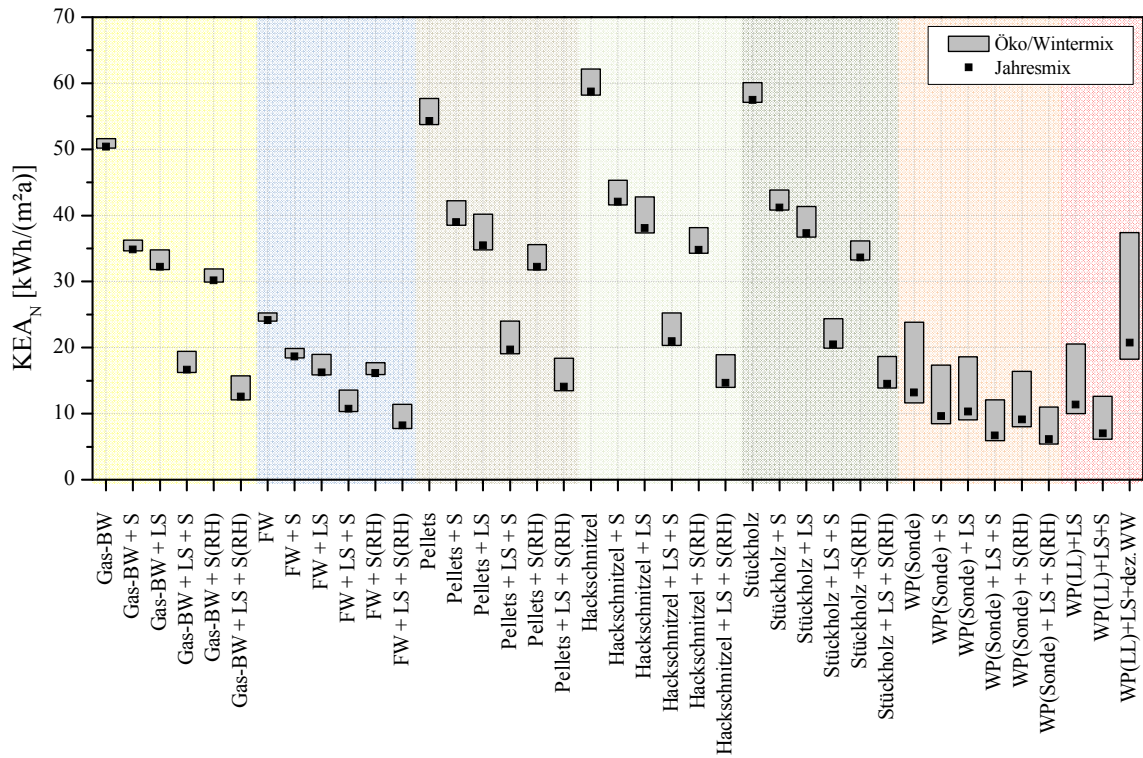


Abbildung 4-27: Darstellung der Bandbreite des KEA_N als Summe der nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen Anteile aus Abbildung 4-26).

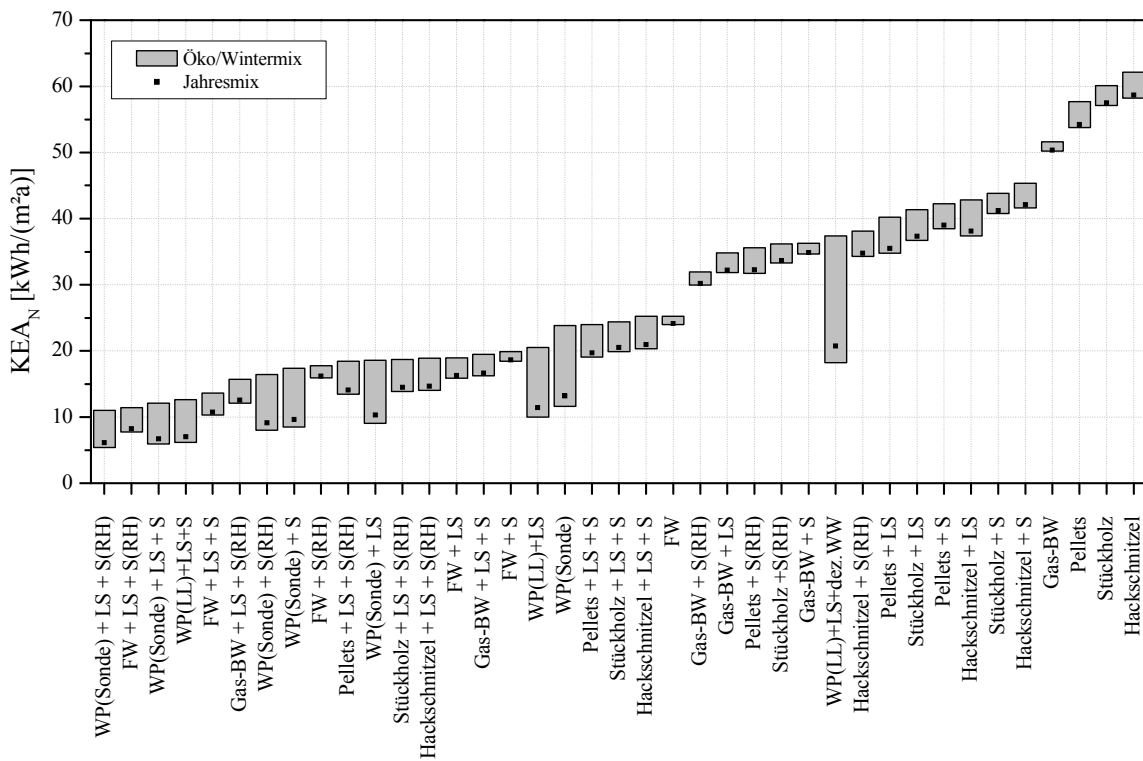


Abbildung 4-28: Darstellung der Daten aus der vorigen Abbildung, geordnet nach dem Maximalwert der erwarteten Bandbreite.

4.5.3 Gesamter kumulierter Energieaufwand (KEA)

Aufgrund der ermittelten Daten für die Herstellung (Entsorgung) und Nutzung, kann nun der gesamte resultierende KEA, bezogen auf die Nutzfläche (160m^2) und die gesamte Lebensdauer¹, untersucht werden.

In Abbildung 4-29 bis Abbildung 4-34 werden die Ergebnisse für das EFH mit dem HWB von $25\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ dargestellt und jene für einen HWB von $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nur zum Vergleich, bei den ersten beiden Abbildungen, strichliert angedeutet. Diese werden aber, um die Übersichtlichkeit zu wahren, getrennt dargestellt und sind dem Anhang (Abbildung A-15 bis Abbildung A-20) zu entnehmen.

Abbildung 4-29 zeigt den KEA, wobei bei der Berechnung von den optimalen Endenergiewerten und dem Jahresstrommix ausgegangen wird. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 4-30 die Ergebnisse für den worst-case des Endenergiebedarfs (resultierend aus den in Kapitel 4.2 besprochenen verminderte Nutzungsgraden bzw. Leistungszahlen und Maximalwerte des zu erwartenden Hilfsstrombedarfs) und Nutzung des Jahresstrommixes.

Beim KEA_H kann davon ausgegangen werden, dass dieser beinahe vollständig nicht regenerativ ist.

Um eine Bewertung nicht nur in Hinblick auf den gesamten KEA durchzuführen, zeigen Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 die, nach der Summe aus KEA_{H+E} und dem nicht regenerativen KEA der Nutzung, geordneten Werte.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich aus energetischer Sicht die Investitionen in Lüftungsanlagen mit WRG und/oder Solarkollektoren (zur Warmwasserbereitung und/oder Raumheizung) im Regelfall als sinnvoll erweisen. Die Einsparungen am nutzungsbedingtem KEA überwiegen gegenüber dem zusätzlichen Aufwand für die Herstellung dieser Komponenten. Lediglich bei jenen beiden Varianten, welche eine Erdsonde-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger nutzen und über einen Solarkollektor verfügen, der neben der Trinkwassererwärmung auch noch zur teil-solaren Raumheizung benutzt wird², ist dies nicht der Fall. Dabei überwiegen die zusätzlichen energetischen Aufwendungen die zur Herstellung notwendig sind, gegenüber den realisierbaren Einsparungen. Somit weisen diese beiden Varianten insgesamt einen höheren KEA auf, als wenn der Solarkollektor lediglich zur Warmwasserbereitung verwendet werden würde (also nur 6m^2 und kein Pufferspeicher)³.

Dieses Ergebnis sollte allerdings insofern kritisch betrachtet werden, da Erdsonden untersucht werden, welche die höchstwahrscheinlich energieintensivste Wärmequellenanlage für Wärmepumpen darstellt⁴. Der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung der eben besprochenen WBR-Systeme, weist einen Anteil von etwa 43-55% des gesamten KEAs auf.

In Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 werden die Berechnungsergebnisse zusammengestellt, welchen Anteil der kumulierte Energieaufwand der Herstellung und Entsorgung am gesamten KEA hat. Besonders groß ist dieser, wie schon erläutert, bei den Varianten mit der Erdsonde-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger und kann, wenn ein Lüftungssystem mit WRG und ein Solarkollektor zur Warmwasserbereitung und Raumheizung verwendet werden, bei über 50% liegen. Bei den Luftheizsystemen ist der KEA_H vergleichsweise gering und liegt im Bereich

¹ Die verwendeten Lebensdauern der Komponenten sind Tabelle A-18 zu entnehmen.

² $\text{WP}(\text{Sonde}) + \text{S}(\text{RH})$, $\text{WP}(\text{Sonde}) + \text{LS} + \text{S}(\text{RH})$

³ $\text{WP}(\text{Sonde}) + \text{S}$, $\text{WP}(\text{Sonde}) + \text{LS} + \text{S}$

⁴ Der Energieaufwand für die Installation der Wärmequellenanlage ist besonders stark abhängig von den lokalen Gegebenheiten.

4. Ökologischer Vergleich

von 7-25%. Erfolgt eine dezentrale Warmwasserbereitung, ist der Anteil am KEA_{ges} lediglich etwa 2- 4%.

Tabelle 4-5: Anteil des KEA_{H+E} am gesamten KEA bei Wasserheizsystemen. Die Werte in der oberen Zeile gelten jeweils ausgehend vom $HWB=25kWh/(m^2a)$ und die Werte der darunterliegenden Zeile vom $HWB=50kWh/(m^2a)$. Die Werte links resultieren aus der Annahme eines optimalen Endenergiebedarfs und die Werte rechts durch ungünstige Voraussetzungen (kleinerer JNG/JAZ bzw. Winterstromerzeugungsmix) (siehe Kapitel 4.2).

			+ S	+ LS	+ LS + S	+ S(RH)	+ LS + S(RH)
Gas-BW	8% / 7%	13% / 11%	14% / 11%	25% / 19%	18% / 15%	36% / 26%	
	6% / 5%	8% / 7%	8% / 7%	11% / 10%	10% / 9%	15% / 13%	
FW	15% / 13%	21% / 17%	23% / 18%	34% / 24%	28% / 23%	45% / 31%	
	10% / 9%	13% / 12%	14% / 12%	18% / 15%	17% / 15%	24% / 19%	
Pellets	11% / 9%	16% / 13%	17% / 14%	28% / 21%	20% / 16%	37% / 27%	
	8% / 7%	10% / 9%	10% / 9%	14% / 12%	12% / 10%	17% / 14%	
Hackschnitzel	11% / 9%	15% / 13%	16% / 13%	28% / 21%	19% / 16%	37% / 27%	
	7% / 7%	10% / 8%	10% / 8%	13% / 11%	11% / 10%	16% / 14%	
Stückholz	10% / 9%	15% / 12%	16% / 13%	27% / 21%	19% / 16%	36% / 26%	
	7% / 6%	9% / 8%	9% / 8%	13% / 11%	11% / 10%	16% / 13%	
WP(Sonde)	28% / 14%	37% / 20%	35% / 18%	48% / 27%	43% / 24%	55% / 33%	
	19% / 10%	24% / 13%	24% / 12%	30% / 16%	29% / 16%	35% / 20%	

Tabelle 4-6: Entspricht Tabelle 4-5, jedoch jetzt für das untersuchte Luftheizsystem. Die Werte gelten somit nun gegenüber der Grundvariante, die bereits über ein Lüftungssystem verfügt.

		+ S	+ dezentrale Warmwasserbereitung (elektro Durchlauferhitzer)
Lüftungssystem mit WRG und Abluft-Wärmepumpe	13% / 7%	25% / 14%	4% / 2%
	--- / ---	--- / ---	--- / ---

4. Ökologischer Vergleich

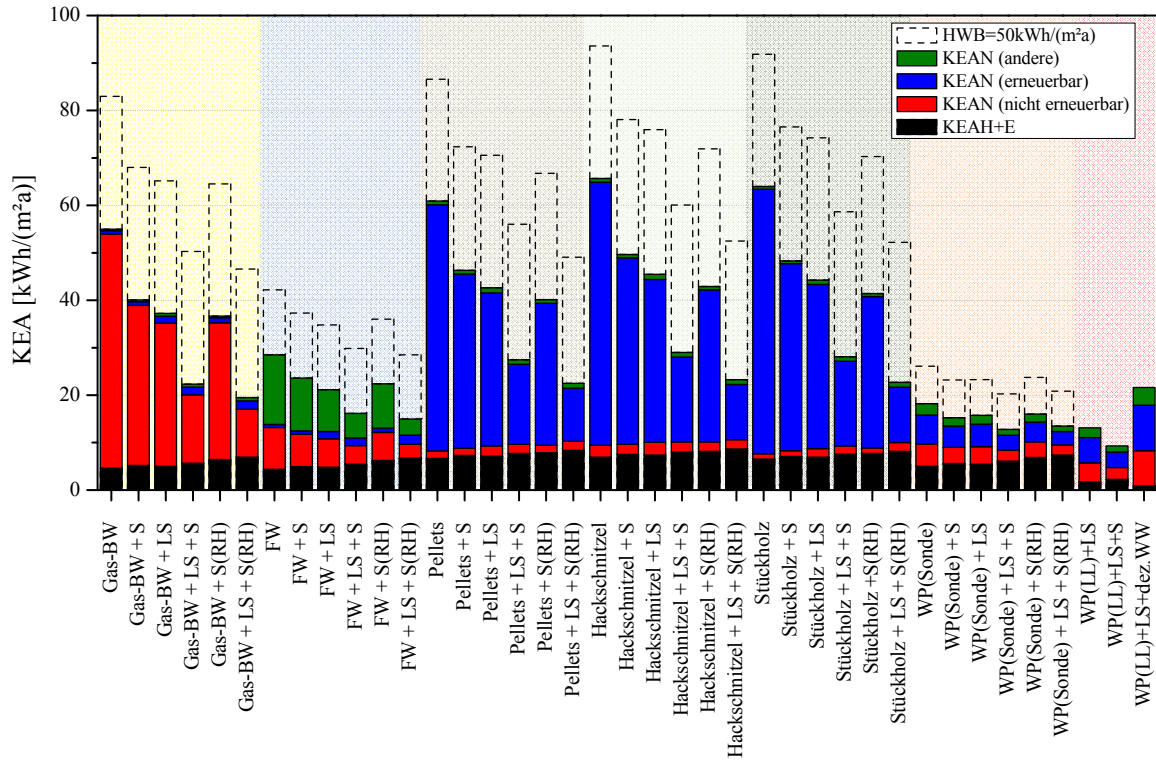


Abbildung 4-29: Darstellung des gesamten KEAs der untersuchten WBR-Systeme. Berechnung gilt für optimalen Endenergiebedarf und Jahresstrommix (Daten siehe Anhang, Tabelle A-19 und Tabelle A-21). Daten geordnet nach aufstiegenderm KEA in Abbildung 4-31.

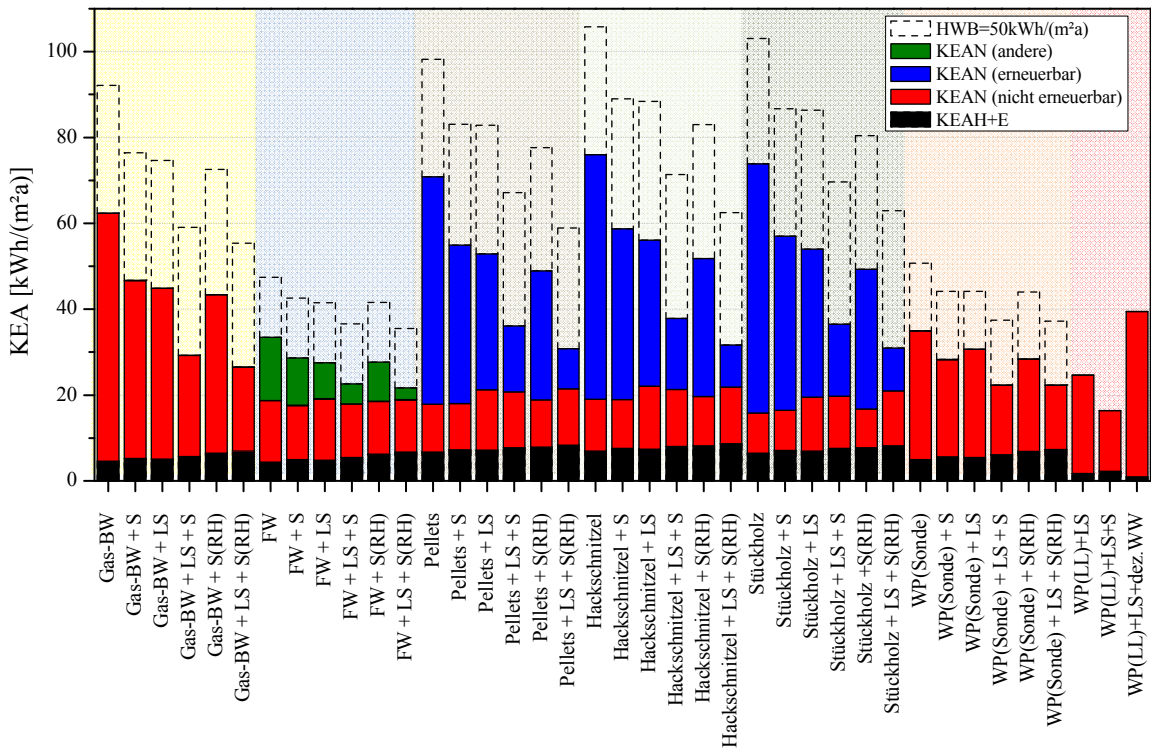


Abbildung 4-30: Darstellung des gesamten KEAs der untersuchten WBR-Systeme. Berechnung gilt für maximalen Endenergiebedarf (siehe Kapitel 4.2) und Winterstrommix (Daten siehe Anhang, Tabelle A-19 und Tabelle A-24). Daten geordnet nach aufstiegenderm KEA in Abbildung 4-32.

4. Ökologischer Vergleich

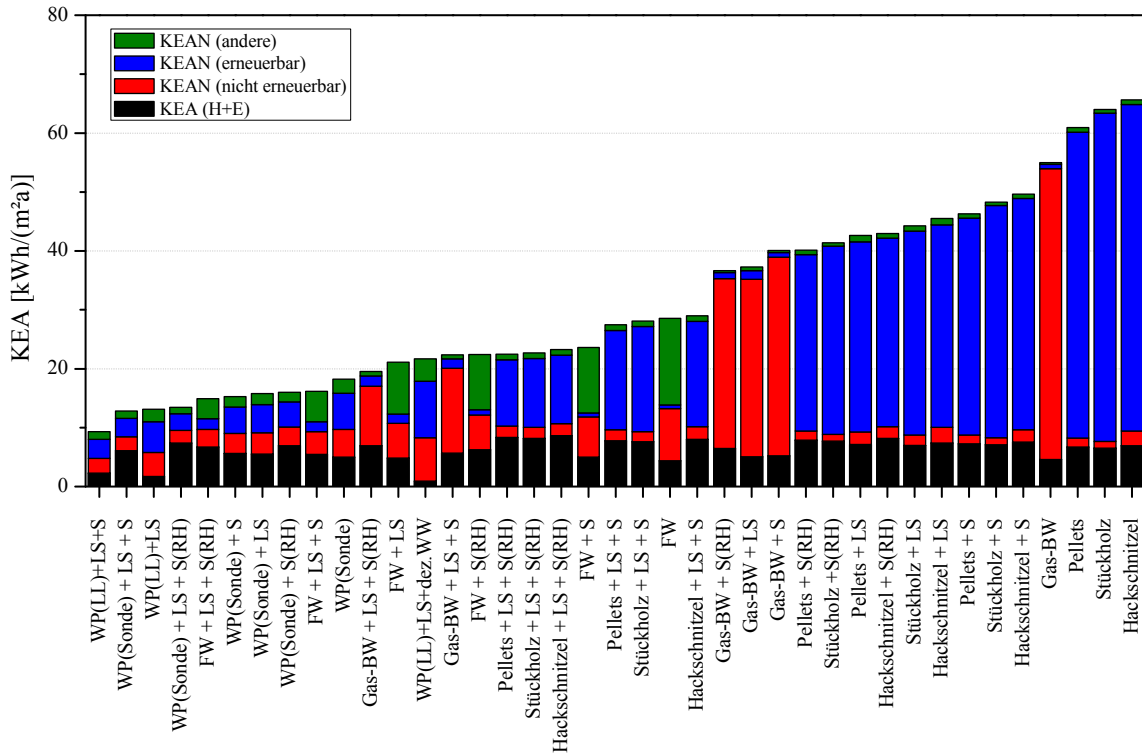


Abbildung 4-31: Darstellung der Daten aus Abbildung 4-29, geordnet nach aufsteigenden KEA_{ges} (ohne An-
deutung des KEAs für einen HWB von $50kWh/(m^2a)$).

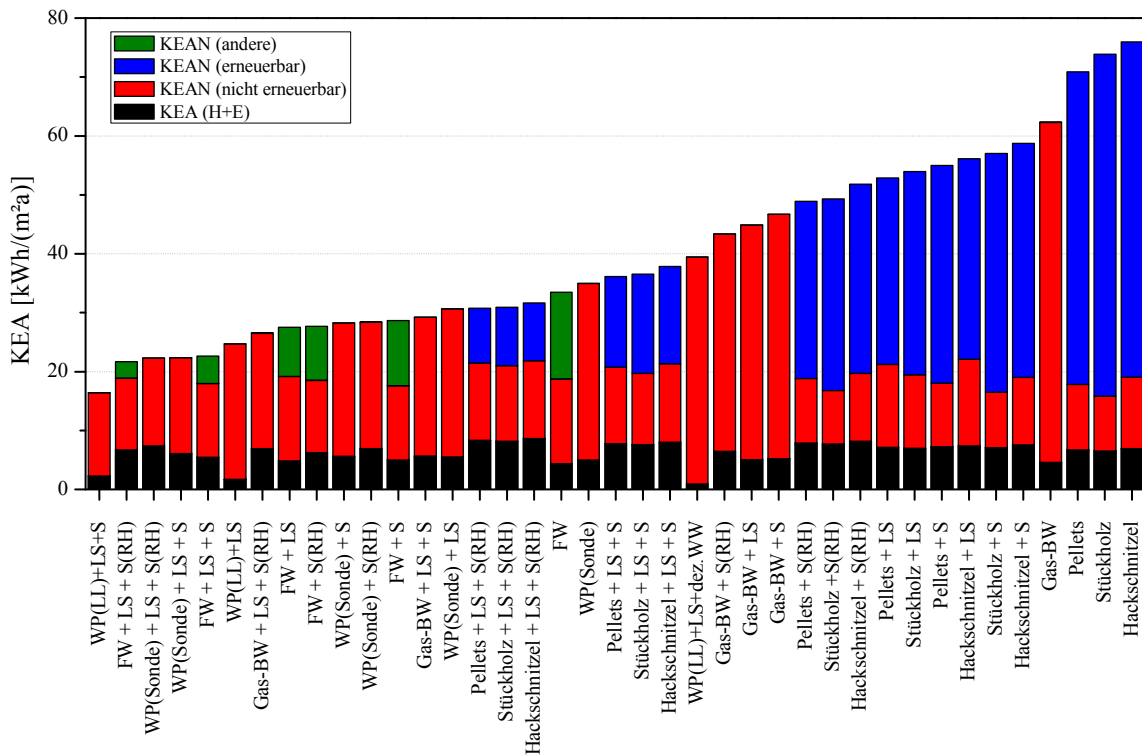


Abbildung 4-32: Darstellung der Daten aus Abbildung 4-30, geordnet nach aufsteigenden KEA_{ges} (ohne An-
deutung des KEAs für einen HWB von $50kWh/(m^2a)$).

4. Ökologischer Vergleich

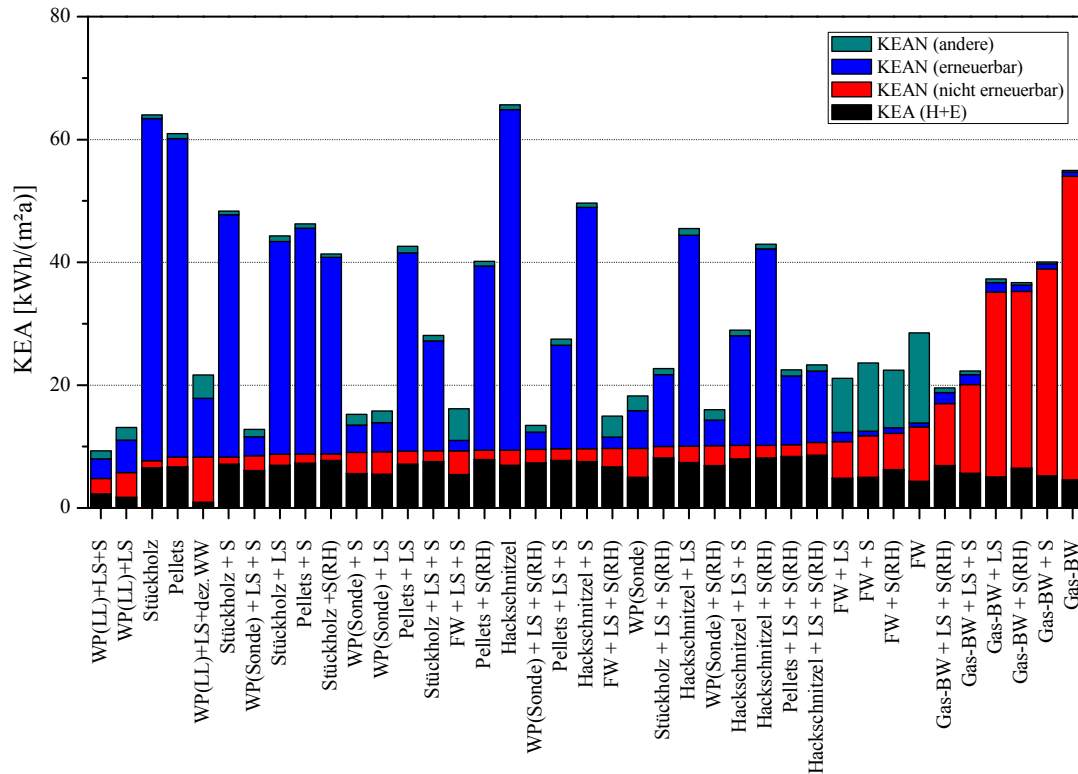


Abbildung 4-33: Darstellung der Daten aus Abbildung 4-29, geordnet nach der Summe aus KEA_{H+E} und $KEA(\text{nicht erneuerbar})$ (ohne Andeutung des KEAs für einen HWB von $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$).

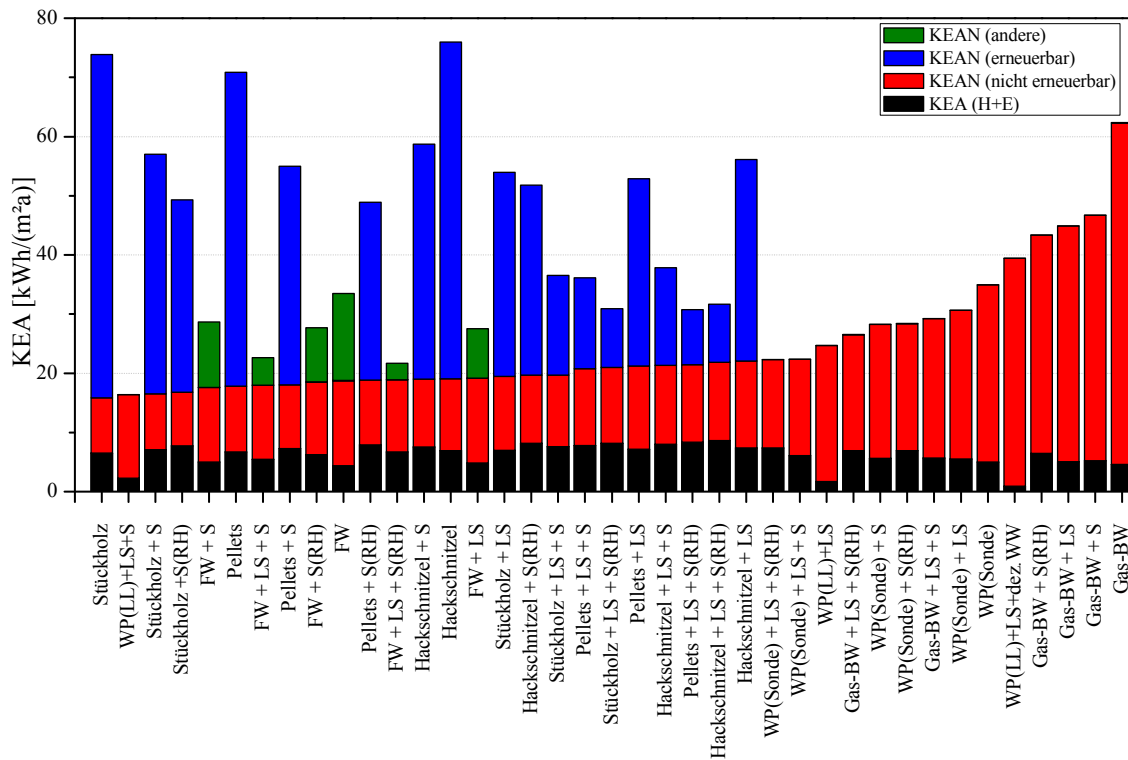


Abbildung 4-34: Darstellung der Daten aus Abbildung 4-30, geordnet nach der Summe aus KEA_{H+E} und $KEA(\text{nicht erneuerbar})$ (ohne Andeutung des KEAs für einen HWB von $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$).

4. Ökologischer Vergleich

In Abbildung 4-35 wird gezeigt welchen Anteil der kumulierte Energieaufwand der Nutzung, welcher durch den Hilfsstrombedarf verursacht wird, am gesamten KEA_N hat. Bei den Heizsystemen mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen ist dieser natürlich 100%. Aber auch bei den anderen Heizsystemen ist dieser Anteil nicht zu vernachlässigen und kann bei Verwendung eines Solarkollektors zur Warmwasserbereitung und Raumheizung und eines Lüftungssystems mit Wärmerückgewinnung bis zu knapp 40% betragen. Bei den Fernwärme-Heizsystemen macht der Anteil sogar, wenn von der Berechnung mit Gutschriften auf substituierte Prozesse ausgegangen wird, bis zu 50% aus.

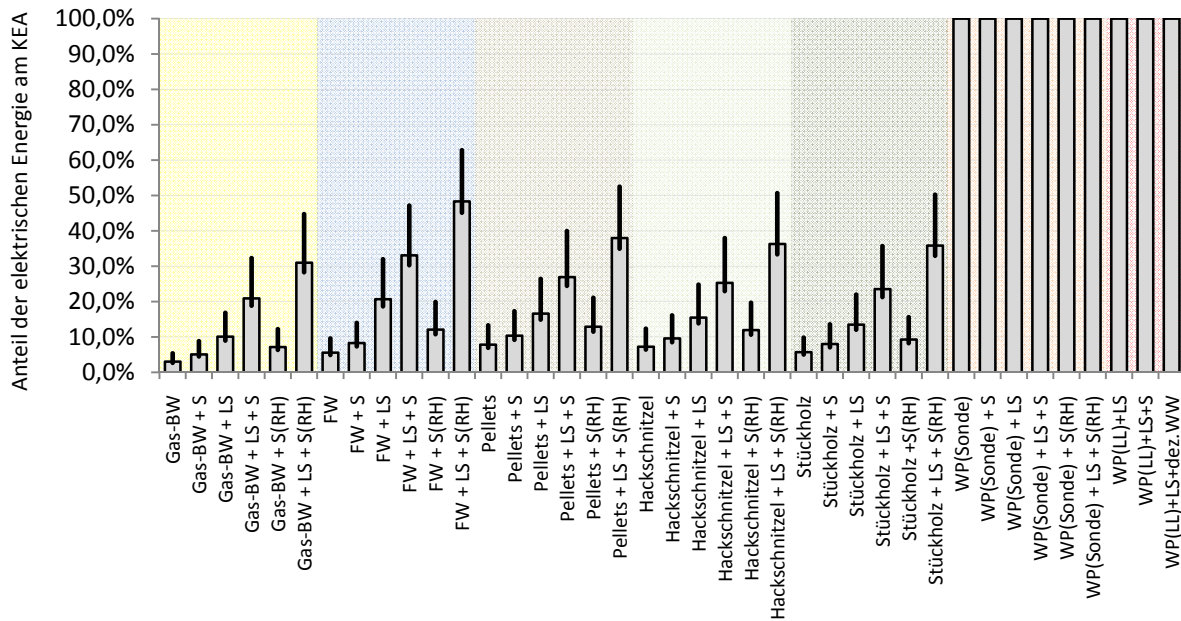


Abbildung 4-35: Anteil des durch den elektrischen Energiebedarf resultierenden KEA_N am gesamten KEA_N . Die Balken resultieren aus dem verwendeten Jahresstrommix und die Unsicherheiten durch den Öko- bzw. Winterstrommix (und maximalen Endenergiebedarf (siehe Kapitel 4.2)).

4.5.4 Mehraufwand durch eine Verbesserung der Wärmedämmung

Im Rahmen des EU-Forschungs- und Demonstrationsprojektes CEPHEUS¹ wurden mehrere Passivhäuser in den Jahren 1999 bis 2001 fertiggestellt. Schuß (2004) analysierte den für den Bau des Gebäudes (ohne Anlagentechnik) entstehenden KEA anhand der aus diesem Projekt stammenden Einfamilienhäuser in Horn und in Dornbirn.

Das Haus in Horn sollte laut ursprünglicher Berechnung bei einer Innentemperatur von 20°C einen Heizwärmebedarf von 16,2 kWh/(m²a) erreichen, weist aber, wie die Messungen zeigten einen Heizwärmeverbrauch von 29,0 kWh/(m²a) auf (Krapmeier & Müller, 2001a, Kap. 12.1). Das Haus besitzt eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Berechnung ergibt für den Wohnbereich einen KEA von 106,5 GWh was bezogen auf die Nutzfläche 617,4 kWh/m² entspricht. Der in diesem Haus vorhandene Keller verursacht einen KEA von 39,53 GWh (430 kWh/m²). Ein zusätzlicher Garagenanbau schlägt sich mit 12,804 GWh (367,93 kWh/m²) zu Buche.

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs des Hauses in Dornbirn ergab 19,7 kWh/(m²a). Die Messungen ergaben jedoch einen Heizwärmeverbrauch von 36,7 kWh/(m²a) (bei einer Innenraumtemperatur von 20°C) (Krapmeier & Müller, 2001b, Kap. 12.1). Das Haus besitzt eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Unter der vom Haus thermisch getrennten Garage wurde ein Keller gebaut. Der von Schuß (2004) berechnete KEA für das Haus selbst beträgt (ohne Berücksichtigung der Garage) 106,29 GWh, was bezogen auf die Nutzfläche 799 kWh/m² entspricht.

Ein weiteres Passivhaus in Wien wurde untersucht, welches einen berechneten HWB von 13 kWh/(m²a) (mit Komfortlüftung) aufweist. Tatsächlich gemessene Werte stehen nicht zur Verfügung. Dieses Zweifamilienhaus weist für den Keller einen KEA von 43,06 GWh (426,34 kWh/m²) und für den Wohnbereich 106,23 GWh (525 kWh/m²) auf (Schuß, 2004).

Joos et al. (2004) analysieren den Primärenergieaufwand anhand von einem Niedrigenergiehaus, einem Ultra-Niedrigenergiehaus und einem Nullenergiehaus. Der Energieaufwand für die Entsorgung ist nicht berücksichtigt. Das Niedrigenergiehaus, welches nur über eine Fensterlüftung verfügt, hat einen berechneten HWB von 55 kWh/(m²a). Die in den ersten drei Heizperioden gemessenen Werte lagen allerdings zwischen 34 und 40 kWh/(m²a). Außer der guten Bauweise, ist dafür vor allem ein bewusstes Nutzerverhalten verantwortlich (relativ kleine Fensteröffnungszeiten und moderate mittlere Raumlufttemperaturen) (Joos et al., 2004, Kap. 1.4.6.3).

Nach den angegebenen Daten kann der Energieaufwand für die Herstellung der Trag- und Hüllkonstruktion mit etwa 870 kWh/m² abgeschätzt werden. Da, wie gesagt, dieses Haus über keine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügt, wird angenommen, dass ansonsten der HWB um etwa 18kWh/(m²a) (entsprechend den vorherigen Berechnungen) auf etwa 37kWh/(m²a) verringert werden könnte.

Das Ultra-Niedrigenergiehaus weist einen Heizwärmebedarf von 38 kWh/(m²a) auf. Die während zweier Heizperioden gemessenen Heizwärmeverbräuche liegen aufgrund mehrerer Ursachen bei etwa 50 kWh/(m²a). Diese werden aber nicht als repräsentativ erachtet. Der Energieaufwand für die Herstellung liegt bei etwa 1000 kWh/m².

Das Null-Heizenergiehaus, welches zu Beginn auch einen zu hohe Heizwärmebedarf hatte, weißt für die Herstellung der Trag- und Hüllkonstruktion etwa 1500 kWh/m² auf. Sowohl das Ultra-Niedrigenergiehaus als auch das Null-Heizenergiehaus verfügen über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Außerdem sind alle drei Häuser unterkellert (Joos et al., 2004, Kap. 1.4.6.3).

¹ Cost Efficient Passive Houses as European Standard

In Abbildung 4-36 werden die eben besprochenen kumulierten Energieaufwände über dem entsprechenden Heizwärmebedarf aufgetragen und durch eine logarithmische Trendlinie angenähert.

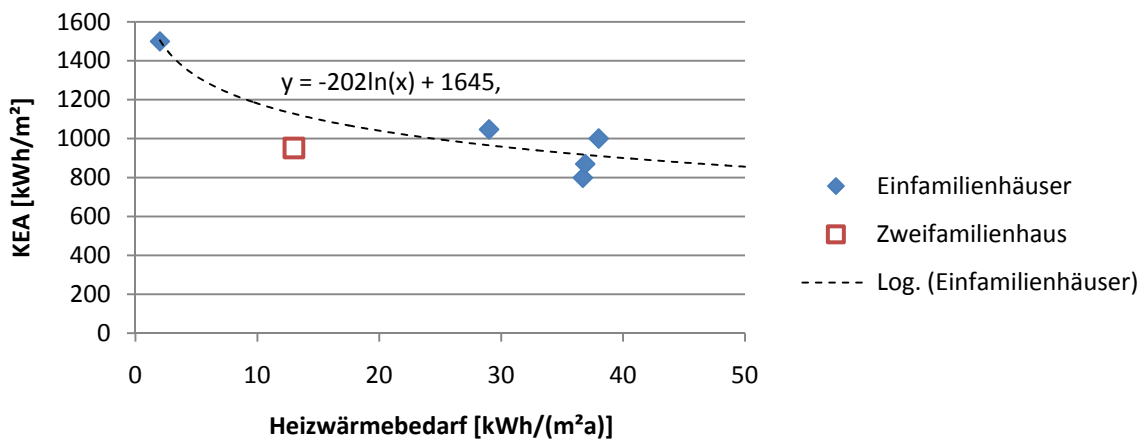


Abbildung 4-36: Zusammenstellung von KEA-Werten der Herstellung für Einfamilienhäuser in Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs (alle mit Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung).

Berechnet man nun, ausgehend von der in Abbildung 4-36 definierten Trendlinie, den zusätzlichen kumulierten Energieaufwand der Wärmedämmung, der notwendig ist, um aus einem Niedrigenergiehaus mit einem HWB von etwa $32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ($50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + \text{LS}$ mit WRG) ein sehr gutes Passivhaus mit einem HWB von etwa $7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ($25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) + \text{LS}$ mit WRG) zu machen, ergeben sich etwa¹ $307 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren vorausgesetzt entsteht somit ein KEA von rund $6,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Diese Untersuchung kann nur einen groben Schätzwert für den kumulierten Energieaufwand, der für die Errichtung von Niedrigenergie- und Passivhäusern notwendig ist, liefern. Natürlich gibt es eine große Streuung, die schon alleine aus den unterschiedlichen Bauweisen resultiert (sei es jetzt Massivbauweise oder Leichtbauweise). Der Standort der jeweiligen Gebäude, deren Ausrichtung, deren Abschattung und nicht zuletzt das Nutzerverhalten haben großen Einfluss auf die tatsächlich gemessenen Heizenergieverbräuche.

Wird dieser Energieaufwand für die verbesserte Dämmung somit in die Betrachtung miteinbezogen (Abbildung 4-37), sieht man, dass sich auch diese Investition energetisch lohnt. Der kumulierte Energieaufwand der sich für das EFH ohne diese verbesserte Dämmung ergäben würde (strichliert dargestellt), liegt in allen untersuchten Fällen höher.

¹ $(-202\ln(7)+1645) - (-202\ln(32)+1645) \approx 307$

4. Ökologischer Vergleich

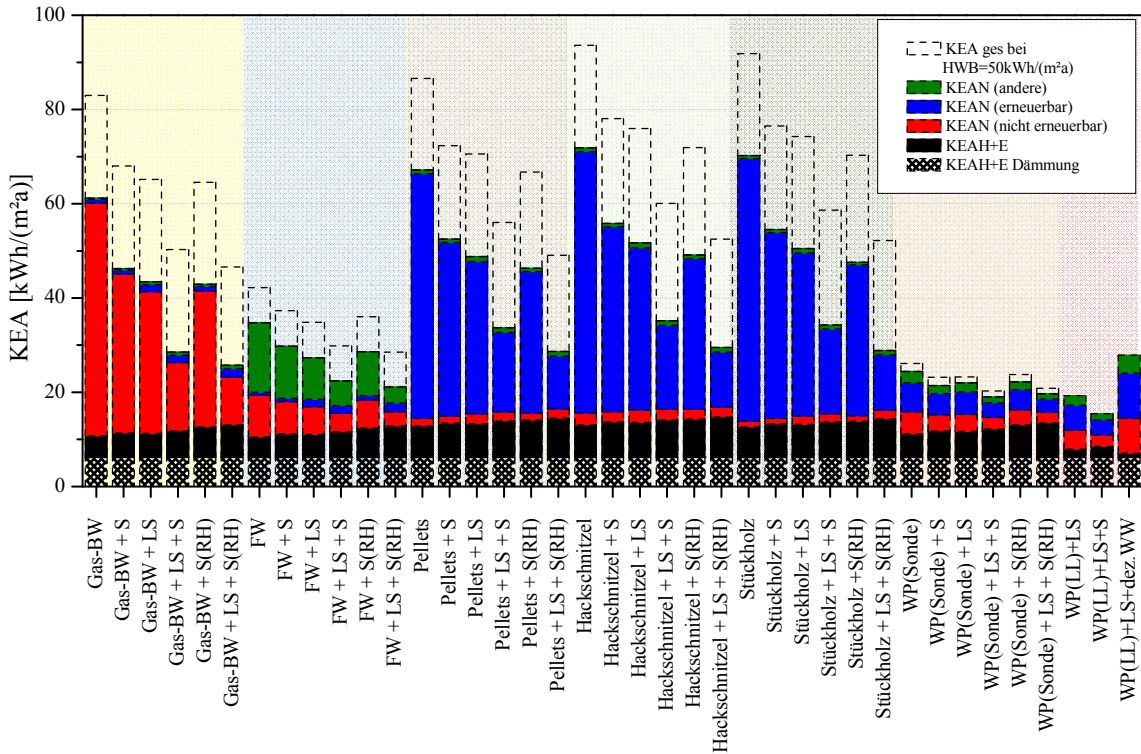


Abbildung 4-37: Vergleich des KEA für verschiedene WBR-Systeme unter Einbeziehung des Mehraufwandes der Dämmung zur Erreichung eines HWB=25kWh/(m²a) (ohne LS) gegenüber einem Niedrigenergiehaus mit HWB=50kWh/(m²a) (ohne LS). Werte des KEA der Nutzung gültig für den optimalen Endenergiebedarf und Jahresstrommix.

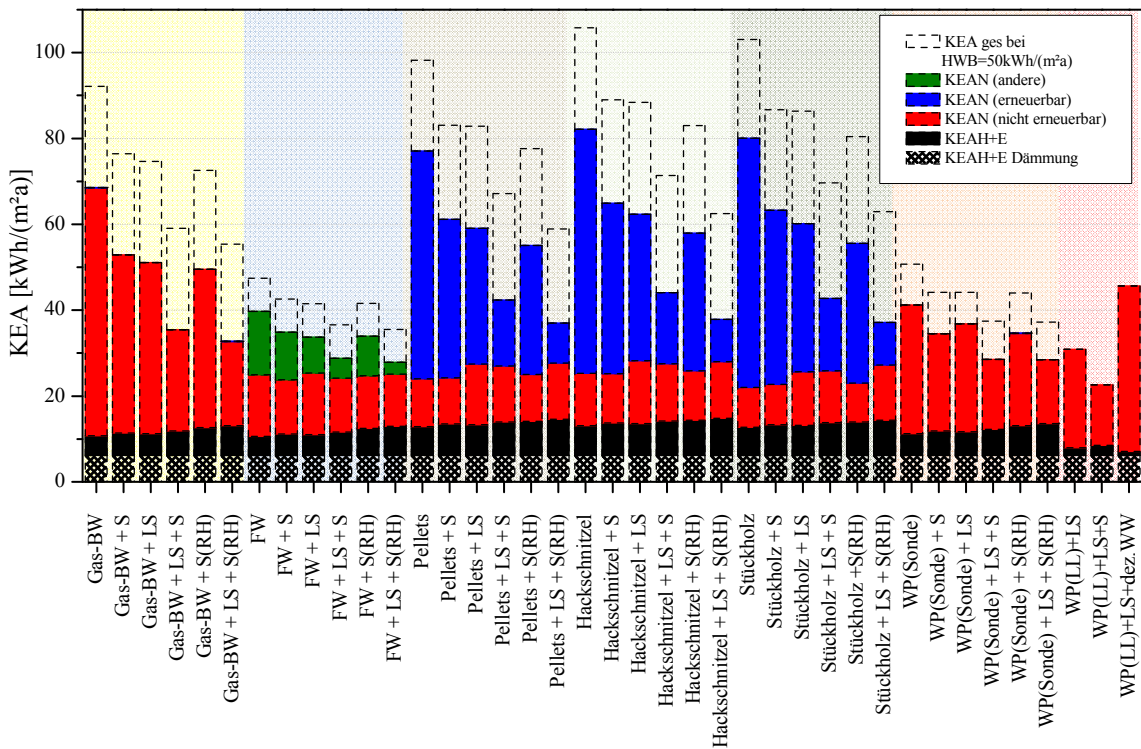


Abbildung 4-38: Wie Abbildung 4-37, nun allerdings gültig für ungünstigsten Endenergiebedarf und Winterstrommix.

4.6 Energiebedingte Emissionen der Nutzungsphase

Um die nutzungsbedingten Emissionen bestimmen zu können, werden mittels GEMIS die Emissionsfaktoren, welche die für die Bereitstellung einer kWh Endenergie entstehenden Emissionen angeben, berechnet. Dabei werden jedoch die bei einer bestimmten Umwandlungstechnologie (z.B. Gas-Brennwertkessel) entstehenden Emissionen mitberücksichtigt. Die Verwendung von auf Endenergie bezogenen Emissionsfaktoren dient lediglich dazu, um die weitere Berechnung davon ausgehend zu ermöglichen (der Nutzungsgrad der Umwandlungstechnologie muss dazu in GEMIS auf 100% Prozent gesetzt werden).

4.6.1 Emissionen

Eine Unterteilung der Emissionen kann z.B. in energie- und in prozeßbedingte Emissionen erfolgen. „Energiebedingte Emissionen entstehen bei Prozessen, deren Ziel die Gewinnung oder Umwandlung von Energien oder Energieträgern ist“ (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6.1). Dabei kann wiederum in direkte bzw. indirekte Emissionen unterschieden werden. Direkte entstehen, wie der Name schon sagt, direkt am betrachteten Ort, indirekte hingegen in den vorgelagerten Prozessen. Die prozessbedingten Emissionen „entstehen bei Prozessen, deren Ziel nicht die Gewinnung oder Umwandlung von Prozessen ist“ (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6.1). Dabei handelt es sich um eine Vielzahl von Schadstoffen in sehr unterschiedlicher Konzentrationen und Toxizität (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6).

Die Emissionen die beim Start und bei der Abschaltung von Heizkesseln auftreten sind deutlich höher als jene, die sich im stationären Betrieb einstellen. Je nach Bauart des Brenners bzw. Kessels ergeben sich unterschiedliche Werte. Gaskessel weisen beim Start- und beim Abschaltvorgang typisch etwa die 4-fachen CO- und die 6-10-fachen CH-Emissionen gegenüber des stationären Betriebs auf. Bei Biomassekessel wirkt sich Taktbetrieb besonders negativ auf die auftretenden Emissionen auf. Dabei entstehen etwa die 3 bis 20-fachen CO- und 26-fachen CH-Emissionen gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb (Streicher et al., 2004a, Kap. 5.1.4).

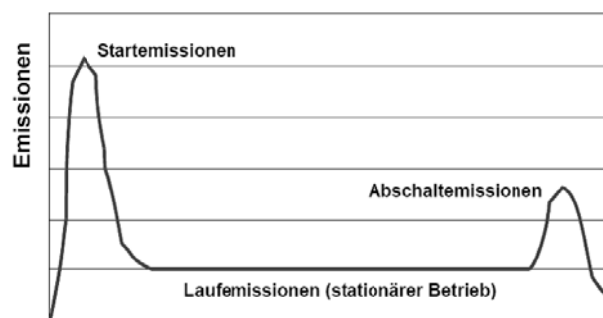


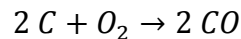
Abbildung 4-39: Darstellung von Start- und Abschaltmissionen (Quelle: (Streicher et al., 2004a, S. 128)).

Besonders bei Festbrennstoffkesseln ist es wichtig, dass der völlige Abbrand einer Kesselladung ermöglicht wird, um unnötig hohe Emissionen zu vermeiden. Da, besonders bei Niedrigenergie- und Passivhäusern, die Kessel oft überdimensioniert sind, würde es in diesem Fall zu einem häufigen An- und Abschalten kommen. Dabei ist vor allem die Dimensionierung eines Pufferspeichers entscheidend, ob die produzierte Wärme abgenommen werden kann. Ist ein solcher nicht vorhanden, muss die Luftzufuhr des Kessels verringert werden wodurch die CO- und C_xH_y -Emissionen ansteigen (Streicher, 2005, Kap. 5.1.4 und Kap. 5.2).

Bei den im Folgenden betrachteten Luftschadstoffen, welche bei der Wärmeerzeugung in Gebäuden von Bedeutung sind, wird nur auf deren energiebedingter Entstehung näher eingegangen.

CO:

Kohlenmonoxid entsteht hauptsächlich bei der unvollständigen Verbrennung (Sauerstoffmangel) kohlenstoffhaltiger Verbindungen:



Außerdem entsteht CO bei der Reaktion von Wasserdampf oder CO₂ mit glühendem Koks (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6.3.2). Kohlenmonoxid kann die Sauerstoffaufnahme von Menschen beeinträchtigen und in größeren Mengen somit zur Bewusstlosigkeit führen (Krapf, 2002, Kap. 2.3.7).

CO₂:

Kohlendioxid entsteht u.a. bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff und gilt als wichtigster Verursacher des anthropogenen Treibhauseffektes (Krapf, 2002, Kap. 2.3.3).

NO und NO_x:

Stickoxide tragen zur Bildung von Sommersmog bei und können bei höheren Konzentrationen zu einer Reizung der Atemwege führen. Im Abgas, nach der Verbrennung, liegt zunächst etwa 95% des entstehenden NO_x als NO vor. Die Entstehung kann in drei Gruppen eingeteilt werden (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6.3.3):

Brennstoff NO:

Entsteht durch den im Brennstoff enthaltenen Stickstoff (schon bei der Verbrennung mit niedrigen Temperaturen).

Thermisches NO:

Entsteht aus den in der Luft vorhandenen Bestandteilen bei Temperaturen von mehr als 1500°C.

Prompt-NO:

„Prompt –NO spielt meist nur eine untergeordnete Rolle. Es entsteht in brennstoffreichen Flammen durch Einwirkung von kohlenstoffhaltigen Radikalen auf den Luftstickstoff mit nachfolgender Oxidation der CN-Verbindung. Der einmal an Kohlenstoff gebundene Stickstoff wird leichter oxidiert“ (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Teil A - Kap. 6.3.3).

Das thermische- und das prompt NO entstehen erst bei Temperaturen über etwa 1300°C und spielen deshalb bei der Wärmeerzeugung in Wohnhäusern kaum eine Rolle. Das beim Hausbrand entstehende NO_x ist somit hauptsächlich auf den im Brennstoff vorhandenen Stickstoff zurückzuführen (Krapf, 2002, Kap. 2.3.4).

SO₂:

Hauptsächlich entsteht Schwefeldioxid durch die Verbrennung eines schwefelhaltigen Brennstoffes. Dieses SO₂ kann bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff reagieren und SO₃ bilden welches wiederum mit Wasser reagieren kann und somit Schwefelsäure bildet. Daher resultiert das Versauerungspotential schwefelhaltiger Brennstoffe. Eine Entschwefelung, der bei der Oxidation entstehenden Rauchgasen, ist möglich (Corradini, Hutter & Köhler, 1999).

C_xH_y :

Kohlenwasserstoffe sind geruchsintensiv, gelten als krebserregend und sind in hohem Maße für die Toxizität von Rauchgasen mitverantwortlich. Wie in Kapitel 2) besprochen wird, entstehen sie durch eine Unvollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (Krapf, 2002, Kap. 2.3.6).

Staub:

Wie im Kapitel 2) beschrieben wird, enthält Biomasse nicht brennbare Anteile wie z.B. Silizium, Calcium oder Magnesium. Diese bleiben somit als Asche zurück. Durch den Rauchgasstrom bei der Verbrennung kann ein Teil dieser Asche mitgerissen werden, wodurch diese Feststoffemissionen entstehen. Schwermetalle können, z.B. durch die Verwendung fossiler Brennstoffe, in die Umwelt gelangen und in die Biomasse eingelagert werden. Werden diese beim Verbrennungsprozess wieder freigesetzt lagern sie sich hauptsächlich an den Asche-Partikeln an. Staub (insbesondere Feinstaub) wird neben der Beeinträchtigung der Lunge somit auch eine krebserregende Wirkung zugeschrieben (Krapf, 2002, Kap. 2.3.5).

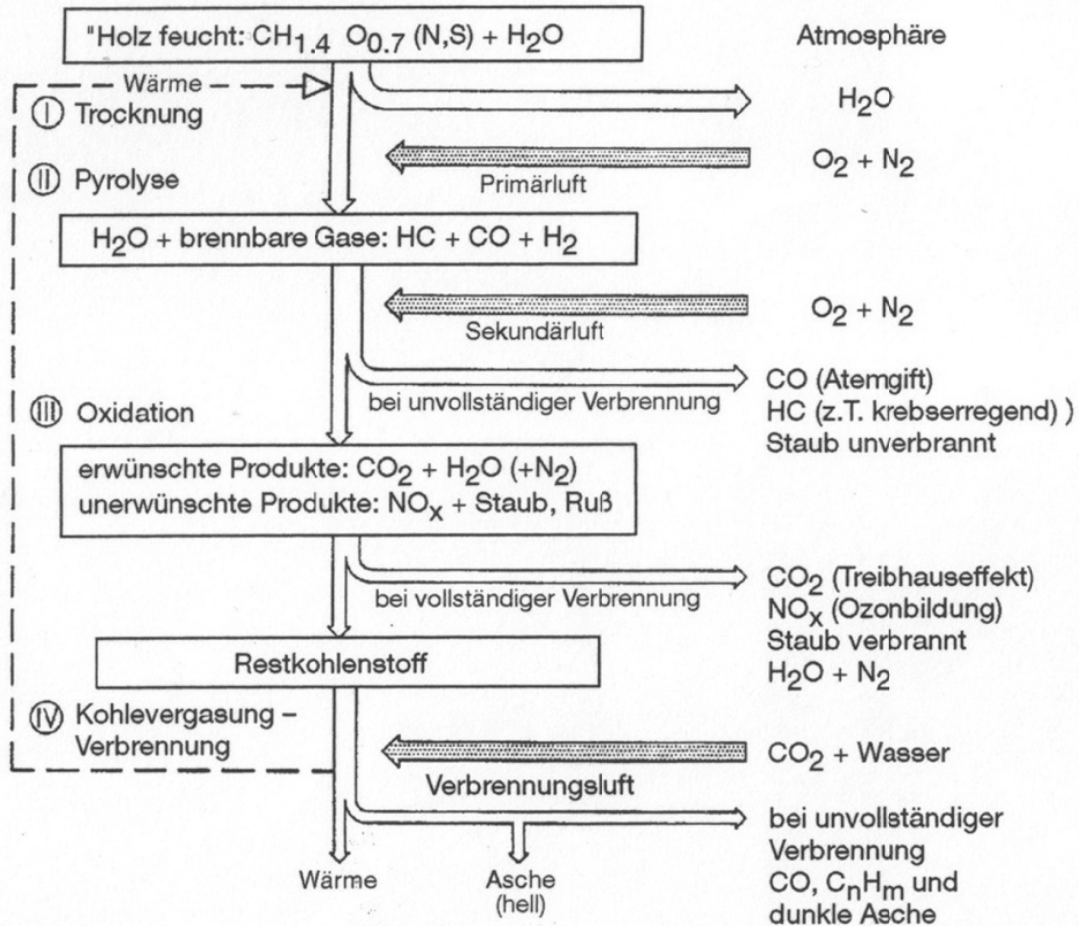
1) **Verbrennungsprozess von Brenngasen**

Brenngase enthalten neben den brennbaren Bestandteilen CO , H_2 , C_nH_m und schwefelhaltigen Gasverbindungen auch nicht brennbare Bestandteile. Bei letzteren kann neben CO_2 und N_2 auch Wasserdampf und O_2 enthalten sein. Hinsichtlich der Gasgewinnung kann zwischen Kokereigas, Stadtgas, Ferngas, Spaltgas, Erdgas, Biogas und Flüssiggas unterschieden werden (Zierhut, 2005, Kap. 6.2).

Da im Folgenden fossile Energieträger nicht weiter untersucht werden, sondern nur die Wärmeerzeugung mittels Gas-Brennwertkessel als Vergleichssystem gewählt wird, wird darauf nicht näher eingegangen.

2) **Verbrennungsprozess von Holz**

Holz besteht im Wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff (50%), Sauerstoff (43%), Wasserstoff (6%) und Stickstoff (<1%). Außerdem können Halogene, Schwefel und Schwermetalle in geringen Mengen enthalten sein (Holz, 2006, Kap. 3.2). Der Verbrennungsvorgang von Holz (Stückholz, Hackschnitzel, Pellets,...) wird in Abbildung 4-40 dargestellt.



in Anlehnung an: Nussbaumer 1989

Abbildung 4-40: Ablauf der Verbrennung von Holz (Quelle: (Joos et al., 2004, S. 224)).

Wie aus Abbildung 4-40 ersichtlich ist, kann der Verbrennungsablauf in verschiedene Phasen gegliedert werden. Die Trocknung erfolgt bei einer Temperatur von $<150^\circ\text{C}$, wobei das im Brennstoff enthaltene Wasser verdampft wird. Je höher der Wassergehalt in der Biomasse ist, desto mehr Energie wird zu dessen Verdampfung benötigt und desto kleiner wird der Heizwert (siehe Abbildung 4-41). Durch Zufuhr der Primärluft kann bei Temperaturen zwischen 150 und 600°C die Pyrolyse (sauerstoffarme Oxidation) vonstatten gehen. Dabei entsteht Holzkohle und die brennbaren Verbindungen CO , H_2 und Kohlenwasserstoffe. Diese Gase werden dann bei Temperaturen zwischen 400 und 1300°C mittels Sekundärluft oxidiert. Dabei handelt es sich nun um einen exothermen Prozess. Auch die Holzkohle wird unter Wärmeabgabe verbrannt. Als Reststoff verbleibt die Asche. Da für die Verbrennung eine bestimmte Menge an Luft (Sauerstoff) benötigt wird, wird das Verhältnis an zugeführter Luftmenge zum theoretischen Luftmengenbedarf über die Luftüberschusszahl λ definiert. Ist $\lambda=1$, weist das Rauchgas den, vom Brennstoff abhängigen, maximalen CO_2 -Gehalt auf. Dieser entspricht bei Holz etwa $20 \text{ Vol.}\%$. Bei Luftmangel ($\lambda < 1$) kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung, wodurch das Rauchgas viel Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffpartikel (Russ) enthält. Über den CO -Gehalt des Rauchgases lässt sich somit die Güte der Verbrennung beurteilen. Um diese Entstehung zu vermeiden, arbeitet man in der Praxis mit Luftüberschusszahlen von etwa $1,4$ bis 2 . Da mit steigendem λ auch der Sauerstoffgehalt im Rauchgas ansteigt, kann über die Messung dieses, mittels einer λ -Sonde, die Sekundärluftzufuhr der Verbrennung, falls notwendig, geregelt werden. Aus Abbildung 4-40 sieht man, dass selbst bei vollständig Verbrennung CO_2 , NO_x , Staub und natürlich H_2O und N_2 (aus der Verbrennungsluft) nicht vermieden werden können. Die NO_x -Emissionen

entstehen in der Regel durch den im Holz gebundenen Stickstoff. Die Bildung durch den in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoff tritt i.A. erst ab 1300°C auf. Bei optimaler Konstruktion des Wärmeerzeugers (hohe Verbrennungstemperatur, gute Durchmischung...) kann theoretisch aber die Bildung von CO, C_xH_y und Russ verhindert werden. Jene Anteile der Biomasse die nicht brennbar sind und somit als Asche übrigbleiben, liegen im Bereich von 1% (Holz, 2006, Kap. 3.2) (Krapf, 2002, Kap. 2.2, Kap. 2.3).

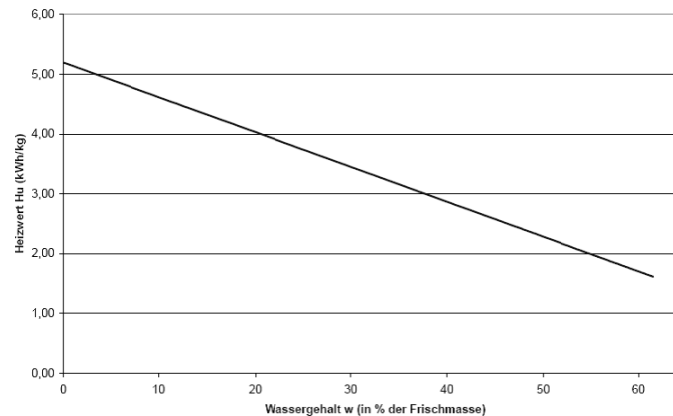


Abbildung 4-41: Abhängigkeit des Heizwertes vom Wassergehalt, am Beispiel von Fichtenholz (Quelle: (Krapf, 2002, S. 14)).

Um die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen zu minimieren kann man grundsätzlich in Primär- und Sekundärmaßnahmen unterscheiden. Erstere beeinflussen den Brennstoff selbst (z.B. weniger Verunreinigungen) oder werden an der Feuerung durchgeführt (z.B. Luftzufuhr, Verweilzeiten...). Bei den Sekundärmaßnahmen kommt es zu einer Minimierung der Emissionen durch eine Reinigung der Abgase durch, wobei dies aus finanziellen Gründen bei Leistungen <100kW kaum durchgeführt wird (Krapf, 2002, Kap. 2.3.9).

4.6.2 Umweltindikatoren

Im Folgenden werden einige Umweltindikatoren näher beschrieben. Diese dienen dazu, um die Umweltbelastungen von Produkten oder Prozessen, einfacher und übersichtlicher, beschreiben zu können. Dabei erfolgt eine Aggregation von verschiedenen Emissionen zu entsprechenden Kennwerten.

Treibhauspotential oder GWP:

Das Treibhauspotential (THP) oder „Global Warming Potential“ (GWP) ist das auf CO₂ mas-sebezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von Treibhausgasen und wird daher in CO₂-Äquivalenten angegeben. Da verschiedene Treibhausgase unterschiedlich lange Verweilzeiten in der Atmosphäre haben, ist das Treibhauspotential ein Integral über einen gewissen Zeitraum (GEMIS-Hilfe, 2007).

In GEMIS erfolgt die Berechnung der CO₂-Äquivalente durch Berücksichtigung der Treibhauswirkung folgender Treibhausgase: CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, PFC¹, HFC² (GEMIS-Hilfe, 2007).

In Tabelle 4-7 sind die GWPs für vier ausgewählte Gase zur beispielhaften Darstellung aufgelistet. Die Daten stammen aus dem AR4 (Fourth Assessment Report) der IPCC¹ (2007). Man sieht deutlich welches enormes Treibhauspotential SF₆ besitzt.

¹ Perfluor-Kohlenwasserstoffe (Perfluorocarbons)

² Wasserstoffhaltige Fluor-Kohlenwasserstoffe (hydrofluorocarbons)

Tabelle 4-7: Auflistung der direkten GWPs (außer bei Methan) von ausgewählten treibhausrelevanten Gasen (Daten nach (Forster et al., 2007)).

	Global Warming Potential (GWP)		
	Zeithorizont		
	20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
CO ₂ (Kohlendioxid)	1	1	1
CH ₄ (Methan) ²	72	25	7,6
N ₂ O (Lachgas)	289	298	153
SF ₆ (Schwefelhexafluorid)	16300	22800	32600

Bodenversauerungspotential oder AP:

Die Bodenversauerung oder auch saurer Regen genannt wird durch das „Acidification Potential“ (AP) charakterisiert. Es beinhaltet sowohl die aquatische als auch die terrestrische pH-Wert Absenkung, die unter anderem eine Ursache für das Waldsterben darstellt (Königshofer & Lesch, 2001). Es entsteht durch Aggregation von Luftschadstoffen zum massebezogenen SO₂-Äquivalent. In GEMIS werden folgende Luftschadstoffe aggregiert: SO₂, NO_x, HCl, HF, NH₃, H₂S.

Ozonbildungspotential oder POCP:

Das Ozonbildungspotential wird in durch das TOPP-Äquivalent angegeben. Es entsteht durch die Aggregation von sogenannten Ozon-Vorläufersubstanzen (CO, CH₄, NMVOC, NO_x) (GEMIS-Hilfe, 2007). Das POCP gibt an, in welchem Ausmaß Photosmog (auch Sommermog genannt) entsteht. Photosmog ist ein Ausdruck für die Bildung von bodennahem Ozon in der Troposphäre. Dabei entsteht Ozon unter Sonneneinwirkung auf die Vorläufersubstanzen (Königshofer & Lesch, 2001).

Eutrophierung oder NP bzw. EP:

Der Beitrag zur Gewässer-Überdüngung wird „Nutrition Potential“ (NP) oder auch Eutrophierung genannt. Dabei kommt es aufgrund des Einbringens von Nährstoffen zu beschleunigten Algenwachstum und damit Sauerstoffzehrung. Als Schadstoffe die dazu beitragen, gelten: N, P, PO₄³⁻, NH₄⁺, NO_x, NO₃ und CSB³. Aufgrund der schlechten Datenlage kann dieses Potential nicht mit GEMIS bestimmt werden (GEMIS-Hilfe, 2007).

Ozonabbaupotential oder ODP:

Das Ozonabbaupotenzial oder „Ozone Depletion Potential“ (ODP) beschreibt den Einfluss von verschiedenen Emissionen auf den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht. Als Vergleichssubstanz wird dabei der Fluorchlorkohlenwasserstoff R11 definiert (Frischknecht, Gresch & Hörning, 2005, Kap. 2.4.3.4).

Bei dem in Kapitel 4.6 durchgeführten Vergleich der energiebedingten Emissionen von verschiedenen WBR-Systemen während der Nutzungsphase, werden die mittels GEMIS ermittelbaren CO₂-, SO₂- und TOPP-Äquivalente herangezogen. Des Weiteren erfolgt die Berücksichtigung des in die Luft emittierten Staubes.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe über Klimaänderungen)

² Das GWP von Methan enthält auch indirekte Effekte (siehe (Forster et al., 2007)).

³ Chemische Sauerstoffbedarf

4.6.3 Bestimmung der Emissionsfaktoren

In den folgenden Diagrammen werden nun die mit GEMIS berechneten Emissionsfaktoren dargestellt. Die Modellierung entspricht den bereits in Kapitel 4.3, für die Ermittlung der Primärenergiefaktoren, erläuterten Daten. Untersucht werden dabei das CO₂-, SO₂-, TOPP-Äquivalent und die Staub Emissionen (näheres dazu siehe Kapitel 4.6.1).

Die folgenden beiden Diagramme zeigen nun die berechneten Emissionen für die untersuchten Stromerzeugungsmixe. Da der „Ökostrommix“ nur durch erneuerbare Umweltenergien bereitgestellt wird, sind die entstehenden Emissionen, welche durch die Herstellung der Anlagen bedingt sind, äußerst gering. Dies stellt somit, aus ökologischer Sicht, die optimistischste Annahme dar. Der definierte Winterstrommix weist, aufgrund der rein thermischen Kraftwerke, die höchsten Emissionen auf.

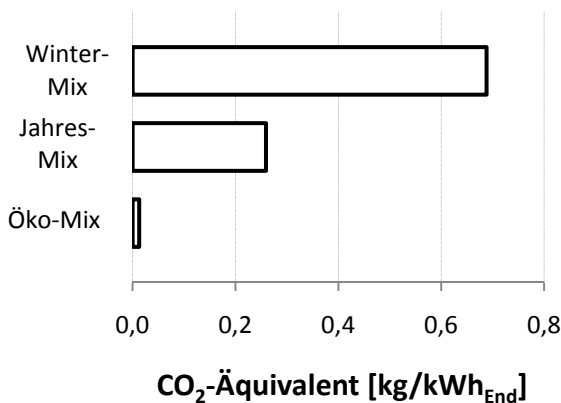


Abbildung 4-42: Darstellung der mit GEMIS für unterschiedliche Strommixe berechneten CO₂-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-4).

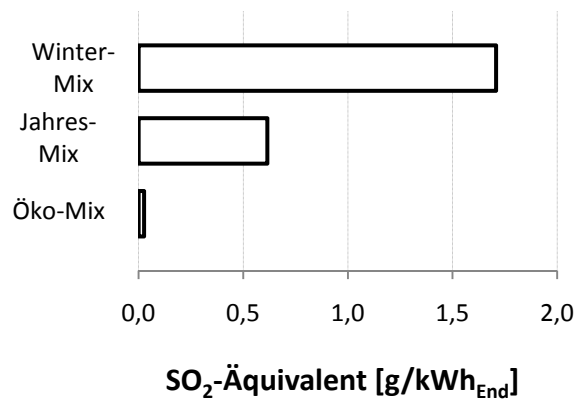


Abbildung 4-43: Darstellung der mit GEMIS für unterschiedliche Strommixe berechneten SO₂-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-4).

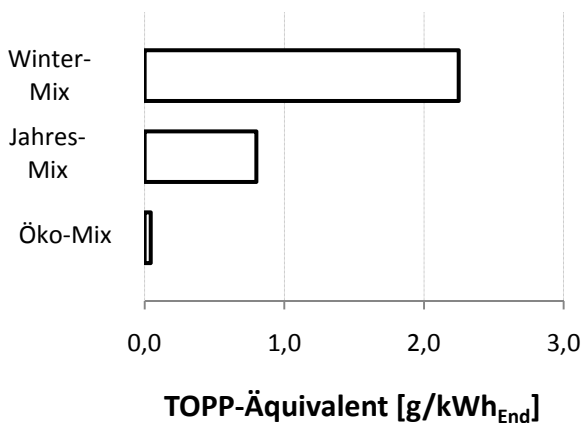


Abbildung 4-44: Darstellung der mit GEMIS für unterschiedliche Strommixe berechneten TOPP-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-4).

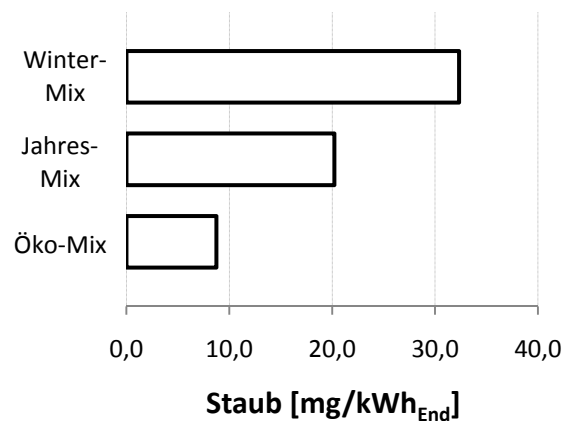


Abbildung 4-45: Darstellung der mit GEMIS für unterschiedliche Strommixe berechneten Staub-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-4).

Abbildung 4-46 bis Abbildung 4-49 zeigen die berechneten Emissionen für eine Öl-Brennwert-, Gas-Brennwert-, Fernwärme-, Pellets-, Hackschnitzel- und Stückholzheizung. Eine Öl-Brennwertheizung wird Variantenvergleich nicht verwendet, dient somit an dieser Stelle, wie schon bei den Primärenergiefaktoren, lediglich als Vergleichswert. Die Biomasse-

4. Ökologischer Vergleich

Heizsysteme weisen aufgrund der angenommenen CO₂-Neutralität sehr geringe CO₂-Äquivalent-Emissionen auf. Die Werte für Fernwärme sind wieder, je nach getroffenen Annahmen, einem äußerst großen Schwankungsbereich unterworfen. Dargestellt werden die Netto-Werte, die sich bei einer Substitution des deutschen Kraftwerksparks ergeben (mehr dazu im nächsten Absatz). Die Biomasseheizsysteme, insbesondere die Hackschnitzel- und die Stückholz-Nutzung weisen relativ hohe Staub-Emissionen auf. Vor allem beim TOPP_{Äquivalent}, also beim Potential zur Bildung bodennahen Ozons, schneidet die Stückholz-Heizung schlecht ab. Es muss aber bei allen Werten beachtet werden, dass diese aus bestimmten Prozessen, die in GEMIS verwendet wurden, resultieren.

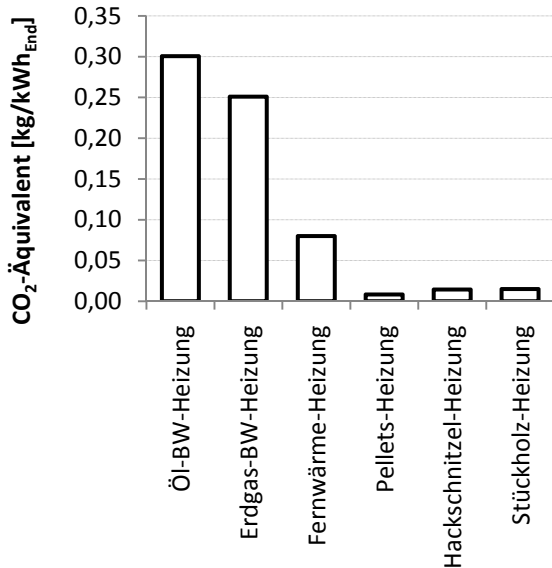


Abbildung 4-46: Darstellung der mit GEMIS für verschiedene Heizsysteme berechneten CO₂-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-5).

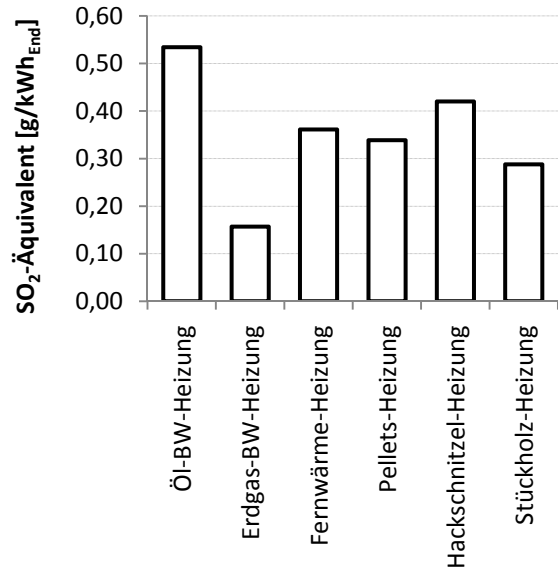


Abbildung 4-47: Darstellung der mit GEMIS für verschiedene Heizsysteme berechneten SO₂-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-5).

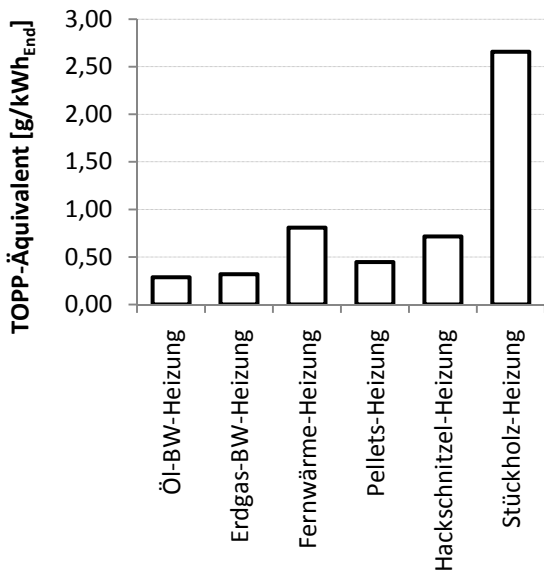


Abbildung 4-48: Darstellung der mit GEMIS für verschiedene Heizsysteme berechneten TOPP-Äquivalent-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-5).

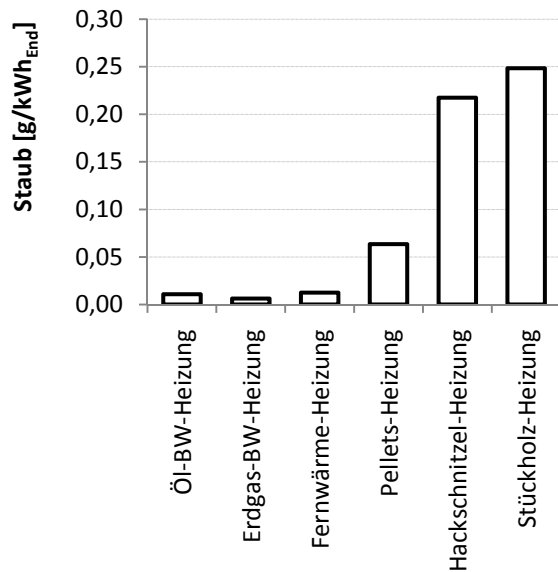


Abbildung 4-49: Darstellung der mit GEMIS für verschiedene Heizsysteme berechneten Staub-Emissionen (Daten siehe Anhang, Tabelle A-5).

Wie schon in Kapitel 4.3 besprochen, hängen die Ergebnisse für die Fernwärme-Beheizung stark davon ab, welche Voraussetzungen getroffen werden. Abbildung 4-50 und Abbildung 4-51 zeigen den Unterschied in den Emissionen, die sich mit bzw. ohne Berücksichtigung von Gutschriften (bzgl. der Substitution des deutschen Kraftwerks-Mixes) ergeben. In der weiteren Berechnung wurde der Nettowert, also der ökologisch bessere Wert, der sich unter Berücksichtigung von Gutschriften ergibt, verwendet.

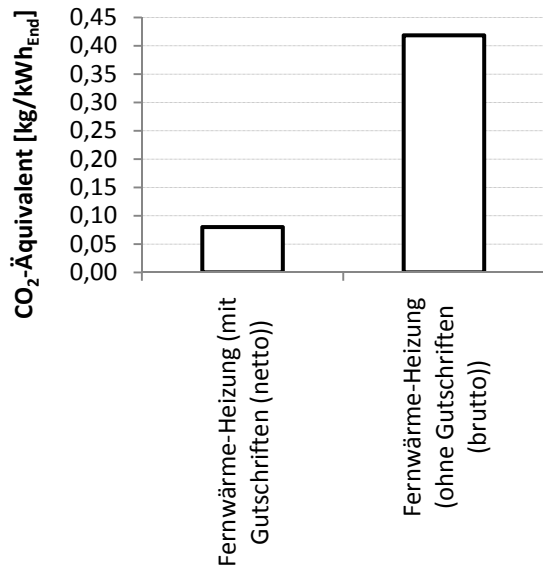


Abbildung 4-50: Vergleich der CO₂-Äquivalent-Emissionen für Fernwärme mit bzw. ohne Berücksichtigung von Gutschriften (berechnet mit GEMIS, siehe Anhang Tabelle A-6).

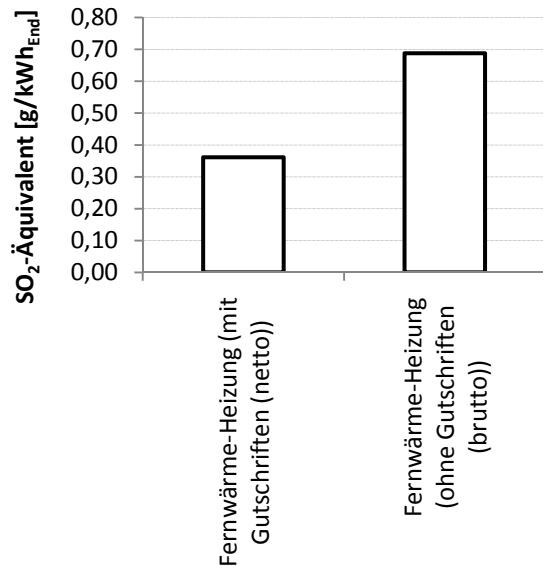


Abbildung 4-51: Vergleich der SO₂-Äquivalent-Emissionen für Fernwärme mit bzw. ohne Berücksichtigung von Gutschriften (berechnet mit GEMIS, siehe Anhang Tabelle A-6).

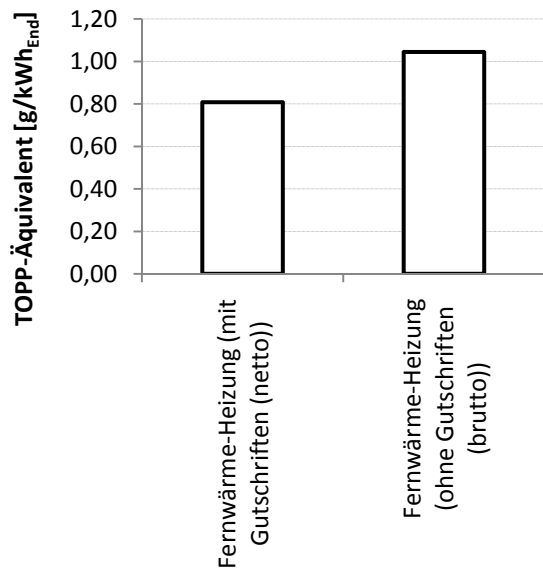


Abbildung 4-52: Vergleich der TOPP-Äquivalent-Emissionen für Fernwärme mit bzw. ohne Berücksichtigung von Gutschriften (berechnet mit GEMIS, siehe Anhang Tabelle A-6).

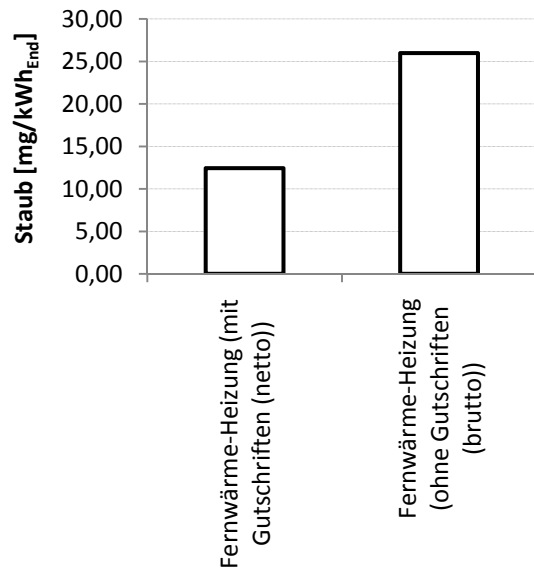


Abbildung 4-53: Vergleich der Staub-Emissionen für Fernwärme mit bzw. ohne Berücksichtigung von Gutschriften (berechnet mit GEMIS, siehe Anhang Tabelle A-6).

4.6.4 Ergebnisse

Ausgehend von den eben dargestellten Emissionsfaktoren und den berechneten Endenergiewerten können nun, die für die jeweiligen WBR-Systeme untersuchten, flächenbezogenen, jährlichen, ausgewählten Emissionen bestimmt werden. Der dabei entstehende, zu erwartende Bereich resultiert aus der Berechnung mit den zuvor besprochenen verschiedenen Stromerzeugungsmixen. Die Werte, welche jeweils mit einer kleinen Markierung gekennzeichnet sind, resultieren unter Verwendung des Jahresstrommixes. Die folgenden Diagramme zeigen jeweils die Ergebnisse, die sich für das EFH mit einem HWB von 25kWh/(m²a) und jenes mit dem höheren Heizwärmebedarf von 50kWh/(m²a) ergeben. Die Luftheizsysteme sind auch hier, wiederum nur für den geringeren HWB, möglich.

Die bei den Biomasseheizsystemen, trotz der vorausgesetzten CO₂-Neutralität, dargestellten CO₂-Äquivalent-Emissionen resultieren, hauptsächlich aufgrund des benötigten Hilfsstromes. Man erkennt dies gut daran, dass bei Verwendung des Ökostrommixes, welcher sehr geringe CO₂-Äquivalent-Emissionen aufweist (siehe Abbildung 4-42), die unteren Bereichsgrenzen in Abbildung 4-54 relativ tief liegen. Werden Wärmepumpen mit dem „Öko-Strom-Mix“ betrieben, entstehen beinahe keinen nutzungsbedingten CO₂-Äquivalent Emissionen. Die Fälle der Verwendung des Jahres- bzw. Winterstrommixes zeigen deutlich höhere Werte, wobei diese als realistischer einzuschätzen sind. Natürlich liegt es aber in der Hand der Stromkunden, durch die Wahl eines entsprechenden Erzeugungsmixes, die ökologische Effizienz mitzubestimmen.

Man sieht, dass die Höhe des Heizwärmebedarfs vor allem Auswirkungen auf die CO₂-Äquivalent -Emissionen der Wärmepumpen- und Gas-Brennwert-Heizsysteme hat. Außerdem können bei diesen Heizsystemen durch zusätzliche Komponenten (Solarkollektoren und/oder Lüftungssysteme mit WRG) besonders hohe Einsparungen an CO₂-Äquivalent-Emissionen erreicht werden.

Bei Biomasseheizsystemen ist der Einfluss des Heizwärmebedarfs geringer, da der Hilfsstrombedarf, aus dem hauptsächlich die CO₂-Äquivalent Emissionen resultieren, nur in einem geringen Ausmaß ansteigt. Ebenfalls können zusätzliche Komponenten, sofern sie nicht zu einer Verringerung des Hilfsstrombedarfes beitragen (siehe Abbildung 4-3), zu kaum einer Reduktion führen, da die Verbrennung selbst ja CO₂ neutral abläuft.

Jene Variante mit dezentraler Warmwasserbereitung mittels elektrischen Durchlauferhitzern stellt, in Hinblick auf die CO₂-Äquivalent- und SO₂-Äquivalent-Emissionen, keine geeignete Lösung dar.

Vor allem bei den Staub- Emissionen weisen die Biomasseheizsysteme (besonders Stückholz und Hackschnitzel) hohe Werte auf.

4. Ökologischer Vergleich

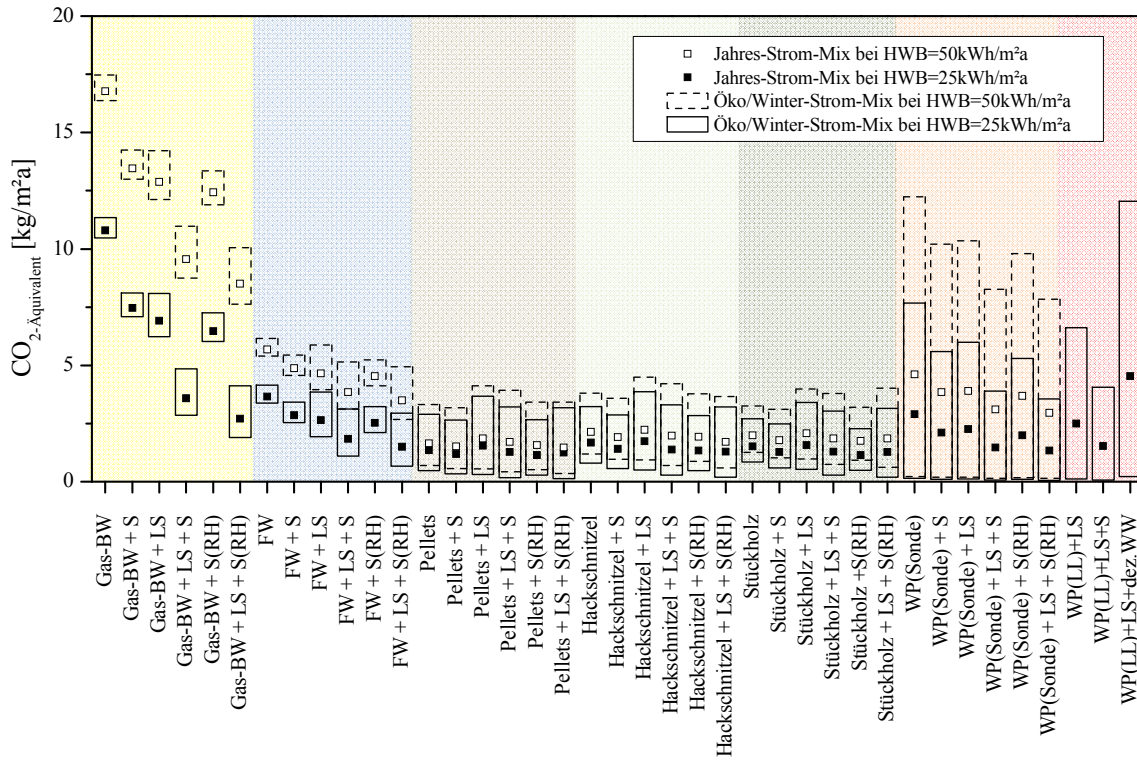


Abbildung 4-54: Darstellung der nutzungsbedingten CO₂-Äquivalent Emissionen für verschiedene WBR-Systeme (Daten siehe Anhang, Tabelle A-25, Tabelle A-26 und Tabelle A-27).

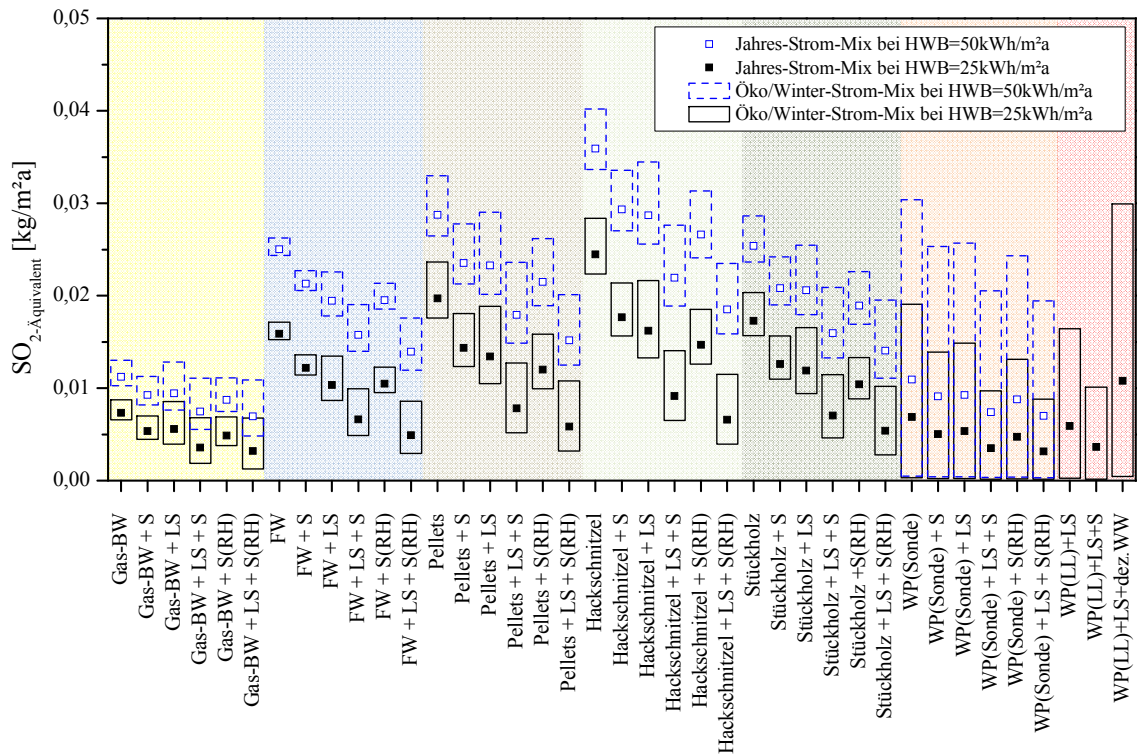


Abbildung 4-55: Darstellung der nutzungsbedingten SO₂-Äquivalent Emissionen für verschiedene WBR-Systeme (Daten siehe Anhang, Tabelle A-25, Tabelle A-26 und Tabelle A-27).

4. Ökologischer Vergleich

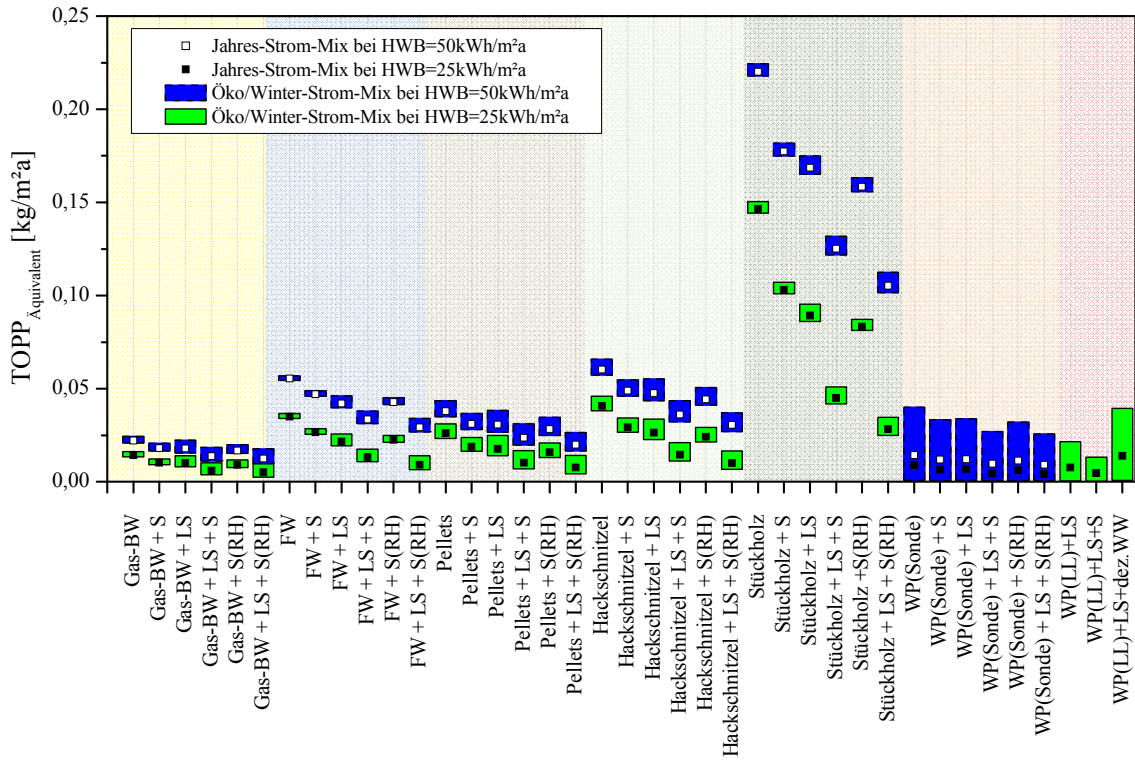


Abbildung 4-56: Darstellung der nutzungsbedingten TOPP-Äquivalent Emissionen für verschiedene WBR-Systeme (Daten siehe Anhang, Tabelle A-25, Tabelle A-26 und Tabelle A-27).

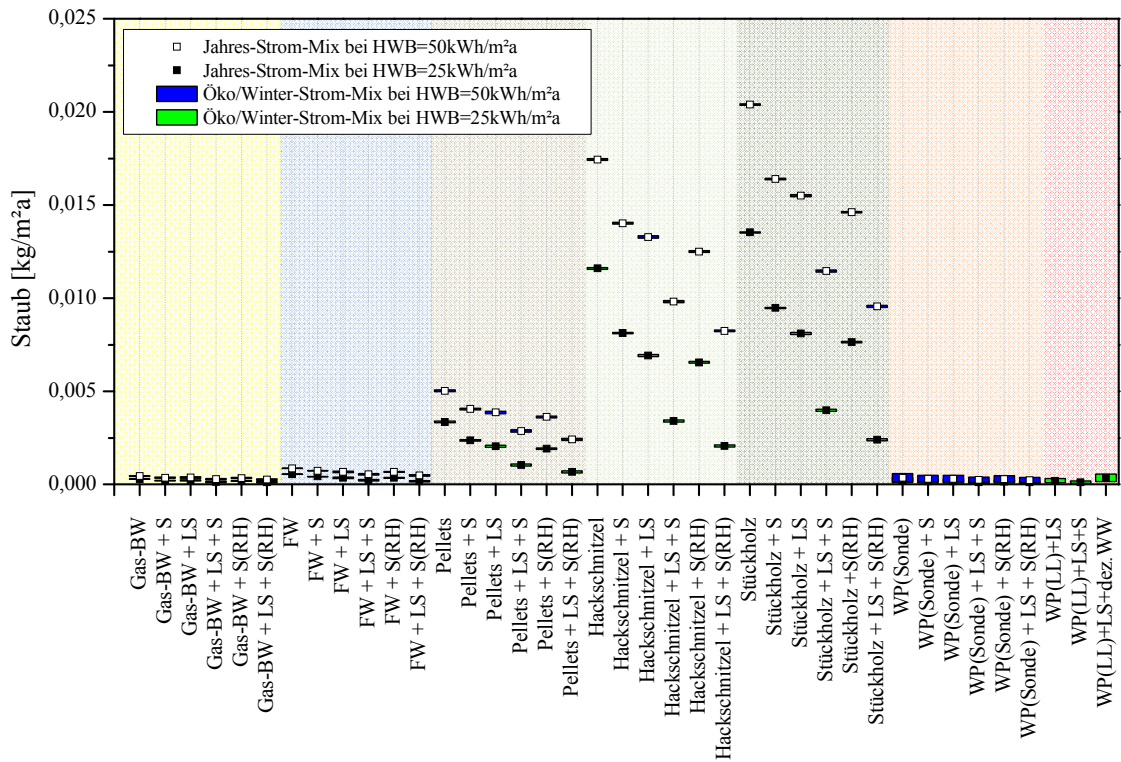


Abbildung 4-57: Darstellung der nutzungsbedingten Staub Emissionen für verschiedene WBR-Systeme (Daten siehe Anhang, Tabelle A-25, Tabelle A-26 und Tabelle A-27).

5 Ökonomischer Vergleich

In diesem Kapitel werden nun die Kosten für die verschiedene WBR-Systeme untersucht, die aus Sicht der Nutzer entstehen. Es kann sich dabei allerdings nur um Richtwerte handeln, da sich je nach Bauart, Hersteller, lokalen Gegebenheiten usw. entsprechend große Unterschiede ergeben.

Grundsätzlich können die Methoden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit in statische und dynamische Rechenverfahren eingeteilt werden. Bei statischen Verfahren werden die Verhältnisse eines bestimmten Jahres betrachtet und unterstellt, dass diese auch in den weiteren Nutzungsjahren gelten. Bei dynamischen Rechenverfahren hingegen werden auch Veränderungen während der Nutzungsdauer berücksichtigt (Richter et al., 2002, Kap. 16.4).

Folgende Kostengruppen können unterschieden werden (nach (Richter et al., 2002, Kap. 16.4.3)):

- **Kapitalgebundene Kosten:**
Darunter fallen neben den Investitionskosten auch die Kosten für Instandhaltung und Erneuerung. Nach VDI 2067 werden diese prozentual von den Investitionskosten berechnet.
- **Verbrauchsgebundene Kosten:**
Diese bestehen hauptsächlich aus den Energie- bzw. Brennstoffkosten und den Kosten für die Hilfsenergie. Auch der bei leitungsgebundenen Energien übliche, jährliche Grundpreis ist dabei zu berücksichtigen.
- **Betriebsgebundene Kosten:**
Diese Kostengruppe beinhaltet hauptsächlich die Kosten für die Wartung. Darunter fallen auch die Rauchfangkehrer-Kosten (Streicher et al., 2004a, S.174).
- **Sonstige Kosten:**
Hierunter fallen z.B. abgeschlossenen Versicherungen, allgemeine Abgaben oder noch nicht erfasste Steuern.

Die Kostenrechnung wird nun mit Hilfe der Annuitätenmethode durchgeführt.

5.1 Aufstellung der Kosten

Im Folgenden wird nur auf einige Punkte näher eingegangen, welche für alle verschiedenen zu vergleichenden Systeme von Bedeutung sind. Die genaue Kostenzusammensetzung für die einzelnen Systeme ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Anhang 7: Kostenrechnung).

5.1.1 Kapitalgebundene Kosten

Die zur Berechnung der Annuitäten notwendigen Nutzungsdauern und Instandsetzungsaufwände (als jährlicher Prozentsatz der Investitionskosten) der verschiedenen Anlagenkomponenten werden in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Der Annuitätenfaktor berechnet sich folgendermaßen (Haas, Nakicenovic, 2005, S.2-11):

$$a = \frac{z \cdot (1 + z)^{LD}}{(1 + z)^{LD} - 1} \quad (5-1)$$

a	...	<i>Annuitätenfaktor</i>
z	...	<i>Zinssatz [%]</i>
LD	...	<i>Lebensdauer [a]</i>

Viele der im Folgenden benutzten Investitionskosten werden in Anlehnung an Herstellerangaben definiert. Dabei wird hauptsächlich auf online verfügbare Daten von Vaillant (2007) und Hoval (2007) zurückgegriffen. Es wird nun nur ein grober Überblick über die Investitionskosten gegeben. Genaueres ist dem Anhang zu entnehmen. Alle im Folgenden behandelten Kosten bzw. Preise beinhalten bereits die Mehrwertsteuer.

Der Luftdichtheitstest der laut Streicher et al. (2004, S.171) für Passivhäuser etwa 1000€ ausmacht, wird nicht berücksichtigt, da er nicht unbedingt dem WBR-System, sondern eher der Gebäudehülle zuzuschreiben ist.

Kamine (inkl. Montage) liegen in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Verbrennungstechnik zwischen 750 und 2000€ (in Anlehnung an (Regionalenergie Steiermark, 2007) und (Hoval, 2007) und (Streicher et al., 2004a, S.172)).

Die Kosten für die Fußbodenheizung (inkl. Wärmeverteilung) werden mit 44€/m²Wohnfläche (inkl. MwSt. & Montage) abgeschätzt (ausgehend von (Hoval, 2007) und (Streicher et al, 2004, S.167)).

Die Installationskosten des kompletten Heizsystems (inklusive Warmwasser- und Pufferspeicher-Installation) werden mit 2700€ angesetzt. Ist nur ein Speicher einzubinden verringert sich der Aufwand auf 2000€ (in Anlehnung an (Hoval, 2007)).

Ausgehend von den in Abbildung 5-1, für selektiv beschichtete Flachkollektoren, dargestellten Daten, werden die Kosten abgeschätzt. Der 6m² Kollektor wird mit 3000€ und der 15m² Kollektor mit 6000€ angesetzt. Diese Kosten enthalten somit den Kollektor selbst, die Befestigung, Regelung, Umwälzpumpe und weiteres Zubehör. Die dazugehörige Montage der solarthermischen Anlage kostet zwischen 950€ und etwa 2000€. Wird der Sonnenkollektor neben der Brauchwassererwärmung auch zur Heizungsunterstützung genutzt, liegen die Montagekosten mit 1500 bis 2700€ etwas höher (Kosten orientiert an (Schriefl, 2007, S.191), (so-

larwaerme.at, 2008) und (Energieinstitut Vorarlberg, 2007)). Bei der Berechnung werden im Folgenden Montagekosten von 1700€ bzw. 2500€ angesetzt.

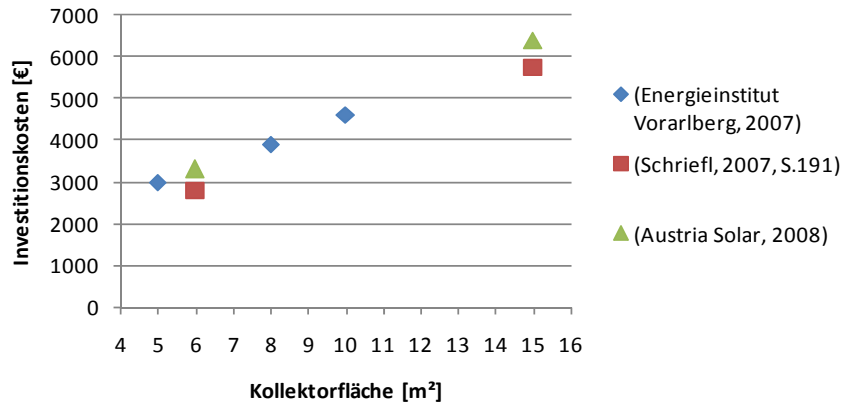


Abbildung 5-1: Investitionskosten für Solarkollektoren (inkl. Zubehör und MwSt.) in Abhängigkeit der Kollektorfläche (basierend auf Daten von (Energieinstitut Vorarlberg, 2007), (Schriefl, 2007, S.191) und (Austria Solar, 2008)¹.

Die Kosten für einen Trink-Warmwasserspeicher von 200Liter liegen bei etwa 900€. Soll auch eine Einbindung der Solaranlage möglich sein, kostet ein 400 Liter Speicher in etwa 1100 bis 1500€ (im Folgenden wird 1300€ angenommen). Ein Pufferspeicher mit 300 Liter kostet in etwa 780€. Soll der Pufferspeicher auch für die Einbindung eines Solarkollektors ausgelegt sein (teilsolare Raumheizung), kostet ein 500 Liter-Speicher in etwa 1580€ (ausgehend von (Vaillant, 2007), (Hoval, 2007), (Schriefl, 2007, S.191) und (Energieinstitut Vorarlberg, 2007)). Da eine Trinkwasserverteilung im Gebäude vorausgesetzt wird, wird im Folgenden angenommen, dass die Mehrkosten für ein zusätzliches Warmwasserrohr, im Rahmen der Montagekosten berücksichtigt werden.

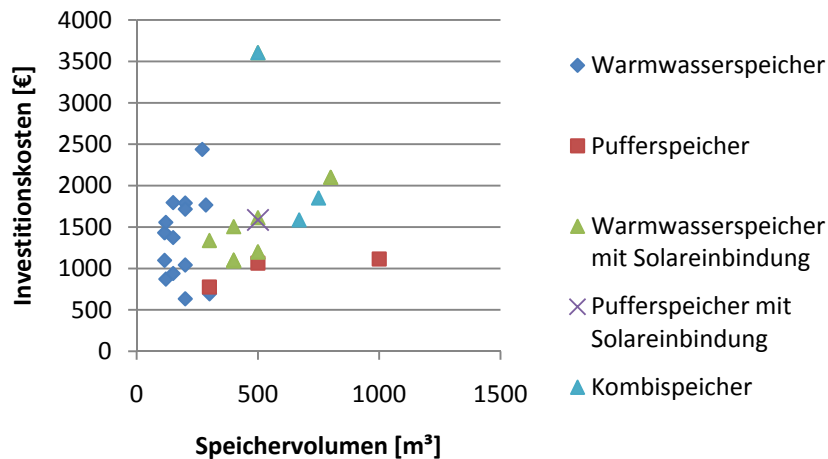


Abbildung 5-2: Marktanalyse von verschiedenen Speichern.

Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung (inkl. Montage und MwSt.) bewegen sich zwischen 6000 und 10000€ (Greml, Blümel, et al., 2004, Kap. 3.6.2). Im Weiteren wird daher von $55\text{€}/\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ ausgegangen. Das Lüftungsgerät mit WRG

¹ Die Daten von (Austria Solar, 2008) enthalten einen 300 bzw. 1000Liter Solarspeicher. Da im Diagramm nur Kosten ohne Speicher verglichen werden, wurden diese mit der Annahme von 1000€ bzw. 2500€ herausgerechnet.

selbst kostet davon, bei 275m³/h Fördervolumen, etwa 2600€ (in Anlehnung an (Hoval, 2007) und (Vaillant, 2007)).

5.1.2 Verbrauchsgebundene Kosten

Der Preis für den Haushaltsstrom wurde auf Datenbasis von e-control (2008a) berechnet. Die in dieser Quelle vorhandenen Daten stellen die Preise der günstigsten Lieferanten für September 2007, für den jeweiligen Netzbereich, getrennt dar. Die Preise gelten als repräsentativ für einen Modellhaushalt mit 3500kWh Jahresverbrauch und beinhalten alle Steuern, Abgaben und Zuschläge. Der daraus gemittelte und in Folge verwendete Preis beträgt somit 15,85cent/kWh. Evtl. jährliche Fixkosten werden hier nicht berücksichtigt, da der Stromanschluss ohnehin vorausgesetzt und somit nicht dem WBR-System zugerechnet wird.

Mit speziellen Stromtarifen von Energieversorgern für den Betrieb von Wärmepumpen können etwas geringere Strompreise von etwa 12cent/kWh (kein Nachtstrom-Tarif) angesetzt werden. Dabei sind aber jährlich etwa 35€ Fixkosten zu berücksichtigen¹.

Auch der Gaspreis für wird für einen durchschnittlichen Tarifkunden berechnet, wobei die von e-control (2008b) bereitgestellten Daten wiederum die für die jeweiligen Netzbereiche günstigsten Energielieferanten enthalten. Netzkosten, Rabatte, Steuern und Abgaben sind bereits inkludiert. Ausgehend von diesen Daten wird der Gaspreis mit 6cent/kWh angesetzt. Der Grundpreis wird mit 50€/Jahr definiert (als Quelle dienen Onlinedaten verschiedener Energieversorger²).

Der Preis für Fernwärme setzt sich aus einem Jahresleistungs-, einem Arbeits- und einem Messpreis zusammen. Der Jahresleistungspreis richtet sich nach dem vereinbarten Verrechnungsanschlusswertes und wird mit 20€/kW definiert (in Anlehnung an (EnergieAG, 2008; Schriefl, 2007, S.126)). Der Arbeitspreis für die gelieferte Wärme beträgt etwa 5,3cent/kWh³. Der Messpreis wird mit 120€/Jahr angesetzt (gilt außerhalb von Wien laut Schriefl (2007, S.126)).

Pellets kosten laut IWO (2008) 0,192€/kg. Wird von einem Heizwert von 4,9kWh/kg⁴ ausgegangen, ergeben sich somit rund 3,92cent/kWh.

Die Preise für Hackschnitzel werden entsprechend Daten vom September 2007 mit 2,8cent/kWh und Scheitholz mit 3,4cent/kWh angesetzt (inklusive Zustellung) (Regionalenergie Steiermark, 2008).

Tabelle 5-1: In der Berechnung verwendete Brennstoff- und Energiepreise.

	Brennstoff- bzw. Energiepreis [cent/kWh] (inkl. Steuern)	Fixkosten [€/Jahr] ⁵ (inkl. Steuern)
Gas	6,0	50
Pellets	3,92	-
Hackschnitzel	2,8	-
Stückholz	3,4	-
Fernwärme	5,3	Jahresleistungspreis: 20€/kW

¹ www.vkw.at, www.energieag.at

² www.energie-graz.at, www.linzag.at, www.tigas.at, www.veg.at

³ www.energie-graz.at, www.linzag.at, www.e-steiermark.com, www.energieag.at

⁴ (OÖ ESV, 2008a)

⁵ Außer Jahresleistungspreis.

		Messpreis	120
Strom	15,85	-	
Wärmestrom	12	35	

5.1.3 Betriebsgebundene Kosten

Die verwendeten betriebsgebundenen Aufwendungen (Wartungskosten) werden in Tabelle 5-2, gemeinsam mit den Nutzungsdauern und Instandhaltungsaufwänden, zusammengestellt.

Bei Streicher et al. (2004, S.176) werden für die Wartung und Instandhaltung von Lüftungssystemen jährlich 3,5% verwendet. Werden, wie in Tabelle 5-2 2% Instandhaltungsaufwände angesetzt, resultieren somit 1,5% jährliche Wartungskosten. Die Wartungskosten für die solarthermische Anlage belaufen sich jährlich etwa auf 0,5% der Investitionskosten (Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2008). Daraus ergeben sich, wiederum ausgehend von Streicher et al. (2004, S.176) Instandhaltungskosten von 1,5% der Investitionskosten.

Die Wartungskosten beim Kamin entsprechen den Rauchfangkehrerkosten (Regionalenergie Steiermark, 2007).

Tabelle 5-2: Zusammenstellung der für die Wirtschaftlichkeitsberechnung verwendeten Nutzungsdauern, Instandsetzungsaufwänden (als jährlicher Prozentsatz der Investitionskosten) und der Wartungskosten. Daten in Anlehnung an Oschatz & Mailach (2007, Kap. 2), Richter et al. (2002, Kap. 16.4, Streicher et al. (2004, Kap. 6.1.2) und Schriegl (2007, Kap. 5.3.1.2.1 und S.178) (eigene Annahmen vorhanden).

Anlagenkomponente	Abschreibedauer/ Nutzungsdauer ¹ [Jahre]	Jährlicher Instandhaltungs- aufwand	Jährliche Wartungs- kosten [€/Jahr] ²
Brennwertgerät	20	2%	110
Fernwärme Übergabestation	20	1%	-
Pelletsessel	20	1%	145
Hackschnitzel-Kessel	20	1%	150
Stückholz-Kessel	20	1%	145
Wärmepumpe Erdreich	20	3%	80
Wärmepumpe Luft	20	3%	80
E-Durchlauferhitzer	15	3%	-
Wärmeverteilung	40	1%	1%
Wärmespeicher	25	1%	1%
Fußbodenheizung	25	1%	-
Lageraum für Pellets, Hackschnitzel oder Stückholz	50	1%	-
Erdsonden	50	0,5%	-
Kamin für Erdgas Verbrennung	35	1%	40
Kamin für Biomasse Verbrennung	35	1%	86
Lüftungssystem	35	2%	1,5%
Solarkollektor	25	1,5%	0,5%

(alle %-Angaben beziehen sich auf die Investitionskosten)

¹ Die Abschreibedauer wird gleich der Nutzungsdauer gesetzt.

² Außer alle %-Angaben

Unter der Anlagenkomponente „Lüftungssystem“, ist sowohl die Verrohrung als auch die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zusammengefasst. Da für Rohrleitungen im Allgemeinen eine Nutzungsdauer von 40 Jahren angesetzt wird (Richter et al., 2002, Kap. 16.4), die Lüftungsanlage aber selbst mit 20 Jahren angenommen wird, ergibt sich mit den zuvor besprochenen, angenommenen Kosten eine gewichtete Nutzungsdauer von etwa 35 Jahren (siehe Formel (5-2)).

$$\text{Gewichtete Lebensdauer} = \frac{IK_1 \cdot LD_1 + IK_2 \cdot LD_2 + \dots + IK_n \cdot LD_n}{\sum_{i=1}^n IK_i} \quad (5-2)$$

IK_n ... Investitionskosten der jeweiligen Komponenten [€]

LD_n ... Lebensdauer der jeweiligen Komponenten [a]

(Formel in Anlehnung an (Streicher et al., 2004a, S.173))

5.2 Förderungen

Im Folgenden wird ein Überblick über Förderungen, die im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit behandelten WBR-Systemen möglich sind, gegeben.

Da die Vergabe von Fördermitteln regional stark differiert, werden im Folgenden die Förderungen für WBR-Systeme von Einfamilienhäusern (Neubauten), am Beispiel meiner Heimatstadt Laakirchen in Oberösterreich, zusammengestellt. Diese Zusammenstellung erfolgt auf Grundlage von Daten der Austria Energy Agency (2007c) und des oberösterreichischen Energiesparverbandes (2008b). Wie gesagt handelt es sich dabei nur um eine Zusammenfassung. Details, wie bestimmte Fördervoraussetzungen, sind bei Bedarf nachzulesen.

Grundsätzlich können Förderungen vom Bund, den Ländern, den Gemeinden oder von Energieversorgungsunternehmen gewährt werden. Letztere werden nicht berücksichtigt.

Bundesebene:

Solaranlagen zur Brauchwasserbereitung oder teilsolaren Raumheizung (inkl. Speicher, und Verrohrung) können bis zu einer Kollektorgröße von maximal 100m² förderungswürdig sein. Der Förderungssatz beträgt dabei „max. 30% der umweltrelevanten Investitionskosten“ (AEA, 2007c). Diese umweltrelevanten Investitionskosten betragen bei Standardkollektoren maximal 675€/m² und bei Vakuumkollektoren maximal 1000€/m². Die Summe dieser muss mindestens 5000€ betragen.

Der Anschluss an das Fernwärmenetz (Übergabestation, Einbindung ins Heizungsnetz...) kann bei umweltrelevanten Investitionskosten von mindestens 5000€ gefördert werden. Dabei beträgt die Höhe der Finanzhilfe bei der Nutzung von Fernwärme aus erneuerbaren Energieträgern maximal 30%, ansonsten maximal 15%. Anschlusskosten, Wärmeverteilungssysteme, Einzelraumregelungen oder Baukosten werden nicht gefördert.

Länderebene:

In Oberösterreich wird eine kontrollierte Raumlüftung mit Wärmerückgewinnung und Erdwärmetauscher mit 1400€ gefördert. Ist kein Erdwärmetauscher vorhanden, vermindert sich der Betrag auf 1100€. Dezentrale, raumluftechnische Geräte können mit 120€ je Einzelgerät gefördert werden. Anlagen ohne Wärmerückgewinnung werden nicht gefördert.

Solarkollektoren die zur Warmwasserbereitung und/oder Raumheizung verwendet werden, können einen Sockelbetrag von 1100€ und zusätzlich 75€/m² Standard-Kollektor bzw. 110€/m² Vakuum-Kollektor erhalten (maximal jedoch 3000€). Durch den Einbau eines Wärmemengenzählers wird der Zuschuss auf 100€/m² bzw. 140€/m² erhöht. Der Maximalbetrag beträgt dann 3800€. Die Förderungen können maximal 50% der Anlagenkosten betragen.

Pellets- und Hackgutanlagen können mit 30% der förderbaren Nettoinvestitionskosten, maximal jedoch 2200€ unterstützt werden. Bei Scheitholzanlagen können nur Spezialholzkessel (keine Universalkessel) eine Unterstützung von 25% der förderbaren Nettokosten (maximal 1500€) erhalten.

Wird eine Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung bzw. Übergangsheizung eingesetzt beträgt die Förderung 380€ und bei Verwendung als Heizungsanlage 1500€. Dazu muss allerdings die JAZ der Gesamtanlage für Wasser/Wasser- oder Erdwärmewärmepumpen mindestens 4, bei einer Tiefenbohrung mindestens 3,8 und bei einer Luft-Wärmepumpe mindestens 3 betragen. Bei einer integrierten Warmwasserbereitung vermindern sich die notwendigen Jahresarbeitszahlen um 0,2. Wird mit der Gesamtanlage eine Jahresarbeitszahl von 4,5 (oder darüber) erreicht, beträgt die Förderung der Beheizungsanlage 2200€.

Der Anschluss an ein Fernwärmenetz kann mit 880€ (Fernwärme aus nicht regenerativen Energieträgern) bzw. 1200€ (50% der Fernwärme aus regenerativen Energieträgern) gefördert werden.

Gemeinde:

Die gewählte Stadtgemeinde Laakirchen (im Bezirk Gmunden, OÖ) fördert Solaranlagen zur Warmwasserbereitung mit 110€ und bei zusätzlicher Verwendung zur Übergangsheizung mit 370€.

Davon ausgehend, kann bei den betrachteten WBR-Systemen die Lüftungsanlage mit 1400€, 6m² Kollektor mit 1660€ und 15m² Kollektor mit 2620€ gefördert werden. Aufgrund der ermittelten Investitionskosten werden der Pellets-, Hackgut- und Stückholzkessel mit den Maximalbeträgen von 2200€ bzw. 1500€ gefördert. Wird angenommen, dass die Wärmepumpen die Anforderungen an die benötigte JAZ erfüllen, werden die Wärmepumpen mit 1500€ unterstützt (die höhere JAZ von 4,3 wird nicht erreicht). Die veranschlagten Kosten für die Fernwärme-Übergabestation (inkl. Einbindung in das Heizungsnetz) sind zu gering um vom Bund gefördert zu werden. Wird angenommen, dass die Fernwärme zum größten Teil aus nicht regenerativen Energieträgern entsteht, kann sie mit 880€ von Land gefördert werden.

5.3 Ergebnisse

Ausgehend von den in den letzten beiden Abschnitten besprochenen Komponenten werden nun die jährlichen und flächenbezogenen Gesamtkosten der untersuchten Varianten mit bzw. ohne Förderungen verglichen.

Das Ergebnis der Berechnung, welche mittels Annuitäten-Methode durchgeführt wurde, wird in Abbildung 5-3 und geordnet in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Kosten werden aufgeschlüsselt in kapitalgebundene-, betriebsgebundene- und verbrauchsgebundene Kosten (Heizenergie bzw. Hilfsstrom) dargestellt.

Man erkennt, dass die Gesamtkosten von den Investitionskosten dominiert werden. Mit zusätzlichen Komponenten wie Lüftungssystemen oder Solaranlagen steigen neben den Investitionskosten auch die Betriebskosten. Interessant ist, dass unter den gemachten Voraussetzungen bei einem derart gut wärmegeprägten EFH die betriebsgebundenen Kosten die verbrauchsgebundenen teilweise übersteigen (hauptsächlich bei den Systemen, die neben einem Lüftungssystem auch noch über eine Solaranlage verfügen).

Die geringsten Kosten verursachen die Varianten des Luftheizsystems. Bei den Wasserheizsystemen sind Fernwärme, gefolgt vom Gas-Brennwert- und dem Stückholzkessel die finanziell günstigsten. Die konkreten Ergebnisse sind den Diagrammen zu entnehmen, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

Die Ergebnisse zeigen natürlich immer in Hinblick auf die gewählten Voraussetzungen, dass sich aus finanzieller Sicht die Investition in energieeffiziente Techniken wie Lüftungsanlagen und/oder Solarkollektoren leider noch nicht rentieren. Aus ökologischer Sicht, wie vorhin gezeigt wurde, aber sehr wohl.

Die Berechnungsergebnisse für das EFH mit dem HWB von $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ werden sortiert im Anhang (Abbildung A-21) dargestellt.

5. Ökonomischer Vergleich

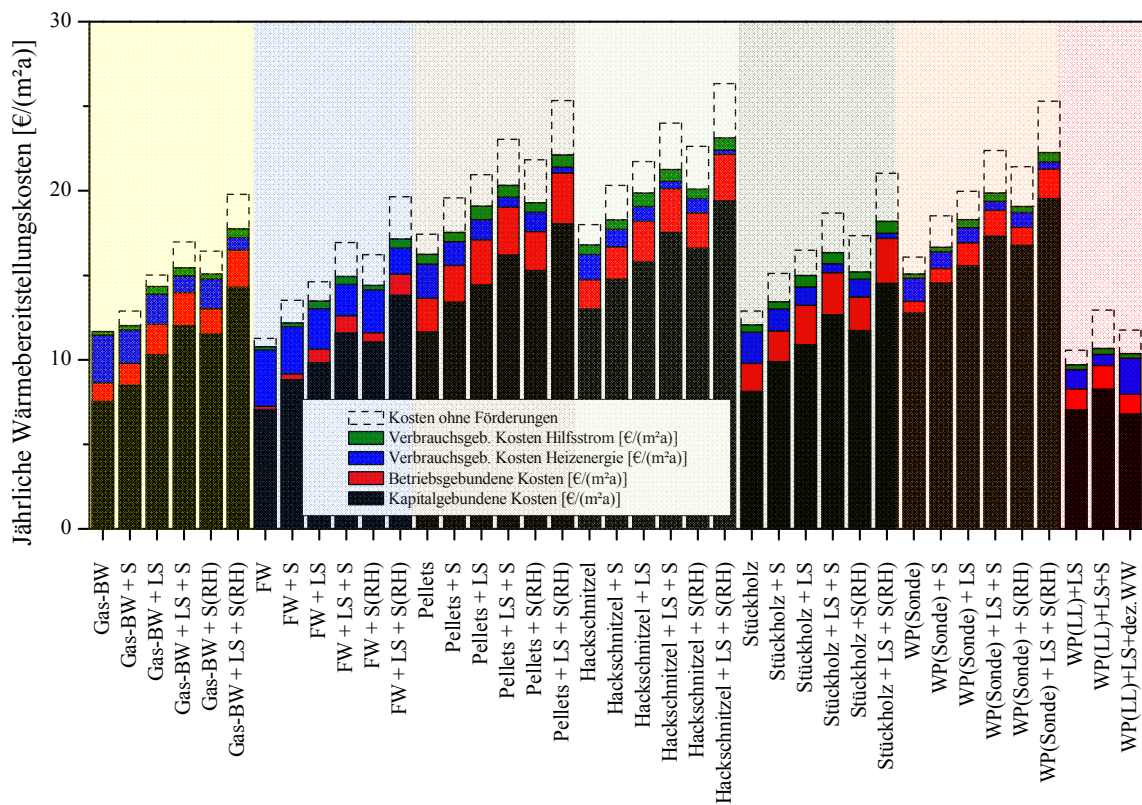


Abbildung 5-3: Kostenvergleich mit bzw. ohne Förderungen für das EFH mit einem HWB von 25kWh/(m²a) (Daten siehe Tabelle A-28 bis Tabelle A-34 (ohne Förderungen)).

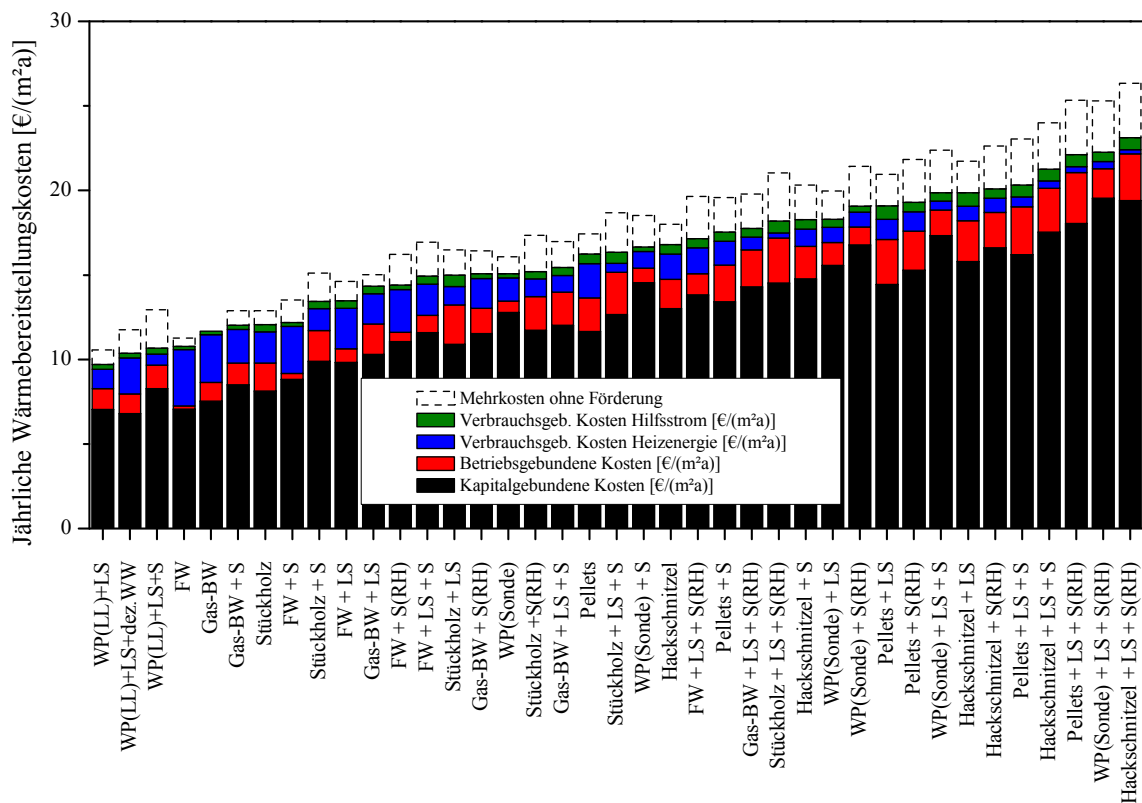


Abbildung 5-4: Darstellung der Werte für das EFH mit einem HWB von 25kWh/(m²a) aus dem vorigen Diagramm, sortiert nach der Höhe der Gesamtkosten.

5.4 Gegenüberstellung von Kosten und Energieeinsparungen

In Abbildung 5-5 wird gezeigt, welche energetischen Einsparungen sich durch höhere finanzielle Ausgaben in etwa erreichen lassen.

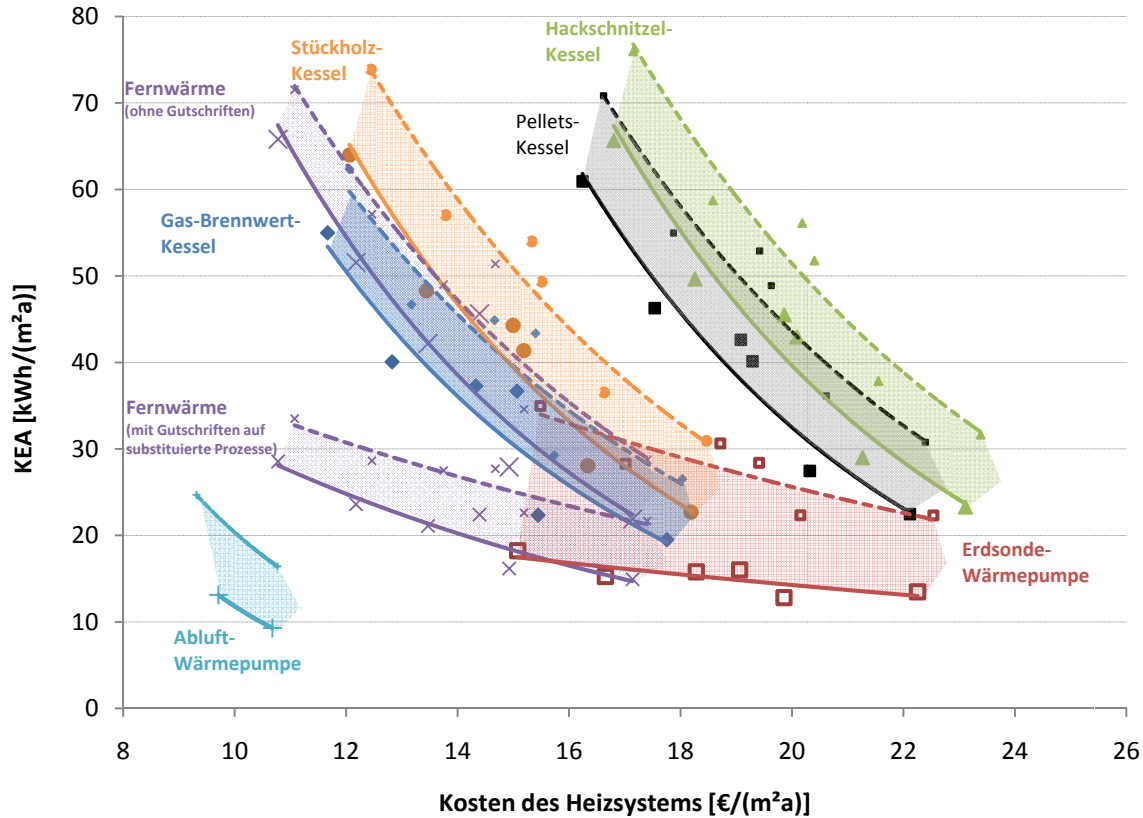


Abbildung 5-5: Kosten-Nutzen-Analyse: Abhängigkeit des gesamten KEA des Lebenszyklus von Heizsystemen in Abhängigkeit der Kosten.

Die ermittelten Werte des gesamten kumulierten Energieaufwandes werden für alle untersuchten Varianten¹ farblich unterschiedlich für jeden Wärmeerzeuger dargestellt. Für die Werte des KEA, die sich für den Fall des optimalen Endenergiebedarfs und dem Jahresstrommix (entsprechend Abbildung 4-29) ergeben, gelten die größeren Markierungen. Entsprechend gelten die kleineren Markierungen für jene kumulierten Energieaufwände, die sich bei maximalen Endenergiebedarfen und dem Winterstrommix (entsprechend Abbildung 4-30) ergeben. Die dafür ermittelten exponentiellen Trendlinien bilden die Grenzen der farblich hinterlegten Bereiche.

Betrachtet man zuerst die Wasserheizsysteme, fällt sofort auf, dass das Fernwärmeheizsystem (mit Gutschriften auf substituierte Prozesse)² und die Erdsonde-Wärmepumpe in der Grundvariante etwa die Hälfte des KEA des Gas-Brennwert- und der Biomasseheizsysteme aufweisen. Wichtig ist, dass dieser Vergleich auf dem gesamten aggregierten KEA basiert. Es muss somit berücksichtigt werden, dass ein wesentlicher Anteil bei den Biomasseheizsystemen durch erneuerbaren Energien gedeckt wird! Der Verlauf der sich ergibt, wenn als Kriterium

¹ Werte gelten für das EFH mit HWB = 25 kWh/(m²a)

² Die Beurteilung der Fernwärme-Heizsysteme hängt besonders stark von den gemachten Voraussetzungen ab. Je nachdem ob Gutschriften für substituierte Prozesse angesetzt werden oder nicht (siehe 4.3.2), ergibt sich ein deutlich anderer kumulierter Energieaufwand.

lediglich der nicht erneuerbare KEA der Nutzung und der KEA der Herstellung und Entsorgung (beinahe ausschließlich nicht erneuerbar) herangezogen wird, ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

Des Weiteren sieht man in Abbildung 5-5, dass zusätzliche primärenergetische Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus bei jenen Heizsystemen, welche bereits in der Grundvariante einen geringen KEA aufweisen, mit höheren Kosten verbunden sind.

Bei den Luftheizsystemen werden die Grundvariante (Abluft-Wärmepumpe und Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung) und jene, mit zusätzlichem Solarkollektor zur Warmwasserbereitung dargestellt. Der Fall der dezentralen Warmwasserbereitung mit elektrischen Durchlauferhitzern wird nicht miteinbezogen. Man erkennt, dass sich dies, sowohl aus gesamtenergetischer als auch aus ökonomischer Sicht, als besonders geeignet erweist.

Wird nun, wie bereits erwähnt, der nicht erneuerbare KEA als Kriterium herangezogen (Abbildung 5-6), kommt es hauptsächlich bei den Biomasseheizsystemen zu einer deutlichen Verbesserung. Dabei liegt der nichterneuerbare KEA im Bereich der Fernwärme und weist vor allem gegenüber dem Heizsystemen mit Gas-Brennwertkessel Vorteile auf. Bei Letzterem können mit zusätzlichen energieeffizienten Komponenten wie Solarkollektoren und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die größten Einsparungen an nichterneuerbarer Primärenergie mit moderaten Kosten erreicht werden. Bei Biomasseheizsystemen kommt es dabei aufgrund des zusätzlichen Hilfsstrombedarfs tendenziell zu einer leichten Erhöhung. Aus Gründen der Energieeffizienz (Abbildung 5-5) sind solche Komponenten aber besonders zu empfehlen.

Die Obergrenzen der farblich hinterlegten zu erwartenden Bereiche ändern sich, wenn lediglich der nichterneuerbare KEA (Abbildung 5-6) betrachtet wird, bei den Wärmepumpen- und den Gas-Brennwert-Heizsystemen gegenüber dem gesamten KEA (Abbildung 5-5) kaum, da auch dort im betrachteten worst-case beinahe ausschließlich nichterneuerbare Energieaufwände notwendig sind.

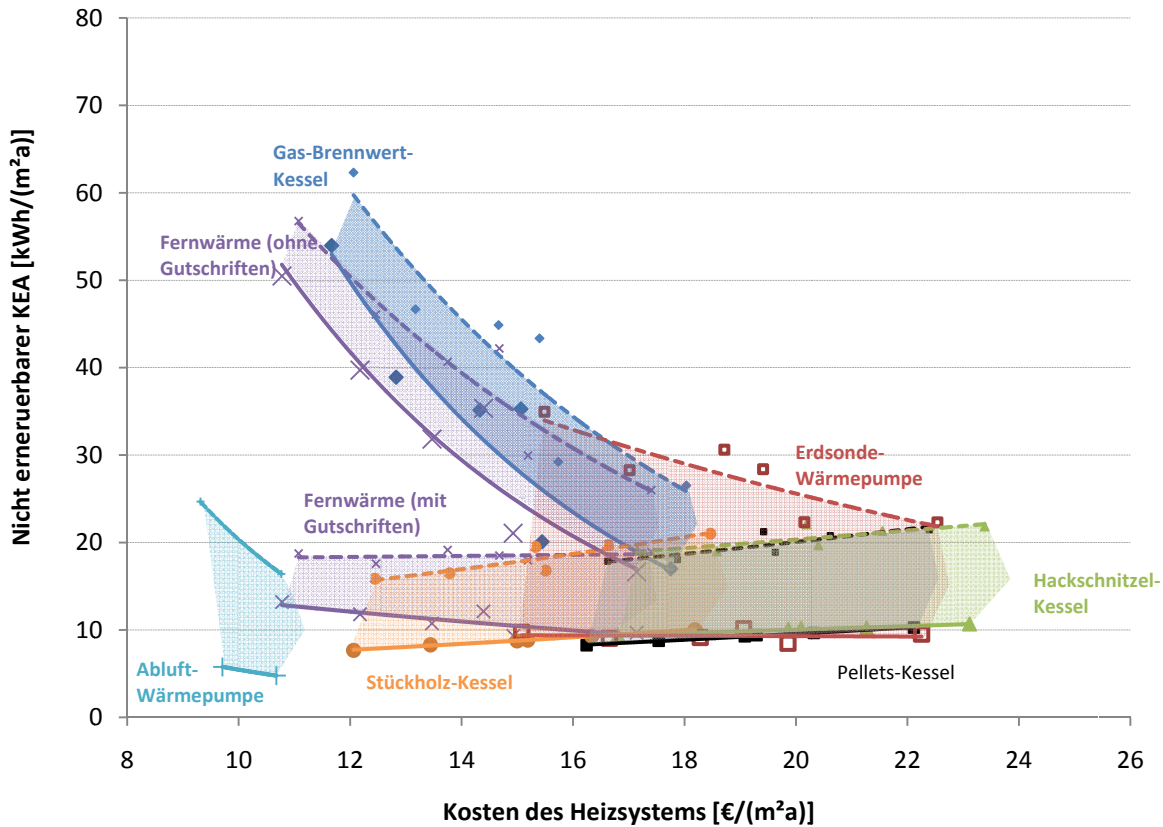


Abbildung 5-6: Kosten-Nutzen-Analyse: Abhängigkeit des nicht regenerativen KEA der Nutzung und des KEA der Herstellung und Entsorgung (hauptsächlich nichtregenerativ) von Heizsystemen in Abhängigkeit der Kosten.

Interessant ist, dass der nichterneuerbare KEA beim Heizsystem mit Erdsonde-Wärmepumpe und bei Verwendung energieeffizienter Komponenten, in den Bereich der Biomasseheizsysteme kommt. Eine genauere Untersuchung der Auswirkung der Verwendung von Solarkollektoren und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wird im Folgenden durchgeführt.

Es ist schwierig den Nutzen einer bestimmten Wärmeerzeugungstechnik zu quantifizieren. Je nachdem, welches Kriterium zur Bewertung herangezogen wird, sei es nun der gesamte notwendige KEA, nur der nicht erneuerbare Anteil oder bestimmte Emissionen, ergibt sich ein anderes Bild. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Kosten-Nutzen Analyse nicht für die verschiedenen Wärmeerzeugungstechniken untereinander durchgeführt, sondern untersucht, wie viel die Einsparungen an Primärenergie über den gesamten Lebenszyklus (KEA_{ges}) aus Sicht des Nutzers kosten, welche ausgehend von der Variante 1 des jeweiligen Systems, durch Solarkollektoren und/oder Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung erreicht werden können. In Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 werden die Ergebnisse zusammengestellt.

5. Ökonomischer Vergleich

Tabelle 5-3: Kosten-Nutzen-Analyse für zusätzliche Komponenten bei den untersuchten Wasserheizsystemen. Die Werte in der oberen Zeile gelten jeweils ausgehend vom HWB=25kWh/(m²a) und die Werte der darunterliegenden Zeile vom HWB=50kWh/(m²a). Die Werte links resultieren aus der Annahme eines optimalen Endenergiebedarfs und die Werte rechts durch ungünstige Voraussetzungen (kleinerer JNG/JAZ bzw. Winterstromerzeugungsmix) (siehe Kapitel 4.2).

	+ S	+ LS	+ LS + S	+ S(RH)	+ LS + S(RH)
	[cent/kWh]				
Gas-Brennwert	7,8 / 9,6	15,0 / 17,2	11,6 / 12,3	18,6 / 19,6	17,2 / 17,8
	7,8 / 10,1	15,0 / 17,6	11,5 / 12,5	18,4 / 19,3	16,6 / 17,4
Fernwärme	28,5 / 34,7	36,3 / 49,6	33,6 / 40,6	59,2 / 67,3	46,8 / 56,0
	28,5 / 35,3	36,3 / 50,0	33,6 / 40,8	58,1 / 66,5	46,3 / 55,4
Pellets	8,8 / 10,3	15,5 / 17,7	12,2 / 12,6	14,7 / 15,4	15,3 / 15,4
	9,3 / 11,4	18,3 / 21,7	13,9 / 14,8	15,9 / 17,2	15,7 / 15,8
Hackschnitzel	9,1 / 10,3	15,2 / 17,0	12,2 / 12,5	14,5 / 14,9	14,9 / 14,9
	9,6 / 11,0	17,7 / 20,1	13,7 / 14,3	15,6 / 16,4	15,4 / 15,3
Stückholz	8,8 / 10,3	14,9 / 16,4	11,9 / 12,2	13,8 / 14,1	14,8 / 14,9
	9,1 / 10,9	17,1 / 20,5	13,2 / 14,3	14,9 / 15,9	15,7 / 16,4
Erdsonde-Wärmepumpe	52,9 / 28,9	130,8 / 83,7	88,0 / 40,1	178,8 / 65,9	150,7 / 58,9
	55,1 / 31,2	114,1 / 55,1	82,4 / 38,8	172,0 / 65,6	136,5 / 55,5

Tabelle 5-4: Entspricht Tabelle 5-3, jedoch jetzt für das untersuchte Luftheizsystem. Die Werte gelten somit nun gegenüber der Grundvariante, die bereits über ein Lüftungssystem verfügt.

	+ S	+ dezentrale Warmwasserbereitung (elektro Durchlauferhitzer)
	[cent/kWh]	
Lüftungssystem mit WRG und Abluft-Wärmepumpe	25,37 / 12,80	-7,62 / -4,86
	--- / ---	--- / ---

Aus der Kosten-Nutzen-Analyse folgt somit, dass bei Heizsystemen, welche bereits in der Grundvariante, also ohne Solarkollektoren und Lüftungssysteme, einen geringen Energiebedarf aufweisen, wie es vor allem bei der Erdsonde-Wärmepumpe der Fall ist, jede weitere primärenergetische Einsparung durch diese Komponenten zu deutlich höheren Kosten führt. Die dezentrale Warmwasserbereitung mittels elektrischen Durchlauferhitzern weist negative Werte auf, da dadurch wieder ein höherer kumulierter Energieaufwand verursacht wird. Das Lüftungssystem weist höhere spezifische Kosten als der verwendete Solarkollektor zur Warmwasserbereitung auf, jedoch geringere als wenn dieser auch zur Raumheizung verwendet wird. Lediglich bei den Biomasseheizsystemen ist die solare Raumheizung mitunter etwas günstiger, da dort bereits in der Grundvariante ein Pufferspeicher vorgesehen wurde.

In Abbildung 5-7 wird der gesamte KEA, der sich bei den Wasserheizsystemen¹, ausgehend von der Grundvariante (100% kumulierter Energieaufwand und 0% Mehrkosten), bei entsprechenden Mehrkosten ergibt, dargestellt. Die dabei dargestellte Trendlinie geht durch die jeweils effizientesten Varianten, die bei geringsten Zusatzkosten die maximalen primärenergetischen Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus ermöglichen. Beim Wärmeerzeuger Wärmepumpensonde sind dies zwei Varianten, ansonsten immer drei. Man sieht, dass durch den Solarkollektor zur Warmwasserbereitung (6m²) mit den geringsten Mehrkosten deutliche Einsparungen möglich sind. Bei etwa 10% höheren Kosten gegenüber der Grundvariante können bei den Gas-Brennwert- und den Biomasseheizsystemen etwa 25% an Primärenergie über den gesamten Lebenszyklus eingespart werden. Bei den Heizsystemen Fernwärme und

¹ EFH mit HWB = 25kWh/(m²a)

5. Ökonomischer Vergleich

Erdsonde-Wärmepumpe, welche bereits in der Grundvariante einen geringen KEA aufweisen (siehe Abbildung 5-5), liegen die energetischen Einsparungen niedriger, bei etwa 18%. Dieser Trend ist auch, wie bereits erwähnt, durch den flacheren Verlauf des erwarteten Bereichs in Abbildung 5-5 zu erkennen. Wird zusätzlich ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung verwendet, liegen die primärenergetischen Einsparungen bei Biomasse- und Gas-Brennwert-Heizsystemen im Bereich von beachtlichen 55-65%. Bei Fernwärme und Erdsonde-Wärmepumpe sind diese wiederum geringer. Als dritter effizienter Punkt ergibt sich, außer bei der Erdsonde-Wärmepumpe, die Kombination aus Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung und Solarkollektor mit 15m² zur Warmwasserbereitung und teilsolaren Raumheizung. Die Varianten nur mit Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung bzw. nur mit 15 m² Solar- kollektor liegen in keinem Fall auf der Frontierlinie.

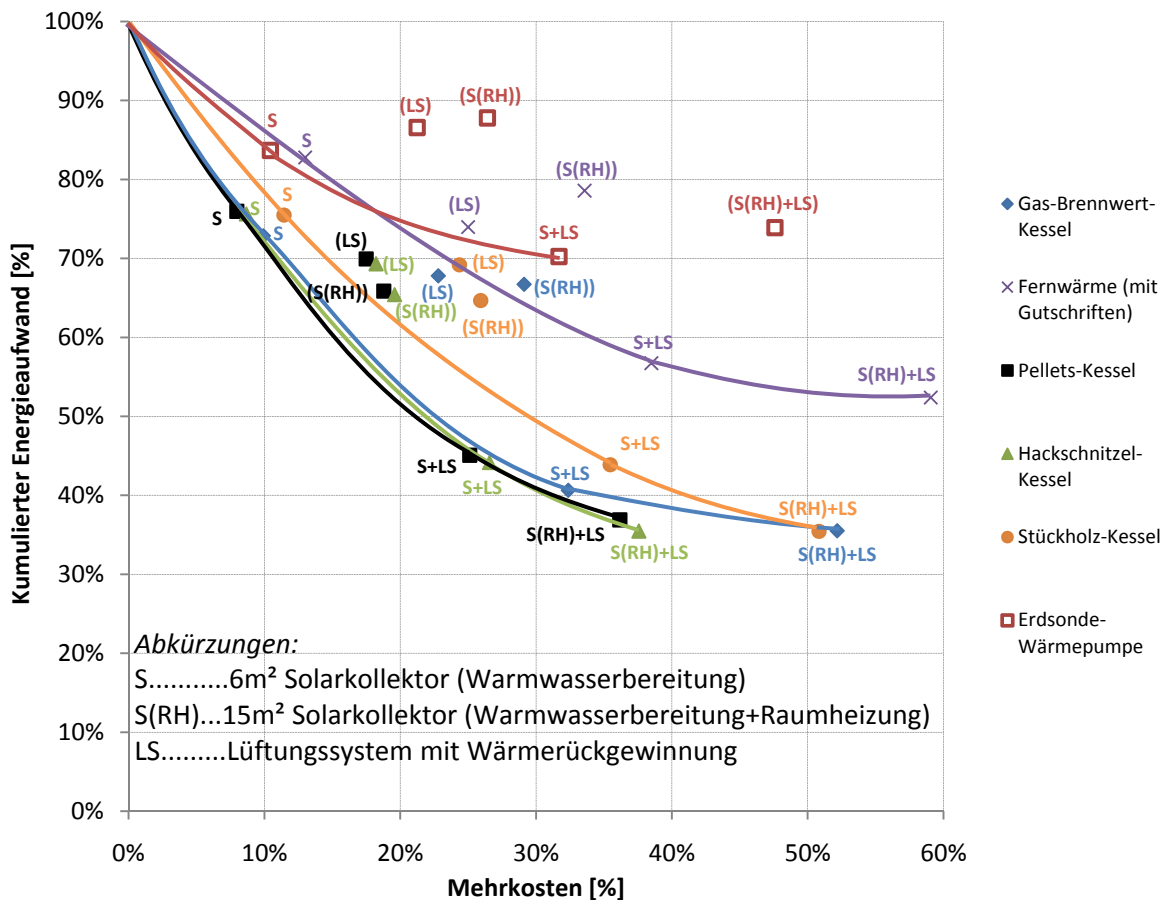


Abbildung 5-7: Mögliche Primärenergieeinsparungen durch Solarkollektoren und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Trendlinie kennzeichnet Komponenten mit optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnis (Werte ohne Klammer gekennzeichnet).

5. Ökonomischer Vergleich

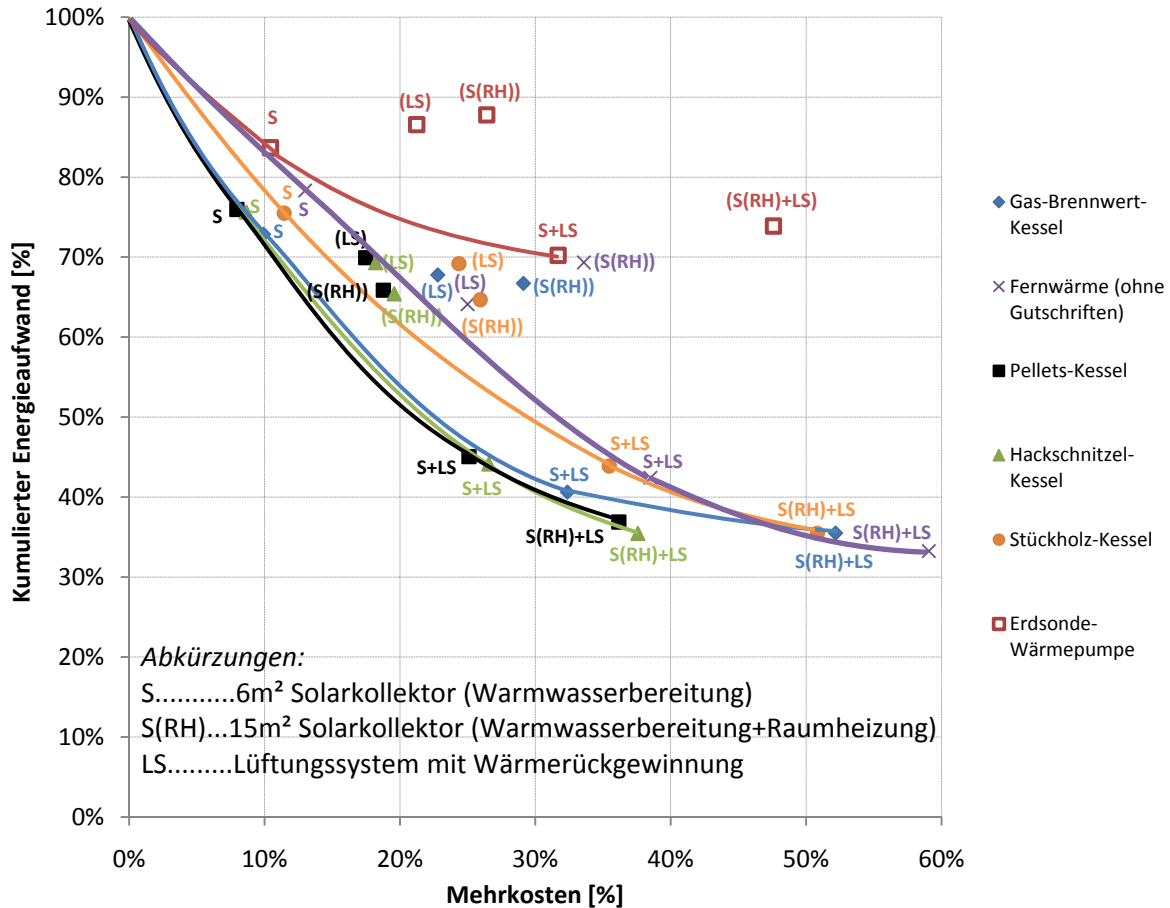


Abbildung 5-8: Gleiches Diagramm wie Abbildung 5-7, nur dass hier das Fernwärme-Heizsystem ohne Gutschriften untersucht wird (näheres dazu siehe Kapitel 4.3.2).

Im Folgenden wird angenommen, dass ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung vorausgesetzt sein soll. Dies ist z.B. im Regelfall bei Passivhäusern der Fall, da ansonsten kaum ein Heizwärmebedarf unter 15kWh/(m²a) möglich wird. Außerdem kann solch ein Lüftungssystem auch als Gründen des Komforts und der Gesundheit als Grundvoraussetzung angesehen werden. Greml, Blümel, Kapferer & Leitzinger (2004, S.234) fassen dies folgendermaßen zusammen: „Die Investition in eine Lüftungsanlage ist vor allem eine Investition in Komfort, Gesundheit und Umweltschutz. Die Energieeinsparungen übersteigen zwar die laufenden Kosten für Filter und Strom, eine wirtschaftliche Amortisation der gesamten Anlage ist bei den derzeitigen Energiepreisen jedoch nicht zu erwarten“. Abbildung 5-9 zeigt nun sowohl für die Wasser- als auch für das Luftheizsystem, welcher Kosten-Nutzen-Verlauf sich bei zusätzlicher Verwendung von Solarkollektoren ergibt. Dabei wird von jenen Varianten ausgegangen (100% KEA, 0% Mehrkosten), bei denen ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung vorhanden ist. Man sieht auch hier, dass es durch 6m² Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung in allen zu Einsparungen kommt. Bei Biomasse- und Gas-Brennwert-Heizsystemen sind diese wieder am größten. Besonders interessant ist nun die Tatsache, dass es beim Wasserheizsystem mit Erdsonde-Wärmepumpe, wenn ein 15m² Solarkollektor, der neben der Warmwasserbereitung auch zur Raumwärmebereitstellung eingesetzt wird, zu einer Verringerung des primärenergetischen Nutzen kommt! Dies ergibt sich in diesem Fall daraus, dass die Aufwände für die Herstellung gegenüber den zusätzlichen Einsparungen überwiegen (siehe auch aus Abbildung 4-29).

5. Ökonomischer Vergleich

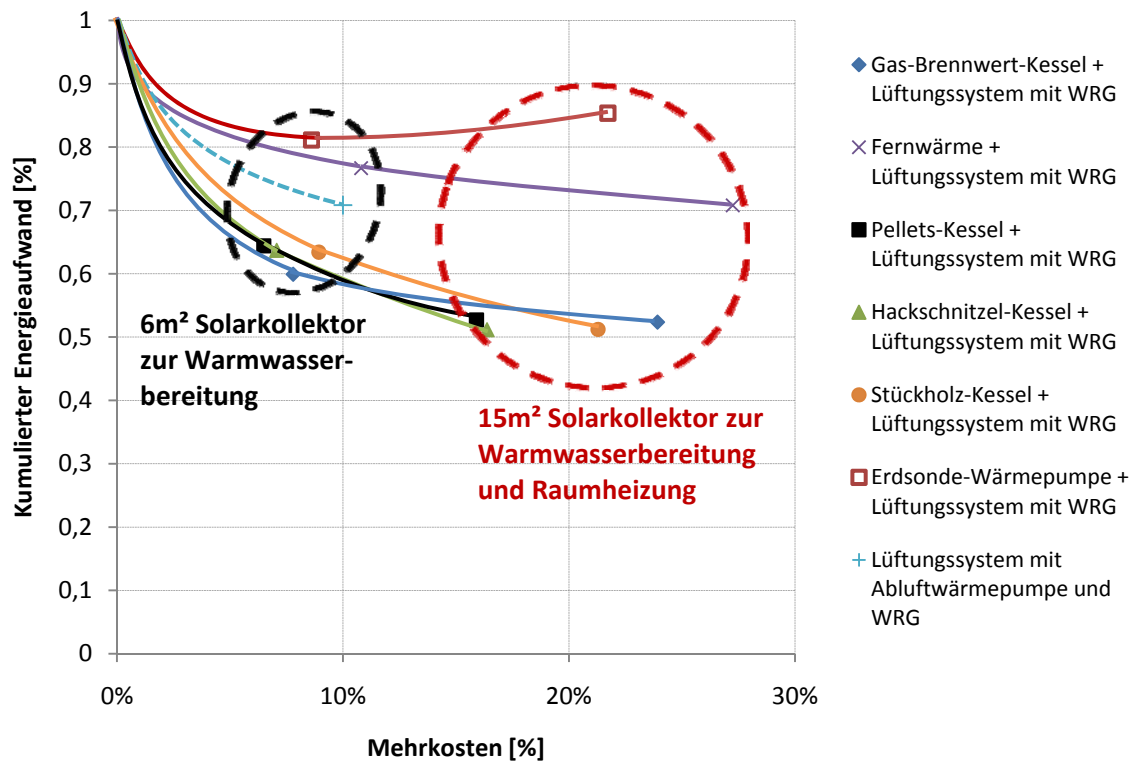


Abbildung 5-9: Mögliche Primärenergieeinsparungen durch Solarkollektoren, wenn ein Lüftungssystem als Voraussetzung angesehen wird.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden zuerst die Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit zusammengefasst. Danach werden noch Aspekte erwähnt, die nicht behandelt werden konnten, aber hinsichtlich dieser Thematik von Interesse sind und somit Ausgangspunkt für weitere Studien sein könnten.

6.1 Schlussfolgerungen

- 1) Der Primärenergieaufwand für die Herstellung (und Entsorgung¹) von Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssystemen kann bei Verwendung energieeffizienter Komponenten wie Solarkollektoren und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bis zu 55% des gesamten kumulierten Energieaufwandes betragen. Somit ist es bei Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf wichtig, diesen in einen ökonomischen Vergleich mit einzubeziehen (siehe Kapitel 4.5.3).
- 2) Der Strombedarf hat neben den elektrisch betriebenen Wärmepumpen auch bei den anderen Heizsystemen, durch den Betrieb der Nebenaggregate, einen wesentlichen Anteil am Endenergiebedarf, weshalb dem Erzeugungsmix in allen Fällen eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der ökologischen Auswirkungen der Heizsysteme zukommt (siehe Kapitel 4.5.3).
- 3) Die Verwendung sowohl von Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung als auch von Solarkollektoren führt, trotz des zusätzlichen Aufwandes bei der Herstellung, zu einer meist deutlichen Senkung des Primärenergiebedarfs bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus.
Es zeigt sich jedoch, dass es bei den Heizsystemen mit Erdsonde-Wärmepumpe, welche einen geringen kumulierten Energieaufwand aufweisen, zu einer Trendumkehr kommen kann. Wird hierbei anstelle des 6m² Kollektors zur Warmwasserbereitung einer mit 15m² verwendet, welcher auch zur Raumheizung eingesetzt wird, überwiegen die zusätzlichen Energieaufwände für die Herstellung gegenüber den zusätzlichen Einsparungen bei der Nutzung. Daraus folgt, dass es aus energetischer Sicht nicht sinnvoll sein muss, den Energiebedarf der Nutzung mit den untersuchten Komponenten beliebig weit zu senken, wie es beispielsweise bei Nullenergiehäusern der Fall ist (siehe Kapitel 4.5.3 und 5.4).
- 4) Der Mehraufwand zur Herstellung der Wärmedämmung, um Niedrigenergiehäuser auf den Passivhausstandard zu verbessern, hat sich in allen untersuchten Fällen als energetisch sinnvoll erwiesen (siehe Kapitel 4.5.4).
- 5) Bei den CO₂-Äquivalent-Emissionen weisen die Biomasseheizsysteme, aufgrund der CO₂-Neutralität der Verbrennung grundsätzlich Vorteile auf. Jedoch können auch durch Wärmepumpenheizsysteme in Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf, die zusätzlich mit einem Solarkollektor und einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden, kaum höhere Emissionen erreicht werden. Dies ist beachtlich, da es zeigt, dass der notwendige Hilfsstrom in jene Größenordnung kommt, wo der Vorteil der Verwendung von CO₂-neutralem Brennstoff nicht mehr gegeben sein muss.

¹ Kann im Regelfall wegen Gutschriften beim Recycling vernachlässigt werden.

Bei den untersuchten SO₂-, TOPP-Äquivalent- und Staubemissionen zeigt sich, dass hier die Wärmepumpen grundsätzlich Vorteile gegenüber den Biomasseheizsystemen aufweisen (siehe Kapitel 4.6.4).

- 6) Als finanziell günstigstes Heizsystem in Niedrigenergiehäusern erweist sich (falls möglich) der Anschluss an ein Wärmenetz. Ansonsten kommt es bei den Wärmeerzeugern Gas-Brennwert- bzw. Stückholzkessel zu den geringsten Gesamtkosten. Letztere weisen aber Nachteile im Komfort auf, da die Möglichkeit einer automatischen Beschickung fehlt.
Für den Einsatz in Passivhäusern weisen Luftheizsysteme (Wärmeträgermedium ist Luft) mit Abluft-Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung sowohl energetische als auch ökonomische Vorteile auf (siehe Kapitel 5.4).
- 7) Bei den untersuchten Systemen kommt es durch die Investition in Solarkollektoren oder Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung noch zu keiner Verringerung der Gesamtkosten. Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung erweisen sich dabei als effektivste Möglichkeit zur Einsparung an Primärenergie. Durch etwa 8-13% höhere Kosten können primärenergetische Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus von etwa 15-30% erzielt werden (siehe Kapitel 5.4).

6.2 Was bleibt offen?

Interessante Aspekte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden konnten, sind, zu welchen Unterschieden es im Vergleich zu Einfamilienhäusern bei Mehrfamilienhäusern kommt und welche Emissionen bei der Herstellung der heiztechnischen Komponenten selbst verursacht werden. Da die berechneten Betriebskosten, insbesondere bei Verwendung von Komponenten wie Solarkollektoren und Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung, einen beträchtlichen Anteil der Gesamtkosten ausmachen, wäre es interessant, z.B. über eine Nutzerbefragung zu klären, inwieweit dies mit in der Praxis tatsächlich auftretenden Kosten übereinstimmt. Da sich gezeigt hat, dass Luftheizsysteme eine ökologisch und ökonomisch sehr sinnvolle Variante darstellen können, wären weitere Studien dazu, wie z.B. eine Untersuchung der Potentiale von solaren Luftkollektoren und deren Akzeptanz, von Bedeutung.

7 Zusammenfassung

Niedrigenergie- und Passivhäuser gelten als wichtiger Beitrag um nachhaltige Energiesysteme und eine Senkung der Treibhausgas-Emissionen zu ermöglichen. Der Energieaufwand der dabei für die Herstellung und Entsorgung der Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssysteme benötigt wird, ist, wie auch die Bedeutung des Hilfsstrombedarfs, bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus noch weitgehend ungeklärt und wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Zur ökologischen Beurteilung werden der kumulierte Energieaufwand (KEA¹) und die energiebedingten Emissionen der Nutzung (CO₂-, SO₂-, TOPP-Äquivalent und Staub) von 39 Heiz-, Warmwasserbereitungs-, und Lüftungssystemen in einem Referenz-Passiv- und einem Niedrigenergiehaus² bestimmt. Zusätzlich werden auch noch die für die Anwender während der gesamten Nutzungsdauer zu erwartenden Kosten berechnet.

Ausgangsbasis für alle weiteren Berechnungen bildet eine umfangreiche Literaturanalyse. Davon ausgehend kann der KEA der Herstellung und Entsorgung abgeschätzt werden. Mit geeigneter Software werden die verschiedenen Heizsysteme modelliert, um so den zu erwartenden Endenergiebedarf zu bestimmen. Davon ausgehend wird mit Hilfe der Primärenergiefaktoren, welche mit Hilfe der Software GEMIS bestimmt werden, der KEA der Nutzung berechnet. Auch die energiebedingten Emissionen der Nutzung werden durch mit GEMIS bestimmte Emissionsfaktoren aus dem Endenergiebedarf bestimmt.

Als Wärmeerzeuger für Niedrigenergiehäuser werden ein Gas-Brennwert-, Pellets-, Hack-schnitzel- und Stückholzkessel, Fernwärme und eine Erdsonde-Wärmepumpe untersucht. Die Wärmeabgabe erfolgt bei all diesen Systemen über eine Fußbodenheizung. Zu jedem dieser Wärmeerzeuger werden sechs verschiedene Varianten modelliert (siehe Abbildung 7-1)³. Zusätzlich zur Grundvariante werden dabei Solarkollektoren und Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung vorgesehen. Neben diesen Wasserheizsystemen werden auch drei Luftheizsysteme (Wärmeträgermedium ist Luft) mit Abluft-Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung untersucht. Diese Systeme können allerdings, aufgrund der maximal möglichen Heizlast von etwa 10-12W/m², im Regelfall nur in Passivhäusern eingesetzt werden. Die farblich dargestellten Werte in Abbildung 7-1 resultieren aus der Berechnung für ein Passivhaus. Strichliert angedeutet werden die Werte für das Niedrigenergiehaus.

Bei existierenden durchschnittlichen Einfamilienhäusern wird der gesamte kumulierte Energieaufwand meist deutlich von der Nutzungsphase geprägt und der Aufwand für die Herstellung der Komponenten kann näherungsweise vernachlässigt werden. Bei den untersuchten Niedrigenergie- und Passivhäusern, die evtl. noch über Solarkollektoren und mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung verfügen, ist dies im Allgemeinen aber nicht mehr zulässig. Es zeigt sich nämlich, dass der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung der Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssysteme mehr als 50% ausmachen kann, wobei dieser im Regelfall beinahe ausschließlich nicht regenerativ ist. Da die modellierten Luftheizsysteme über keine Fußbodenheizung verfügen, welche besonders energieintensiv in der

¹ Definiert, wie viel Primärenergieaufwand nötig ist, um ein Produkt herzustellen, zu nutzen und zu entsorgen.

² Jeweils Einfamilienhäuser.

³ Abkürzungen: Gas-BW: Gas-Brennwertkessel; FW: Fernwärme; WP(Sonde): Erdsonde-Wärmepumpe; WP(LL): Luftheizsystem mit Abluft-Wärmepumpe; S: 6m² Solarkollektor zur Warmwasserbereitung; S(RH): 15m² Solarkollektor zur Warmwasserbereitung und Raumheizung; LS: Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung; dez.WW: dezentrale Warmwasserbereitung mit elektrischen Durchlauferhitzern.

Herstellung ist, weisen diese einen vergleichsweise geringen KEA der Herstellung auf (siehe Abbildung 7-1).

Die konkreten Werte des kumulierten Energieaufwandes der Herstellung sind aber insofern kritisch zu betrachten, da es bedingt durch die verschiedenen Konstruktionsweisen verwendeten Materialien und lokalen Gegebenheiten (z.B. Art der Gesteinsformationen bei der Verlegung von Erdsonden) zu einer großen Bandbreite kommen kann und die Daten auf verhältnismäßig wenig Literaturquellen beruhen.

Auch zum kumulierten Energieaufwand der Entsorgung liegen relativ wenige Untersuchungen vor. Allerdings zeigt sich, dass es dabei kaum zu einer Erhöhung des gesamten kumulierten Energieaufwandes kommt. Vielmehr wird dieser durch Gutschriften auf Materialien die wiederverwertet werden verringert, wobei jedoch die eingesetzte Entsorgungsmethode von Bedeutung ist.

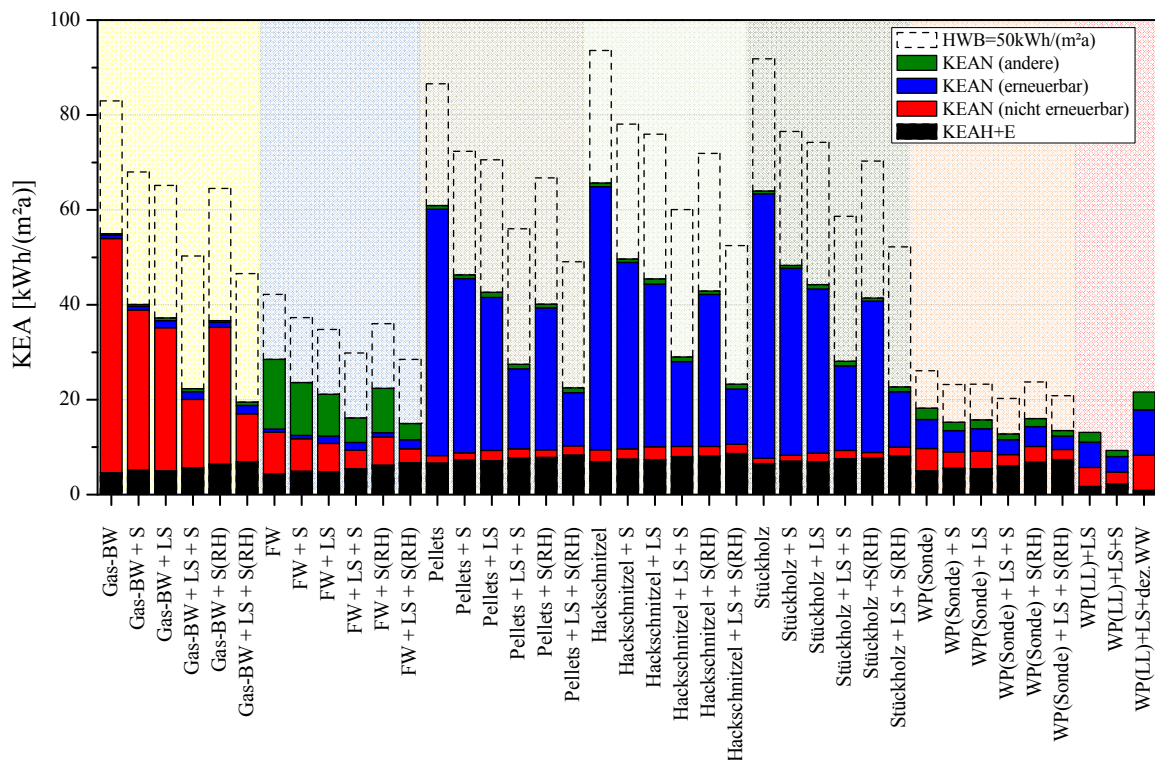


Abbildung 7-1

Aufgrund der günstigen Voraussetzungen in Niedrigenergie- und Passivhäusern können elektrisch betriebene Wärmepumpen hohe Jahresarbeitszahlen erreichen und ermöglichen dadurch geringe Primärenergieaufwände bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (siehe Abbildung 7-1). Um die ebenfalls niedrigen Werte der Fernwärme-Heizsystemen beurteilen zu können, sind die Voraussetzungen zur Bestimmung des Energieaufwandes der Nutzung von entscheidender Bedeutung. In der Software GEMIS, welche zur Bestimmung der Primärenergiefaktoren benutzt wurde, hängt das Ergebnis stark davon ab, ob Gutschriften auf substituierte Prozesse angesetzt werden oder nicht. Wird beispielsweise angenommen, dass ein Heizkraftwerk hauptsächlich zur Stromerzeugung dienen soll, kann die genutzte Abwärme als Nebenprodukt betrachtet werden. Für diese können dann Gutschriften in der Höhe angesetzt werden, die ansonsten zur Bereitstellung durch andere Heizsysteme anfallen würde. Werden solche Gutschriften, wie in Abbildung 7-1 verwendet, fällt der berechnete kumulierte Energieaufwand der Nutzung deutlich niedriger aus als wenn nicht (Vergleich in Abbildung 7-5).

Bei der Beurteilung der Fernwärme-Heizsysteme ist allerdings auch die Effizienz der Wärmenetze selbst zu berücksichtigen. Der verbreitete Einsatz von Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf in zersiedelten Gebieten kann aufgrund der geringeren Leistungsdichte diese in Frage stellen, was aber in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird.

Die Heizsysteme mit Gas-Brennwertkessel werden lediglich als Vergleichstechnik in die Untersuchung mit einbezogen, sind aber, trotz des sehr guten Wirkungsgrades des Wärmeerzeugers, wegen der Verwendung eines fossilen Brennstoffes, nicht als zukunftsträchtiges Heizsystem anzusehen.

Die energetischen Einsparungen im Betrieb, welche durch die Verwendung von Solarkollektoren und Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung erreicht werden können, überwiegen gegenüber dem zusätzlichen Aufwand bei der Herstellung meist deutlich. Jedoch zeigt sich, dass dies ab einem gewissen Punkt nicht mehr der Fall sein muss. Wird eine Wärmepumpe als Wärmeerzeuger eingesetzt, wodurch das Heizsystem einen sehr geringen Endenergiebedarf aufweist, übersteigen bei Verwendung eines 15m² Kollektors anstelle des 6m² Kollektors die zusätzlichen energetischen Aufwendungen bei der Herstellung die zusätzlichen Einsparungen bei der Nutzung, welche dadurch erreicht werden können.

Die durch die benötigte elektrische Energie entstehenden kumulierten Energieaufwände der Nutzung werden in Abbildung 7-1 mit Hilfe des Stromerzeugungsmixes Österreichs des gesamten Jahres 2006 berechnet. Dabei werden etwa 50% aus erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt. Wird hingegen angenommen, dass jede zusätzlich benötigte elektrische Energieeinheit durch thermische Kraftwerke bereitgestellt werden muss¹, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 7-2. Man erkennt deutlich die höheren nicht regenerativen Anteile.

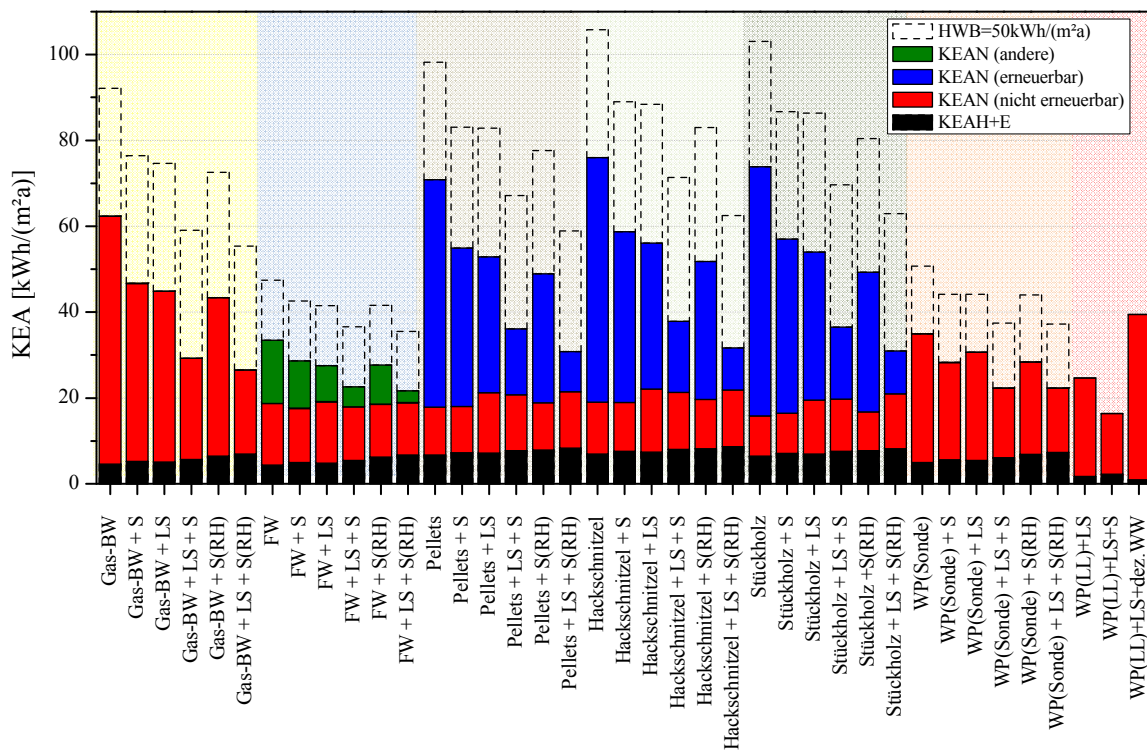


Abbildung 7-2

¹ Entspricht näherungsweise einer Grenzbetrachtung im Winter.

Da neben den elektrisch betriebenen Wärmepumpen auch der Strombedarf der Nebenaggregate einen wesentlichen Anteil am Endenergiebedarf von Niedrigenergie- und Passivhäusern ausmacht, hat der betrachtete Stromerzeugungsmix entsprechend großen Einfluss auf den resultierenden kumulierten Energieaufwand. Abbildung 7-3 zeigt, welchen Anteil der aus dem benötigten Strombedarf resultierende Primärenergiebedarf am gesamten KEA der Nutzung hat.

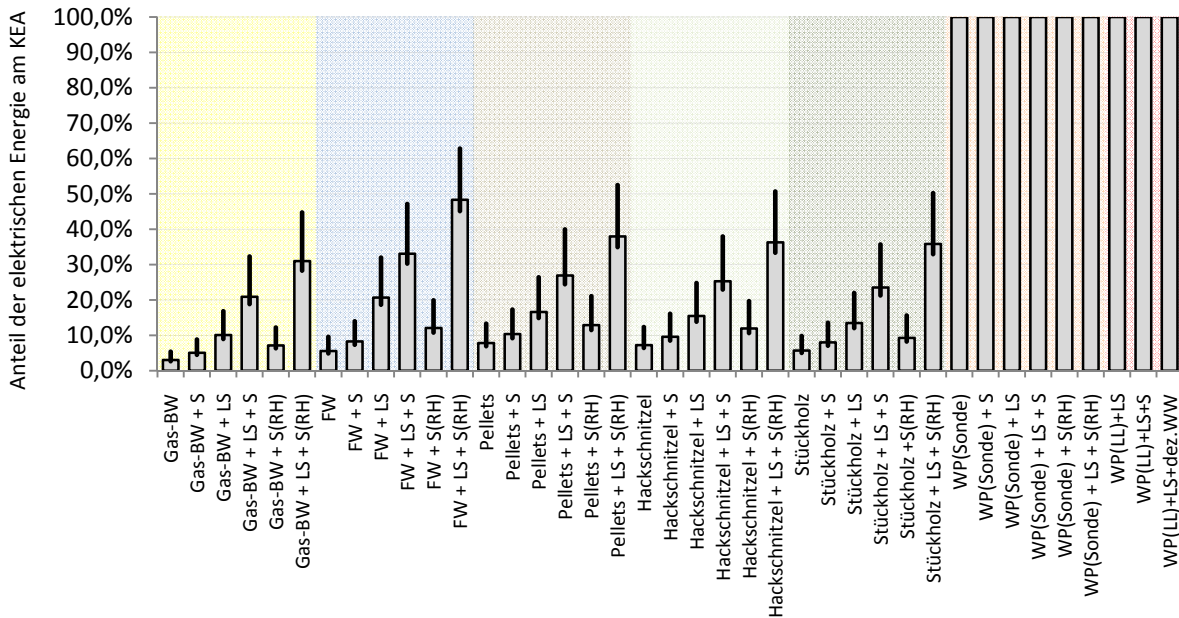


Abbildung 7-3

Anhand einer Analyse von verschiedenen Studien wird ermittelt, dass der zusätzliche kumulierte Energieaufwand, der zur Verbesserung der Wärmedämmung vom Niedrigenergie- zum Passivhausstandard notwendig ist, mit etwa 6,2 kWh/(m²a) abgeschätzt werden kann. Trotz dieses zusätzlichen Aufwandes erweist sich die Anwendung in allen untersuchten Fällen als energetisch sinnvoll.

Verwendet man zur ökologischen Beurteilung den kumulierten Energieaufwand als Kriterium, zeigt sich, dass es wichtig ist, diesen auch in disaggregierter Form zu untersuchen, da es ansonsten zu falschen Schlussfolgerungen kommen kann. Beispielsweise kommt es bei den Biomasseheizsysteme zu einem höheren KEA, wobei allerdings ein überwiegender Anteil aus erneuerbaren Energien stammt. Wird hingegen nur der nicht-erneuerbare Energieaufwand als Kriterium verwendet, kommt es dabei zu deutlichen Vorteilen z.B. gegenüber dem Gas-Brennwertkessel. Allerdings ist es im Sinne der energetischen Effizienz auch nicht zielführend, nur den nicht-erneuerbaren Anteil als entscheidend zu erachten. Vielmehr ist es somit notwendig, die Beurteilung auf verschiedenen Kriterien basierend, durchzuführen.

Neben dem kumulierten Energieaufwand werden auch energiebedingte Emissionen der Nutzung als Beurteilungskriterium herangezogen. Auch hier kommt es bei den Heizsystemen zu unterschiedlichen Vor- und Nachteilen. Bei den CO₂-Äquivalent-Emissionen (Abbildung 7-4) weisen die Biomasseheizsysteme aufgrund der CO₂-Neutralität der Verbrennung grundsätzlich Vorteile auf. Jedoch können auch durch Wärmepumpenheizsysteme in Wohnhäusern mit niedrigem Energiebedarf, die zusätzlich mit einem Solarkollektor und einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet werden, kaum höhere Emissionen erreicht werden. Dies ist beachtlich, da es zeigt, dass der notwendige Hilfsstrom in jene Größenordnung kommt, wo der Vorteil der Verwendung von CO₂-neutralem Brennstoff nicht mehr gegeben

sein muss. Bei den untersuchten SO₂-, TOPP-Äquivalent- und Staubemissionen zeigt sich, dass hier die Wärmepumpen grundsätzlich Vorteile gegenüber den Biomasseheizsysteme aufweisen.

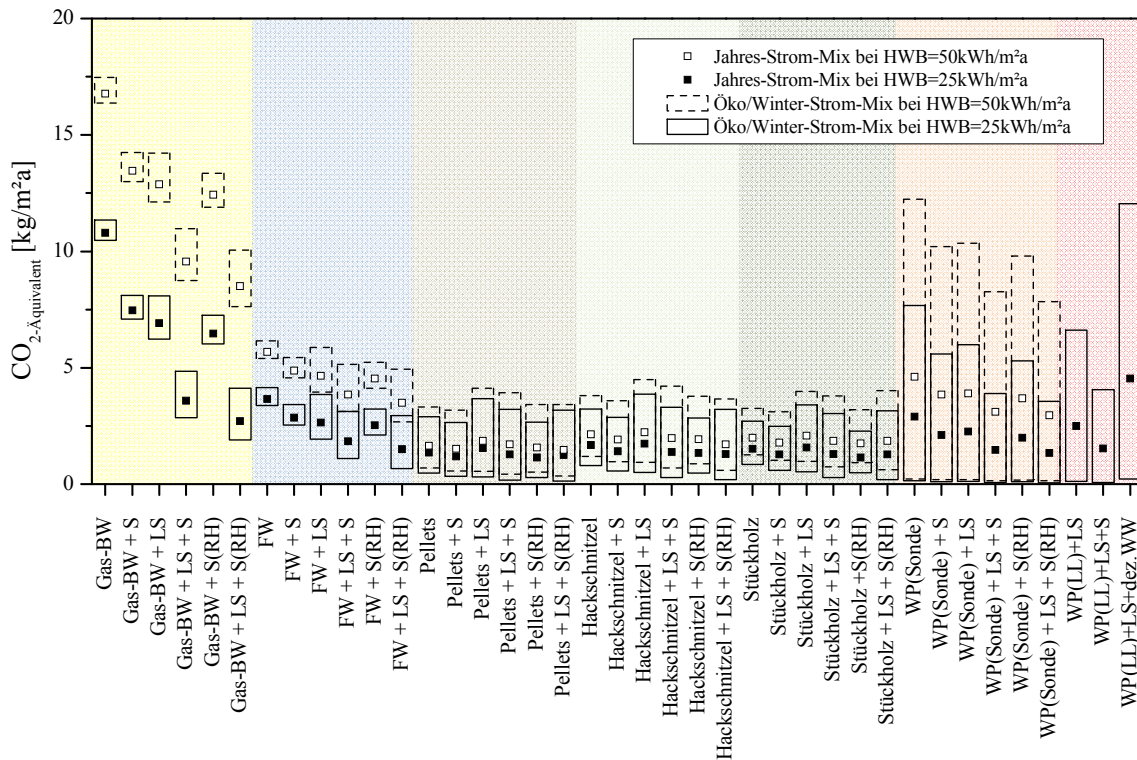


Abbildung 7-4

Der ökonomische Vergleich der Heizsysteme zeigt, dass die kapitalgebundenen Kosten den größten Teil der Gesamtkosten ausmachen. Durch zusätzliche energiesparende Komponenten wie Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung und Solarkollektoren kommt es vor allem bei den Passivhäusern dazu, dass die betriebsgebundenen die verbrauchsgebundenen Kosten übersteigen.

Abbildung 7-5 zeigt, welcher kumulierte Energieaufwand in Abhängigkeit der Kosten bei den verschiedenen Wärmeerzeugern zu erwarten ist. Ist der Anschluss an ein Wärmenetz möglich, erweist sich in Niedrigenergiehäuser das Fernwärme-Heizsystem als finanziell günstigste Variante. Ansonsten kommt es bei den Wärmeerzeugern Gas-Brennwert- bzw. Stückholzkessel zu den geringsten Gesamtkosten. Letzteres weist aber Nachteile im Komfort auf, da die Möglichkeit einer automatischen Beschickung fehlt. Wenn die Bereitstellung der benötigten Heizleistung über ein Lüftungssystem mit elektrisch betriebener Abluft-Wärmepumpe erfolgen kann (in Passivhäusern), weist dieses Konzept die geringsten Gesamtkosten auf.

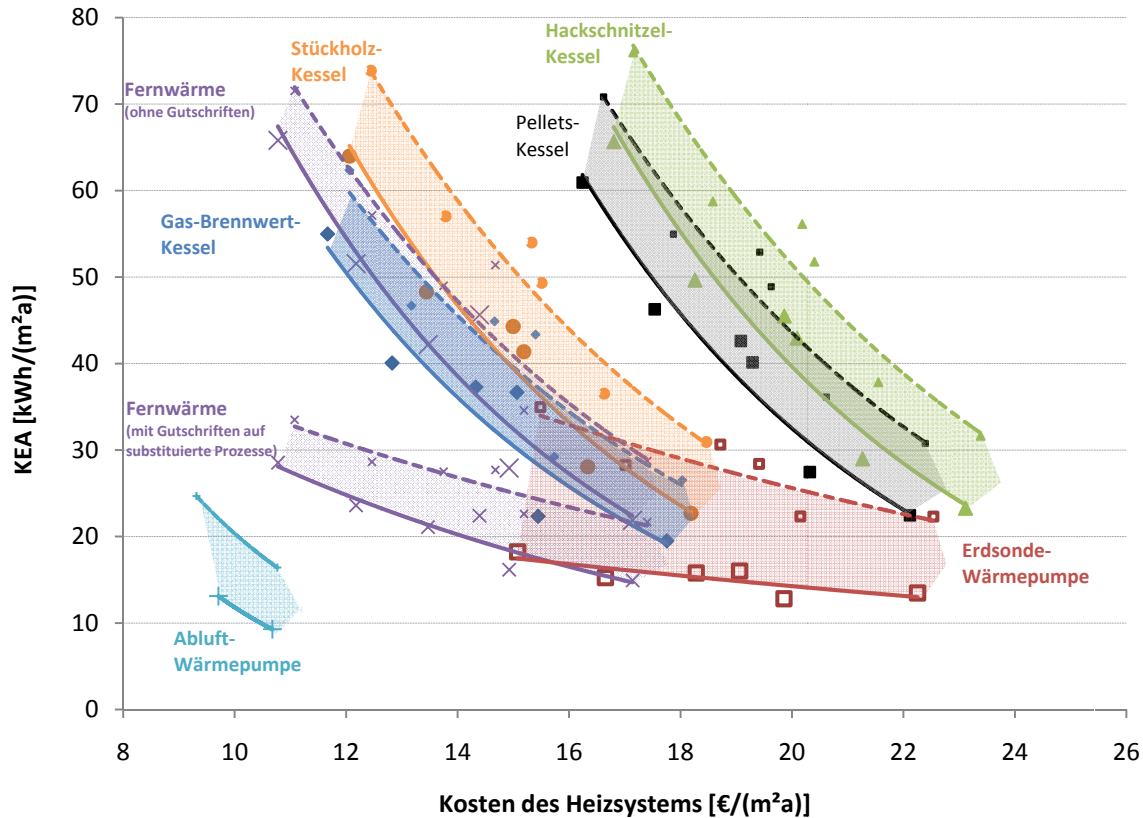


Abbildung 7-5

Abbildung 7-6 zeigt die Primärenergieeinsparungen, welche bei Verwendung von zusätzlichen energieeffizienten Komponenten durch entsprechende Mehrkosten gegenüber den Grundvarianten möglich sind.

Durch die Einsparungen an verbrauchsgebundenen Kosten durch Solarkollektoren und Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung können bei den angenommenen Voraussetzungen aufgrund der höheren Investitionskosten noch keine Einsparungen bei Betrachtung der gesamten Nutzungsdauer erreicht werden. Die Berechnung für 6m² Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung zeigt, dass mit Mehrkosten von etwa 8-13% Primärenergieeinsparungen von rund 15-30% erreicht werden können. Dies ergibt im Vergleich der Komponenten maximale Primärenergieeinsparungen bei minimalen Mehrkosten.

Bei den Heizsystemen mit Erdsonde-Wärmepumpe, welche bereits in der Grundvariante einen niedrigen kumulierten Energieaufwand aufweisen, sind weitere primärenergetische Einsparungen durch Solarkollektoren und Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung mit höheren Kosten verbunden als bei den Gas-Brennwert- und Biomasseheizsystemen. Erfolgt die Bewertung der Fernwärme-Heizsysteme unter Berücksichtigung von Gutschriften (wie in Abbildung 7-6), ergeben sich auch hier kleinere Erträge durch zusätzliche Komponenten. Man sieht in diesem Diagramm auch noch einmal den schon diskutierten Trend, dass bei den Heizsystemen mit Erdsonde-Wärmepumpe die Verwendung von 15m² Kollektoren zu einem primärenergetischen Mehraufwand gegenüber einem 6m² Kollektor führt, wenn der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird.

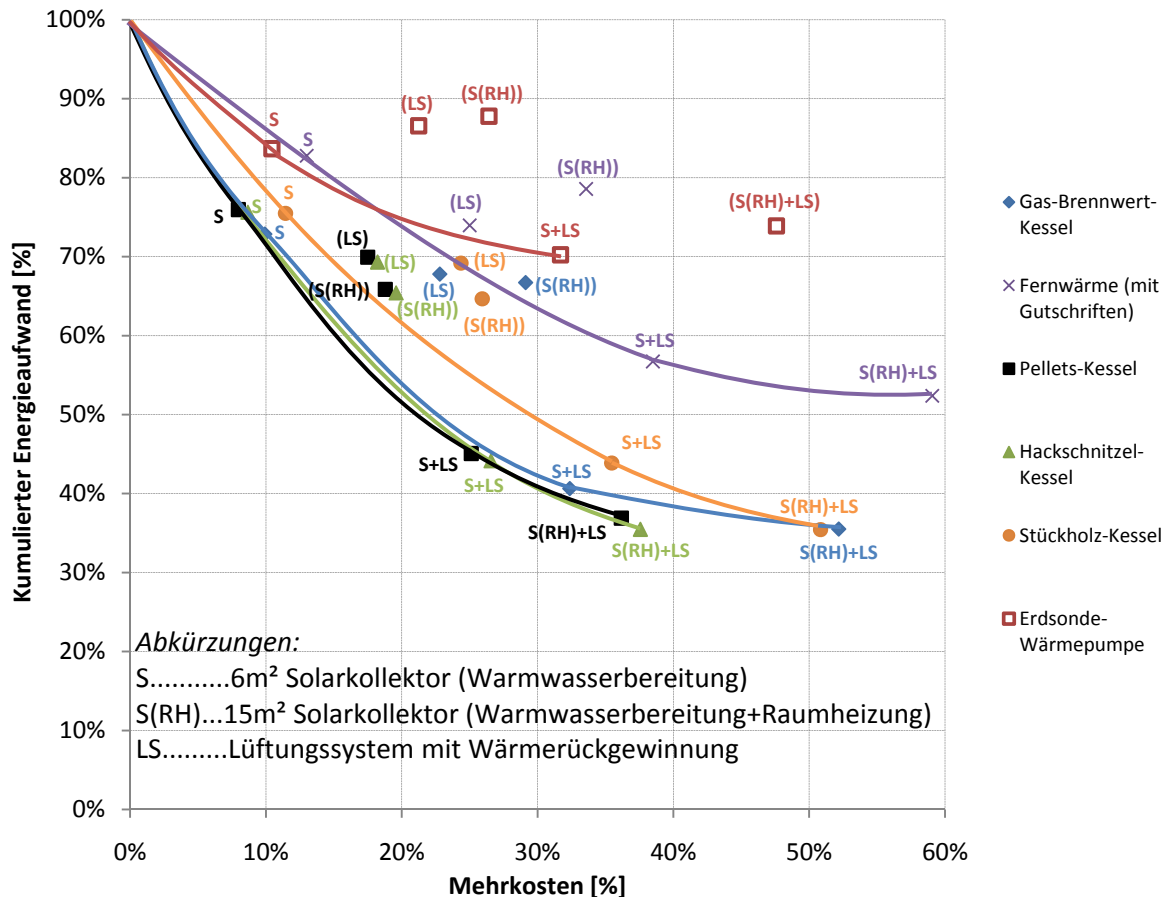


Abbildung 7-6

Zusammenfassend lassen sich nun folgende Kernaussagen festhalten:

- Da der Primärenergieaufwand der Herstellung von Heiz-, Warmwasserbereitungs- und Lüftungssystemen bis zu 55% des gesamten kumulierten Energieaufwandes in Niedrigenergie- und Passivhäusern ausmachen kann, sollte dieser bei einer ökologischen Beurteilung unbedingt berücksichtigt werden.
- Der Primärenergieaufwand der durch den Hilfsstrombedarf verursacht wird, beträgt bei den untersuchten Systemen bis zu etwa 50% des kumulierten Energieaufwandes der Nutzung und spielt daher eine entscheidende Rolle, wobei auch der verwendete Stromerzeugungsmix von entsprechender Bedeutung ist.
- Luftheizsysteme erweisen sich in Passivhäusern als sehr sinnvolle Variante.
- Eine Senkung des Energiebedarfs der Nutzung ist nur bis zu einem gewissen Punkt sinnvoll. Danach überwiegen die zusätzlichen energetischen Aufwendungen für die Herstellung gegenüber den zusätzlich möglichen Einsparungen.

Interessante Aspekte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden konnten, sind, zu welchen Unterschieden es im Vergleich zu Einfamilienhäusern bei Mehrfamilienhäusern kommt und welche Emissionen bei der Herstellung der heiztechnischen Komponenten selbst verursacht werden. Da die berechneten Betriebskosten, insbesondere bei Verwendung von Komponenten wie Solarkollektoren und Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung, einen beträchtlichen Anteil der Gesamtkosten ausmachen, wäre es interessant, z.B. über eine Nutzerbefragung zu klären, inwieweit dies mit in der Praxis tatsächlich auftretenden Kosten übereinstimmt. Da sich gezeigt hat, dass Luftheizsysteme eine ökologisch und ökonomisch sehr sinnvolle Variante darstellen können, wären weitere Studien dazu, wie z.B. eine Untersuchung der Potentiale von solaren Luftkollektoren und deren Akzeptanz, von Bedeutung.

Abkürzungsverzeichnis

AEA	Austrian Energy Agency – Österreichische Energieagentur
AP	„Acidification Potential“
BGF	Brutto-Geschossfläche
BMBWK	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
COP	„Coefficient of performance“ = Leistungszahl
EFH	Einfamilienhaus
ENEV	Energieeinsparverordnung
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
FVU	Fernwärme-Versorgungs-Unternehmen
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GWP	„Global Warming Potential / Greenhouse Warming Potential“
HdZ	Haus der Zukunft
HEB	Heizenergiebedarf
HGT	Heizgradtage
HKW	Heizkraftwerk
HT	Heiztage
HW	Heizwerk
HWB	Heizwärmebedarf
IPCC	„Intergovernmental Panel on Climate Change“ = Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe über Klimaänderungen
IPP	Integrierte Produktpolitik
ISOTEG	Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung
JNG	Jahresnutzungsgrad
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEA _E	Kumulierter Energieaufwand der Entsorgung
KEA _H	Kumulierter Energieaufwand der Herstellung
KEA _N	Kumulierter Energieaufwand der Nutzung
KEV	Kumulierter Energieverbrauch
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau (Deutschland)
KWL	Kontrollierte Wohnraumlüftung
LCA	„Life Cycle Assessment“ = Ökobilanzierung
LCI	„Life Cycle Inventory“ = Sachbilanz
LD	Lebensdauer
LEK	„Line of European k-values“
MFH	Mehrfamilienhaus
NEH	Niedrigenergiehaus
NEZ	Nutzheiz-Energiekennzahl
NP	Nitrification Potential
ODP	Ozone Depletion Potential
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PH	Passivhaus
PHPP	Passivhaus Projektierungs-Paket
POCP	„photochemical ozone creation potential“

ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SPF	„Seasonal Performance Factor“ = Arbeitszahl
SWD	Schaltbare Wärmedämmung
TOPP	„tropospheric ozone precursor potential“ = Ozonbildungspotential
TWD	Transparente Wärmedämmung
VOCs	„volatile organic compounds“ (Flüchtige Kohlenwasserstoffe)
WBR	Wärmeversorgung, Brauchwassererwärmung und Raumluftechnik
WE	Wohneinheiten
WQA	Wärmequellenanlage
WRG	Wärmerückgewinnung
WSVO	Wärmeschutzverordnung

Abkürzungen, welche speziell für diese Arbeit verwendet wurden:

Dez. WW	Dezentrale Warmwasserbereitung mit elektrischen Durchlauferhitzern
FW	Fernwärme
HS	Hilfsstrom (=Haustechnikstrom)
LS	Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung
S	Solarkollektor zur Warmwasserbereitung, 6m ²
RH	Raumheizung
S(RH)	Solarkollektor zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, 15m ²
SD	Solarer Deckungsgrad
SD _{RH}	Solarer Deckungsgrad der Raumheizung
SD _{WW}	Solarer Deckungsgrad der Warmwasserbereitung
WP	Wärmepumpe
WP(LL)	Luft/Luft-Wärmepumpe
WW	Warmwasser

Literaturverzeichnis

AFJEI T., BETSCHAT W., BONVIN M., GEERING H. P., GINSBURG S., KELLER P., SHAFAI E., WITTEW D., ZWEIFEL G. (2000): „Konstengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe – Phase 3: Messung an drei Funktionsmustern, Benutzereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regelkonzepte“, Bundesamt für Energie, Bern.

Amt der O.Ö. Landesregierung – Abteilung Umwelt und Anlagentechnik, O.Ö. Energiesparverband (1998): „Richtlinie für die Berechnung von Energiekennzahlen in Oberösterreich“.

Amt der Vorarlberger Landesregierung (2008): „Wohnen-Wohnbauförderung, Kosten“, Bregenz, 2008. URL: <http://www.vorarlberg.at> [18.01.2008]

ANDERL M., GANGL M., KAMPEL E., KÖTHER T., LORENZ-MEYER V., MUIK B., SCHODL B., POUPA S., WAPPEL D. (2007): „Emissionstrends 1990-2005: Ein Überblick über die österreichischen Verursacher von Luftschadstoffen (Datenstand 2007)“, Umweltbundesamt GmbH, Wien.

ARSENAL (2007a): „Prüfresultate Sole/Wasser und Wasser/Wasser Wärmepumpen basierend auf der EN 14511“, arsenal research - Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H., Wien.

ARSENAL (2007b): „Prüfresultate Wärmepumpen mit Direktverdampfung basierend auf der EN 14511“, arsenal research - Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H., Wien.

AUER F., SCHOTE H. (2007): „Feldtest Elektro-Wärmepumpen: Nicht jede Wärmepumpe trägt zum Klimaschutz bei“, Lokale Agenda-Gruppe 21 Umwelt/Energie, Lahr (Schwarzwald).

AEA (2007a): Energieflussbilder Österreichs 2005, Austrian Energy Agency, Wien.
URL: [http://www.energyagency.at/\(de\)/publ/pdf/efluss05.pdf](http://www.energyagency.at/(de)/publ/pdf/efluss05.pdf) [27.01.2008]

AEA(2007b): „Neue energiesparende Technologie für effizientere Umwälzpumpen“, Austrian Energy Agency, Wien. URL: <http://www.energyagency.at> [04.02.2008]

AEA (2007c): „Energiesparförderungen, Energieberatung“, Austrian Energy Agency, Wien.
URL: <http://www.energyagency.at> [04.02.2008]

AEA (2007d): „Energieeinsparpotentiale von Altbauten“, Austrian Energy Agency, Wien.
URL: <http://energytech.at> [03.10.2007].

AUSTRIA SOLAR (2008): Austria-Solar – Verein zur Förderung der thermischen Solarenergie, Wien. URL: <http://www.solarwaerme.at/EFH/Geld-sparen/> [Stand 18.01.2008]

BACH B., BIERMAYER P., FRICKO O., GREISBERGER H., HAAS R., NAKICENOVIC N., PAULA M., REUTER A., SCHNITZER H., SPITZER J., WIMMER R. (2007): „Strategieprozess ENERGIE 2050 – Zwischen zum Forschungsprogramm, Themenfeld - Energie in Gebäuden“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, S.28.

BLT (2006a): „Prüfbericht – Pelletsfeuerung pelletstar biocontrol 10“, BLT-Aktzahl: 030/05, BLT-Protokollnummer: 003/06, Bundesanstalt für Landtechnik, Wieselburg.

BMWA (2003): „Energiebericht 2003“, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Wien.

- BMWA (2005): „Stand und Entwicklung der Energieversorgung in Österreich – Ergänzungspapier zum ENERGIEBERICHT 2003 der österreichischen Bundesregierung“, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Wien.
- BOHNE D. (2004): „Ökologische Gebäudetechnik“, Kohlhammer, Stuttgart.
- BRESSLER G., GÜNTHER-POMHOFF C., SALLER A. (1996): „Ganzheitliche Bilanzierung von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen als Basis einer Ökobilanz“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- BUND DER ENERGIEVERBRAUCHER (2007): „Wettergott und Energieverbrauch“, Unkel.
URL: <http://www.energieverbraucher.de> [25.01.2008]
- CORRADINI R., HUTTER C., KÖHLER D. (1999): „Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil I – Allgemeiner Teil“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- CORRADINI R., KÖHLER D. (1999): „Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil III – Metalle“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- DIEFENBACH N., LOGA T., BORN R. (2005): „Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser – Erfahrungen und Perspektiven“, Institut Wohnen und Umwelt GMBH, Darmstadt.
- DREIER T. (1999): „Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- E-CONTROL (2007a): „Monatliche Bilanz der elektrischen Energie, Daten Juli 2007“, Energie-Control GmbH, Wien.
URL: http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/ZAHLENDATENFAKTEN/ENERGIESTATISTIK/Betriebsstatistik2006/files/2006_GesBil.xls [16.11.2007]
- E-CONTROL (2007b): „Physikalische Importe und Exporte, Daten Juli 2007“, Energie-Control GmbH, Wien.
URL: http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/ZAHLENDATENFAKTEN/ENERGIESTATISTIK/Betriebsstatistik2006/files/2006_GesImEx.xls [16.11.2007]
- E-CONTROL (2007c): „Erzeugungskomponenten - Jahresergebnis“, Energie-Control GmbH, Wien.
URL: http://www.e-control.at/portal/page/portal/ECONTROL_HOME/STROM/ZAHLENDATENFAKTEN/ENERGIESTATISTIK/Betriebsstatistik2006/files/2006_GesEzg1Komp.xls [19.11.2007]
- E-CONTROL (2008a): „Endverbraucherpreise – Haushaltsstrompreisentwicklung in den Netzbereichen“, Energie-Control GmbH, Wien. URL: <http://www.e-control.at> [04.01.2008]
- E-CONTROL (2008b): „Endverbraucherpreise – Haushaltsgaspreisentwicklung in ausgewählten Netzbereichen“, Energie-Control GmbH, Wien. URL: <http://www.e-control.at> [04.01.2008]
- EGOLF P. W., GENDRE F., KITANOVSKI A., SARI O. (2006): „Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz“, Bundesamt für Energie - Forschungsprogramm Umgebungswärme, Bern.
- EGOLF P. W., GENDRE F., KITANOVSKI A., SARI O., BESSON C. (2007): „Magnetische Wärmepumpen für den Schweizer Markt - Machbarkeitsstudie“, Wärmepumpen-Forschung: Wärmequellen, Komponenten, Arbeitsmedien, 12.Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamts für Energie (BFE), 2005, S.79-94.

- ENERGIEAG (2008): „Tarifübersicht Aschach a.d.D, Hartkirchen; Tarifübersicht Ostermiething, Riedersbach, Trimmelkam; Tarifübersicht Vöcklabruck, Timelkam, Regau, Lenzing“, EnergieAG Oberösterreich, Linz. URL: www.energieag.at [02.01.2008]
- ENERGIEINSTITUT VORARLBERG (2007): „Energieset´s für die Solar-Aktion 2007“, Dornbirn. URL: <http://www.energieinstitut.at/?sID=2211> [Stand 09.03.2007] [02.01.2008]
- ERB M., HUBACHER P., EHRBAR M. (2004): „Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003, Schlussbericht, April 2004“, Im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern.
- ERHORN H., DE BOER J., KLUTTIG H., REITH A. (2001): „Fertighäuser im Wandel – vom Niedrigenergiehaus zum Null-Heizenergiehaus“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart.
- FANINGER G. (2007): „Aktueller der Wärmepumpen-Technik in Österreich“, Fakultät für Interdisziplinäre Forschung und Fortbildung, IFF, Institut für Interventionsforschung und Kulturelle Nachhaltigkeit, Alpen-Adria Universität, Klagenfurt.
- FEIST W. (2007a): „Mit Energiebilanzen zur Energieeffizienz“, Passivhaus-Institut, Darmstadt. URL: <http://www.passivhaustagung.de> [04.09.2007]
- FEIST W. (2007b): „Was ist ein Passivhaus?“, Passivhaus-Institut, Darmstadt. URL: <http://www.passiv.de> [30.08.2007].
- FEIST W. (2007c): „Informationen zum Passivhaus“, Passivhaus-Institut, Darmstadt. URL: http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/passivhaus.pdf [04.10.2007]
- FEIST W. (2007d): „Passivhaus Qualitätsanforderungen“, Passivhaus-Institut, Darmstadt. URL: <http://www.passiv.de> [25.11.2007]
- FEIST W. (2008): „Energie – Bezugs – Fläche, Kurz und bündig: Was ist ein Passivhaus?“, Passivhaus-Institut, Darmstadt. URL: <http://www.passiv.de> [25.02.2007]
- FGW (2007): „Zahlenspiegel 2007“, Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen, Wien. URL: <http://www.gaswaerme.at> [19.11.2007]
- FORSTER, P., V. RAMASWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. BETTS, D.W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D.C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ, R. VAN DORLAND (2007): „Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing“, In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- FRIEDL E. (2003): „Vom Heizwärmebedarf zum Heizenergiebedarf – ÖNORM H 5056“, FGW – Forschungsgesellschaft für Wohnen, Bauen und Planen, Wien.
- FRISCHKNECHT R. (2006): „Umweltverträgliche Technologien: Analyse und Beurteilung, Teil 2 – Ökobilanzen (Life cycle assessment, LCA)“, Skript zum Studiengang Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich.
- FRITSCH U. R., JENSEIT W., HOCHFELD C. (1999): „Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA)“, Öko-Institut, Darmstadt.
- FRITSCH U. R., SCHMIDT K. (2007): „Handbuch zu Gemis“, Öko-Institut, Darmstadt, 2007.

- GEUDER M. (2004): „Energetische Bewertung von Windkraftanlagen“, Diplomarbeit, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt.
- GIESELER U., HEIDT F. D. (2005): „Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Maßnahmen für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- GREML A., BLÜMEL E., KAPFERER R., LEITZINGER W. (2004): „Technischer Status von Wohnraumlüftungen - Evaluierung bestehender Wohnraumlüftungsanlagen bezüglich ihrer technischen Qualität und Praxistauglichkeit“, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Haus der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- GROSS A. (2005): „Der Energieausweis für Gebäude - Im Rahmen der europäischen Richtlinie über die Gesamteffizienz von Gebäuden“, GF Institut Vorarlberg.
URL: http://www.energieinstitut.at/hp/Upload/Dateien/Vortrag_Gebaeudeausweis.pdf [30.08.2007].
- GROß H. (2008): „Die Wärmepumpen – Produktübersicht“, Rohr-Regelsbach.
URL: <http://www.umweltheizung.de> [15.01.2008]
- GUGELE B., LORENZ-MEYER V., PAZDERNIK K., WAPPEL D. (2007): „Kyoto-Fortschrittsbericht: Österreich 1990-2005 (Datenstand 2007)“, Umweltbundesamt GmbH, Wien.
- HAAS R. (2006): „Wirtschaftliche und ökologische Optimierung der Heizenergieversorgung“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, WS 2006/2007, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien.
- HAAS R., NAKICENOVIC N. (2005): „Energieökonomie – Skriptum zur Vorlesung mit Übung“, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien.
- HAAS R., MÜLLER A. (2007): „2. Zwischenbericht – Szenarien der gesamtwirtschaftlichen Marktchancen verschiedener Technologielinien im Energiebereich“, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Energy Economics Group, TU-Wien.
- HANDKE V., KNOLL M., HARTMANN U., SPITZMÜLLER P. (2003): „Machbarkeitsstudie für neue Umweltzeichen in Anlehnung an ISO 14024 für die Produktgruppe Thermische Solaranlagen“, IZT Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. Landesverband Berlin Brandenburg.
- HEIDT F. D. (2005): „Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Maßnahmen für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- HOLZ T. (2006): „Holzpellet-Heizungen, Planung – Installation – Betrieb“, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg.
- HOVAL (2007): „Produkte & Systeme“, Hoval GmbH, Marchtrenk.
URL: www.hoval.at [07.01.2008]
- HUTTER C., WEDLER C. (2002): „ISOTEG-Teilprojekt KEA - Ermittlung des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) von Komponenten und Techniken in ISOTEG“, Kurzbericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.
- IWT (2008): „Der aktuelle Ölpreis – Heizölpreis – Energieträgerpreis“, Institut für wirtschaftliche Ölheizung, Wien. URL: <http://www.iwo-austria.at> [04.01.2008]
- JOOS L., BISCHOF S., BOHN D., BÖCKELMANN-GREWE M., BRAUN R., BUSCHATZ I., DILMETZ K., EBERHARDT J., ECKES J., EGGER R., EICKENHORST H., ERHORN H., FALL

M., FISCHER K.-D., GAILFUß M.; GÖRICKE P., HAIN K., HEINING A., HILDEBRAND H.-U., HUPPERICH P., JANNEMANN T., JORDING W., KÖHNE V., KRANZ R., KRUG S., MATOUSCHEK G., MECKEL B., NIMZ G., NOWAK H.-J., PAUL R., PRAHL W., RODEFELD G., ROGALL A., ROHMAN A., SEYDA B., STADELMANN M., STREHLER A., VENS C., WACKERTAPP H., WEßING W. (2004): „Energieeinsparung in Gebäuden“, Vulkan-Verlag, Essen.

KALTSCHMITT M., HARTMANN H. (2001): „Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren“, Springer Verlag, Wien, New York.

KALTSCHMITT M., STREICHER W., WIESE A. (2006): „Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte“, Springer Verlag, Wien, New York.

KfW (2008): „Technische Anforderungen“, Frankfurt am Main.
URL: <http://www.kfw-foerderbank.de> [24.02.2008]

KLIMA:AKTIV HAUS (2007): „Kriterienkatalog zum klima:aktiv Haus und zum Klima aktiv Passivhaus, Version 3.3.3“, Lebensministerium, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Energieinstitut Vorarlberg, Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie GmbH, Wien.

KLIMA M., GREBE A. (2001): „Marktrecherche: 10 Pelletskessel im Vergleich“, Die neue Quadriga, Kastner AG, Wolnzach, 06/2001.

KOSCHENZ M., PFEIFFER A. (2005): „Potenzial Wohngebäude“, Faktor Verlag, Zürich.

KÖNIGSHOFER K., LESCH K. H. (2001): „Handbuch für regionale und kommunale Energieplanung“, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Graz.

KRAPF G. (2002): „Holzpellets und Pelletsheizanlagen“, Centrales Agrar-, Rohstoff-, Marketing- und Entwicklungsnetzwerk (C.A.R.M.E.N), Straubing.

KRAPMEIER H., MÜLLER E. (2001a): „Einfamilienhaus Horn“, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 30, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn.

KRAPMEIER H., MÜLLER E. (2001b): „Einfamilienhaus Dornbirn-Knie“, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 26, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn.

KRUSE H. (2007): „Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen in Theorie und Praxis und Primärenergetischer Vergleich zu Gaskesseln“, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik e.V., 2007.
URL: http://www.dlr.de/tt/de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/map/Thema_2_IZW_Kruse.pdf [08.02.2008]

LANG-KOETZ C., SPRINGER S., BEUCKER S. (2006): „Life Cycle e-Valuation Produkt, Service, System“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

LANG G. (2004): „1000 Passivhäuser in Österreich, Passivhaus Objektdatenbank, Interaktives Dokumentations- Netzwerk Passivhaus“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

LANG G. (2006a): „Analyse der Lenkungseffekte der einzelnen Wohnbauförderungen in Österreich auf die Passivhausentwicklung - Auszug vom Endbericht „1000 Passivhäuser in Österreich““, IG Passivhaus Österreich, Wien.

LANG G. (2006b): „Neueste Passivhausförderungen in Österreich“, IG Passivhaus Österreich, Wien.

LANG G. (2006c): „1000 Passivhäuser in Österreich“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Haus der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

LASSELSBERGER L. (2000): „Kleinfeuerungen für Holz“, Bundesanstalt für Landtechnik (BLT), Wieselburg.

LECHNER H. (2005): „Ökologische Stromversorgung? Die Entscheidung fällt bei Ihnen.“, Austrian Energy Agency, 2005. URL: [http://www.energyagency.at/\(de\)/projekte/gruenerstrom.htm](http://www.energyagency.at/(de)/projekte/gruenerstrom.htm) [Stand: 15.03.2005] [23.01.2008]

LIEBI P. (2003): „Heizen mit Holz“, Fachvortrag ZTL.
URL: <http://www.holzvergaserkessel.de/infopool/unterlagen/fachvortrag.pdf> [10.02.2008]

MERL A. (2001): „Ökobilanzen (Life Cycle Assessment)“, Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau, TU-Wien.

OIB-RICHTLINIE 6 (2007): „OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, Ausgabe April 2007“, Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-300.6-038/07, April 2007.

OÖ ESV (2007a): „Fachbegriffe“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz.
URL: <http://www.esv.or.at/esv/index.php?id=796> [03.10.2007a].

OÖ ESV (2007b): „Der Energieausweis – der Typenschein für ihr Haus“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz.
URL: <http://www.energielabel.at/energielabel/index.php?id=1194> [03.10.2007b].

OÖ ESV 2007c): „Der Energieausweis und die Nutzheiz-Energiekennzahl“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz. URL: <http://www.esv.or.at/esv/index.php?id=740> [03.10.2007c].

OÖ ESV (2007d): „Das Niedrigenergiehaus“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz.
URL: <http://www.esv.or.at/esv/index.php?id=1732> [23.10.2007d].

OÖ ESV (2008a): „Informationen für Privat-Haushalte - Holzpellets“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz. URL: <http://esv.or.at/esv/index.php?id=843> [04.01.2008a]

OÖ ESV (2008b): „Energieförderungen in Oberösterreich“, Oberösterreichischer Energiesparverband, Linz. URL: <http://www.esv.or.at/esv/index.php?id=13> [05.02.2008]

REGIONALENERGIE STEIERMARK (2007): „Kostenvergleich – Energieträgervergleich“, Weiz.
URL: <http://www.holzenergie.net> [04.01.2008]

RICHTER W., ZSCHERNIG J., WINDISCH, RICHARTS F., ROOS H., STIEBEL D., POSTENRIEDER E., WÖRISTER R., MATTIOLI F., NEUMANN V., WISMACH R., SCHENKE A., KLUGE U., BÖHM G., FAUST H.-J., GRABENHENRICH H. B., LENNARZ L., NEUBER K., OEHLER H., SKOPP K.-D., DIEBEL W., KRING H.-G., PARMA W., ROHM D., WEDEL U. (2002): „Handbuch für Heizungstechnik“, Buderus Heiztechnik GmbH, Beuth Verlag, Berlin Wien Zürich.

ROGNON F. (2007): „Rund um Wärmepumpen in 10 Fragen, Antworten für Laien und Interessierte über Wärmepumpen und deren Anwendungen“, Bundesamt für Energie BFE.
URL: http://www.hakagerodur.ch/upload/downloads/de/erdwaerme/Rund_um_Waermepumpen.pdf [03.01.2008]

RUMMICH E. (2004): „Nichtkonventionelle Energiewandlung“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien.

SCHMIDT H. (2006): „Integrierte Kopplung von Solarthermie und Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung“, HLH, Bd. 57, Heft 2 – Februar, S.22-29, 2006.

SCHMITTERLING C., FLEIßNER T., GEIGER B. (1999): „Wege zum Niedrigenergiehaus“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.

SCHRIEFL E. (2007): „Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebeunter der Annahme verschiedener Optimierungsziele“, Dissertation, Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien.

SCHUB M. (2004): „Life-cycle-Analyse von Passivhäusern“, Diplomarbeit am Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, TU Wien,.

SCHWAIGER K. (1996): „Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE) – Teil I – Allgemeiner Teil“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.

SEEBACHER U., OEHME I., SUSCHEK-BERGER J., WINDSBERGER A., STEINLECHNER S. (2003): „Handbuch – Produktbezogene Umweltinformationssysteme (PUIS) in Theorie und Praxis“, Fabrik der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

SIMADER G., JAMEK A., RITTER H., BENKE G. (2007): „Ökologischer Vergleich von Wärmepumpen mit Öl- und Gasheizungen“, Austrian Energy Agency, Wien.

SOLTEX (2007): Solar-Wärmepumpen-Kopplungen, Ahrensburg.
URL: <http://www.soltex-net.de> [Stand: 05.12.2007]

STATISTIK AUSTRIA (2008): „Gesamtenergiebilanz“, Bundesanstalt Statistik Österreich, Wien.
URL: http://www.statistik.at/web_de/static/gesamtenergiebilanz_022710.pdf [27.02.2008]

STOIBER G. (2007a): „Niedrigenergiehaus“, Linz.
URL: <http://www.energiesparhaus.at/gebaeudehuelle/neh.htm> [03.10.2007].

STOIBER G. (2007b): „Energiekennzahl“, Linz.
URL: <http://www.energiesparhaus.at/energieausweis/energiekennzahl.htm> [03.10.2007].

STOIBER G. (2007c): „LEK-Wert“, Linz.
URL: <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/lek.htm> [25.10.2007].

STOIBER G. (2007d): „Heiztage (HT)“, Linz.
URL: <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/ht.htm> [25.10.2007]

STOIBER G. (2007e): „Heiztage (HT)“, Linz.
URL: <http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/hgt.htm> [25.10.2007]

STREICHER W. (2005): „Sonnenenergienutzung“, Skriptum, Institut für Wärmetechnik, TU Graz.

STREICHER W., MACH T., SCHWEYER K., HEIMRATH R., KOUBA R., THÜR A., JAEHNIG D., BERGMANN I., SUSCHEK-BERGER J., ROHRACHER H., KRAPMEIER H. (2004a): „Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser“, Projekt im Rahmen der Programmrichtlinie „Haus der Zukunft“, Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft, Graz.

STREICHER W., HEIMRATH R., MACH T., KOUBA R., SCHWEYER K., THÜR A., JAEHNIG D., BERGMANN I., ROHRACHER H., SUSCHEK-BERGER J. (2004b): „Leitfaden - Benutzer-

freundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser“, Projekt im Rahmen der Programmrichtlinie „Haus der Zukunft“, Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft, Graz.

TRITTHART W., HOLZER P., FUSKO M., DIMTER A., TAPPEINER G., GRAGGABER M. (2001): „Check it! – Kriterienkatalog zur Berücksichtigung des Umweltschutzes im Beschaffungs- und Auftragswesen, Ordner 7: Technische Gebäudeausstattung und Wassernutzung“, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (BMBWK); Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT); Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA); Land Steiermark; Magistrat Wien; Land Niederösterreich; Land Salzburg, Land Burgenland.

TSCHABUSCHNIG H. (2007): „Richtlinien zur Förderung von thermischen Solaranlagen“, Kärntner Landesregierung, Klagenfurt.

TZSCHEUTSCHLER P. (1999): „Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil IV Kunststoffe“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.

UMWELTBUNDESAMT (2007): „Umweltsituation in Österreich. Achter Umweltkontrollbericht“, Umweltbundesamt, Wien.

VAILLANT (2007): „Produktprogramm“, Vaillant Austria GmbH, Wien. URL: www.vaillant.at

VDZ (2003): „Die richtige Dimensionierung von Wärmeerzeugern bei der Modernisierung“, Vereinigung der deutschen Zentralheizungswirtschaft, Köln, 2003.

VOLLAND K., VOLLAND J. (2006): „Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2006“, Rudolf Müller Verlag, Köln.

WIRTH S. M. (2002): „Gebäudetechnische Systemlösungen für Niedrigenergiehäuser“, Ernst & Sohn, Berlin.

WOLFF D., TEUBER P., BUDDE J., JAGNOW K. (2004): „Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln“, Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel, Institut für Heizungs- und Klimatechnik, Wolfenbüttel, 2004.

WPZ (2007): „Prüfresultate Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen basierend auf der EN 14511“ (S.1) und „Prüfresultate Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen basierend auf der EN 255 (WPZ Töss und Buchs“ (S.2-8), Wärmepumpenzentrum WPZ, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs, 15.10.2007.

ZIERHUT H. (2005): „Installations- und Heizungstechnik, Sanitär – Heizung – Klima“, Bildungsvlag EINS, Troisdorf.

Anhang

Anhang 1: Details zur Modellierung in GEMIS

- Prozesskette für elektrische Energie, Variante „Jahresstrommix“:

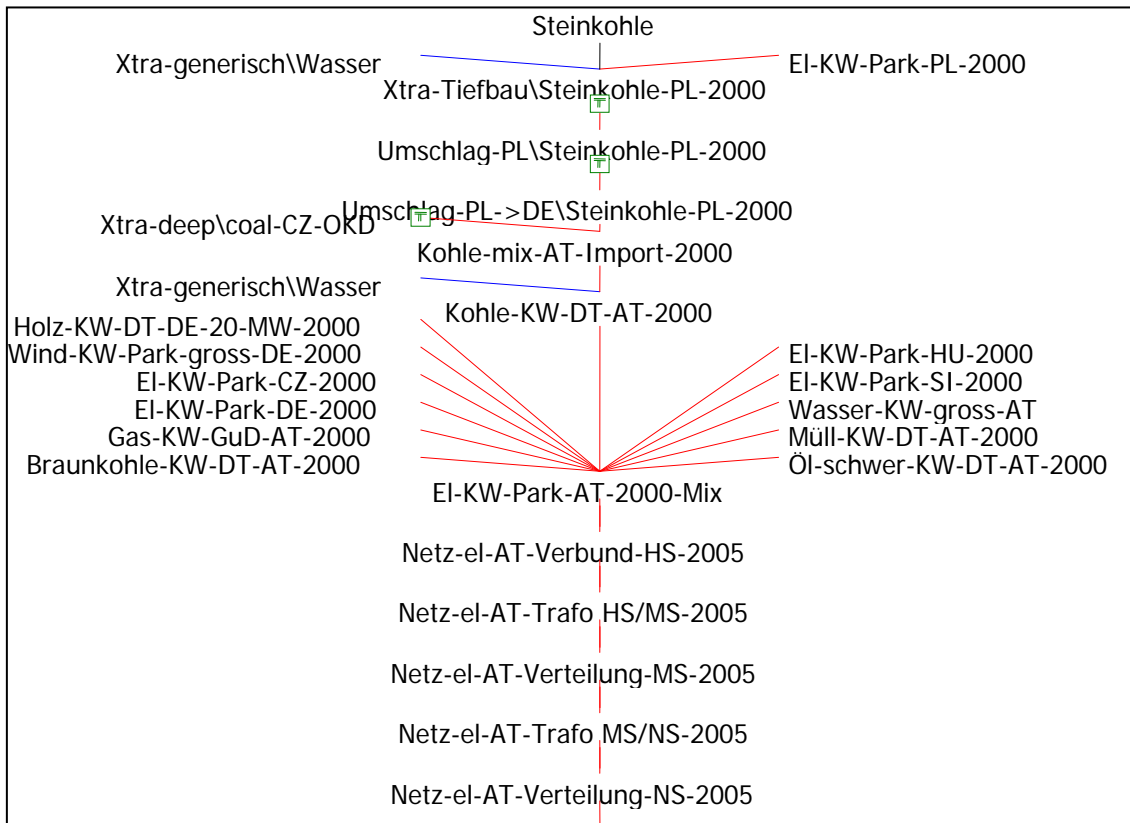


Abbildung A-1: Prozesskette für den Jahresstrommix.

Diese Grafik stellt die komplette Prozesskette für Strom (hier: Variante „Mix“) bis zum Wohnhaus wo sie benötigt wird (Niederspannungsnetz) dar. Die Modellierung erfolgt ausgehend vom Prozess Netz-el-DE-Verteilung-NS-2005. Die Prozessschritte der Verteilung (also vom Hochspannungsnetz zum Niederspannungsnetz) werden übernommen. Der Kraftwerkspark wird an die österreichischen Verhältnisse der Erzeugungsstruktur in Österreich im Jahre 2006 angepasst (basierend auf Daten von (e-control, 2007c), GEMIS und eigenen Berechnungen). Der Mix setzt sich somit folgendermaßen zusammen:

Kohle-KW-DT-AT-2000	8,00 %
Braunkohle-KW-DT-AT-2000	1,00 %
Öl-schwer-KW-DT-AT-2000	3,00 %
Gas-KW-GuD-AT-2000	13,00 %
Müll-KW-DT-AT-2000	2,00 %
EI-KW-Park-DE-2000	15,00 %
Wasser-KW-gross-AT	44,00 %
EI-KW-Park-CZ-2000	7,50 %
EI-KW-Park-SI-2000	1,25 %

Wind-KW-Park-gross-DE-2000	2,00 %
El-KW-Park-HU-2000	1,25 %
Holz-KW-DT-DE-20-MW-2000	2,00 %

- *Prozesskette für elektrische Energie, Variante „Ökostrommix“:*

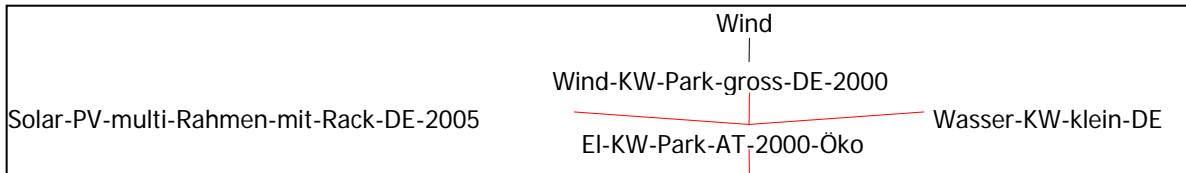


Abbildung A-2: Prozesskette für den Ökostrommix.

Die Verteilung der Energie bis ins Niederspannungsnetz erfolgt analog wie in Abbildung A-1 und wird jetzt nicht mehr extra dargestellt. Bei der Modellierung dieser Variante wurde der in GEMIS vorhandene Prozess El-KW-Park-AT-2000 angepasst. Die Ausgangsdaten stellen den Stromerzeugungsmix in Österreich aus dem Jahre 2000 dar, wobei die letzte Anpassung am 09.Aug.2005 durchgeführt wurde. Die Daten wurden für Deutschland übernommen, da für Österreich keine geeigneten Daten vorhanden sind. Dieser Prozess wurde so verändert, dass 50% des Stroms nun aus Kleinwasserkraftwerken, 49% aus Windkraftwerken und zu 1% durch Photovoltaik gewonnen wird. Zusammensetzung des Prozesses:

Wind-KW-Park-gross-DE-2000	49,00 %
Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2005	1,00 %
Wasser-KW-klein-DE	50,00 %

Dieser Erzeugungsmix wurde, wie bereits erwähnt, bewusst so gewählt, da sich aus dem hohen Anteil aus regenerativen Umweltenergien eine besonders vorteilhafte Bewertung hinsichtlich des KEA ergibt. Würde anstelle der Wind- oder Wasserkraftwerke die Stromerzeugung durch Biomassekraftwerke modelliert werden, wäre der KEA deutlich höher. Der Grund, dass 1% mittels Photovoltaik hergestellt wird, liegt daran, dass die Bezeichnung „grüner Strom“ mit dem Umweltzeichen dieses fordert. Außerdem dürfen die dabei verwendeten Wasserkraftwerke eine Leistung von max. 10MW besitzen (Lechner, 2005).

- *Prozesskette für elektrische Energie, Variante „Wintermix“:*

Zur Modellierung des Winterstrom-Erzeugungsmix wird davon ausgegangen, dass jede zusätzlich zum Betrieb von Wärmepumpen benötigte elektrische Energieeinheit ausschließlich durch Wärmekraftwerke erzeugt wird. Dafür wird, ausgehend der für Österreich für das gesamte Jahr 2006 von e-control (2007c) angegebenen Daten für Wärmekraftwerke, welche mit fossilen Brennstoffen und Derivaten betrieben werden, der Erzeugungsmix folgendermaßen modelliert (beruht auf teils eigenen Berechnungen):

Kohle-KW-DT-AT-2000	37,4 %
Braunkohle-KW-DT-AT-2000	3,1 %
Öl-schwer-KW-DT-AT-2000	8 %
Gas-KW-GuD-AT-2000	51,5 %

Zur genaueren Erklärung sei erwähnt, dass das GuD-Kraftwerk dabei einen Nutzungsgrad von 52,5%, das Steinkohlekraftwerk 39,0%, das Dampfturbinenkraftwerk mit schwerem Heizöl 42,5% und das Braunkohlekraftwerk 37,0% aufweist.

Auch hier erfolgt die Verteilung der Energie bis ins Niederspannungsnetz analog wie in Abbildung A-1 und wird nicht mehr extra dargestellt. Ausgehend vom Prozess El-KW-Park-AT-2000 erfolgt folgende Modellierung:

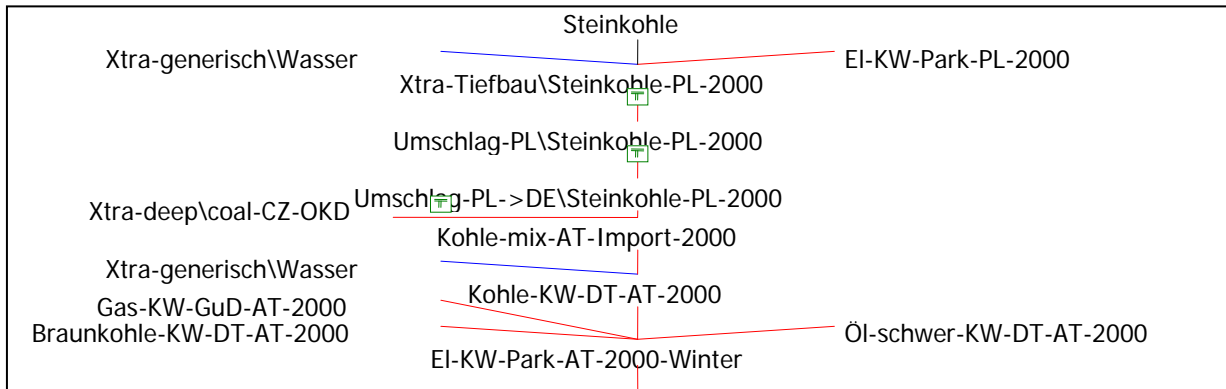


Abbildung A-3: Prozesskette Winter-Strom-Mix.

▪ Prozesskette zum Gas-Brennwert-Kessel:

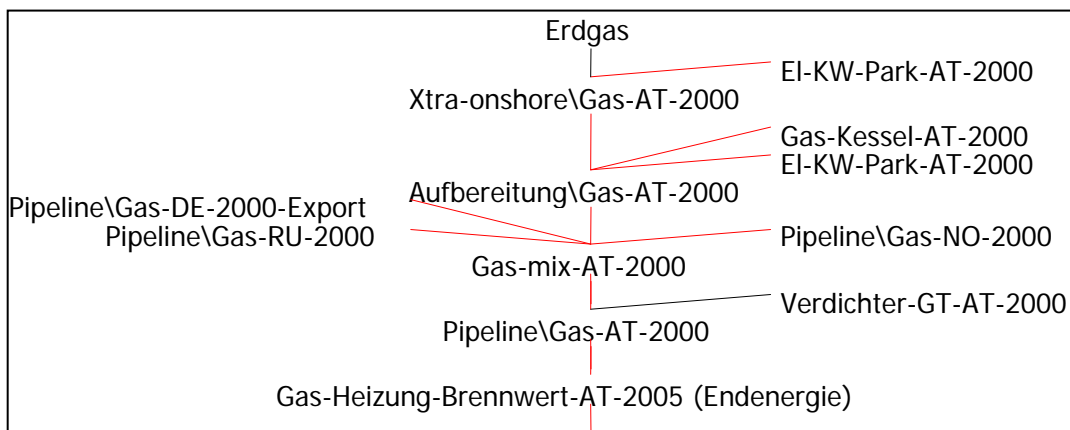


Abbildung A-4: Prozesskette Endenergie Erdgas.

Ausgehend vom Prozess Gas-Heizung-Brennwert-DE-2005, wird die gesamte Prozesskette zur Bereitstellung des Erdgases für Österreich anstelle für Deutschland aus dem Prozess Gas-Kessel-AT-2000 (letzte Überarbeitung am 09.April.2005) eingefügt. Der Nutzungsgrad der Heizungsanlage beträgt 100%, wodurch der KEA auf Basis von Endenergiedaten berechnet werden kann. Bei diesem Prozess werden auch keine Hilfsprodukte berücksichtigt, da der KEA der Herstellung für die Anlage nicht miteinbezogen werden soll.

■ *Prozesskette für Öl:*

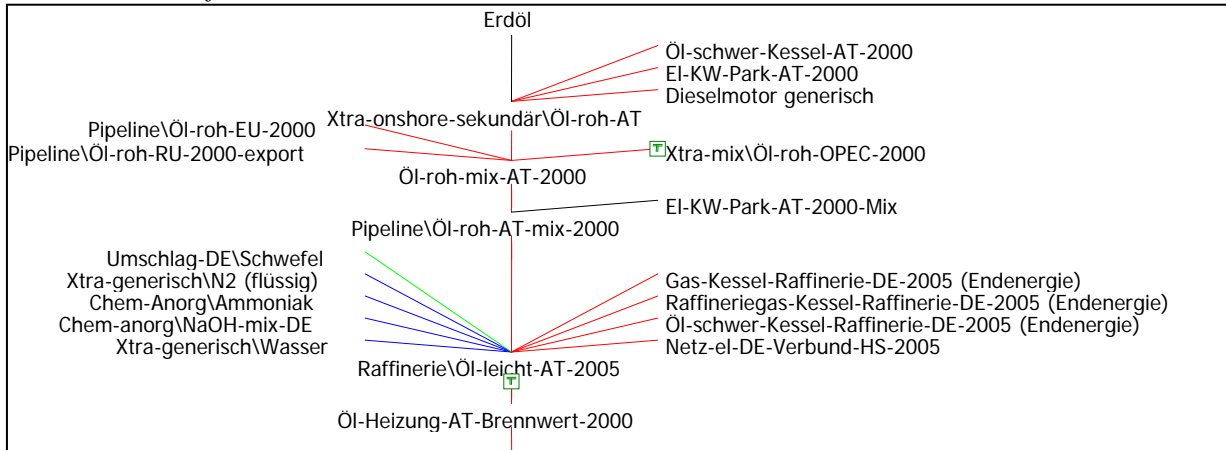


Abbildung A-5: Prozesskette für Öl.

■ *Prozesskette für Fernwärme:*

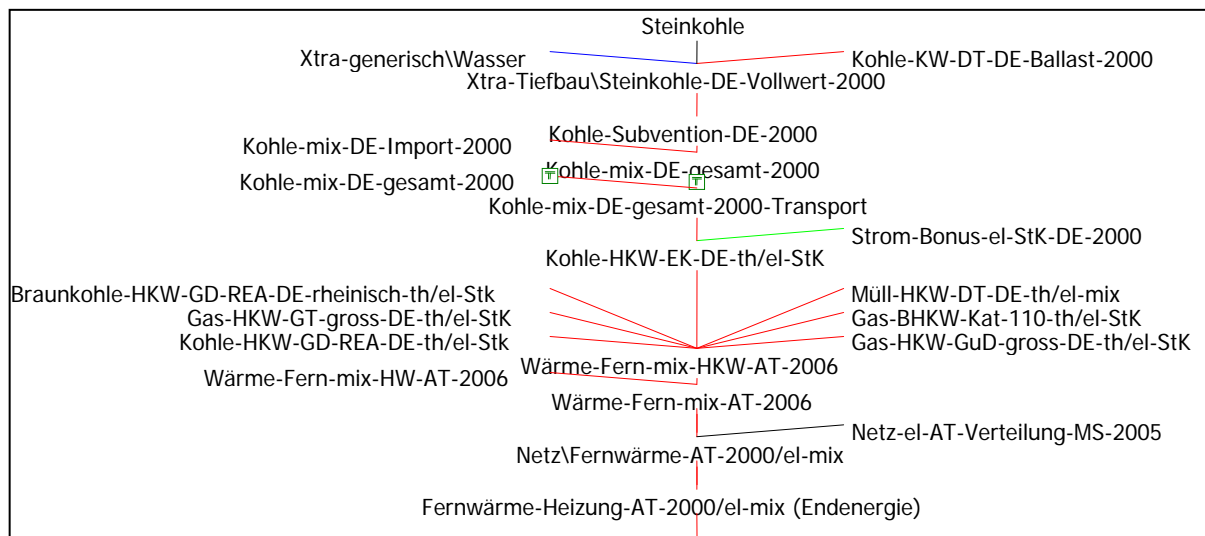


Abbildung A-6: Mix von Heizkraftwerken und Heizwerken zur Fernwärmebereitstellung.

Die Wärmeversorgung von Wohngebäuden mittels Fernwärme wird ausgehend vom Prozess Fernwärme-Heizung-DE-2000/el-mix modelliert, was der Station zur Übergabe der Wärme im Haus entspricht. Dieser spezielle KWK-Mix erzeugt Stromgutschriften auf Basis des deutschen Kraftwerksmix. Die Hausübergabestation und die Fernwärmeverteilung werden übernommen. Der Fernwärmemix wird ausgehend vom Prozess Wärme-Fern-mix-DE-2000/el-mix auf österreichische Verhältnisse soweit wie möglich angepasst. Dabei definiert der Prozess einen Mix aus einem typischen österreichischen HKW-Anteil von 70% und HW-Anteil von 30%. Die Brennstoffeinsatzstruktur wird nach Abbildung 4-10 modelliert, wobei der Anteil der jeweiligen HKW-Typen von Deutschland übernommen und auf die Brennstoffeinsatzstruktur Österreichs umgerechnet wird. Die Struktur der Heizkraftwerke ergibt sich somit folgendermaßen:

Kohle-HKW-EK-DE-th/el-StK	10,40 %
Kohle-HKW-GD-REA-DE-th/el-StK	12,40 %
Gas-HKW-GuD-gross-DE-th/el-StK	15,80 %
Gas-HKW-GT-gross-DE-th/el-StK	31,40 %

Gas-BHKW-Kat-110-th/el-StK	11,80 %
Braunkohle-HKW-GD-REA-DE-rheinisch-th/el-Stk	5,20 %
Müll-HKW-DT-DE-th/el-mix	13,00 %

Die Heizwerke werden folgendermaßen strukturiert:

Kohle-Brikett-HW-klein-DE-2000	14,40 %
Gas-HW-gross-DE-2000	39,30 %
Braunkohle-Brikett-HW+TAV-DE-rheinisch	4,20 %
Öl-leicht-HW-gross-DE-2000	33,40 %
Xtra-generisch\Abwärme	8,70 %

Die Prozesskette für den Mix von Heizwerken, welche aus dem oberen Diagramm nicht erkennbar ist, sieht folgendermaßen aus:

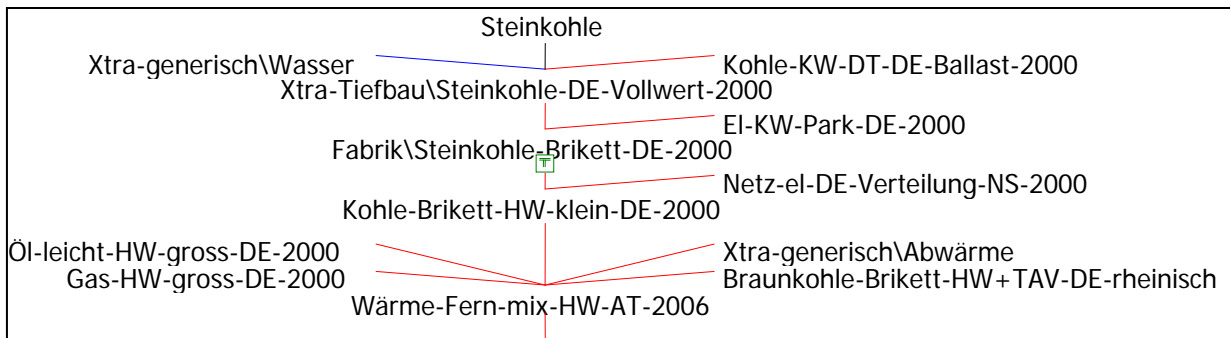


Abbildung A-7: Mix von Heizwerken zur Fernwärmebereitstellung.

▪ Prozesskette für den Pellets-Kessel:

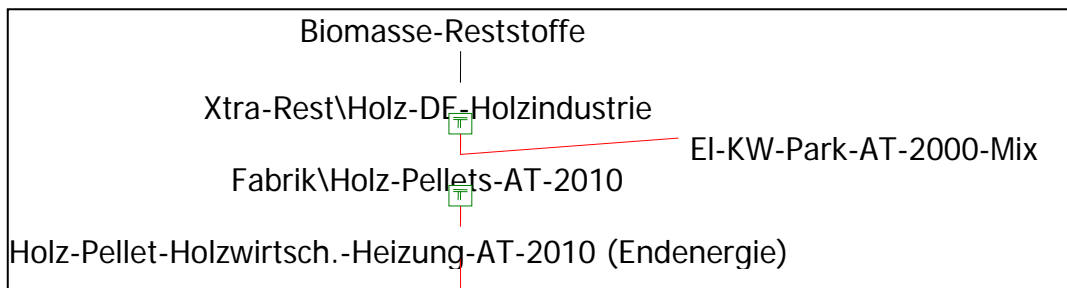


Abbildung A-8: Prozesskette für Endenergie Pellets.

Der bereits vorhandene Prozess Holz-Pellet-Holzwirtsch.-Heizung-10 kW CON-2010 (CON steht in GEMIS für „Continental“ und bezeichnet die Ländergruppe Österreich und Polen) definiert eine kleinere Holz-Pellets-Zentralheizung. Der Prozess wird soweit angepasst, dass der Bedarf an Hilfsenergie für den Betrieb nicht berücksichtigt wird. Durch einen Nutzungsgrad von 100% wird wieder der Bezug auf die Endenergie erreicht. Wie man sieht, ist dem letzten Schritt der Prozesskette der Prozess Fabrik\Holz-Pellets-AT-2010 vorgelagert. Dieser wurde durch Anpassung von Fabrik\Holz-Pellets-CON-2010 erstellt. Dieser Prozess beschreibt die Aufbereitung von Sägespänen zu Holzpellets auf Basis österreichischer Daten, und wird nun so adaptiert, dass die bei der Herstellung benötigte elektrische Energie aus dem österreichischen Netz stammt (der Prozess ist der vorher bereits beschriebene EI-KW-Park-AT-2000-Mix).

▪ *Prozesskette für den Hackschnitzel-Kessel:*

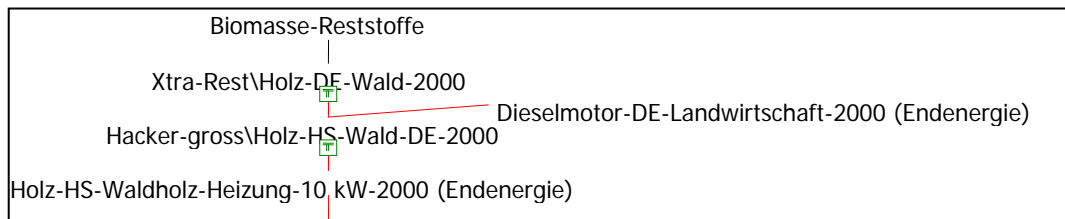


Abbildung A-9: Prozesskette zur Bereitstellung der Endenergie Hackschnitzel.

Holz-HS-Waldholz-Heizung-10 kW-2000 (Endenergie)

▪ *Endenergie Stückholz:*

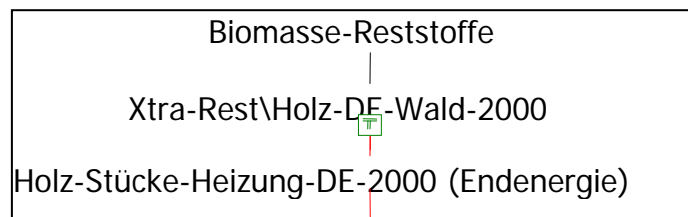


Abbildung A-10: Prozesskette zur Bereitstellung der Endenergie Stückholz.

In den folgenden Tabellen (Tabelle A-1 - Tabelle A-3) werden die, durch die eben beschriebenen Modellierungen in GEMIS, Berechnungsergebnisse angeführt.

Tabelle A-1: Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung einer kWh elektrischer Energie (Endenergie), ausgehend von drei verschiedenen Strom-Erzeugungsmixen.

	KEA nicht erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA andere [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA gesamt [kWh _{Prim} /kWh _{End}]
Öko-Mix	1,145E-02	1,030E+00	-3,556E-10	1,041E+00
Jahres-Mix	4,199E-01	5,477E-01	2,163E-01	1,184E+00
Winter-Mix	2,135E+00	1,062E-03	-3,085E-06	2,136E+00

Tabelle A-2: Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung einer kWh Endenergie für verschiedene Endenergieträger.

	KEA nicht erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA andere [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA gesamt [kWh _{Prim} /kWh _{End}]
Öl	1,0177917	9,01E-04	-8,24E-07	1,02E+00
Erdgas	1,172E+00	6,263E-04	0,000E+00	1,173E+00
Fernwärme	1,984E-01	5,149E-04	3,434E-01	5,423E-01
Pellets	1,175E-03	9,663E-01	0,000E+00	9,675E-01
Hackschnitzel	1,816E-02	1,010E+00	0,000E+00	1,028E+00
Stückholz	7,583E-05	1,000E+00	0,000E+00	1,000E+00

Tabelle A-3: Vergleich des KEA für die Bereitstellung einer kWh Endenergie mittels Fernwärme mit bzw. ohne Gutschriften. Bei „brutto“ werden keine Gutschrift verwendet, bei „netto“ hingegen schon.

	KEA nicht erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA erneuerbar [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA andere [kWh _{Prim} /kWh _{End}]	KEA gesamt [kWh _{Prim} /kWh _{End}]
FW (netto)	1,984E-01	5,149E-04	3,434E-01	5,423E-01
FW (brutto)	1,084E+00	5,481E-04	3,434E-01	1,428E+00

Tabelle A-4 zeigt die berechneten Emissionswerte, die, bei der Bereitstellung einer kWh elektrischer Energie (Endenergie), auftreten.

Tabelle A-4: Ausgewählte Emissionen für die Bereitstellung einer kWh elektrischer Energie (Endenergie) für verschiedene Strom-Erzeugungsmixe.

	CO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	SO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	TOPP-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	Staub [kg/kWh _{End}]
Öko-Mix	1,286E-02	2,638E-05	4,360E-05	8,74E-06
Jahres-Mix	2,592E-01	6,151E-04	8,004E-04	2,02E-05
Winter-Mix	6,880E-01	1,708E-03	2,248E-03	3,23E-05

In Tabelle A-5 finden sich jene ausgewählten, mit GEMIS berechneten Emissionsmengen, die für die Bereitstellung einer kWh Endenergie, notwendig sind. Diese Werte berücksichtigen dabei bereits die entsprechende Umwandlungstechnologie, um aus der Endenergie die benötigte Nutzenergie bereitzustellen. Dementsprechend werden in Tabelle A-6 die Werte für die Fernwärme-Heizung mit Berücksichtigung von Gutschriften, gegenübergestellt zu jenen Werten, die sich ohne diese ergeben.

Tabelle A-5: Ausgewählte Emissionsmengen für die Bereitstellung einer kWh Endenergie. Dabei wird die entsprechende Umwandlungstechnologie (End- auf Nutzenergie) bereits berücksichtigt (Nutzungsgrad = 100%).

	CO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	SO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	TOPP-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	Staub [kg/kWh _{End}]
Öl-BW-Heizung	3,01E-01	5,34E-04	2,86E-04	1,08E-05
Erdgas-BW-Heizung	2,510E-01	1,569E-04	3,187E-04	6,23E-06
Fernwärme-Heizung	8,000E-02	3,611E-04	8,084E-04	1,24E-05
Pellets-Heizung	8,259E-03	3,387E-04	4,461E-04	6,35E-05
Hackschnitzel-Heizung	1,428E-02	4,201E-04	7,150E-04	2,17E-04
Stückholz-Heizung	1,491E-02	2,878E-04	2,659E-03	2,48E-04

Tabelle A-6: Vergleich der Emissionsmengen für die Bereitstellung einer kWh Endenergie mittels Fernwärme mit bzw. ohne Verwendung von Gutschriften. Dabei wird die entsprechende Umwandlungstechnologie (End- auf Nutzenergie) bereits berücksichtigt (Nutzungsgrad = 100%).

	CO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	SO2-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	TOPP-Äquivalent [kg/kWh _{End}]	Staub [kg/kWh _{End}]
Fernwärme-Heizung	8,000E-02	3,611E-04	8,084E-04	0,000012436
Fernwärme-Heizung	4,185E-01	6,878E-04	1,045E-03	2,60E-05

Anhang 2: Simulation mittels GetSolar

Die Simulation mittels GetSolar wird angewendet, um die solaren Deckungsgrade bei teilsolarer Raumheizung genauer als mittels B52 bestimmen zu können. Bei Letzteren erfolgt in Übereinstimmung mit DIN 4701-10¹ keine Berechnung, sondern es wird ein Standardwert von 0,1 verwendet.

Für dieses Programm ist eine Testversion verfügbar, welche zur Ermittlung dieser Ergebnisse herangezogen wurde². Um nun in GetSolar eine möglichst gute Übereinstimmung mit der Modellierung in B52 zu erreichen, wird folgendermaßen vorgegangen:

Der Anlagentyp besitzt ebenfalls einen Brauchwasserspeicher von 400Liter und einen Pufferspeicher von 500 Liter. Der Warmwasserbedarf wird mit 5,48kWh/Tag³ entsprechend einen Standard-Zapfprofil definiert. Der Kollektor wird auch als fest montierter, selektiv beschichtetem Flachkollektor ausgeführt. Der Heizwärmebedarf wird mit 1104kWh/a bzw. 4000kWh/Jahr (keine Lüftungsanlage) für das Passivhaus und mit 5104kWh/(m²a) bzw. 8000kWh/(m²a) eingegeben. Die weiteren Eingabeparameter werden in Tabelle A-7 aufgelistet. Da die Simulation auch eine Berechnung nach DIN 4701-10 ermöglicht, können die Einstellungen auf Übereinstimmung mit dem Modell in B52 überprüft werden. Diese Übereinstimmung ist gegeben, da die Selben solaren Deckungsgrade ($SD_{WW}=0,76$ und $SD_{RH}=0,10$ (Standardwert)) berechnet werden. Die eigentliche Simulation mittels GetSolar liefert hingegen einen um 5% höheren solaren Deckungsgrad der Warmwasserbereitung von 0,81. Welcher dieser beiden Werte nun das genauere Ergebnis darstellt, kann an dieser Stelle leider nicht mit Sicherheit beurteilt werden. Es wird somit mit dem Ergebnis aus B52 ($SD_{WW}=0,76$) und natürlich den mit GetSolar ermittelten solaren Deckungsgraden (siehe Tabelle 3-6) der teilsolaren Raumheizung in B52 die Berechnung der Endenergien vorgenommen.

Tabelle A-7: Ausgewählte Eingabeparameter für die Simulation mittels GetSolar.

Kaltwassertemperatur:	10°C	Heizgrenze:	10°C
Zapftemperatur:	45°C	Nennleistung Heizung:	3,1kW
Stütztemperatur:	42°C	Kollektorfläche:	15m ²
max. Temp.:	75°C	Neigung:	30°
max. Temp. Sp.2:	75°C	Azimut:	0°
Dämmung des Speichers:	0,3W/m ² K	Solarkreislänge:	20m
Auslegungstemp.:	-16°C	Material:	Cu 18 mm, vollgedämmt
Vorlauftemp. Heiz.:	35°C	Volumenstrom:	750l/h
Rücklauftemp. Heiz.:	28°C	Speicherwärmetauscher:	60W/Km ²

¹ Entsprechend B52 Online-Hilfe

² Version 9.

³ $12,5\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a}) * 160\text{m}^2 / 365\text{Tage} = 5,48\text{kWh}/\text{Tag}$

Anhang 3: Daten zur Abschätzung des KEA_H

Tabelle A-8: Daten zur Ermittlung des KEAs der Herstellung von Speichern (Daten nach (Handke et al., 2003), ergänzt mit eigenen Berechnungen).

	Speichervolumen [Liter]		Speichervolumen [Liter]	
	450		600	
Material	Menge [kg]	KEA [MJ]	Menge [kg]	KEA [MJ]
Stahl St 37	209	6771,6	220	7128
Chromstahl	40	2080	40	2080
Glaswolle	18	635,94	20	706,6
PVC	1,8	110,16	2	122,4
Alkyharzlack	0,9	110,7	1	123
		9708,4		10160
	Speichervolumen [Liter]		Speichervolumen [Liter]	
	2250		3000	
Material	Menge [kg]	KEA [MJ]	Menge [kg]	KEA [MJ]
Stahl St 37	337	10918,8	390	12636
Chromstahl	40	2080	40	2080
Glaswolle	37	1307,21	45	1589,85
PVC	3,4	208,08	4	244,8
Alkyharzlack	1,7	209,1	2	246
		14723,19		16796,65
		KEA [MJ/kg]		
Baustahl		32,4		
Edelstahl, hochlegiert		52		
Glaswolle		35,33		
PVC		61,2		
KS Decklack als Akrylharzlack u. als Farbe		123		

Tabelle A-9: Daten zur Ermittlung des KEAs der Herstellung von Expansionspeichern (Daten nach (Handke et al., 2003), ergänzt mit eigenen Berechnungen).

	Expansionsvolumen [Liter]		Expansionsvolumen [Liter]	
	25		80	
Material	Menge [kg]	KEA [MJ]	Menge [kg]	KEA [MJ]
Stahl	4,7	152,28	12,2	395,28
Buthyl	0,7	27,86	1,5	59,7
Farbe	0,07	8,61	0,1	12,3
Schweissdraht	0,05	2,65	0,12	6,36
		191,4		473,64
		KEA [MJ/kg]		
Baustahl		32,4		
Propylen/Ethylen als Kunststoff mix und als Buthyl		39,8		
KS Decklack als Akrylharzlack u. als Farbe		123		
Kupfer als Schweißanode u. -draht		53		

Tabelle A-10: Daten zur Ermittlung des KEAs der Herstellung einer Umwälzpumpe mit 40 Watt (Daten nach (Handke et al., 2003), ergänzt mit eigenen Berechnungen).

Material	Menge [kg]	KEA [MJ]
EPDM	0,007	0,819
Kupfer	0,25	12,33
hochlegierter Stahl	0,92	47,84
Grauguss (GG20)	1,2	34,56
Aluminium	0,02	8,486
Platte mit Elektronikbauteilen	0,04	5,63296
Kunststoffe	0,03	1,194
		110,86196
		KEA [MJ/kg]
Rohgummi als EPDMA		117
Kupferblech 0,5mm		49,32
Edelstahl, hochlegiert		52
Gussstahl als Grauguß		28,8
Aluminiumkonstruktion als Aluminium		424,3
Epxidharz		140,824
Propylen/Ethylen als Kunststoff mix und als Buthyl		39,8

Die Berechnung für die „Platte mit Elektronikbauteilen“ erfolgt auf Basis des gewichtsspezifischen KEA von Epoxidharz¹.

¹ Wert für Epoxidharz aus (Tzscheutschler, 1999, S.51)

Tabelle A-11: Daten zur Ermittlung des KEAs der Herstellung von Sonnenkollektoren mit unterschiedlichen Beschichtungen (Daten nach (Handke et al., 2003) außer Messing, ergänzt mit eigenen Berechnungen).

	Flachkollektor			
	Galvanik		Sputter	
	kg	[MJ/m ²]	kg	[MJ/m ²]
Kupfer	2,83	139,5756	2,1	103,572
Messing	0	0	0	0
Edelstahl	0	0	0	0
Glas	9,9	131,472	7,5	99,6
Aluminium	3,57	602,6517	2	337,62
Mineralwolle	2,35	34,31	2	29,2
Polystrol		0	2	101,2
EPDMA	0,83	97,11	0,3	35,1
Cd freies Hartlot	0,022	0,33924	0,01	0,1542
		1005,45854		706,4462
	Vakuumkollektor			
	Galvanik		TiNOX	
	kg	[MJ/m ²]	kg	[MJ/m ²]
Kupfer	6	295,92	5,91	291,4812
Messing		0	0,48	25,44
Edelstahl		0	0,13	6,76
Glas	22	292,16	13,14	174,4992
Aluminium	4	675,24	4	675,24
Mineralwolle	2	29,2	2	29,2
Polystrol	0	0	0,32	16,192
EPDMA	1	117	0	0
Cd freies Hartlot	0,1	1,542	0	0
		1411,062		1218,8124
				KEA [MJ/kg]
Kupferblech 0,5 mm				49,32
Messing				53
Edelstahl, hochlegiert				52
Glas				13,28
Aluminiumprofil (stranggepresst) als Rahmen				168,81
Mineralwolle				14,6
Styrol als Polystyrol				50,6
Rohgummi als EPDMA				117
Blei- Metall D-mix als 37-%iger Bestandteil v. Lötmaterial				15,42

Der gewichtsspezifische KEA-Wert für Messing stammt aus (Geuder, 2004, S.66).

Tabelle A-12: Vergleich des KEA für verschiedene Sole/Wasser-Wärmepumpen.

	KEA(H)	KEA(E)	KEA(H+E)
	[GJ]	[GJ]	[GJ]
Wärmepumpe Sole-Wasser (7,8kW) (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47)	7,28		
Wärmepumpe Sole-Wasser (7,8kW) (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.47)	9,00	-1,90	7,10

Tabelle A-13: Vergleichs des KEA für verschiedene Erdwärmesonden.

	KEA(H)	KEA(E)	KEA(H+E)
	[GJ]	[GJ]	[GJ]
2-Doppel-U-Sonden (je 40m) (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.52, 57)	26,80	-0,56	26,24
3-Doppel-U-Sonden (je 40m) (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.52, 57)	38,60	-0,51	38,09
4-Doppel-U-Sonden (je 40m) (Bressler, Günther-Pomhoff & Saller, 1996, S.52, 57)	52,30	0,45	52,75
Erdsonden (Hutter & Wedler, 2002)	35,90		
Sondenanlage mit Verrohrung (ohne Entsorgung) (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, S.47)	5,32		

Tabelle A-14: KEAH für das Rohrsystem (40m) zu einer solarthermischen Installation in einem EFM (Daten nach (Handke et al., 2003), ergänzt mit eigenen Berechnungen).

	Masse [kg]	KEA [MJ/kg]	KEA [MJ]
Stahl 3/8"	27	27,69	747,63
Kupfer DN12	14	53,32	746,48
Silikon	2,1	101,48	213,108
Glaswolle (28 u. 20mm Dicke)	2,4	35,33	84,792
			1792,01

Tabelle A-15: Zusammenstellung des KEAs für die Herstellung verschiedener Komponenten eines Wärmeverteilungs- und Abgabesystems (Daten basierend auf (Schmittinger, Fleißner & Geiger, 1999, Kap. 2.3.3), ergänzt mit eigenen Berechnungen).

	KEAH [GJ]	KEAH [MJ/m ²]
Warmwasserleitungen	8,90	49,44
Dämmstoff Warmwasserleitungen	1,10	6,11
Feinblech (NT-Heizkörper)	7,17	39,83
Heizungsrohre	18,97	105,39
Dämmstoff Heizungsrohre	1,16	6,44

Tabelle A-16: KEA für verschiedene Materialien basierend auf Berechnungen mit GEMIS 4.42.

		KEA nicht erneuerbar	KEA erneuerbar	KEA andere	KEA gesamt
		[kWh/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]	[kWh/kg]
Aluminium	Metall\Aluminium-mix-DE	42,160623	5,0489	1,6934865	48,90301
Stahl	Metall\Stahl-DE-mix	4,6640447	0,02078	0,75411	5,438935
Kupfer	Metall\Kupfer-DE-primär	18,230288	0,087646	0,47987	18,7978
Glas-flach	Steine-Erden\Glas-flach	2,791854	0,0078562	0,035963	2,835673
Gummi	Chem-Org\Gummi-EPDM	22,84492	0,26814	0,55685	23,66991
HDPE-Granul	Chem-Org\HDPE	19,160543	0,02518	0,06276	19,24848
Glaswolle	Steine-Erden\Glaswolle	10,146709	0,25077	-0,030372	10,36711
Propylengly	Chem-Org\Propylenglycol	16,839778	0,06039	0,3488	17,24897
PVC-Granula	Chem-Org\PVC-mix-DE	13,634768	0,072921	0,20704	13,91473
Kupfer	Metall\Kupfer-DE-mix	11,878978	0,068873	0,81154	12,75939
Beton	Steine-Erden\Beton	0,040128	7,0552E-05	0	0,040199

Tabelle A-17: KEA_H für einen Flach- und einen Vakuumkollektor mit Werten aus GEMIS 4.42 (eigene Berechnung, ausgehend von den in GEMIS gegebenen Materialbilanzen und Werten in Tabelle A-16).

	Material	KEA nicht ern	KEA erneuerl	KEA andere	KEA gesamt
	[kg/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]
Solarkollektor-Flach-2000					
Metall\Aluminium-mix-DE	30,00	1264,82	151,47	50,80	1467,09
Metall\Stahl-DE-mix	62,80	292,90	1,30	47,36	341,57
Metall\Kupfer-DE-primär	84,55	1541,37	7,41	40,57	1589,35
Steine-Erden\Glas-flach	71,50	199,62	0,56	2,57	202,75
Chem-Org\Gummi-EPDM	4,50	102,80	1,21	2,51	106,51
Chem-Org\HDPE	52,40	1004,01	1,32	3,29	1008,62
Steine-Erden\Glaswolle	12,50	126,83	3,13	-0,38	129,59
Chem-Org\Propylenglycol	10,00	168,40	0,60	3,49	172,49
Chem-Org\PVC-mix-DE	0,40	5,45	0,03	0,08	5,57
		4706,21	167,04	150,29	5023,54
	Material	KEA nicht ern	KEA erneuerl	KEA andere	KEA gesamt
Solar-Kollektor-Vakuum-Röhre	[kg/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]	[kWh/kW]
Metall\Aluminium-mix-DE	0,10	4,22	0,50	0,17	4,89
Metall\Stahl-DE-mix	87,00	405,77	1,81	65,61	473,19
Metall\Kupfer-DE-primär	40,10	731,03	3,51	19,24	753,79
Steine-Erden\Glas-flach	70,00	195,43	0,55	2,52	198,50
Chem-Org\Gummi-EPDM	2,10	47,97	0,56	1,17	49,71
Chem-Org\HDPE	23,10	442,61	0,58	1,45	444,64
Chem-Org\Propylenglycol	7,20	121,25	0,43	2,51	124,19
Chem-Org\PVC-mix-DE	0,30	4,09	0,02	0,06	4,17
		1952,37	7,98	92,73	2053,08

Tabelle A-18: Werte des KEA_H für verschiedene Komponenten von WBR-Systemen, ausgehend von der Untersuchung verschiedener Studien (siehe dazu Kapitel 0 und 4.5.1). Werte bezogen auf die Gebäudenutzfläche (160m²). Genaueres zu den Nutzungsdauern in Kapitel 5.1.3.

	ND	KEA(H+E)	
	[a]	[GJ]	[kWh/m ² a]
Gas-BW-Kessel (3,1-13kW)	20	4,00	0,35
Anschluss Gasnetz	50	4,00	0,14
Fernwärme Hausstation	20	2,00	0,17
Anschluss Fernwärmenetz	50	4,00	0,14
Pellets-Kessel + Fördereinrichtung + Lager (3,4-13kW)	20	22,00	1,91
Hackschnitzel-Kessel + Fördereinrichtung + Lager (15kW)	20	25,00	2,17
Stückholz-Kessel (10kW)	20	20,00	1,74
Sole/Wasser-Wärmepumpe	20	5,00	0,43
Wärmequellenanlage Tiefensonde	50	15,00	0,52
Abluftwärmepumpe	20	3,76	0,33
Lüftungsanlage mit WRG	20	3,7	0,32
2 Stk. Durchlauferhitzer	15	1,16	0,13
Kamin	35	1,00	0,05
Wärmeverteilung + Fußbodenheizung	35	62,4	3,10
Warmwasserverteilung	40	7,22	0,31
WW-Speicher 200l	25	9,00	0,63
WW-Speicher (Solare Einbindung) 400l	25	9,60	0,67
Pufferspeicher 300l	25	9,30	0,65
Pufferspeicher (Solare Einbindung) 500l	25	9,90	0,69
Lüftungsverrohrung	40	3,25	0,14
Kollektor 6m ² + Montageset	25	5,46	0,38
Kollektor 15m ² + Montageset	25	13,65	0,95
Verrohrung Kollektor	40	1,19	0,05
Steuergerät	12	0,87	0,13
Umwälzpumpe (30W)	18	0,11	0,01
Speicherladepumpe WW (53W)	18	0,16	0,02
Speicherladepumpe RH (45W)	18	0,15	0,01
Solarpumpe (38W)	18	0,11	0,01

Tabelle A-19: Werte für den KEA_{H+E} verschiedener WBR-Systeme, ausgehend von den Werten der Komponenten aus Tabelle A-18.

	KEA(H+E)		KEA(H+E)
	[kWh/m ² a]		[kWh/m ² a]
Gas-BW	4,596	Hackschnitzel + LS	7,403
Gas-BW + S	5,205	Hackschnitzel + LS + S	8,012
Gas-BW + LS	5,058	Hackschnitzel + S(RH)	8,160
Gas-BW + LS + S	5,667	Hackschnitzel + LS + S(RH)	8,622
Gas-BW + S(RH)	6,476	Stückholz	6,506
Gas-BW + LS + S(RH)	6,938	Stückholz + S	7,115
FW	4,372	Stückholz + LS	6,968
FW + S	4,982	Stückholz + LS + S	7,577
FW + LS	4,835	Stückholz + S(RH)	7,726
FW + LS + S	5,444	Stückholz + LS + S(RH)	8,188
FW + S(RH)	6,252	WP(Sonde)	5,015
FW + LS + S(RH)	6,715	WP(Sonde) + S	5,624
Pellets	6,680	WP(Sonde) + LS	5,477
Pellets + S	7,289	WP(Sonde) + LS + S	6,086
Pellets + LS	7,142	WP(Sonde) + S(RH)	6,895
Pellets + LS + S	7,751	WP(Sonde) + LS + S(RH)	7,357
Pellets + S(RH)	7,899	WP(LL)+LS	1,727
Pellets + LS + S(RH)	8,362	WP(LL)+LS+S	2,294
Hackschnitzel	6,940	WP(LL)+LS+dez.WW	0,923
Hackschnitzel + S	7,549		

Anhang 4: Daten zur Berechnung des End- und Primärenergiebedarfs

Tabelle A-20: Ergebnisse für den Endenergiebedarf für verschiedene WBR-Systeme (Berechnung mittels B52).

	EE (ohne HS)				Hilfsstrom			
	25 kWh/m ² a		50 kWh/m ² a		25 kWh/m ² a		50 kWh/m ² a	
	opt.	worst	opt.	worst	opt.	worst	opt.	worst
	[kWh/m ² a]				[kWh/m ² a]			
Gas-BW	41,65	43,95	65,15	68,70	1,29	2,90	1,63	3,24
Gas-BW + S	28,21	29,73	51,71	54,48	1,49	3,10	1,84	3,45
Gas-BW + LS	24,69	26,03	48,14	50,78	2,74	4,35	3,09	4,70
Gas-BW + LS + S	11,24	11,81	34,69	36,56	2,94	4,55	3,29	4,90
Gas-BW + S(RH)	23,91	25,20	47,31	49,48	1,82	3,43	2,16	3,77
Gas-BW + LS + S(RH)	7,40	7,78	30,18	31,81	3,29	4,90	3,61	5,22
FW	42,08	42,92	67,33	68,68	1,13	2,74	1,13	2,74
FW + S	31,53	32,16	56,78	57,92	1,30	2,91	1,30	2,91
FW + LS	23,80	24,28	49,05	50,03	2,84	4,45	2,84	4,45
FW + LS + S	13,25	13,52	38,50	39,27	3,00	4,61	3,00	4,61
FW + S(RH)	26,20	26,72	51,27	52,30	1,65	3,26	1,65	3,26
FW + LS + S(RH)	7,84	8,00	32,83	33,49	3,36	4,97	3,36	4,97
Pellets	51,69	54,84	77,83	82,53	3,59	5,20	3,88	5,49
Pellets + S	36,13	38,19	62,47	66,22	3,41	5,02	3,88	5,49
Pellets + LS	30,59	32,76	59,08	63,01	4,97	6,58	5,28	6,89
Pellets + LS + S	14,89	15,91	43,53	46,43	4,48	6,09	5,19	6,80
Pellets + S(RH)	29,03	31,07	55,57	59,02	3,51	5,12	4,31	5,92
Pellets + LS + S(RH)	9,05	9,64	36,52	38,69	4,52	6,13	4,53	6,14
Hackschnitzel	52,96	56,33	79,84	84,74	3,59	5,20	3,88	5,49
Hackschnitzel + S	37,01	39,36	64,10	67,85	3,41	5,02	3,88	5,49
Hackschnitzel + LS	31,32	33,72	60,56	64,48	4,97	6,58	5,28	6,89
Hackschnitzel + LS + S	15,23	16,36	44,62	47,52	4,48	6,09	5,19	6,80
Hackschnitzel + S(RH)	29,78	31,78	57,07	60,51	3,51	5,12	4,31	5,92
Hackschnitzel + LS + S(RH)	9,08	9,73	37,47	39,64	4,49	6,10	4,53	6,14
Stückholz	54,22	58,02	81,86	86,75	2,76	4,37	2,96	4,57
Stückholz + S	37,90	40,54	65,73	69,48	2,78	4,39	3,09	4,70
Stückholz + LS	32,28	34,50	62,03	66,45	4,25	5,86	4,45	6,06
Stückholz + LS + S	15,68	16,81	45,70	48,97	4,07	5,68	4,53	6,14
Stückholz +S(RH)	30,53	32,52	58,52	62,01	2,64	4,25	3,38	4,99
Stückholz + LS + S(RH)	9,30	9,94	38,06	40,59	4,39	6,00	5,01	6,62
WP(Sonde)	9,60	10,86	15,81	17,82	1,56	3,17	1,97	3,58
WP(Sonde) + S	6,40	7,27	12,61	14,23	1,73	3,34	2,22	3,83
WP(Sonde) + LS	5,80	7,27	11,65	13,12	2,90	4,51	3,39	5,00
WP(Sonde) + LS + S	2,60	2,93	8,45	9,53	3,07	4,68	3,56	5,17
WP(Sonde) + S(RH)	5,54	6,31	11,69	13,21	2,15	3,76	2,55	4,16
WP(Sonde) + LS + S(RH)	1,76	1,99	7,50	8,47	3,40	5,01	3,89	5,50
WP(LL)+LS	7,84	8,88	0,00	0,00	1,78	1,87	0,00	0,00
WP(LL)+LS+S	3,71	4,30	0,00	0,00	2,20	2,31	0,00	0,00
WP(LL)+LS+dez.WW	15,81	16,26	0,00	0,00	1,70	1,79	0,00	0,00

Tabelle A-21: Berechnungsergebnisse für den KEA der Nutzung mit Verwendung des "Jahres-Strommixes", unter Berücksichtigung des minimalen Endenergiebedarfs (siehe Tabelle A-20).

	Jahres-Mix					
	HWB=25kWh/m ² a			HWB=50kWh/m ² a		
	KEA nicht erneuer- bar	KEA erneuer- bar	KEA andere	KEA nicht erneuer- bar	KEA erneuer- bar	KEA andere
	[kWh/m ² a]					
Gas-BW	49,37	0,73	0,28	77,07	0,93	0,35
Gas-BW + S	33,70	0,83	0,32	61,40	1,04	0,40
Gas-BW + LS	30,10	1,52	0,59	57,74	1,72	0,67
Gas-BW + LS + S	14,41	1,62	0,64	42,05	1,82	0,71
Gas-BW + S(RH)	28,80	1,01	0,39	56,37	1,21	0,47
Gas-BW + LS + S(RH)	10,06	1,81	0,71	36,90	2,00	0,78
FW	8,82	0,64	14,69	13,83	0,65	23,37
FW + S	6,80	0,73	11,11	11,81	0,74	19,78
FW + LS	5,91	1,57	8,79	10,92	1,58	17,46
FW + LS + S	3,89	1,65	5,20	8,90	1,66	13,87
FW + S(RH)	5,89	0,92	9,35	10,86	0,93	17,96
FW + LS + S(RH)	2,97	1,84	3,42	7,92	1,86	12,00
Pellets	1,57	51,91	0,78	1,72	77,33	0,84
Pellets + S	1,47	36,78	0,74	1,70	62,49	0,84
Pellets + LS	2,12	32,28	1,08	2,29	59,98	1,14
Pellets + LS + S	1,90	16,84	0,97	2,23	44,91	1,12
Pellets + S(RH)	1,51	29,97	0,76	1,88	56,06	0,93
Pellets + LS + S(RH)	1,91	11,22	0,98	1,95	37,77	0,98
Hackschnitzel	2,47	55,46	0,78	3,08	82,78	0,84
Hackschnitzel + S	2,10	39,25	0,74	2,79	66,88	0,84
Hackschnitzel + LS	2,66	34,36	1,08	3,32	64,07	1,14
Hackschnitzel + LS + S	2,16	17,84	0,97	2,99	47,92	1,12
Hackschnitzel + S(RH)	2,01	32,00	0,76	2,85	60,01	0,93
Hackschnitzel + LS + S(RH)	2,05	11,63	0,97	2,58	40,33	0,98
Stückholz	1,16	55,73	0,60	1,25	83,48	0,64
Stückholz + S	1,17	39,42	0,60	1,30	67,42	0,67
Stückholz + LS	1,79	34,61	0,92	1,87	64,47	0,96
Stückholz + LS + S	1,71	17,91	0,88	1,91	48,18	0,98
Stückholz +S(RH)	1,11	31,98	0,57	1,42	60,37	0,73
Stückholz + LS + S(RH)	1,84	11,70	0,95	2,11	40,80	1,08
WP(Sonde)	4,69	6,11	2,41	7,47	9,74	3,85
WP(Sonde) + S	3,41	4,45	1,76	6,23	8,12	3,21
WP(Sonde) + LS	3,65	4,76	1,88	6,32	8,24	3,25
WP(Sonde) + LS + S	2,38	3,11	1,23	5,04	6,58	2,60
WP(Sonde) + S(RH)	3,23	4,21	1,66	5,98	7,80	3,08
WP(Sonde) + LS + S(RH)	2,17	2,83	1,12	4,78	6,24	2,46
WP(LL)+LS	4,04	5,27	2,08	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+S	2,48	3,24	1,28	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+dez.WW	7,35	9,59	3,79	0,00	0,00	0,00

Tabelle A-22: Berechnungsergebnisse für den KEA der Nutzung mit Verwendung des "Winter-Strommixes", unter Berücksichtigung des minimalen Endenergiebedarfs (siehe Tabelle A-20).

	Winter-Mix					
	HWB=25kWh/m ² a			HWB=50kWh/m ² a		
	KEA nicht erneuer-	KEA erneuer-	KEA andere	KEA nicht erneuer-	KEA erneuer-	KEA andere
	[kWh/m ² a]					
Gas-BW	51,58	0,03	0,00	79,86	0,04	0,00
Gas-BW + S	36,25	0,02	0,00	64,55	0,03	0,00
Gas-BW + LS	34,80	0,02	0,00	63,04	0,03	0,00
Gas-BW + LS + S	19,45	0,01	0,00	47,69	0,03	0,00
Gas-BW + S(RH)	31,92	0,02	0,00	60,08	0,03	0,00
Gas-BW + LS + S(RH)	15,70	0,01	0,00	43,09	0,02	0,00
FW	10,76	0,02	14,45	15,77	0,04	23,12
FW + S	9,03	0,02	10,83	14,04	0,03	19,50
FW + LS	10,78	0,02	8,17	15,79	0,03	16,84
FW + LS + S	9,03	0,01	4,55	14,04	0,02	13,22
FW + S(RH)	8,72	0,02	9,00	13,69	0,03	17,61
FW + LS + S(RH)	8,73	0,01	2,69	13,68	0,02	11,27
Pellets	7,72	49,95	0,00	8,37	75,21	0,00
Pellets + S	7,32	34,92	0,00	8,36	60,37	0,00
Pellets + LS	10,64	29,56	0,00	11,34	57,09	0,00
Pellets + LS + S	9,58	14,39	0,00	11,13	42,07	0,00
Pellets + S(RH)	7,53	28,06	0,00	9,27	53,70	0,00
Pellets + LS + S(RH)	9,66	8,75	0,00	9,71	35,29	0,00
Hackschnitzel	8,62	53,50	0,00	9,73	80,65	0,00
Hackschnitzel + S	7,95	37,39	0,00	9,45	64,76	0,00
Hackschnitzel + LS	11,18	31,64	0,00	12,37	61,18	0,00
Hackschnitzel + LS + S	9,84	15,39	0,00	11,89	45,08	0,00
Hackschnitzel + S(RH)	8,03	30,09	0,00	10,24	57,65	0,00
Hackschnitzel + LS + S(RH)	9,75	9,18	0,00	10,35	37,86	0,00
Stückholz	5,90	54,22	0,00	6,32	81,86	0,00
Stückholz + S	5,94	37,90	0,00	6,60	65,73	0,00
Stückholz + LS	9,07	32,28	0,00	9,50	62,03	0,00
Stückholz + LS + S	8,69	15,68	0,00	9,67	45,70	0,00
Stückholz +S(RH)	5,64	30,53	0,00	7,22	58,52	0,00
Stückholz + LS + S(RH)	9,37	9,30	0,00	10,70	38,07	0,00
WP(Sonde)	23,82	0,01	0,00	37,95	0,02	0,00
WP(Sonde) + S	17,35	0,01	0,00	31,66	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS	18,57	0,01	0,00	32,10	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS + S	12,10	0,01	0,00	25,64	0,01	0,00
WP(Sonde) + S(RH)	16,41	0,01	0,00	30,40	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS + S(RH)	11,01	0,01	0,00	24,31	0,01	0,00
WP(LL)+LS	20,53	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+S	12,62	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+dez.WW	37,38	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle A-23: Berechnungsergebnisse für den KEA der Nutzung mit Verwendung des "Öko-Strommixes", unter Berücksichtigung des minimalen Endenergiebedarfs (siehe Tabelle A-20).

	Öko-Mix					
	HWB=25kWh/m ² a			HWB=50kWh/m ² a		
	KEA nicht erneuer-	KEA erneuer-	KEA andere	KEA nicht erneuer-	KEA erneuer-	KEA andere
	[kWh/m ² a]					
Gas-BW	48,85	1,35	0,00	76,40	1,72	0,00
Gas-BW + S	33,09	1,55	0,00	60,65	1,93	0,00
Gas-BW + LS	28,98	2,84	0,00	56,48	3,21	0,00
Gas-BW + LS + S	13,21	3,03	0,00	40,71	3,41	0,00
Gas-BW + S(RH)	28,05	1,89	0,00	55,49	2,25	0,00
Gas-BW + LS + S(RH)	8,71	3,39	0,00	35,42	3,74	0,00
FW	8,36	1,19	14,45	13,37	1,20	23,12
FW + S	6,27	1,35	10,83	11,28	1,37	19,50
FW + LS	4,75	2,94	8,17	9,76	2,95	16,84
FW + LS + S	2,66	3,10	4,55	7,67	3,11	13,22
FW + S(RH)	5,22	1,71	9,00	10,19	1,73	17,61
FW + LS + S(RH)	1,59	3,46	2,69	6,55	3,48	11,27
Pellets	0,10	53,64	0,00	0,14	79,20	0,00
Pellets + S	0,08	38,42	0,00	0,12	64,36	0,00
Pellets + LS	0,09	34,68	0,00	0,13	62,53	0,00
Pellets + LS + S	0,07	19,00	0,00	0,11	47,41	0,00
Pellets + S(RH)	0,07	31,67	0,00	0,11	58,14	0,00
Pellets + LS + S(RH)	0,06	13,40	0,00	0,09	39,95	0,00
Hackschnitzel	1,00	57,19	0,00	1,49	84,65	0,00
Hackschnitzel + S	0,71	40,90	0,00	1,21	68,75	0,00
Hackschnitzel + LS	0,63	36,76	0,00	1,16	66,61	0,00
Hackschnitzel + LS + S	0,33	20,00	0,00	0,87	50,42	0,00
Hackschnitzel + S(RH)	0,58	33,70	0,00	1,09	62,09	0,00
Hackschnitzel + LS + S(RH)	0,22	13,80	0,00	0,73	42,52	0,00
Stückholz	0,04	57,06	0,00	0,04	84,91	0,00
Stückholz + S	0,03	40,76	0,00	0,04	68,91	0,00
Stückholz + LS	0,05	36,66	0,00	0,06	66,61	0,00
Stückholz + LS + S	0,05	19,87	0,00	0,06	50,36	0,00
Stückholz +S(RH)	0,03	33,25	0,00	0,04	62,00	0,00
Stückholz + LS + S(RH)	0,05	13,82	0,00	0,06	43,22	0,00
WP(Sonde)	0,13	11,49	0,00	0,20	18,31	0,00
WP(Sonde) + S	0,09	8,37	0,00	0,17	15,27	0,00
WP(Sonde) + LS	0,10	8,96	0,00	0,17	15,49	0,00
WP(Sonde) + LS + S	0,06	5,84	0,00	0,14	12,37	0,00
WP(Sonde) + S(RH)	0,09	7,92	0,00	0,16	14,66	0,00
WP(Sonde) + LS + S(RH)	0,06	5,31	0,00	0,13	11,73	0,00
WP(LL)+LS	0,11	9,91	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+S	0,07	6,09	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+dez.WW	0,20	18,03	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle A-24: Berechnungsergebnisse für den KEA der Nutzung mit Verwendung des "Winterstrommixes", unter Berücksichtigung des maximalen Endenergiebedarfs (siehe Tabelle A-20).

	Winter-Mix					
	HWB=25kWh/(m ² a)			HWB=50kWh/(m ² a)		
	KEA nicht erneuer- bar	KEA er- neuer-bar	KEA andere	KEA nicht erneuer- bar	KEA er- neuer-bar	KEA andere
	[kWh/(m ² a)]					
Gas-BW	57,72	0,03	0,00	87,46	0,05	0,00
Gas-BW + S	41,47	0,02	0,00	71,24	0,04	0,00
Gas-BW + LS	39,80	0,02	0,00	69,57	0,04	0,00
Gas-BW + LS + S	23,56	0,01	0,00	53,32	0,03	0,00
Gas-BW + S(RH)	36,87	0,02	0,00	66,06	0,03	0,00
Gas-BW + LS + S(RH)	19,58	0,01	0,00	48,44	0,03	0,00
FW	14,36	0,03	14,74	19,47	0,04	23,58
FW + S	12,59	0,02	11,04	17,70	0,03	19,89
FW + LS	14,31	0,02	8,34	19,42	0,03	17,18
FW + LS + S	12,52	0,01	4,64	17,63	0,03	13,49
FW + S(RH)	12,26	0,02	9,18	17,33	0,03	17,96
FW + LS + S(RH)	12,19	0,01	2,75	17,25	0,02	11,50
Pellets	11,16	53,00	0,00	11,82	79,75	0,00
Pellets + S	10,76	36,91	0,00	11,80	63,99	0,00
Pellets + LS	14,08	31,66	0,00	14,78	60,89	0,00
Pellets + LS + S	13,02	15,38	0,00	14,57	44,87	0,00
Pellets + S(RH)	10,97	30,03	0,00	12,71	57,04	0,00
Pellets + LS + S(RH)	13,10	9,32	0,00	13,15	37,39	0,00
Hackschnitzel	12,12	56,91	0,00	13,26	85,61	0,00
Hackschnitzel + S	11,43	39,77	0,00	12,95	68,54	0,00
Hackschnitzel + LS	14,66	34,07	0,00	15,88	65,14	0,00
Hackschnitzel + LS + S	13,30	16,53	0,00	15,38	48,01	0,00
Hackschnitzel + S(RH)	11,51	32,11	0,00	13,74	61,13	0,00
Hackschnitzel + LS + S(RH)	13,20	9,84	0,00	13,83	40,05	0,00
Stückholz	9,33	58,02	0,00	9,76	86,75	0,00
Stückholz + S	9,37	40,54	0,00	10,04	69,49	0,00
Stückholz + LS	12,51	34,51	0,00	12,94	66,46	0,00
Stückholz + LS + S	12,13	16,82	0,00	13,11	48,98	0,00
Stückholz +S(RH)	9,07	32,52	0,00	10,66	62,02	0,00
Stückholz + LS + S(RH)	12,81	9,95	0,00	14,13	40,60	0,00
WP(Sonde)	29,95	0,01	0,00	45,68	0,02	0,00
WP(Sonde) + S	22,65	0,01	0,00	38,55	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS	25,14	0,01	0,00	38,68	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS + S	16,24	0,01	0,00	31,38	0,02	0,00
WP(Sonde) + S(RH)	21,49	0,01	0,00	37,08	0,02	0,00
WP(Sonde) + LS + S(RH)	14,94	0,01	0,00	29,82	0,01	0,00
WP(LL)+LS	22,94	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+S	14,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
WP(LL)+LS+dez.WW	38,52	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Anhang 5: KEA für einen HWB von 50kWh/(m²a)

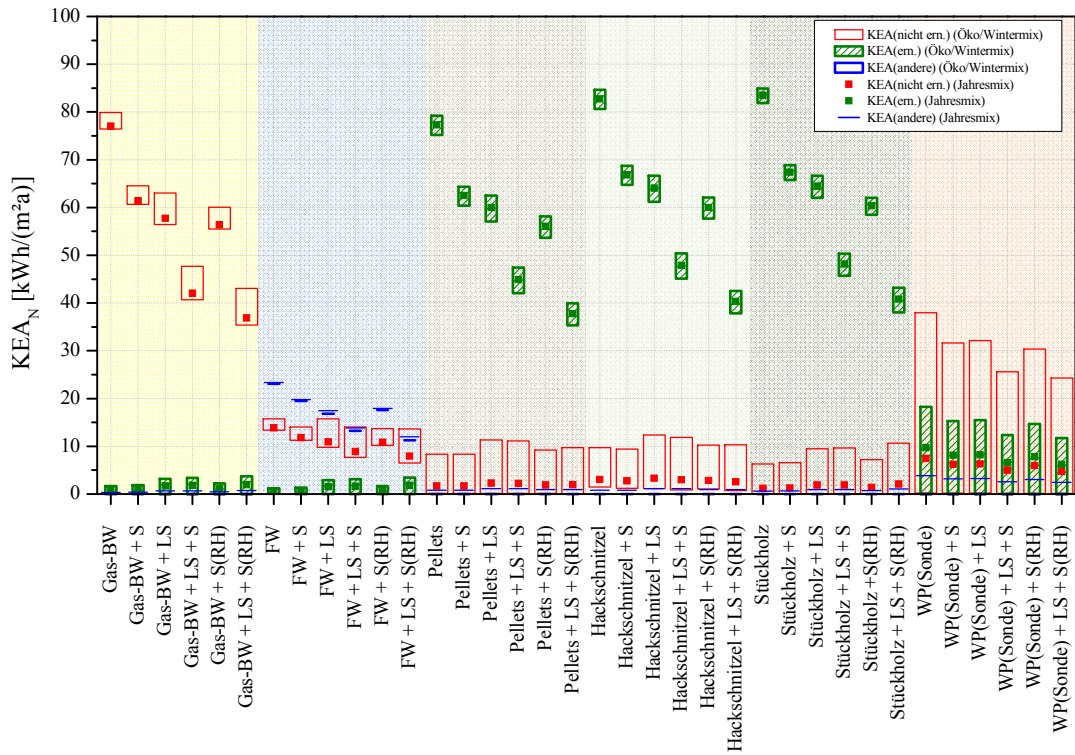


Abbildung A-11: Darstellung des KEA_N für verschiedene WBR-Systeme in einem EFH mit einem HWB von 50kWh/(m²a) (ohne LS). Getrennte Darstellung von nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen (vorallem Müllverbrennung) Anteilen (Daten siehe im Anhang, Tabelle A-21, Tabelle A-22 und Tabelle A-23).

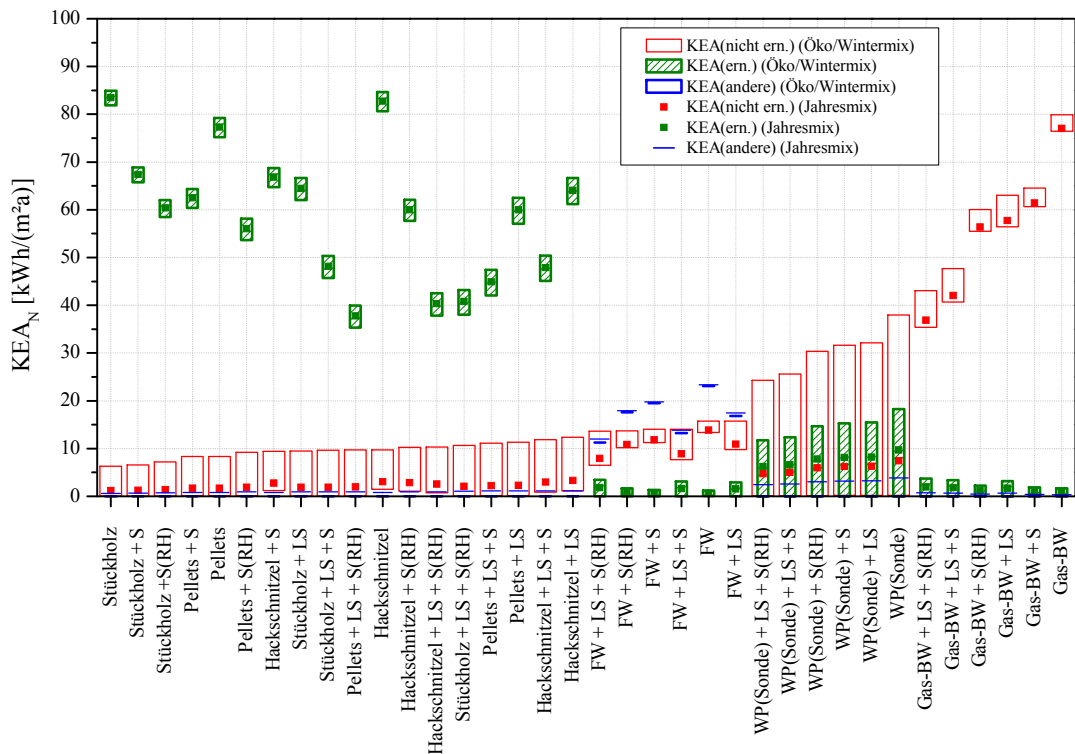


Abbildung A-12: Darstellung der Daten aus Abbildung A-11, aufsteigend geordnet nach dem KEA (nicht erneuerbar).

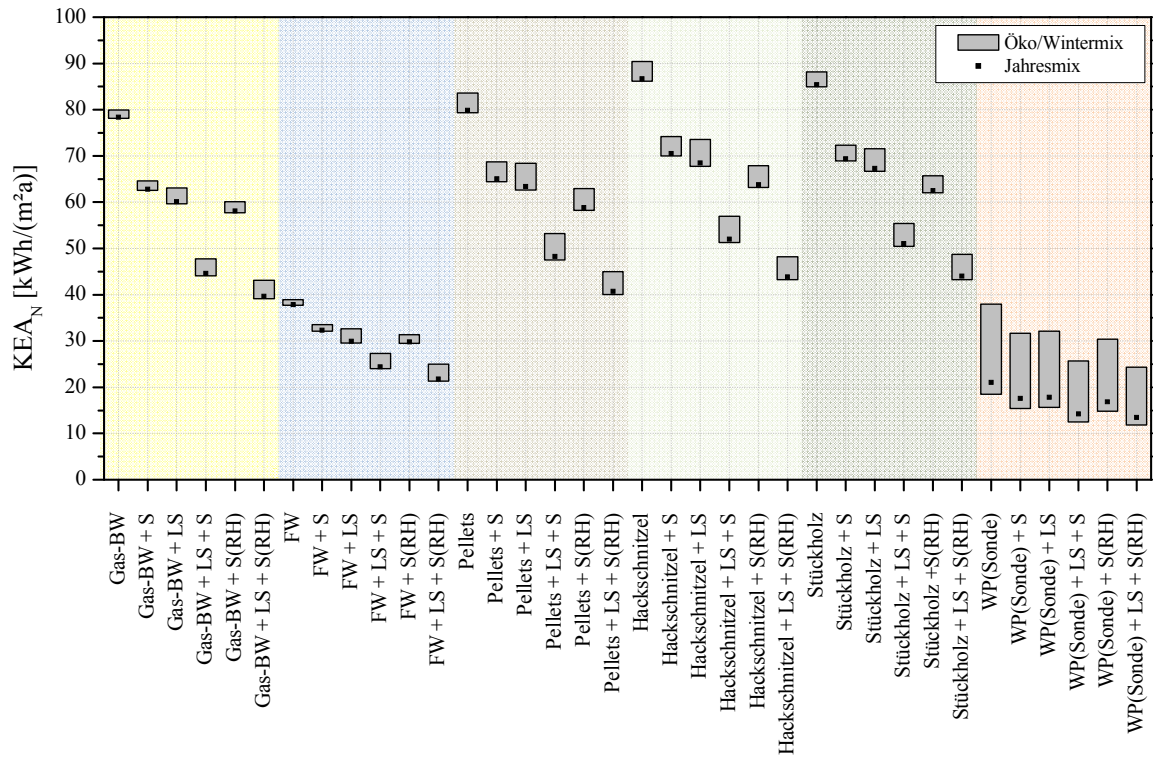


Abbildung A-13: Darstellung der Bandbreite des KEA_N als Summe der nicht erneuerbaren, erneuerbaren und anderen Anteile (siehe Abbildung A-11).

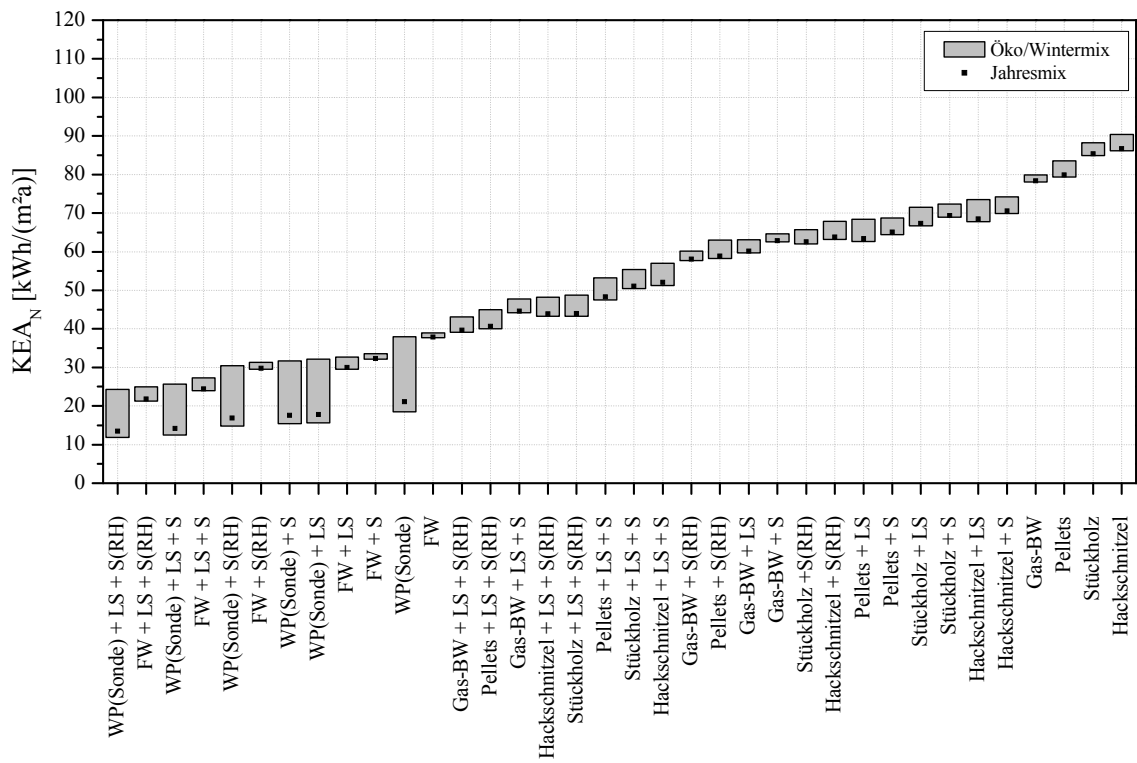


Abbildung A-14: Darstellung der Daten aus Abbildung A-13, geordnet nach dem Maximalwert der erwarteten Bandbreite.

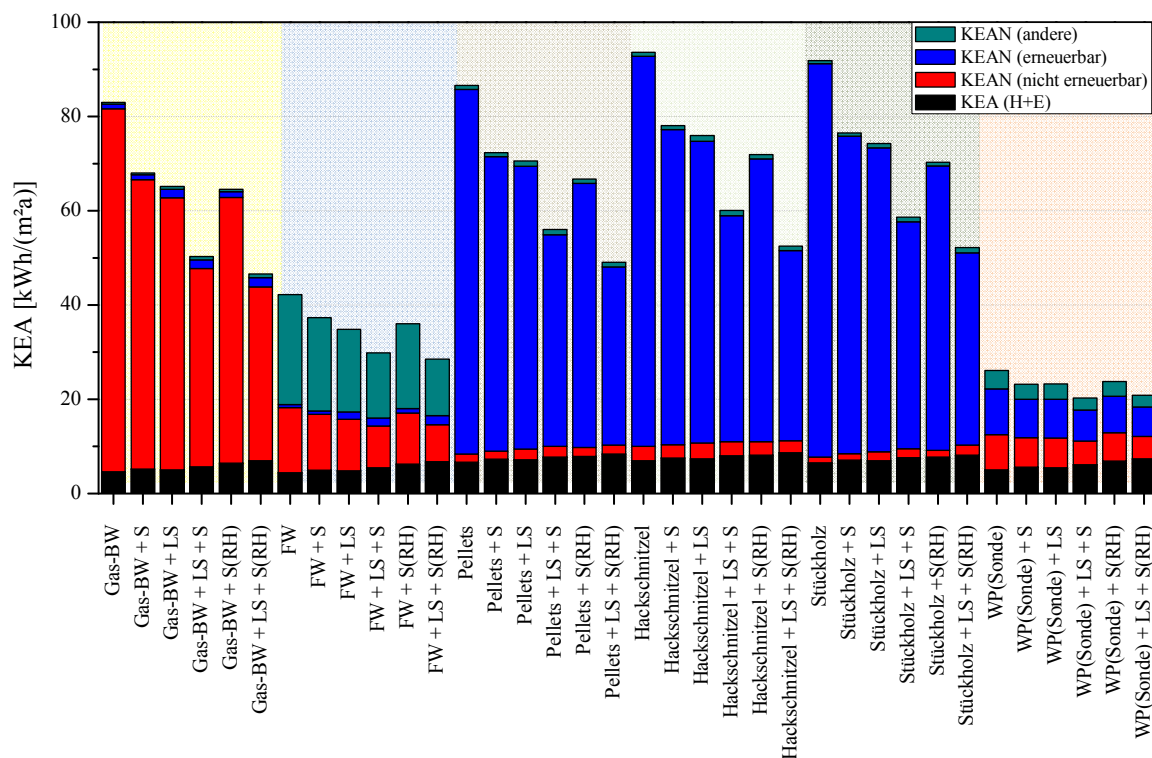


Abbildung A-15: Darstellung des gesamten KEAs der untersuchten WBR-Systeme beim EFH mit dem HWB von $50\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Berechnung gilt für optimalen Endenergiebedarf und Jahresstrommix (Daten siehe Anhang Tabelle A-19 und Tabelle A-21). Daten geordnet nach aufsteigendem KEA in Abbildung A-17.

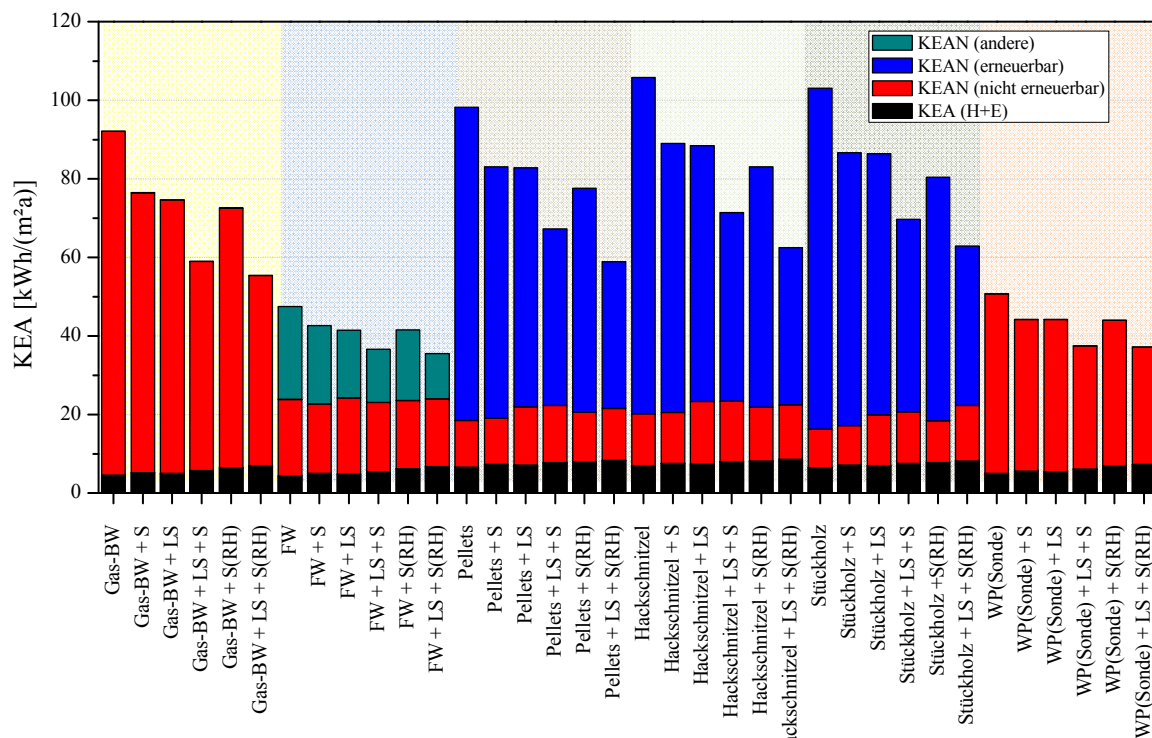


Abbildung A-16: Darstellung des gesamten KEAs der untersuchten WBR-Systeme. Berechnung gilt für maximalen Endenergiebedarf (siehe Kapitel 4.2) und Jahresstrommix (Daten siehe Anhang, Tabelle A-19 und Tabelle A-24). Daten geordnet nach aufsteigendem KEA in Abbildung A-18.

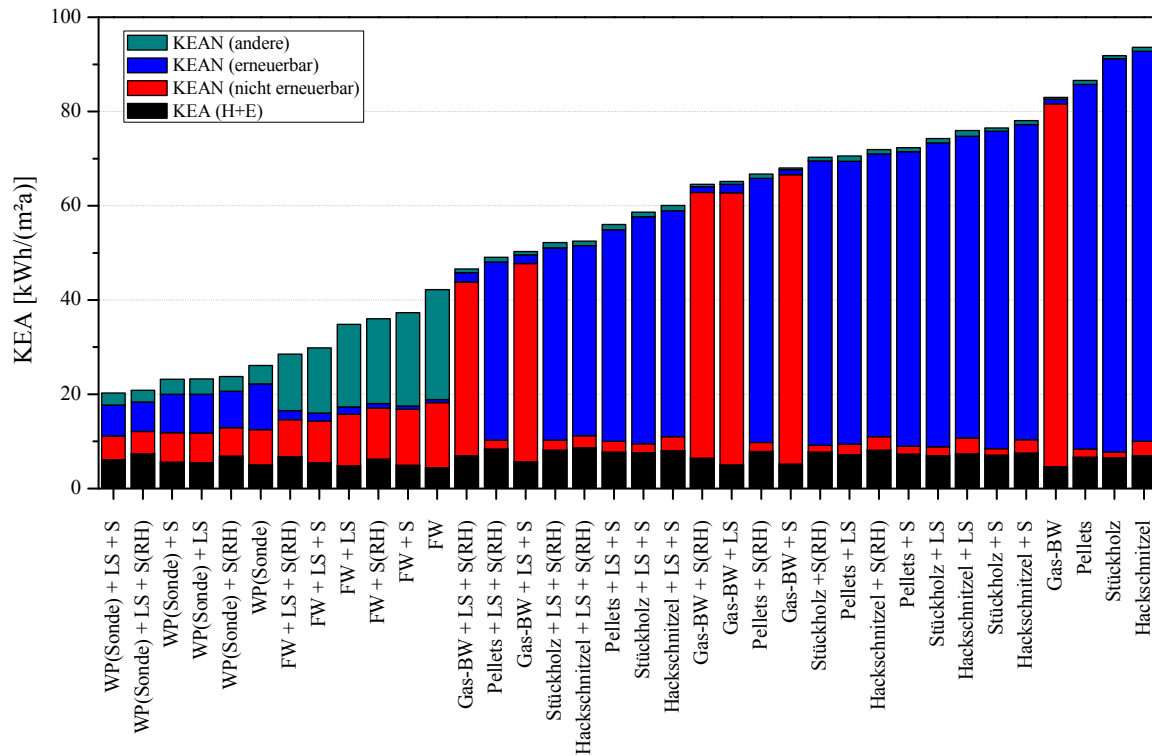


Abbildung A-17: Darstellung der Daten aus Abbildung A-15, geordnet nach aufsteigenden KEA_{ges} .

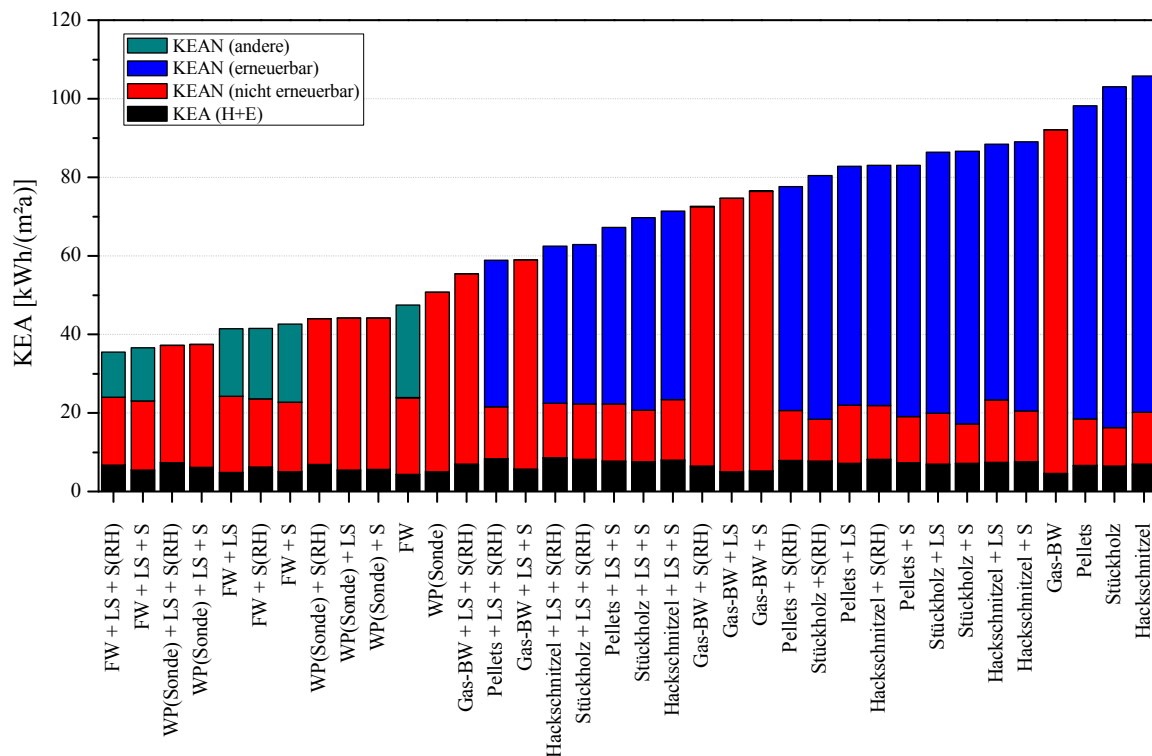


Abbildung A-18: Darstellung der Daten aus Abbildung A-16, geordnet nach aufsteigenden KEA_{ges} .

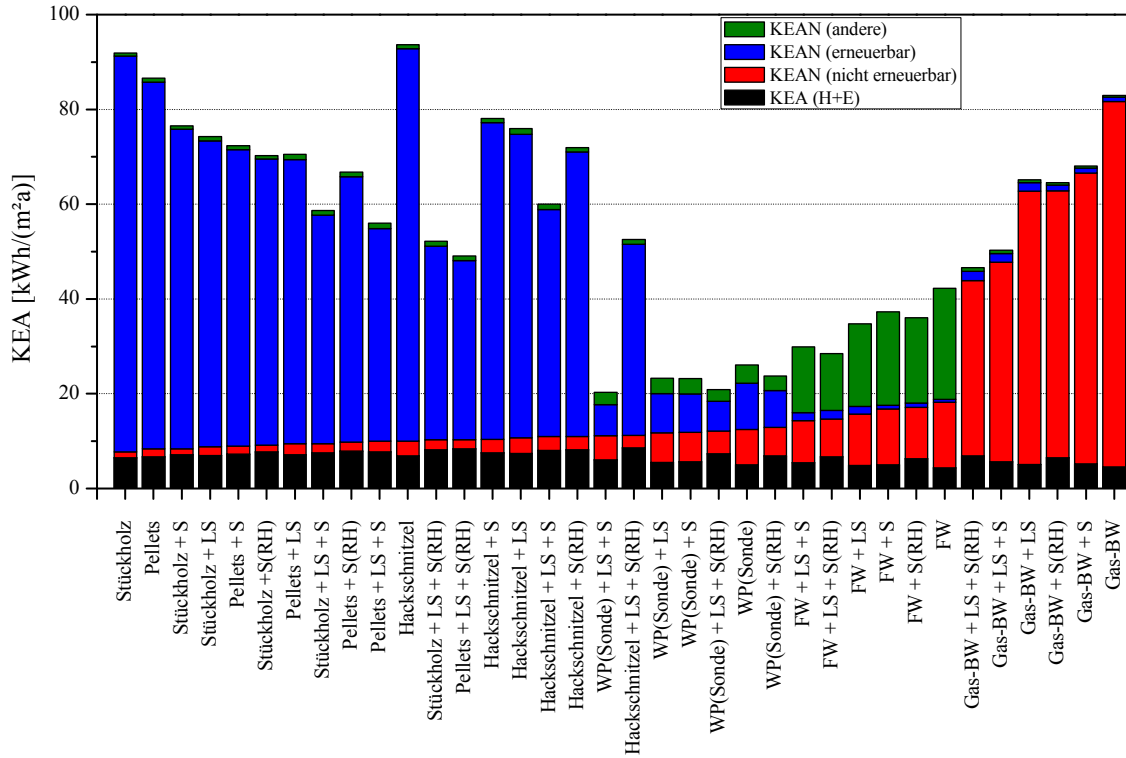


Abbildung A-19: Darstellung der Daten aus Abbildung A-15, geordnet nach der Summe aus KEA_{H+E} und $KEA(\text{nicht erneuerbar})$.

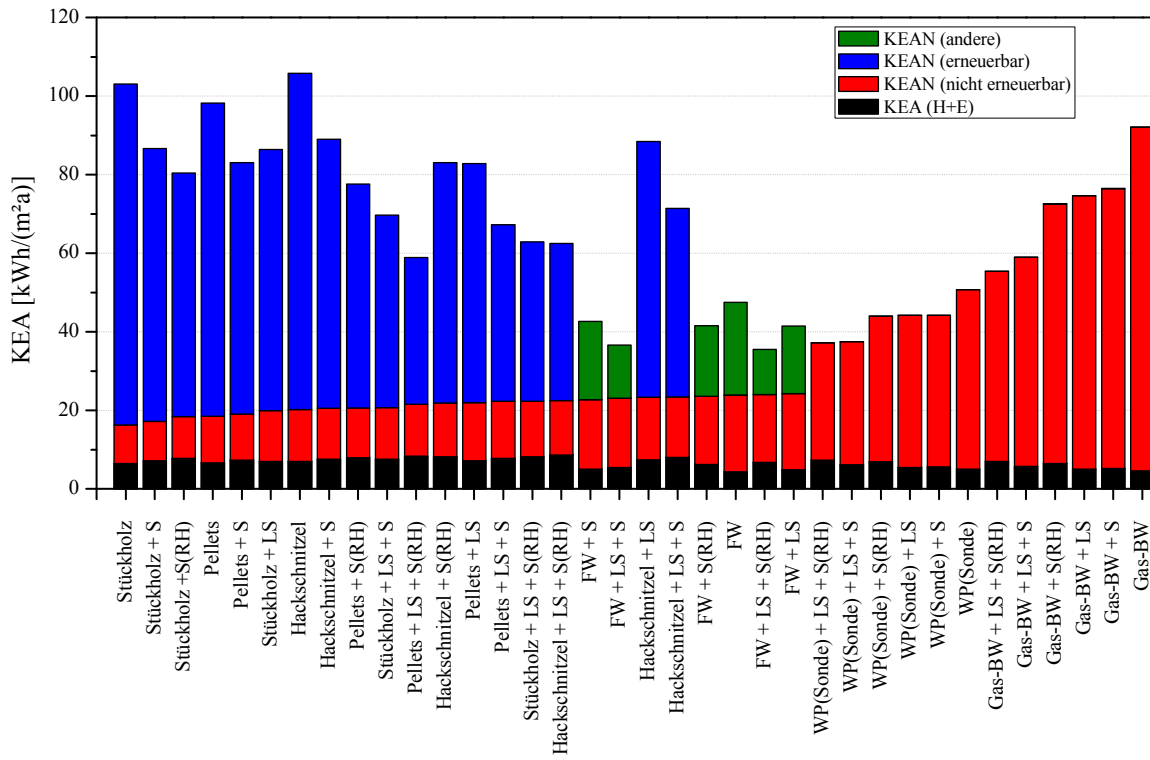


Abbildung A-20: Darstellung der Daten aus Abbildung A-16, geordnet nach der Summe aus KEA_{H+E} und $KEA(\text{nicht erneuerbar})$.

Anhang 6: Daten zur Emissionsberechnung

Tabelle A-25: Berechnete Emissions-Werte unter Verwendung des „Strom-Jahres-Mix“.

	Jahres-Mix							
	HWB=25kWh/m ² a				HWB=50kWh/m ² a			
	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub
	[kg/m ³ a]							
Gas-BW	10,78813	0,00733	0,01431	0,00029	16,77453	0,01122	0,02207	0,00044
Gas-BW + S	7,46667	0,00534	0,01018	0,00021	13,45566	0,00924	0,01795	0,00036
Gas-BW + LS	6,90721	0,00556	0,01006	0,00021	12,88365	0,00945	0,01782	0,00036
Gas-BW + LS + S	3,58323	0,00357	0,00594	0,00013	9,55968	0,00747	0,01369	0,00028
Gas-BW + S(RH)	6,47295	0,00487	0,00908	0,00019	12,43425	0,00875	0,01681	0,00034
Gas-BW + LS + S(RH)	2,71016	0,00318	0,00499	0,00011	8,51066	0,00696	0,01251	0,00026
FW	3,65911	0,01589	0,03492	0,00055	5,67898	0,02501	0,05533	0,00086
FW + S	2,85923	0,01219	0,02653	0,00042	4,87910	0,02131	0,04694	0,00073
FW + LS	2,64007	0,01034	0,02151	0,00035	4,65994	0,01946	0,04192	0,00067
FW + LS + S	1,83759	0,00663	0,01311	0,00023	3,85747	0,01575	0,03352	0,00054
FW + S(RH)	2,52358	0,01048	0,02250	0,00036	4,52906	0,01953	0,04277	0,00067
FW + LS + S(RH)	1,49814	0,00490	0,00903	0,00017	3,49722	0,01392	0,02923	0,00048
Pellets	1,35750	0,01971	0,02593	0,00335	1,64856	0,02874	0,03783	0,00502
Pellets + S	1,18233	0,01433	0,01885	0,00236	1,52171	0,02354	0,03097	0,00404
Pellets + LS	1,54096	0,01342	0,01762	0,00204	1,85662	0,02326	0,03058	0,00386
Pellets + LS + S	1,28428	0,00780	0,01023	0,00104	1,70486	0,01793	0,02357	0,00287
Pellets + S(RH)	1,14962	0,01199	0,01576	0,00191	1,57619	0,02147	0,02824	0,00362
Pellets + LS + S(RH)	1,24642	0,00585	0,00766	0,00067	1,47588	0,01515	0,01992	0,00241
Hackschnitzel	1,68692	0,02446	0,04074	0,01159	2,14597	0,03593	0,06019	0,01744
Hackschnitzel + S	1,41248	0,01765	0,02919	0,00812	1,92119	0,02931	0,04894	0,01402
Hackschnitzel + LS	1,73560	0,01621	0,02637	0,00691	2,23354	0,02869	0,04753	0,01328
Hackschnitzel + LS + S	1,37881	0,00915	0,01448	0,00340	1,98257	0,02194	0,03606	0,00981
Hackschnitzel + S(RH)	1,33515	0,01467	0,02410	0,00655	1,93225	0,02663	0,04426	0,01250
Hackschnitzel + LS + S(RH)	1,29357	0,00658	0,01009	0,00207	1,70938	0,01853	0,03042	0,00824
Stückholz	1,52370	0,01730	0,14638	0,01353	1,98758	0,02538	0,22003	0,02040
Stückholz + S	1,28561	0,01262	0,10300	0,00947	1,78083	0,02082	0,17725	0,01639
Stückholz + LS	1,58288	0,01190	0,08923	0,00811	2,07821	0,02059	0,16850	0,01550
Stückholz + LS + S	1,28877	0,00702	0,04495	0,00398	1,85552	0,01594	0,12514	0,01144
Stückholz +S(RH)	1,13945	0,01041	0,08329	0,00764	1,74852	0,01892	0,15831	0,01461
Stückholz + LS + S(RH)	1,27661	0,00538	0,02824	0,00240	1,86605	0,01404	0,10521	0,00956
WP(Sonde)	2,89290	0,00686	0,00893	0,00023	4,60893	0,01094	0,01423	0,00036
WP(Sonde) + S	2,10746	0,00500	0,00651	0,00016	3,84423	0,00912	0,01187	0,00030
WP(Sonde) + LS	2,25521	0,00535	0,00696	0,00018	3,89867	0,00925	0,01204	0,00030
WP(Sonde) + LS + S	1,46978	0,00349	0,00454	0,00011	3,11323	0,00739	0,00961	0,00024
WP(Sonde) + S(RH)	1,99340	0,00473	0,00615	0,00016	3,69129	0,00876	0,01140	0,00029
WP(Sonde) + LS + S(RH)	1,33758	0,00317	0,00413	0,00010	2,95252	0,00701	0,00912	0,00023
WP(LL)+LS	2,49370	0,00592	0,00770	0,00019	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+S	1,53199	0,00364	0,00473	0,00012	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+dez.WW	4,53894	0,01077	0,01401	0,00035	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Anhang

Tabelle A-26: Berechnete Emissions-Werte unter Verwendung des „Winter-Strom-Mixes“.

	Winter-Mix							
	HWB=25kWh/m²a				HWB=50kWh/m²a			
	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub
	[kg/m³a]							
Gas-BW	11,34121	0,00874	0,01618	0,00030	17,47339	0,01301	0,02443	0,00046
Gas-BW + S	8,10550	0,00697	0,01234	0,00022	14,24456	0,01126	0,02062	0,00038
Gas-BW + LS	8,08198	0,00855	0,01403	0,00024	14,20849	0,01283	0,02229	0,00040
Gas-BW + LS + S	4,84376	0,00679	0,01019	0,00017	10,97026	0,01106	0,01845	0,00032
Gas-BW + S(RH)	7,25328	0,00686	0,01171	0,00021	13,36035	0,01111	0,01994	0,00036
Gas-BW + LS + S(RH)	4,12075	0,00678	0,00976	0,00015	10,05845	0,01090	0,01774	0,00030
FW	4,14360	0,01713	0,03656	0,00056	6,16347	0,02625	0,05697	0,00087
FW + S	3,41660	0,01361	0,02841	0,00043	5,43648	0,02273	0,04882	0,00075
FW + LS	3,85772	0,01345	0,02562	0,00039	5,87759	0,02257	0,04604	0,00070
FW + LS + S	3,12384	0,00991	0,01746	0,00026	5,14372	0,01903	0,03787	0,00058
FW + S(RH)	3,23102	0,01228	0,02489	0,00038	5,23649	0,02133	0,04516	0,00069
FW + LS + S(RH)	2,93874	0,00857	0,01389	0,00021	4,93782	0,01760	0,03409	0,00052
Pellets	2,89671	0,02364	0,03113	0,00340	3,31211	0,03299	0,04345	0,00507
Pellets + S	2,64437	0,01806	0,02379	0,00240	3,18526	0,02778	0,03659	0,00409
Pellets + LS	3,67185	0,01885	0,02482	0,00210	4,12042	0,02903	0,03823	0,00392
Pellets + LS + S	3,20508	0,01270	0,01672	0,00109	3,93007	0,02361	0,03109	0,00293
Pellets + S(RH)	2,65453	0,01583	0,02084	0,00196	3,42410	0,02618	0,03448	0,00367
Pellets + LS + S(RH)	3,18437	0,01079	0,01420	0,00072	3,41812	0,02011	0,02648	0,00247
Hackschnitzel	3,22613	0,02838	0,04594	0,01163	3,80952	0,04017	0,06581	0,01749
Hackschnitzel + S	2,87452	0,02137	0,03413	0,00816	3,58474	0,03356	0,05456	0,01407
Hackschnitzel + LS	3,86649	0,02165	0,03357	0,00697	4,49734	0,03446	0,05517	0,01334
Hackschnitzel + LS + S	3,29961	0,01405	0,02096	0,00346	4,20778	0,02761	0,04357	0,00987
Hackschnitzel + S(RH)	2,84006	0,01851	0,02918	0,00659	3,78017	0,03134	0,05050	0,01255
Hackschnitzel + LS + S(RH)	3,21866	0,01148	0,01659	0,00212	3,65161	0,02348	0,03698	0,00830
Stückholz	2,70705	0,02032	0,15038	0,01356	3,25668	0,02862	0,22432	0,02043
Stückholz + S	2,47753	0,01566	0,10703	0,00951	3,10566	0,02420	0,18172	0,01643
Stückholz + LS	3,40507	0,01655	0,09539	0,00816	3,98615	0,02545	0,17494	0,01555
Stückholz + LS + S	3,03378	0,01147	0,05084	0,00403	3,79775	0,02089	0,13170	0,01150
Stückholz +S(RH)	2,27135	0,01330	0,08712	0,00767	3,19770	0,02262	0,16320	0,01465
Stückholz + LS + S(RH)	3,15882	0,01018	0,03460	0,00245	4,01409	0,01951	0,11247	0,00962
WP(Sonde)	7,67775	0,01906	0,02509	0,00036	12,23211	0,03037	0,03998	0,00057
WP(Sonde) + S	5,59320	0,01389	0,01828	0,00026	10,20260	0,02533	0,03334	0,00048
WP(Sonde) + LS	5,98534	0,01486	0,01956	0,00028	10,34707	0,02569	0,03382	0,00049
WP(Sonde) + LS + S	3,90079	0,00969	0,01275	0,00018	8,26252	0,02052	0,02700	0,00039
WP(Sonde) + S(RH)	5,29049	0,01314	0,01729	0,00025	9,79669	0,02433	0,03202	0,00046
WP(Sonde) + LS + S(RH)	3,54993	0,00881	0,01160	0,00017	7,83598	0,01946	0,02561	0,00037
WP(LL)+LS	6,61827	0,01643	0,02163	0,00031	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+S	4,06590	0,01010	0,01329	0,00019	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+dez.WW	12,04635	0,02991	0,03937	0,00057	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Anhang

Tabelle A-27: Berechnete Emissions-Werte unter Verwendung des „Öko-Strom-Mixes“.

	Öko-Mix							
	HWB=25kWh/m²a				HWB=50kWh/m²a			
	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub	CO ₂ -Äqu	SO ₂ -Äqu	TOPP-Äqu	Staub
	[kg/m³a]							
Gas-BW	10,47032	0,00657	0,01333	0,00027	16,37296	0,01026	0,02084	0,00042
Gas-BW + S	7,09959	0,00447	0,00906	0,00019	13,00235	0,00816	0,01656	0,00034
Gas-BW + LS	6,23218	0,00395	0,00799	0,00018	12,12239	0,00763	0,01548	0,00033
Gas-BW + LS + S	2,85893	0,00184	0,00371	0,00010	8,74915	0,00553	0,01120	0,00025
Gas-BW + S(RH)	6,02457	0,00380	0,00770	0,00016	11,90211	0,00748	0,01517	0,00031
Gas-BW + LS + S(RH)	1,89963	0,00125	0,00250	0,00007	7,62130	0,00483	0,00978	0,00022
FW	3,38072	0,01523	0,03407	0,00053	5,40059	0,02435	0,05448	0,00085
FW + S	2,53896	0,01142	0,02554	0,00040	4,55883	0,02054	0,04596	0,00072
FW + LS	1,94040	0,00867	0,01936	0,00032	3,96027	0,01779	0,03977	0,00063
FW + LS + S	1,09851	0,00486	0,01084	0,00019	3,11838	0,01398	0,03125	0,00051
FW + S(RH)	2,11709	0,00951	0,02125	0,00034	4,12256	0,01856	0,04152	0,00065
FW + LS + S(RH)	0,67037	0,00292	0,00648	0,00013	2,66944	0,01194	0,02669	0,00044
Pellets	0,47307	0,01760	0,02322	0,00331	0,69268	0,02646	0,03489	0,00498
Pellets + S	0,34224	0,01233	0,01627	0,00232	0,56583	0,02126	0,02804	0,00400
Pellets + LS	0,31655	0,01049	0,01386	0,00199	0,55583	0,02015	0,02659	0,00380
Pellets + LS + S	0,18058	0,00516	0,00684	0,00098	0,42625	0,01488	0,01965	0,00281
Pellets + S(RH)	0,28489	0,00992	0,01310	0,00187	0,51437	0,01893	0,02498	0,00357
Pellets + LS + S(RH)	0,13287	0,00318	0,00423	0,00061	0,35987	0,01249	0,01649	0,00236
Hackschnitzel	0,80249	0,02234	0,03802	0,01155	1,19009	0,03364	0,05726	0,01740
Hackschnitzel + S	0,57239	0,01564	0,02661	0,00808	0,96531	0,02703	0,04600	0,01397
Hackschnitzel + LS	0,51119	0,01329	0,02261	0,00685	0,93275	0,02558	0,04353	0,01322
Hackschnitzel + LS + S	0,27511	0,00652	0,01108	0,00335	0,70396	0,01888	0,03213	0,00975
Hackschnitzel + S(RH)	0,47042	0,01260	0,02145	0,00651	0,87044	0,02409	0,04099	0,01245
Hackschnitzel + LS + S(RH)	0,18741	0,00393	0,00669	0,00201	0,59336	0,01586	0,02699	0,00819
Stückholz	0,84375	0,01568	0,14429	0,01349	1,25835	0,02364	0,21779	0,02036
Stückholz + S	0,60072	0,01098	0,10090	0,00944	1,01957	0,01900	0,17491	0,01636
Stückholz + LS	0,53585	0,00940	0,08602	0,00806	0,98190	0,01797	0,16513	0,01545
Stückholz + LS + S	0,28608	0,00462	0,04187	0,00393	0,73950	0,01327	0,12171	0,01139
Stückholz +S(RH)	0,48906	0,00886	0,08129	0,00761	0,91582	0,01693	0,15575	0,01457
Stückholz + LS + S(RH)	0,19509	0,00279	0,02492	0,00235	0,63178	0,01109	0,10142	0,00950
WP(Sonde)	0,14351	0,00029	0,00049	0,00010	0,22863	0,00047	0,00078	0,00016
WP(Sonde) + S	0,10454	0,00021	0,00035	0,00007	0,19070	0,00039	0,00065	0,00013
WP(Sonde) + LS	0,11187	0,00023	0,00038	0,00008	0,19340	0,00040	0,00066	0,00013
WP(Sonde) + LS + S	0,07291	0,00015	0,00025	0,00005	0,15444	0,00032	0,00052	0,00010
WP(Sonde) + S(RH)	0,09889	0,00020	0,00034	0,00007	0,18311	0,00038	0,00062	0,00012
WP(Sonde) + LS + S(RH)	0,06635	0,00014	0,00022	0,00005	0,14646	0,00030	0,00050	0,00010
WP(LL)+LS	0,12370	0,00025	0,00042	0,00008	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+S	0,07600	0,00016	0,00026	0,00005	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
WP(LL)+LS+dez.WW	0,22516	0,00046	0,00076	0,00015	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Anhang 7: Kostenrechnung

Im Folgenden werden die Kosten, welche für die Wärmeerzeuger verwendet werden, definiert.

Wärmeerzeuger: Gas-Brennwert-Kessel

Die Investitionskosten für den Anschluss ans Erdgasnetz setzen sich aus den Anschlusskosten, Tiefbauarbeiten und den Hauseinführungskosten zusammen. Es ergeben sich in etwa Kosten von 1900€ (vorausgesetzt die Fernwärmeleitung geht direkt am Haus vorbei und die Hausanschlusslänge beträgt 10m) (als Quelle dienen die Daten verschiedener Energieversorger¹ und (Energieinstitut Vorarlberg, 2007)).

Der Gas Brennwertkessel (inkl. Heizkreis- und Ladepumpe, Ausdehnungsgefäß und sonstigen Armaturen) wird mit etwa 3400€ veranschlagt (für 3,1-13kW bei 40/30°C) (in Anlehnung an (Vaillant, 2007) und (Hoval, 2007)).

Wärmeerzeuger: Fernwärme-Station

Die Anschlusskosten an ein Fernwärmenetz sind sehr uneinheitlich und werden ausgehend von Daten einer Betreiberbefragung von Neuhäuser (2005) mit 2800€ abgeschätzt. Die Fernwärme-Übergabestation wird mit 3706€ in Rechnung gestellt².

Wärmeerzeuger: Pellets-Kessel

Der Pellets-Kessel kostet etwa 10500€ (Leistungsbereich 3,4-13kW inkl. Schneckenförderung) (in Anlehnung an (Vaillant, 2007), (Holz, 2006, S.75), (Hoval, 2007) und (Schriefl, 2007, S.81)).

Wärmeerzeuger: Hackschnitzel-Kessel

Für den Hackschnitzelkessel werden 16000€ für 15kW Heizleistung angesetzt (Schriefl, 2007, S.81).

Wärmeerzeuger: Stückholz-Kessel

Für den Stückholz-Kessel werden 7100€ für 10kW Heizleistung angesetzt (in Anlehnung an (Schriefl, 2007, S.81) und (Hoval, 2007)).

Wärmeerzeuger: Sole/Wasser-Wärmepumpe

Für die Wärmepumpe mit 5,9kW Heizleistung werden 8700€ angesetzt (in Anlehnung an (Vaillant, 2007) und (Hoval, 2007)).

Als Richtpreis für die Tiefensonde (inklusive Montage und Erdarbeiten) werden 11400€ angenommen. Wird anstelle der Tiefensonde ein Sondenfeld bzw. ein Flachkollektor eingesetzt verringern sich die Kosten auf 8800 bzw. 3700€ (basierend auf Daten von (Hoval, 2007) und (Energieinstitut Vorarlberg, 2007)).

Wärmeerzeuger: Luft/Luft-Wärmepumpe

Eine Kombination aus Lüftungsgerät mit Kreuzstromwärmetauscher, Wärmepumpe (Heizleistung 3,6kW) und Steuerung kostet etwa 4015€ (ausgehend von (Groß, 2008), angepasst an österreichische MwSt.). Wie Kapitel 5.1.1 erläutert, liegen die Lüftungssysteme mit WRG im

¹ www.veg.at, www.e-steiermark.com

² www.biofernwaeirme.at

Bereich von 6000-10000€, weshalb die Verrohrung hier, trotz Verwendung eines Kompaktgerätes mit Wärmetauscher, weiterhin mit $55\text{€}/\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ berücksichtigt wird.

Wird angenommen, dass im Falle einer dezentralen, rein elektrischen Warmwasserbereitung zwei hydraulisch gesteuerte Durchlauferhitzer mit 18kW und einer mit 27kW verwendet werden, entstehen Kosten von etwa 950€ (basierend auf (Vaillant, 2007)).

Bei der Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten, wird von dem im Kapitel 4.2 ermittelten, optimalen Endenergiebedarf ausgegangen. Die folgenden Tabellen zeigen die mittels Annuitäten-Methode berechneten Kosten, ohne Berücksichtigung von Förderungen. Die Höhe der Förderungen ist Kapitel 5.2 zu entnehmen. Der Zinssatz wird mit 4,5% festgelegt.

Tabelle A-28: Kostenrechnung für das WBR-System mit Gas-Brennwert-Kessel.

Heizsysteme mit Gas-Brennwert-Kessel							
Zinssatz:	4,50%			Gas-Preis [€/kWh]		0,06	
Fläche [m²]:	160			Verbrauchsgeb. Fixkosten [€/Jahr]		50	
				Strompreis [€/kWh]		0,1585	
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH)	HS +LS +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)		41,65	28,21	24,69	11,24	23,91	7,4
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)		1,29	1,49	2,74	2,94	1,82	3,29
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=50)		65,15	51,71	48,14	34,69	47,31	30,18
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=50)		1,63	1,84	3,09	3,29	2,16	3,61
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis [€]	Inst. [%/a]	Wartung [€/a]	ND [a]	a [1]	A [€/a]
Gas-Brennwert-Kessel + Anschlusskosten		5300	2,00%	110,0	20	0,0769	513,44
Kamin		750	1,00%	40,0	35	0,0573	50,45
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674	442,95
Montage		2000	1,00%	20,0	40	0,0543	128,69
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674	69,70
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674	100,67
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674	122,35
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674	387,46
Flachkollektor, selektiv, 15m² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674	700,73
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573	552,48
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH)	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		7,53	10,15	10,99	13,56	12,87	16,32
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		2,81	2,01	1,79	0,99	1,75	0,76
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,20	0,24	0,43	0,47	0,29	0,52
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,12	1,29	1,79	1,96	1,51	2,18
GESAMT [€/m²a]		11,67	13,68	15,00	16,98	16,41	19,78
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH)	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		7,53	10,15	10,99	13,56	12,87	16,32
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		4,22	3,42	3,20	2,39	3,15	2,12
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,26	0,29	0,49	0,52	0,34	0,57
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,12	1,29	1,79	1,96	1,51	2,18
GESAMT [€/m²a]		13,13	15,15	16,47	18,44	17,87	21,20

Tabelle A-29: Kostenrechnung für das WBR-System mit Fernwärme-Heizung.

Heizsysteme mit Fernwärme-Nutzung						
Zinssatz:	4,50%			Fernwärme-Preis [€/kWh]		0,053
Fläche [m²]:	160			Verbrauchsgeb. Fixkosten [€/Jahr]		180
				Strompreis [€/kWh]		0,1585
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)		42,08	31,53	23,8	13,25	26,2
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)		1,13	1,3	2,84	3	1,65
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=50)		67,33	56,78	49,05	38,5	51,27
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=50)		1,13	1,3	2,84	3	1,65
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis	Inst.	Wartung	ND	a
		[€]	[%/a]	[€/a]	[a]	[1]
Fernwärme-Übergabestation + Anschlusskosten		6500	1%	0,0	20	0,0769
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674
Montage		2000	1,00%	20,0	40	0,0543
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 15m² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/(m²a)]		7,54	10,15	10,99	13,61	12,88
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/(m²a)]		3,36	2,80	2,39	1,83	2,51
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/(m²a)]		0,18	0,21	0,45	0,48	0,26
Betriebsgebundene Kosten [€/(m²a)]		0,18	0,35	0,80	1,02	0,57
GESAMT [€/m²a]		11,25	13,51	14,62	16,93	16,22
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/(m²a)]		7,54	10,15	10,99	13,61	12,88
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/(m²a)]		4,69	4,13	3,72	3,17	3,84
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/(m²a)]		0,18	0,21	0,45	0,48	0,26
Betriebsgebundene Kosten [€/(m²a)]		0,18	0,35	0,80	1,02	0,57
GESAMT [€/m²a]		12,59	14,85	15,96	18,27	17,55

Tabelle A-30: Kostenrechnung für das WBR-System mit Pellets-Kessel.

Heizsysteme mit Pellets-Kessel						
Zinssatz:	4,50%			Brennstoffpreis Pellets [€/kWh]		0,039
Fläche [m ²]	160			Strompreis [€/kWh]		0,1585
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m ² a)] (HWB=25)		51,69	36,13	30,59	14,89	29,03
Stromverbrauch [kWh/(m ² a)] (HWB=25)		3,59	3,41	4,97	4,48	3,51
Brennstoffverbrauch[kWh/(m ² a)] (HWB=50)		77,83	62,47	59,08	43,53	55,57
Stromverbrauch [kWh/(m ² a)] (HWB=50)		3,88	3,88	5,28	5,19	4,31
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis [€]	Inst. [%/a]	Wartung [€/a]	ND [a]	a [1]
Pellets-Kessel + Montage		10500	1,00%	145,0	20	0,0769
Kamin		1800	1,00%	86,0	35	0,0573
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674
Montage		7000	1,00%	70,0	40	0,0543
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. beheizt) (300 Liter)		780	1,00%	7,8	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 6m ² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 15m ² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m ² a]		12,85	15,47	16,31	18,92	17,81
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m ² a]		2,03	1,42	1,20	0,58	1,14
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m ² a]		0,57	0,54	0,79	0,71	0,56
Betriebsgebundene Kosten [€/m ² a]		1,99	2,16	2,66	2,83	2,33
GESAMT [€/m ² a]		17,44	19,58	20,95	23,05	21,84
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m ² a]		12,85	15,47	16,31	18,92	17,81
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m ² a]		3,05	2,45	2,32	1,71	2,18
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m ² a]		0,61	0,61	0,84	0,82	0,68
Betriebsgebundene Kosten [€/m ² a]		1,99	2,16	2,66	2,83	2,33
GESAMT [€/m ² a]		18,51	20,69	22,12	24,28	23,00

Tabelle A-31: Kostenrechnung für das WBR-System mit Hackschnitzel-Kessel.

Heizsysteme mit Hackschnitzel-Kessel						
Zinssatz:	4,50%			Hackschnitzel-Preis [€/kWh]		0,028
Fläche [m²]:	160			Strompreis [€/kWh]		0,1585
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)		52,96	37,01	31,32	15,23	29,78
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)		3,59	3,41	4,97	4,48	3,51
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=50)		79,84	64,1	60,56	44,62	57,07
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=50)		3,88	3,88	5,28	5,19	4,31
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis [€]	Inst. [%/a]	Wartung [€/a]	ND [a]	a [1]
Hackschnitzel-Kessel		16000	1,00%	150,0	20	0,0769
Kamin		2000	1,00%	86,0	35	0,0573
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674
Montage		2700	1,00%	27,0	40	0,0543
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. beheizt) (300 Liter)		780	1,00%	7,8	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 15m² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		14,20	16,81	17,65	20,26	19,16
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		1,48	1,04	0,88	0,43	0,83
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,57	0,54	0,79	0,71	0,56
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,75	1,92	2,42	2,59	2,09
GESAMT [€/m²a]		18,00	20,31	21,73	23,99	22,64
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +LS +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		14,20	16,81	17,65	20,26	19,16
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		2,24	1,79	1,70	1,25	1,60
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,61	0,61	0,84	0,82	0,68
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,75	1,92	2,42	2,59	2,09
GESAMT [€/m²a]		18,80	21,14	22,60	24,93	23,53

Tabelle A-32: Kostenrechnung für das WBR-System mit Stückholz-Kessel.

Heizsysteme mit Stückholz-Kessel						
Zinssatz:	4,50%			Stückholz-Preis [€/kWh]		0,034
Fläche [m²]:	160			Strompreis [€/kWh]		0,1585
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)		54,22	37,9	32,28	15,68	30,53 9,3
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)		2,76	2,78	4,25	4,07	2,64 4,39
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=50)		81,86	65,73	62,03	45,7	58,52 38,06
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=50)		2,96	3,09	4,45	4,53	3,38 5,01
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis [€]	Inst. [%/a]	Wartung [€/a]	ND [a]	a [1] A [€/a]
Stückholz-Kessel		7100	1,00%	145,0	20	0,0769 616,82
Kamin		2000	1,00%	86,0	35	0,0573 134,54
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674 442,95
Montage		1650	1,00%	16,5	40	0,0543 106,17
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674 69,70
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674 100,67
Pufferspeicher (ind. beheizt) (300 Liter)		780	1,00%	7,8	25	0,0674 60,40
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674 122,35
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674 387,46
Flachkollektor, selektiv, 15m² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674 700,73
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573 552,48
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		8,94	11,56	12,39	15,01	13,90 17,35
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		1,84	1,29	1,10	0,53	1,04 0,32
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,44	0,44	0,67	0,65	0,42 0,70
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,65	1,82	2,32	2,49	1,99 2,66
GESAMT [€/m²a]		12,87	15,11	16,49	18,68	17,35 21,03
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		8,94	11,56	12,39	15,01	13,90 17,35
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		2,78	2,23	2,11	1,55	1,99 1,29
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,47	0,49	0,71	0,72	0,54 0,79
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		1,65	1,82	2,32	2,49	1,99 2,66
GESAMT [€/m²a]		13,85	16,10	17,53	19,78	18,42 22,11

Tabelle A-33: Kostenrechnung für das WBR-System mit Sole/Wasser-Wärmepumpe.

Heizsysteme mit Sole/Wasser-Wärmepumpe						
Zinssatz:	4,50%			Heizstrom-Preis [€/kWh]		0,12
Fläche [m²]:	160			Verbrauchsgeb. Fixkosten [€/Jahr]		35
				Strompreis [€/kWh]		0,1585
Endenergiebedarf		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)		9,6	6,4	5,8	2,6	5,54
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)		1,56	1,73	2,9	3,07	2,15
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=50)		15,81	12,61	11,65	8,45	11,69
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=50)		1,97	2,22	3,39	3,56	2,55
Annuitätenberechnung der Komponenten		Preis [€]	Inst. [%/a]	Wartung [€/a]	ND [a]	a [1] A [€/a]
Erdreich/Wasser-Wärmepumpe		8700	3,00%	80,0	20	0,0769
Wärmequellenanlage		11400	0,50%	0,0	50	0,0506
Fußbodenheizung (inkl. Montage und Wärmeverteilung)		5720	1,00%	0,0	25	0,0674
Montage		2000	1,00%	20,0	40	0,0543
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)		900	1,00%	9,0	25	0,0674
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)		1300	1,00%	13,0	25	0,0674
Pufferspeicher (ind. u. sol. beheizt) (500 Liter)		1580	1,00%	15,8	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung		4700	1,50%	23,5	25	0,0674
Flachkollektor, selektiv, 15m² + Anbindung		8500	1,50%	42,5	25	0,0674
Lüftungsgerät mit WRG + Verrohrung		7150	2,00%	107,3	35	0,0573
Kosten für HWB=25kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		13,78	16,40	17,23	19,85	19,12
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		1,37	0,99	0,91	0,53	0,88
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,25	0,27	0,46	0,49	0,34
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		0,68	0,85	1,35	1,52	1,07
GESAMT [€/m²a]		16,08	18,51	19,96	22,39	21,41
Kosten für HWB=50kWh/m²a		HS	HS+S	HS+LS	HS +LS +S	HS +S(RH) +S(RH)
Kapitalgebundene Kosten [€/m²a]		13,78	16,40	17,23	19,85	19,12
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/m²a]		2,12	1,73	1,62	1,23	1,62
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/m²a]		0,31	0,35	0,54	0,56	0,40
Betriebsgebundene Kosten [€/m²a]		0,68	0,85	1,35	1,52	1,07
GESAMT [€/m²a]		16,89	19,33	20,74	23,17	22,22

Tabelle A-34: Kostenrechnung für das WBR-System mit Abluft-Wärmepumpe.

Heizsysteme mit Abluft-Wärmepumpe								
Zinssatz:	4,50%		Heizstrom-Preis [€/kWh]		0,12			
Fläche [m²]:	160		Verbrauchsgeb. Fixkosten [€/Jahr]		35			
			Strompreis [€/kWh]		0,1585			
Endenergiebedarf			WP(LL) +LS	WP(LL) +LS +S	WP(LL) +LS +dez.WW			
Brennstoffverbrauch[kWh/(m²a)] (HWB=25)			7,84	3,71	15,81			
Stromverbrauch [kWh/(m²a)] (HWB=25)			1,78	2,2	1,7			
Annuitätenberechnung der Komponenten			Preis	Inst.	Wartung	ND	a	A
			[€]	[%/a]	[€/a]	[a]	[1]	[€/a]
Verrohrung der Zu- und Abluftanlage			7150	2,00%	107,3	35	0,0573	552,5
Lüftungsgerät mit WRG, WP + Montage			6015	3,00%	80,0	20	0,0769	642,9
Warmwasserspeicher (ind. beheizt) (200l)			900	1,00%	9,0	25	0,0674	69,7
Warmwasserspeicher (ind. u. sol. beheizt) (400l)			1300	1,00%	13,0	25	0,0674	100,7
Flachkollektor, selektiv, 6m² + Anbindung			4700	1,50%	23,5	25	0,0674	387,5
Dezentrale Warmwasserbereitung			950	3,00%	0,0	15	0,0931	117
Kosten für HWB=25kWh/m²a			WP(LL) +LS	WP(LL) +LS +S	WP(LL) +LS +dez.WW			
Kapitalgebundene Kosten [€/(m²a)]			7,91	10,52	8,20			
Verbrauchsgeb. Kosten _{Heizenergie} [€/(m²a)]			1,16	0,66	2,12			
Verbrauchsgeb. Kosten _{Hilfsstrom} [€/(m²a)]			0,28	0,35	0,27			
Betriebsgebundene Kosten [€/(m²a)]			1,23	1,40	1,17			
GESAMT [€/(m²a)]			10,57	12,93	11,76			

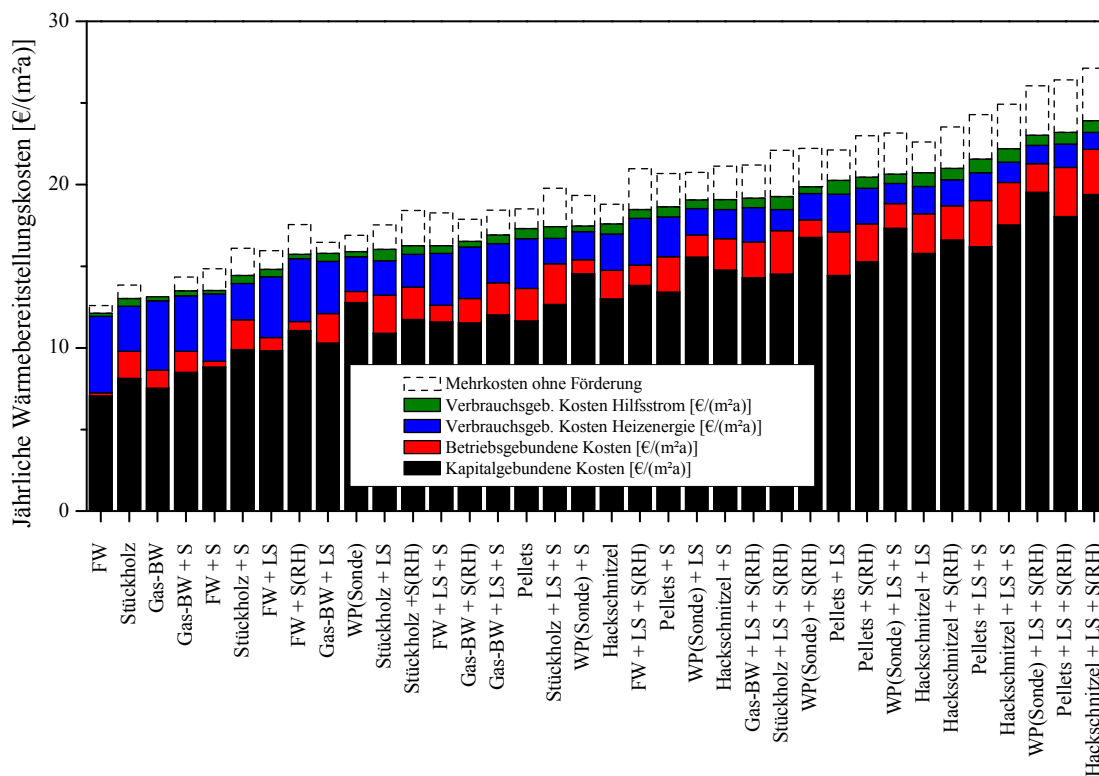


Abbildung A-21: Darstellung der Kosten für einen HWB von 50kWh/(m²a) unter Einbeziehung von Förderungen. Strichliert dargestellt werden die Kosten ohne Förderung.