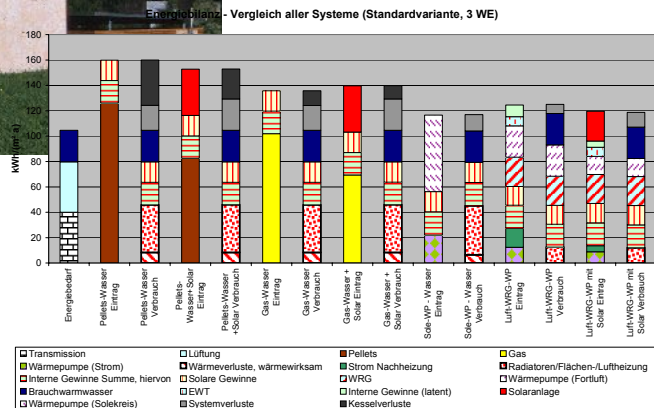


Leitfaden

„Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser“

Programmlinie „Haus der Zukunft“ – eine Initiative des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)



Autoren

Wolfgang Streicher (Projektleitung), Richard Heimrath, Thomas Mach, Robert Kouba, Karin Schweyer, Institut für Wärmetechnik, TU Graz

Alexander Thür, Dagmar Jaehrig, Irene Bergmann
AEE INTEC - Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie, Institut für Nachhaltige Technologien

Harald Rohrer, Jürgen Suschek-Berger
Interuniversitäres Forschungszentrum für Technik, Arbeit und Kultur, IFF/IFZ

Unterstützende Firmen: Drexel und Weiss, Hexatherm, KWB, Vaillant

Graz, Jänner 2004

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
1.1	Einführung und Zielgruppe des Leitfadens.....	1
1.2	Der Energiebedarf von Gebäuden.....	1
1.3	Definitionen	2
1.4	Zielsetzung des Leitfadens.....	6
2	BEHAGLICHKEIT UND EIGENSCHAFTEN VON HEIZSYSTEMEN	6
2.1	Thermische Behaglichkeit	6
2.2	Eigenschaften gängiger Wärmeabgabesysteme.....	8
2.2.1	Luftheizung.....	8
2.2.2	Wasserheizungssysteme.....	9
2.2.3	Vergleich der verschiedenen Wärmeabgabesysteme	12
2.3	Wärmeverteilung für zentrale Wärmeerzeugung in Mehrfamilienhäuser	13
2.3.1	Vier-Leiter-Netze	14
2.3.2	Drei Leiter-Netze.....	14
2.3.3	Zwei-Leiter-Netze.....	15
2.4	Wärmeerzeuger und Pufferspeicher	16
2.4.1	Emissionen von Heizkesseln	16
2.4.2	Generelle technische Hinweise für Pufferspeicher.....	18
2.5	Qualitative Bewertung von Heizungssystemkomponenten aus Nutzersicht	21
2.5.1	Einschätzung unterschiedlicher Heizsysteme	22
2.5.2	Heizen mit Biomasse aus Sicht der NutzerInnen – eine Sekundäranalyse.....	25
2.5.3	Heizen über die Lüftungsanlage aus Sicht der NutzerInnen.....	27
3	QUALITATIVE BESCHREIBUNG AUSGEWÄHLTER HEIZUNGSSYSTEME 30	
3.1	Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral	31
3.1.1	Systembeschreibung.....	31
3.1.2	Vor- und Nachteile	33
3.1.3	Einsatzbereiche	34
3.2	Gastherme – Luftheizung – dezentral	34
3.2.1	Systembeschreibung.....	34
3.2.2	Vor- und Nachteile	35
3.2.3	Einsatzbereiche	36
3.3	Gastherme – Wasserheizung – dezentral	37
3.3.1	Systembeschreibung.....	37
3.3.2	Vor- und Nachteile	37
3.3.3	Einsatzbereiche	39
3.4	Pelletskaminofen – Luftheizung – dezentral.....	39
3.4.1	Systembeschreibung.....	39
3.4.2	Vor- und Nachteile	40
3.4.3	Einsatzbereiche	41
3.5	Pelletskaminofen – Wasserheizung – dezentral.....	42
3.5.1	Systembeschreibung.....	42
3.5.2	Vor- und Nachteile	43
3.5.3	Einsatzbereiche	44

3.6	Sole-Wärmepumpe – Wasserheizsystem – zentral (mit Speicherbeladung)	44
3.6.1	Systembeschreibung.....	44
3.6.2	Vor- und Nachteile.....	46
3.6.3	Einsatzbereiche.....	47
3.7	Pellets- oder Gaskessel zentral – Luftheizsystem dezentral	48
3.7.1	Systembeschreibung.....	48
3.7.2	Vor- und Nachteile.....	49
3.7.3	Einsatzbereiche.....	50
3.8	Pellets- oder Gaskessel – Wasserheizsystem – zentral	51
3.8.1	Systembeschreibung.....	51
3.8.2	Vor- und Nachteile.....	52
3.8.3	Einsatzbereiche.....	53
3.9	Kachelofen – Wasserheizung – dezentral	54
3.9.1	Systembeschreibung.....	54
3.9.2	Vor- und Nachteile.....	55
3.9.3	Einsatzbereiche.....	56
3.10	Zusammenfassung der qualitativen Bewertung	56
4	REFERENZGEBÄUDE	58
4.1	Gemeinsame Annahmen für die Referenzgebäude.....	58
4.2	Referenzmehrfamilienhaus Typ 1, Reihenhaus, 3 Wohneinheiten (WE).....	61
4.3	Referenzmehrfamilienhaus Typ 2, mehrgeschossiger Wohnbau, 12 WE).....	63
5	QUANTITATIVER VERGLEICH VON VIER AUSGEWÄHLTEN HEIZUNGSSYSTEMEN MITTELS SIMULATIONEN	66
5.1	Standardvariante	67
5.1.1	Energiebilanz des Systems im Gebäude.....	68
5.1.2	Ökonomische Analyse.....	73
5.1.2.1	Einleitung.....	73
5.1.2.2	Investitionskosten.....	74
5.1.2.3	Annuitätenfaktoren und Kapitalkosten.....	77
5.1.2.4	Betriebsgebundene Kosten.....	79
5.1.2.5	Kosten der Heizkostenabrechnung.....	79
5.1.2.6	Verbrauchsgebundene Kosten.....	81
5.1.2.7	Wärmegestehungskosten.....	83
5.1.3	End-, Primärenergie, CO ₂ -äquivalent Emissionen und Wärmegestehungskosten pro Wohnnutzfläche.....	85
5.2	Extremszenarien (Referenzgebäude 1)	89
5.3	„Härtetest“ für alle Systeme (Referenzgebäude 1)	94
5.4	Statistik Raumtemperaturen, Raumlufffeuchten und Heizlast (Referenzgebäude 1)	98
5.4.1	Raumlufftemperaturen.....	98
5.4.2	Raumlufffeuchten.....	100
5.4.3	Heizleistung.....	102
5.5	Ergebnisse Referenzgebäude 2	104
5.6	Übersicht über die quantitative Bewertung	109
6	ZUSAMMENFASSUNG	112

7 LITERATUR114

1 Einleitung

1.1 Einführung und Zielgruppe des Leitfadens

Der Energieverbrauch von neuen Gebäuden hat sich in den letzten 25 Jahren drastisch reduziert. Dies ist auf eine rasante Entwicklung von Baustoffen und Bautechnik zurückzuführen. Heute können Häuser mit nur einem Sechstel des Energieverbrauchs (50 kWh/(m² a)) gegenüber durchschnittlichen Häusern vor 30 Jahren ohne Mehrkosten gebaut werden. Mit geringen Mehrkosten kann der Energieverbrauch noch weiter gesenkt werden.

Gebäude in Niedrigenergiebauweise (bzw. Passivhausstandard) stellen allerdings andere Anforderungen an das Heizungssystem als herkömmliche Gebäude. Dieser Leitfaden soll darüber informieren, welche Systeme in Niedrigenergie- und Passivhäusern sinnvoll eingesetzt werden können, und Entscheidungskriterien für deren Auswahl aufzeigen. Er dient als technisches Nachschlagewerk mit Hintergrundinformation für Haustechnikplaner, Bauträger und Architekten.

1.2 Der Energiebedarf von Gebäuden

Gebäude verlieren Wärme an ihre Umgebung. Diese Wärmeverluste müssen durch das Heizsystem ausgeglichen werden. Abbildung 1 zeigt schematisch alle Energieflüsse, die bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs zu berücksichtigen sind.

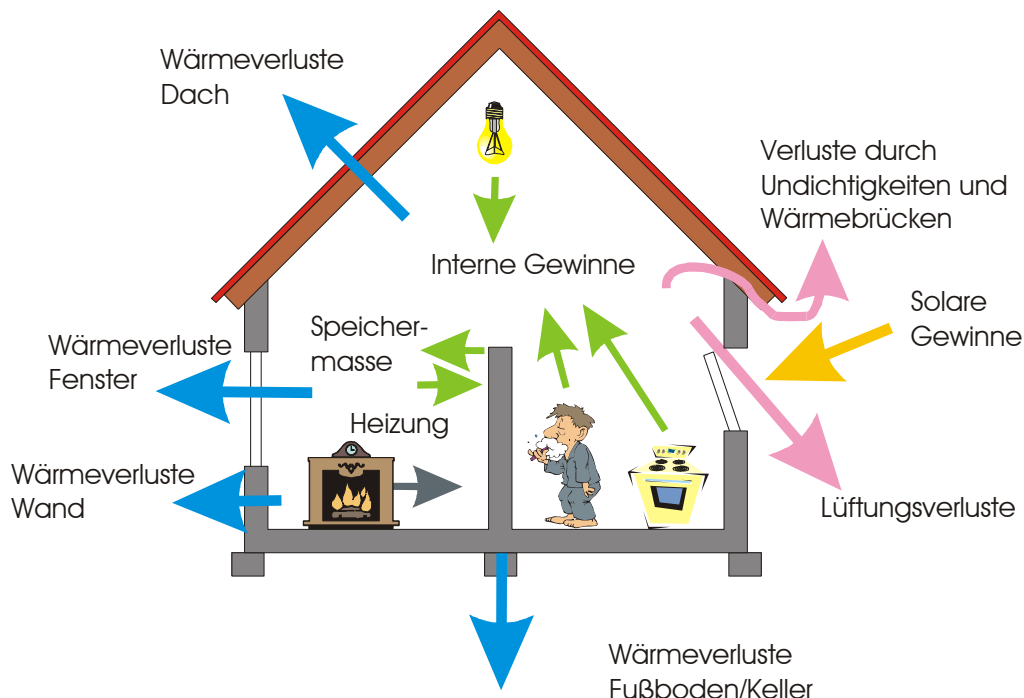


Abbildung 1: Energieflüsse im Gebäude

Die Wärmeverluste lassen sich in drei Kategorien einteilen. Die Transmissionsverluste werden durch die Gebäudehülle (Wände, Dach, Fußboden/Keller, Fenster) übertragen, wenn die Außenlufttemperatur niedriger ist als die Raumtemperatur. Sie können durch gute

Wärmedämmung und hochwertige Fenster auf sehr kleine Werte gesenkt werden. Durch eine gute Planung und Bausausführung können Wärmebrücken vermieden werden. Um mit Feuchtigkeit, CO₂, Gerüchen oder Schadstoffen angereicherte Luft auszutauschen, muss ein Gebäude gelüftet werden. Das kann entweder auf konventionellem Wege durch Fensterlüftung oder durch eine kontrollierte Lüftungsanlage geschehen. Der Lüftungsverlust ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen der abgeführten Raumluft und der zugeführten Außenluft. Der dritte Wärmeverlust ist die so genannte Infiltration. Sie entsteht, durch Luftaustausch zwischen dem Gebäude und der Umgebung aufgrund Undichtigkeiten im Gebäude oder z.B. durch das Öffnen von Türen.

Auf der anderen Seite gibt es in Gebäuden auch Wärmegewinne. Einerseits gibt es solare Gewinne. Sie entstehen primär, wenn die Sonne durch Fenster oder Wintergärten ins Gebäude fällt oder eine transparente Wärmedämmung eingesetzt wird. Die solaren Gewinne durch nichttransparente (opake) Wände ist zumeist zu vernachlässigen. Interne Gewinne wird die Wärme genannt, die Personen oder elektrische Geräte wie Beleuchtung, Küchengeräte, Waschmaschine, Computer etc. (auch Gasherd) im Gebäude abgeben.

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes setzt sich also aus den Transmissions-, den Infiltrations- und den Lüftungsverlusten abzüglich der solaren und internen Gewinne zusammen.

1.3 Definitionen

In dem Projekt zur Erstellung dieses Leitfadens wurden Messdaten aus dem EU-Projekt CEPHEUS (2001) von mehreren Passivhäusern ausgewertet. Dabei wurden Energieverbräuche und das Benutzerverhalten in Bezug auf die Raumtemperatur aufgezeichnet. Ausgehend von diesen Messungen, einer detaillierten Befragung der Bewohner und den Gebäudedaten dieser Wohnhäuser wurden repräsentative Referenzgebäude definiert (siehe Kap. 4), die mit dem Simulationsprogramm TRNSYS (2000) mit verschiedenen Heizsystemen simuliert wurden. Bei dem einen Referenzgebäude handelt es sich um ein Reihenhauses mit drei Wohneinheiten, das andere Referenzgebäude ist ein mehrgeschossiges Gebäude mit 12 Wohneinheiten. Die Simulationsergebnisse (siehe Kap. 5) dienen als Basis für die Vergleiche der unterschiedlichen Heizsysteme in den folgenden Kapiteln.

In dieser Studie werden für Gebäudetypen und Heizungen die folgenden Annahmen getroffen:

Energiebezugsfläche: Die Energiebezugsfläche für sämtliche spezifische Energiedaten ist in dieser Studie die Nettogeschossfläche des Gebäudes

Altbau: Heizwärmebedarf 125 kWh/(m²a) (dieser Wert war vor ca. 15 Jahren Standard, vor 30 Jahren war der Wert noch wesentlich höher)

Niedrigenergiehaus: (NEH) Gleich guter Dämmstandard wie Passivhäuser, jedoch ohne Abluftwärmerückgewinnung. Diese Definition wurde für diese Arbeit gewählt, um verschiedene Heizungssysteme (mit und ohne Abluftwärmerückgewinnung) am selben Gebäude vergleichen zu können. In dieser Studie hat das NEH einen spezifischen Heizwärmebedarf zwischen 44,5 und 41,7 kWh/(m²a) für die Standard Benutzerannahmen (22,5°C Raumtemperatur, Belegung, innere Wärmen etc.).

Passivhaus: (PH) Gleicher Dämmstandard wie Niedrigenergiehaus, jedoch mit Abluftwärmerückgewinnung, um den Restheizwärmebedarf auf unter $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu senken. Dies entspricht der klassischen Passivhaus-Definition nach Feist, 2003 (<http://www.passiv.de/>). Zusätzliche Definitionen des Passivhauses sind ein spezifischer Gesamtendenergiebedarf unter $42 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ein spezifischer Primärenergiebedarf von unter $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die neuesten Passivhaus-Förderkriterien von der deutschen Kreditanstalt für Wiederaufbau vom Mai 2003 nehmen hierbei den Haushaltsstrom wieder heraus, da dem Gebäude das Nutzerverhalten bzgl. Haushaltgeräte nicht angelastet werden kann. Als Nachweisverfahren dient jetzt das Passivhaus Projektierungs-Paket PHPP (Neuaufgabe 2003) und nicht mehr die Passivhaus-Vorprojektierung (PHVP). Nachzuweisen sind der Jahres-Heizwärmebedarf von max. $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, Energiebezugsfläche hierfür ist die Wohnfläche innerhalb der thermischen Hülle (zur genauen Definition siehe PHPP, Feist 2001) und – das ist neu - der Jahresprimärenergiebedarf von max. $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, Bezugsfläche hierfür ist die Gebäudenutzfläche A_N nach Energieeinsparverordnung (EnEV). Im Jahresprimärenergiebedarf sind der Jahresheizwärmebedarf, der Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung, die Energieverluste des Wärmeversorgungssystems, der Hilfsenergiebedarf für Heizung und Brauchwarmwasserbereitung sowie der Energieverbrauch für die Bereitstellung der Energieträger enthalten (http://www.passiv.de).

Vergleichsgebäude: In dieser Studie werden im EU-Projekt CEPHEUS (2001) vermessene Passivhäuser herangezogen, um die Simulationsmodelle für die Referenzgebäude aufzubauen. Zuerst werden diese Vergleichsgebäude mit TRNSYS (2000) nachsimuliert um die Realitätsnähe des Simulationsmodells zu erhöhen.

Referenzgebäude 1: Mit den Referenzgebäuden werden die Modellrechnungen für die verschiedenen Heizungssysteme und Nutzerverhalten aufgestellt. Das Referenzgebäude 1 ist ein Reihenhauses mit drei Wohneinheiten (WE) gedämmt im Passivhausstandard (siehe Kapitel 4).

Referenzgebäude 2: Ein Geschosswohnhaus mit zwölf Wohneinheiten (WE) gedämmt im Passivhausstandard (siehe Kapitel 4).

Heizungssysteme: Es wird davon ausgegangen, dass entweder ein Luftheizungssystem mit Abluftwärmerückgewinnung (ev. in Kombination mit einem Pellets-Kaminofen) oder ein Wasserheizungssystem zum Einsatz kommt. Bei Wasserheizungssystemen wird davon ausgegangen, dass gleichzeitig KEIN Lüftungssystem eingesetzt wird, um die Investitionskosten und den Platzbedarf für die Systeme gering zu halten.

Abbildung 2 zeigt, wie sich der Heizwärmebedarf mit den oben definierten Gebäuden darstellt. Niedrigenergiegebäude und Passivhäuser zeichnen sich durch eine sehr gut gedämmte Gebäudehülle aus. Die Transmissionsverluste sind dadurch deutlich gegenüber dem Altbau reduziert. Die Lüftungsverluste bleiben aber in etwa gleich wie im Altbau, da sich der Lüftungsbedarf nicht wesentlich ändert, nur die Infiltration sinkt durch dichter gebaute

Häuser für die Niedrigenergie- und Passivhäuser. Der Heizwärmebedarf von Niedrigenergiehäusern liegt damit auf etwa 40-50 kWh/(m²a). Dadurch verschiebt sich auch der Anteil, den die Lüftungsverluste am Gesamtwärmeverlust haben und auch der Anteil, den die internen Gewinne haben, den Wärmeverlust zu decken.

Niedrigenergiehäuser mit Passivhaus-Dämmstandard haben nicht nur einen niedrigeren Heizwärmebedarf (die Betriebskosten des Gebäudes sinken erheblich), sie bieten gegenüber Altbauten auch eine Komfortsteigerung durch höhere Wandtemperaturen und damit geringere Temperaturunterschiede der Umschließungsflächen eines Raumes im Winter. Dadurch wird die Anfälligkeit für Kondensat- und damit Schimmelbildung vermindert. Durch diszipliniertes Lüftungsverhalten bzw. eine kontrollierte Wohnraumlüftung wird diese Schimmelbildung ebenfalls verhindert.

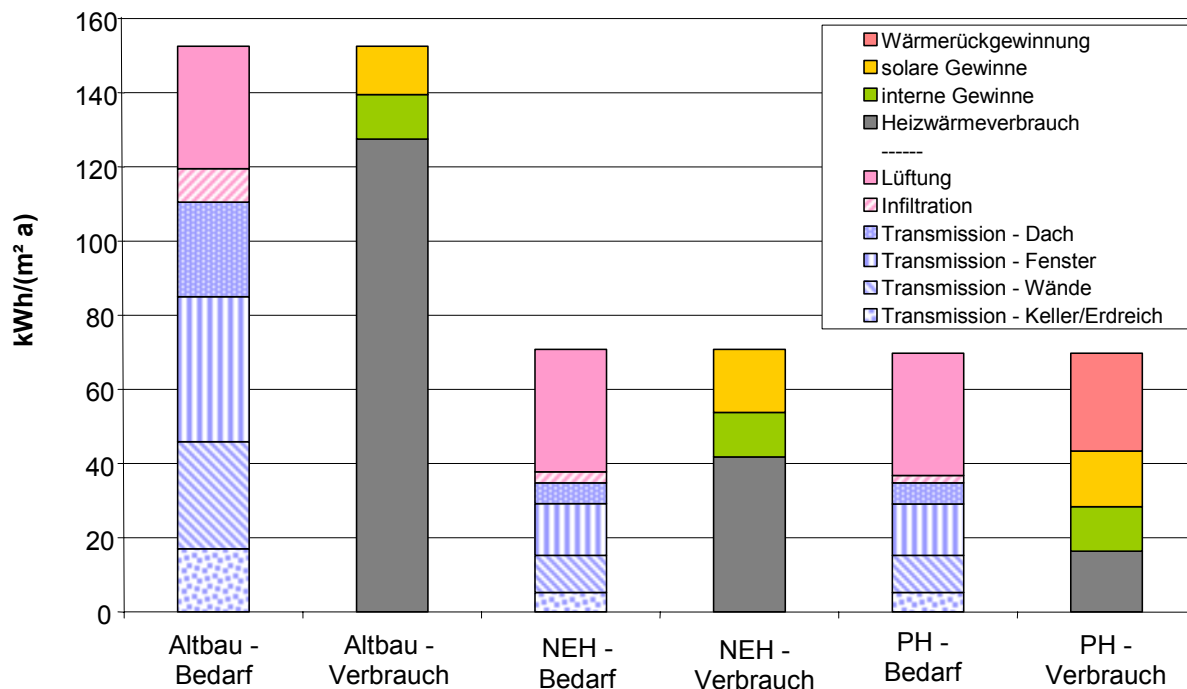


Abbildung 2: Entwicklung der Energiebilanzen (bezogen auf die Nettogeschossfläche) von älteren Gebäuden zum Passivhaus bzw. zum Niedrigenergiehaus mit gleichem Dämmstandard wie das Passivhaus aber ohne Abluftwärmerückgewinnung

Will man jetzt den Heizwärmebedarf eines Gebäudes weiter senken, muss man die Lüftungsverluste verringern. Dies geschieht üblicherweise, indem kontrollierte Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden. Das bedeutet, dass mit Hilfe eines Wärmetauschers Wärme aus der Abluft der Frischluft zugeführt wird. Dabei werden Rückgewinnungsgrade von 75-90% erreicht. Dadurch kann der Heizwärmebedarf soweit gesenkt werden, dass er bei hygienischer Luftwechselrate von 0,3 - 0,5 h⁻¹ und einer Zulufttemperatur unter 50°C allein durch Erwärmung der Zuluft gedeckt werden kann. Ist dies gegeben, so spricht man üblicherweise von einem Passivhaus-Konzept. Konventionelle Heizung (Fußboden-, Wand- oder Radiatorheizung) ist somit nicht mehr notwendig. Wärmerückgewinnung ist also eine Form, die Lüftungsverluste und damit den Heizwärmebedarf des Gebäudes zu reduzieren. Darum taucht die Wärmerückgewinnung (WRG) in Abbildung 2 als Gewinn auf. Der Restheizwärmebedarf liegt bei Passivhäusern bei höchstens 15 kWh/(m² a). Voraussetzung für einen so niedrigen Heizwärmebedarf ist eine sehr hohe Qualität der Gebäudehülle (Dämmung, keine Wärmebrücken, niedriges Verhältnis

Oberfläche zu Volumen und hohe Luftdichtheit :bei 50 Pascal Druckdifferenz zwischen Raum und Außen soll der Luftwechsel durch Infiltration kleiner als $0,6 \text{ h}^{-1}$ sein; $n_{50} < 0,6$).

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes hängt außer von der Dämmung und der Luftdichtheit auch von vielen anderen Faktoren ab. Ein Faktor ist, in welchem Maß passive Solarenergie genutzt wird. Eine optimierte passive Solarenergienutzung (hohe solare Gewinne während der Heizperiode ohne Überhitzung im Sommer) kann den Heizenergiebedarf weiter senken ohne einen Kühlbedarf zu schaffen.

Auch das Benutzerverhalten beeinflusst den Heizwärmebedarf maßgeblich durch die Wärmeabgabe der Bewohner, den Stromverbrauch im Gebäude, der als Wärme an den Raum abgegeben wird, das Lüftungsverhalten der Bewohner und die gewünschte Raumtemperatur.

Tabelle 1 zeigt den Einfluss von verschiedenen Faktoren des Benutzerverhaltens auf den Heizwärmebedarf von den in Kap. 4 definierten Referenzgebäuden mit 3 und 12 Wohneinheiten (3 WE, 12 WE). Allein die Änderung der Raumtemperatur um $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ erhöht bzw. senkt den Heizenergiebedarf um 23 bzw. 22 %. Die in Kap. 5.2 definierten Extremszenarien (hohe Last/geringe Innenwärmen, ex 1 bzw. niedrige Last/hohe Innenwärmen, ex 2) bewirken eine Änderung um + 130 % bzw. - 75 % des Heizenergiebedarfs der Referenzvariante.

Tabelle 1: Einfluss der Gebäudenutzung und des Benutzerverhaltens in Bezug auf Strombedarf, Personenbelegung, Raumtemperatur und Luftwechselrate auf den Heizwärmebedarf (Referenzgebäude 1 mit 3 Wohneinheiten, Beispiel)

	Variation des Benutzerverhaltens				Wärmebedarf		
	Stromverbrauch	Personeanzahl	Raumtemperatur	Luftwechselrate	Heizwärmebedarf	Differenz zu Referenz	
	kWh/(d WE)		$^\circ\text{C}$	[1/h]	kWh/($\text{m}^2 \text{ a}$)	kWh/($\text{m}^2 \text{ a}$)	%
3 WE ref.	7	4	22,5	0,4	44,5	Referenz	
3 WE 20 $^\circ\text{C}$	7	4	20	0,4	34,9	-9,6	-22
3 WE 25 $^\circ\text{C}$	7	4	25	0,4	54,8	+10,3	+23
3 WE ex 1	3,5	2	25	0,8	100,7	+56,2	+126
3 WE ex 2	15	6	20	0,2	11,6	-32,9	-74
12 WE ref.	7	4	22,5	0,4	41,7	Referenz	
12 WE ex 1	3,5	2	25	0,8	97,2	+55,6	+133
12 WE ex 2	15	6	20	0,2	10,2	-31,5	-76

Die Nutzung des Gebäudes bzw. das Verhalten der Nutzer hat also bei gut gedämmten Gebäuden einen wesentlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Verschiedene Heizsysteme reagieren unterschiedlich auf das Nutzerverhalten. Ein Kriterium ist zum Beispiel, wie lange es dauert, das Gebäude wieder aufzuheizen, wenn im Winter längere Zeit das Fenster offen war (vgl. Kap. 5.2). Auch sollte bei der Planung eine mögliche zukünftige Nutzung des Gebäudes berücksichtigt werden, um das Heizsystem nicht zu klein zu dimensionieren. Im Extremfall könnte das Gebäude nicht mehr ausreichend beheizt werden, wenn beispielsweise Energiesparelektrogeräte statt Durchschnittsgeräte benutzt werden und weniger gekocht wird.

1.4 Zielsetzung des Leitfadens

Der Heizwärmebedarf von Passivhäuser und Niedrigenergiehäuser mit Passivhaus-Dämmstandard lässt sich mit sehr unterschiedlichen Heizungssystemen decken. Nach einer generellen Einführung in Behaglichkeit, Wärmeverteil- und Abgabesysteme in Mehrfamilienhäuser wird eine Darstellung der Vor- und Nachteile einiger unterschiedlicher Methoden zur Wärmeerzeugung und -abgabe gegeben.

Vier unterschiedliche Systeme werden für eine engere Betrachtung ausgewählt. Sie werden in die zwei Referenzgebäuden simulationsmäßig eingebaut und verschiedenen Nutzerszenarien unterworfen. Anhand der Energiebilanzen von End- und Primärenergie, der äquivalenten CO₂ Emissionen, der Befriedigung des Nutzerverhaltens, der Wärmegestehungskosten und qualitativer Kriterien werden diese Anlagen miteinander verglichen und Ihre Vor- und Nachteile für die verschiedenen Situationen detailliert beschrieben.

Die Zielsetzung des Leitfadens ist, eine zukünftige Auswahl von Heizungssystemen für Häuser mit Passivhaus-Dämmstandard zu erleichtern.

2 Behaglichkeit und Eigenschaften von Heizsystemen

2.1 Thermische Behaglichkeit

Ob sich ein Mensch in einem Gebäude wohl fühlt, ist immer eine subjektive Frage und hängt auch von dessen Bekleidung und Aktivität ab. Es gibt aber vier Kriterien, die sich in einem bestimmten Rahmen bewegen sollten, damit der Großteil der Menschen das Raumklima als behaglich empfindet. Diese Kriterien sind die Lufttemperatur, die Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen, die Luftbewegung und die Luftfeuchtigkeit. Zudem sollte ein Austausch der durch CO₂, Gerüche, Luftfeuchte etc. belasteten Luft im Raum durch Frischluft gewährleistet sein. Für Wohnhäuser wird zumeist eine Luftwechselrate von 0,5/h bezogen auf das Nettovolumen angegeben (z.B. Ö-NORM B 8135). Für die vorliegende Studie wird dieser Wert auf 0,4 reduziert, da von nicht belastenden Einrichtungsgegenständen und Baustoffen ausgegangen wird und somit primär die Verunreinigung der Luft durch die anwesenden Personen und Ihren Aktivitäten maßgeblich ist.

Raumtemperaturen/Oberflächentemperaturen

Die vom Menschen empfundene Temperatur setzt sich aus der Lufttemperatur im Raum und der Oberflächentemperatur der ihn umgebenden Flächen zusammen. Der Grund dafür ist, dass der Mensch seinen Wärmehaushalt über Wärmeleitung an die ihn umgebende Luft und über Strahlung, also Wärmeabgabe an die umgebenden Flächen reguliert. Die Temperatur von Wand- und Fensterflächen hängt einerseits vom Dämmstandard andererseits aber auch vom gewählten Heizsystem ab. Bei einer relativ hohen Oberflächentemperatur kann die Lufttemperatur etwas geringer sein, ohne die Behaglichkeit zu reduzieren. Umgekehrt muss bei kalten Wänden die Lufttemperatur entsprechend höher sein, um die Behaglichkeit zu gewährleisten. Idealerweise sollte die Oberflächentemperatur etwa bei 20-25°C liegen und die Lufttemperatur bei 19-23°C (Margreiter 1987, Recknagel 2001).

Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang von Oberflächen und Raumtemperatur in Bezug auf die thermische Behaglichkeit. Je nach umgebender Oberflächentemperatur kann sich in einem weiten Spektrum der Lufttemperatur ein behagliches Klima einstellen. Eine bekannte

Tatsache ist, dass im Winter bei -10°C Lufttemperatur ein angenehmes Sonnenbad möglich ist, da die Strahlungstemperatur der Sonne entsprechend hoch ist und viel Strahlung vom Schnee reflektiert wird. Voraussetzung ist dafür allerdings Windstille.

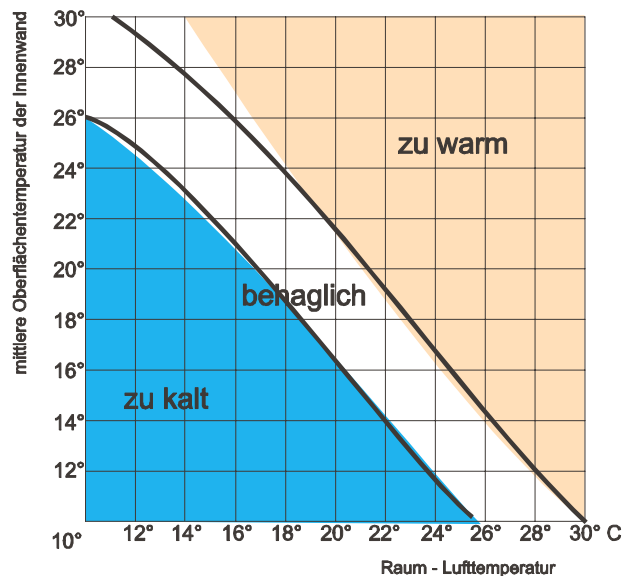


Abbildung 3: Behaglichkeit in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur umschließender Flächen (Seitz, 1993)

Außerdem sollten die Temperaturunterschiede im Raum möglichst klein gehalten werden. Nach einer Untersuchung von Olesen (1979) soll der Temperaturunterschied pro Meter Raumhöhe nicht mehr als 3 K betragen. Bei sitzender Tätigkeit sollte jedoch 1,5 bis 2 K/m nicht überschritten werden (Recknagel, 2001).

Luftbewegung

Luftbewegungen sind notwendig, um den hygienisch notwendigen Luftwechsel im Raum zu ermöglichen. Zu starke Luftbewegungen werden jedoch als unangenehm empfunden. Gründe für Luftbewegungen in Räumen können Undichtigkeiten in der Gebäudehülle oder Konvektion aufgrund von hohen Temperaturdifferenzen im Raum (z. B. an Radiatoren, großen Fensterflächen) sein. Alte Luftheizsysteme, die im Umluftverfahren große Luftmassen umgewälzt haben, können ebenfalls ein Grund für Luftzug sein. Heutige Luftheizungen für Wohngebäude und Büros können aufgrund des geringeren Wärmebedarfs durch bessere Wärmedämmung rein mit Frischluft und wesentlich niedrigeren Luftvolumenströmen arbeiten. Die DIN 1946-2 (1994) erlaubt bei einer Lufttemperatur von $20\text{--}22^{\circ}\text{C}$ eine mittlere Luftgeschwindigkeit von $0,15\text{--}0,24\text{ m/s}$ abhängig vom Turbulenzgrad.

Luftfeuchtigkeit

Der Mensch reguliert seinen Wärmehaushalt auch über die Atmung und Verdunstung. Bei normalen Raumtemperaturen um die 20°C spielt die Verdunstung allerdings eine untergeordnete Rolle. Im Allgemeinen wird eine relative Luftfeuchtigkeit bei 22°C Raumtemperatur von 30-70% als angenehm empfunden. Vermehrte Aufwirbelung von Staub durch Konvektion und auch verschwebender Staub durch hohe Oberflächentemperaturen von Radiatoren, Glühheizkörpern, etc. wird auch als trockene Luft empfunden, auch wenn die gemessene relative Luftfeuchtigkeit nicht besonders niedrig ist. Staub verschwelt ab einer Temperatur von etwa 55°C und setzt dabei Ammoniak und andere Gase frei (Recknagel 2001). Damit ist auch Geruchsbelästigung verbunden.

Hohe Luftfeuchtigkeit bindet Staub und hält ihn am Boden. Zur Reduzierung von Staub ist ein Zentralstaubsauger und ein Lüftungssystem mit Filter sicher die bessere Alternative als die Luftfeuchtigkeit durch Luftbefeuchter zu erhöhen.

2.2 Eigenschaften gängiger Wärmeabgabesysteme

Es gibt unterschiedliche Systeme, Wärme in den Raum abzugeben. Konventionell sind Heizkörper (so genannte Radiatoren) in jedem Raum. Alternativ gibt es Flächenheizungen wie Fußboden-, Wandheizungen. Eine ganz andere Form der Wärmezufuhr sind Luftheizsysteme.

2.2.1 Luftheizung

Bei Luftheizsystemen wird die Wärmeversorgung des Raumes über das Lüftungssystem gewährleistet. Ein Lüftungsgerät bringt erwärmte Frischluft in die Räume ein und saugt die belastete Luft wieder ab. Damit wird auch der hygienisch notwendige Luftwechsel sichergestellt.

Die Zuluft wird, bevor sie in dem Raum zugeführt wird, durch Wärmerückgewinnung aus der Abluft und anschließend mit Elektro- oder Wasserheizregistern (oder auch dem Kondensator einer Wärmepumpe) erwärmt. Bei Wärmerückgewinnung kann die Abluft hierbei so stark abgekühlt werden, dass an kalten Tagen Vereisungsgefahr besteht. Dieses Problem kann mit einem vorgeschalteten Erdreichwärmetauscher auf der Zuluftseite oder einer Abtausaltung, die allerdings zusätzlich Energie verbraucht, gelöst werden. Die Zuluft in den Raum darf nicht zu heiß eingeblasen werden ($<55^{\circ}\text{C}$), um die Behaglichkeit nicht zu beeinträchtigen und um Staubverschmelzung zu vermeiden (Margreiter, 1987). Bei Elektroheizregistern kann die Oberflächentemperatur über 200°C liegen, so dass Staubverschmelzung eintritt, wenn auch in geringerem Maße, da die Luft gefiltert wird. Außerdem müssen die Luftauslässe und Lüftungsrohre so dimensioniert sein, dass eine mittlere Luftgeschwindigkeit im Raum von $0,15 - 0,24 \text{ m/s}$ nicht überschritten wird, um Zugerscheinungen im Raum zu vermeiden DIN 1946-2 (1994). Die Heizleistung, die sich unter diesen Bedingungen in den Raum einbringen lässt, ist relativ gering, wobei die Lüftungsheizlast bei einer Einblasetemperatur gleich der Raumtemperatur vollständig abgedeckt ist und ein Einblasen mit Übertemperatur dann auch die Transmissions- und Infiltrationsverluste abdecken kann.

Beispiel Luftheizung:

Bei einer Netto-Wohnungsgröße von 100 m^2 und einem Standardluftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ ergibt sich bei einer Raumhöhe von $2,5 \text{ m}$ ein Luftvolumenstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei einer Zulufttemperatur von 50°C und einer Ablufttemperatur von 20°C (T_{Raum}) bedeutet dies, dass 1080 W oder $10,8 \text{ W/m}^2$ Wohnfläche mit der Zuluft zur Abdeckung der Transmissions- und Infiltrationsverluste transportiert werden können. 50°C Zulufttemperatur bedeuten hierbei ca. 60°C Warmwassereintrittstemperatur in das Luftheizregister. Bei einem Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ steigt die spezifische Heizleistung auf knapp $13,5 \text{ W/m}^2$.

Generell kann man sagen, dass die maximal mögliche Heizlast aufgrund Transmission und Infiltration bei Luftheizsystemen bei Nichtüberschreiten des hygienisch erforderlichen Luftwechsels im Bereich von $10-14 \text{ W/m}^2$ Wohnfläche liegt. Höhere Luftwechselraten können, besonders im Winter, zu unangenehm geringen Luftfeuchtigkeiten in der Wohnung führen.

Aus diesem Grund ist es für Passivhäuser mit reinen Luftheizungssystemen sehr wichtig, den Wert von 10 W/m² für Transmission und Infiltration für alle zu beheizenden Räume (insbesondere der Eckräume mit hohem Außenflächenanteil) nicht zu überschreiten.

$$\dot{Q}_{\text{Lüftung}} = \dot{V}_{\text{Lüftung}} \cdot c_{p,\text{Luft}} \cdot (T_{\text{Raum}} - T_{\text{Zuluft}})$$

mit

$\dot{Q}_{\text{Lüftung}}$ [kW]	Wärmeleistung durch Luftheizung
$\dot{V}_{\text{Lüftung}}$ [m ³ /h]	Zuluftstrom
$c_{p,\text{Luft}}$ 0,000361 [kWh/(m ³ · K)]	Spezifische Wärmekapazität von Luft bei 20°C
T_{Raum} [°C]	Raumtemperatur
T_{Zuluft} [°C]	Zulufttemperatur

Im Allgemeinen sind Luftheizungen als flinke Systeme eingestuft, da die Nachheizung der Luft sehr schnell geregelt werden kann und keine Speichermassen des Heizungssystems aufgeheizt werden müssen. Allerdings ist durch die limitierte Heizleistung durch die begrenzte Einblasetemperatur nur eine langsame Reaktion des gesamten Gebäudes gegeben. Daher reagiert das Luftheizungssystem im Anwendungsfall der reinen Luftheizung mit begrenzter Luftwechselzahl sehr träge in der Wiederaufheizung aber schnell in der Abkühlung (siehe Kap. 5.3).

2.2.2 Wasserheizungssysteme

Bei Wasserheizungssystemen dient Wasser als Wärmeträgermedium. Wasser zirkuliert hier vom Wärmeerzeuger (z.B. Kessel, Wärmepumpe, Fernwärme-Übergabestation) zu den Radiatoren bzw. Fußboden- oder Wandheizungsflächen in den einzelnen Räumen.

Im Vergleich zu Luft kann Wasser durch seine höhere Dichte und Wärmekapazität wesentlich mehr Wärme transportieren. Dadurch sind wesentlich kleinere Rohrdurchmesser für die Verteilleitungen notwendig und es kann auch mit einer geringeren Vorlauftemperatur wesentlich mehr Wärme eingebracht werden.

$$c_{p,\text{Wasser}} = 1,16 \quad \left[\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \right] \quad \text{spez. Wärmekapazität von Wasser bei } 20^\circ\text{C}$$

Radiator

Bei einer Radiatorheizung sind in jedem Raum ein oder mehrere Heizkörper angebracht, die typischerweise über Thermostatventile einzeln den Massenstrom regeln. Die Vorlauftemperatur wird meist in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt, das heißt, wenn es draußen kalt ist, steigt die Radiatortemperatur. Die Vorlauftemperaturen lagen bei alten Systemen und schlecht gedämmten Gebäuden bei bis zu 90°C, heute sind maximale Vorlauftemperaturen zwischen 40 - 60°C üblich. Die Vorlauftemperatur hängt allerdings stark von der Art und der Fläche der verwendeten Heizkörper ab.

Heiße Luft steigt vom Heizkörper auf, sinkt auf der anderen Seite des Raumes wieder nach unten und kehrt von unten zum Heizkörper zurück. Diese Luftbewegung nennt man Konvektion. Sie führt zu ungleichmäßiger Temperaturverteilung im Raum. Die Wandflächen erwärmen sich bei dieser Wärmeabgabe nur langsam, da sie erst über Wärmeübergang von der Luft erwärmt werden müssen. Der Strahlungsanteil ist je nach Bauart und Fläche des Heizkörpers unterschiedlich, im allgemeinen allerdings relativ gering.

Die Heizkörper werden meist unterhalb der Fenster angeordnet, um so die kalte Abwärtsströmung der Luft am Fenster umzudrehen und einen „Warmluftvorhang“ zu erzeugen. Dadurch wird die als „Kältestrahlung“ empfundene verstärkte Wärmeabgabe des Menschen durch Strahlung an das kältere Fenster reduziert. Gleichzeitig wird aber auch das Glas erwärmt und damit die Transmissionsverluste nach außen erhöht.

Auf Radiatorheizungen setzt sich leicht Staub ab, außerdem sind Heizkörper häufig schlecht zu reinigen. Ab ca. 55°C Oberflächentemperatur am Radiator setzt die Staubverschmelzung ein. Der Staub wird zudem durch die Konvektion aufgewirbelt (Margreiter, 1987). Durch Einsatz von großflächigen Strahlungs- oder auch Plattenheizkörpern mit niedrigen Vorlauftemperaturen, kann der Anteil der Strahlungswärme erhöht und die Staubverschmelzung reduziert werden. Bei Niedrigenergie- und Passivhäusern ist das, bedingt durch die geringen Heizungsvorlauftemperaturen kein Thema.

Fußbodenheizung

Bei der Fußbodenheizung werden in Teilen oder im gesamten Fußboden Rohre verlegt, durch die das Heizungswasser fließt. Die Vorlauftemperatur wird entweder nach der Außentemperatur geregelt oder fix eingestellt und die Heizungspumpe bzw. der Wärmeerzeuger entsprechend ein/aus geregelt, um eine gewünschte Wärmeabgabe zu erreichen. Die Vorlauftemperatur liegt typischerweise bei gut gedämmten Häusern bei maximal 30-40 °C. Der Fußboden fungiert als Speichermasse, daher ist das System je nach Auslegung relativ träge, das heißt nicht schnell regelbar. Die maximale Fußbodenoberflächentemperatur liegt bei Niedrigenergie- und Passivhäusern aufgrund der großen zur Verfügung stehende Fläche und der geringen notwendigen Heizlast meist nur 2-3 °C über der Raumtemperatur. Damit können spezifische Heizlasten von 20-30 W/m²_{Fußbodenfläche} abgedeckt werden (Recknagel, 2001). Bei Passivhäusern kann daher die Heizungs-Vorlauftemperatur weiter abgesenkt werden oder es braucht nur ein Teil des Fußbodens beheizt werden. Durch die niedrigen Fußbodenübertemperaturen kommt es bei Sonneneinstrahlung zu einem Selbstregeleffekt. Der Raum wärmt sich durch die Sonnenstrahlung auf. Das bewirkt gleichzeitig, dass die Wärmeabgabe des Heizsystems bei einer Erhöhung der Raumtemperatur über die Fußbodentemperatur auf Null zurückgeht. In diesem Sinn ist das System als schnell reagierend auf sich ändernde Raumtemperaturen bedingt durch innere Wärmequellen oder solare Einstrahlung anzusehen.

Der Strahlungsanteil einer Fußbodenheizung ist aufgrund der großen Wärmeabgabefläche hoch. Sie erzeugt eine gleichmäßige Raumtemperatur. In Fußbodennähe kann sich bei Übertemperaturen größer 9°C allerdings ebenfalls eine Konvektionsströmung bilden, die zu Staubaufwirbelungen führt (Recknagel, 2001). Dieser Effekt ist aber wesentlich geringer als bei Radiatorheizungen und für Niedrigenergie- und Passivhäuser kein Thema (siehe oben).

Die Wandtemperatur ist bei Fußbodenheizung geringer als die Raumtemperatur, da die Wand nicht direkt beheizt wird. Der Mensch regelt seinen Wärmehaushalt zu einem großen Anteil über die Wärmeabfuhr an den Fußboden. Hohe Oberflächentemperaturen von Fußbodenheizungen führen zu reduzierter Wärmeabgabe und dadurch zu Gefäßverengung an den Beinen. Moderne Fußbodenheizungen arbeiten aber mit sehr niedrigen Oberflächentemperaturen. Nach der Europäischen Norm EN 1264 (1997) ist eine maximale Fußbodentemperatur von 29°C in Aufenthaltszonen gestattet. Nach Recknagel (2001) werden Fußbodentemperaturen über 27°C als unangenehm empfunden, als nur gelegentlich auftretende Auslegungstemperatur sind 29°C zugelassen. Solche Temperaturen führen normalerweise nicht zu gesundheitlichen Problemen. Wegen der niedrigen Vorlauftemperaturen treten bei

Niedrigenergie- und Passivhäusern nur Übertemperaturen von 2-3°C auf. Daher sind diese Effekte ebenso wie eine Staubverschmelzung für Niedrigenergie- und Passivhäuser kein Thema bei der Fußbodenheizung.

Um die Fußbodenheizung effektiv nutzen zu können, sind verklebte oder durchgängige Fußbodenaufbauten (Fliesen, Klebeparkett, Linoleum) und keine dickeren Teppiche (bzw. möglichst gar keine Teppiche) zu verwenden.

Wandflächenheizung

Bei Wandflächenheizungen sind die Heizungsrohre in den Wänden verlegt. Dies führt zu gleichmäßigen Wandtemperaturen und einer gleichmäßigen Temperaturverteilung im Raum. Die Vorlauftemperaturen werden ebenfalls in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt und liegen üblicherweise bei 25-30°C, aber auch Temperaturen bis 40°C sind ohne Probleme realisierbar. Es gibt, wie bei der Fußbodenheizung, kaum Konvektion im Raum. Analog zur Fußbodenheizung liegt bei der Wandheizung die Fußbodentemperatur unter der Raumtemperatur.

Bei gut gedämmten Gebäuden (k -Wert $<0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, beim Neubau ist dies der Standard) können die Rohre ohne zusätzliche Wärmedämmung nahe der Innenoberfläche der Wand angebracht werden. Auf diese Art und Weise kann die Wand in Abhängigkeit von Ihrem Aufbau als Speichermasse dienen, was das System relativ träge machen kann. Um ein flinkes Heizsystem zu bekommen, kann eine zusätzliche Dämmschicht zwischen Wand und Heizungsrohren angebracht werden.

Ein Nachteil der Wandheizung ist, dass die Wandflächen nicht komplett mit Möbeln zugestellt werden sollten und auch dass Befestigungen an den Wänden nur mit Vorsicht möglich sind.

Deckenheizung

Sind die Heizflächen in der Decke verlegt spricht man von einer Deckenheizung. Auch hier ist zwar eine große Fläche gegeben, jedoch bewirken die (geringen) konvektiven Anteile des Wärmeübergangs, dass die Temperatur an der Decke etwas höher als am Fußboden ist. Bis zu einer spezifischen Heizleistung von $40 \text{ W}/\text{m}^2$ lassen sich aber auch Deckenheizungen ohne allzu große Unisometrien der Raumtemperatur einsetzen. Aus diesem Grund sind auch Deckenheizungen für Niedrigenergiehäuser gedämmt nach Passivhausstandard einsetzbar.

Bedingt durch die großen Flächen sind Deckenheizung ebenfalls Niedertemperaturheizungssysteme. Die Heizflächen können als Betonkernaktivierung in der Speichermasse oder als Matten außerhalb der Speichermasse (Trocken- oder Nassausbau) verlegt werden. Daher sind alle Varianten der Heizungsträgheit und Speichermassennutzung denkbar. Ein Vorteil liegt in der für die Wärmeabgabeflächen meist freien Decken.

Die Deckenheizung wird im Folgenden bei den verschiedenen Systemen nicht explizit angeführt, da sie sich ähnlich der Wand- und Fußbodenheizung verhält.

2.2.3 Vergleich der verschiedenen Wärmeabgabesysteme

Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung technischer und qualitativer Eigenschaften der oben beschriebenen Wärmeabgabesysteme.

Tabelle 2: Vergleich der verschiedenen Systeme zur Abgabe der Wärme an den Raum

	Luftheizsysteme	Wasserheizungssysteme			
	Luftwechselrate von 0,4	Wandflächenheizung	Fußbodenheizung	Deckenheizung	Flachheizkörper
Lüftung/Gebäude					
Zusätzliche Dämmung notwendig	Nein	normal Nein, für schnelles Heizsyst.: Ja	(Nein)	(Nein)	Nein
Wärmeabgabesystem entkoppelt Speichermassen	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
Luftdichtheit gefordert	Ja ($n_{50} < 0,6$)	Nein	Nein	Nein	Nein
Hygienischer Luftwechsel gesichert	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Luftwechsel unabh. von Außenlärm	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Abluftwärmerückgewinnung	Ja (>75 %)	Nein	Nein	Nein	Nein
Vermeidung von Feuchteschäden	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Staubbildung	reduziert	Keine Aufwirbelung	(Nein)	Nein	(Ja)
Heizung					
Heizleistung (bei T_{\max}) (Recknagel et al., 2001, http://top-haustechnik2000.de/auslegung-wandheizung.html)	11 $W/m^2_{\text{Wohnfl.}}$ (Transmission und Infiltr.)	200 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	80 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	40 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	1300 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$
Vorlauf T_{\max} Heizung	60°C	50°C	40°C	35°C	90°C
Spez. Wärmeabgabe bei 40°C Heizungsvorlauf	5 $W/m^2_{\text{Wohnfl.}}$	130 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	80 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	40 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	530 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$
Heizung ohne Lüftung möglich	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Fensterlüftung möglich	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Heizung bei Fensterlüftung	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Eigenlärm der Heizung	(Nein)	Nein	Nein	Nein	Nein
Kühlung					
Max. spez. Kühlleistung	3 $W/m^2_{\text{Wohnfl.}}$	50 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	20 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	80 $W/m^2_{\text{Heizfl.}}$	gering
Kühlung Sommer (Erdreichwt.)	bedingt (Luft)	Ja (Wasser)	bedingt	Ja (Wasser)	Nein
Nachtauskühlung Sommer (bei geschlossenem Fenster)	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Wärmeverteilung					
Flächenbedarf Wärmeverteilung	Mittel	Gering (Befestigungen nur mit Vorsicht)	Gering (Heizfläche Boden ist meist frei)	Gering (Heizfläche Decke ist meist frei)	Gering

Tabelle 2: (Fortsetzung) Vergleich der verschiedenen Systeme zur Abgabe der Wärme an den Raum

	Luftheizsysteme	Wasserheizungssysteme			
		Luftwechselrate von 0,4	Wandflächenheizung	Fußbodenheizung	Deckenheizung
Wärmeabgabesystem					
Anteil Strahlungswärme	Gering	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel
Luftbewegung durch Wärmeabgabesystem	Gering (bei richtiger Auslegung)	Gering	Gering	Gering	Mittel
Gleichmäßige Raumtemperaturverteilung	Mittel	Gut	Gut	Mittel (Heizung)	Mittel
Zugluft bei Lüftung	Keine (bei richtiger Auslegung)	Hoch (Querlüftung)	Hoch (Querlüftung)	Hoch (Querlüftung)	Hoch (Querlüftung)
Regelung					
Schnell regelbares Heizungssystem	Ja (aber Leistung ist gering)	Ja, wenn Dämmung zw. Wand und Heizschlangen	Nein	Ja, wenn nicht in Speicher masse	Ja
Freizuhalten der Flächenbedarf Wärmeabgabeflächen	Gering	Hoch	Gering	Gering	Mittel
Einzelraumregelung (im Passiv- und Niedrigenergiehaus durch Thermohülle außen grundsätzlich nur mäßig möglich)	Gering	Gut	Gut	Gut	Gut

2.3 Wärmeverteilung für zentrale Wärmeerzeugung in Mehrfamilienhäuser

Die Wärmeverteilung für Heizung und Brauchwarmwasser in Mehrfamilienhäusern ist aufgrund der Rohrleitungen mit Wärmeverlusten behaftet, welche absolut um so größer werden, je länger, je schlechter sie gedämmt und je höher die Temperaturen in den Leitungen sind. Ein Teil der Verluste kann in der Heizperiode als Heizwärme genutzt werden, ein Teil der Rohre ist jedoch oft in unbeheizten Bauteilen geführt und die Wärmeverluste somit verloren. Bezogen auf den Gesamtwärmebedarf steigen die relativen Verluste zudem, je geringer dieser Wärmebedarf ist. Daher ist besonders bei Niedrigenergie- und Passivhäusern auf ein effizientes Wärmeverteilungssystem zu achten.

Im Folgenden werden drei verschiedene Systeme, unterschieden nach der Anzahl der Versorgungsrohre, mit Ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt. Eine umfassende Studie zu diesen Netzen wurde im Forschungsprojekt „Solare Wärmenetze“ im Rahmen der Forschungsinitiative „Haus der Zukunft“ des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt (Streicher et al. 2001, <http://www.hausderzukunft.at>).

2.3.1 Vier-Leiter-Netze

Als Vier-Leiter-Netze bezeichnet man Verteilsysteme, die neben der Vor- und Rücklaufleitung für die Raumwärmeversorgung auch noch zwei (meist) trinkwasserführende Stränge für die Brauchwarmwasserverteilung aufweisen (Brauchwarmwasserverteilung und Zirkulationsleitung). Das Brauchwarmwasser wird mit einer Umwälzpumpe über die Hauptverteilungen bis kurz vor die Zapfstellen und dann über eine möglichst klein dimensionierte „Zirkulationsleitung“ zum Speicher umgewälzt. Dadurch wird das Verteilnetz ständig auf Temperatur gehalten. Der damit verbundene Energieverbrauch einer Zirkulationsleitung kann allerdings sehr groß sein. Je nach Betriebsweise, Temperatur, Leitungslänge, Umlaufmenge und Dämmgüte der Rohrleitungen ergeben sich Verluste von 20 bis über 100% des eigentlichen Energiebedarfes für die Brauchwarmwasserbereitung. Diese Wärmeverluste stellen den größten Nachteil für ein Vier-Leiter-Netz dar. Als Vorteil für das Vier-Leiter-Netz kann der Platzgewinn in den Wohnungen durch den Wegfall der dezentralen Brauchwarmwasserspeicher gesehen werden. Für das Brauchwarmwasser wird zumeist ein Bereitschaftsspeicher zum Ausgleich der Lastschwankungen eingesetzt. Eine mögliche Schaltung mit optionaler Einbindung einer Solaranlage zeigt Abbildung 4.

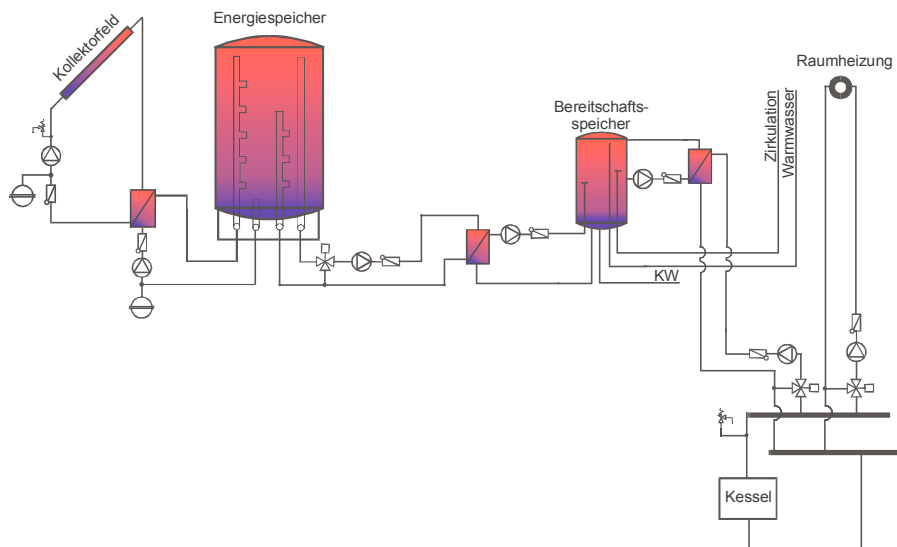


Abbildung 4: Vier-Leiter-Netz mit leistungsgeregeltem Wärmeerzeuger, Brauchwarmwasser-Bereitschaftsspeicher und optional angeschlossener Solaranlage (Streicher et al. 2001)

2.3.2 Drei Leiter-Netze

Als Drei-Leiter-Netze bezeichnet man Verteilsysteme, die für die Brauchwarmwassererwärmung und Raumwärmeversorgung drei Stränge aufweisen. Je nach Einsatzfall wird entweder eine gemeinsame Vorlaufleitung oder eine gemeinsame Rücklaufleitung gewählt. Der wesentliche Unterschied zum Vier-Leiter-Netz ist, dass die Brauchwarmwassererwärmung dezentral in den einzelnen Wohnungen erfolgt und die Verteilstränge somit Heizungswasser führen.

Drei-Leiter-Netze können überall dort sinnvoll eingesetzt werden, wo große Temperaturunterschiede zwischen den nötigen Versorgungstemperaturen (Brauchwarmwasser und Raumheizung) oder den Rücklauftemperaturen vorherrschen. Im allgemeinen bedeuten sie aufgrund des dritten Stranges bzw. aufgrund der dezentralen Brauchwarmwasserbereitung

aber höhere Investitionskosten im Vergleich zu Zwei- und Vier-Leiternetzen. Abbildung 5 zeigt eine mögliche Schaltung für ein Drei-Leiter-Netz mit der optionalen Einbindung einer Solaranlage. Drei-Leiter Netze nutzen allfällige solare Erträge durch den zentralen Speicher immer für Brauchwarmwasser und Heizung. Durch den getrennten Rücklauf von Brauchwarmwasserbereitung und Heizung sind im Speicher unten immer niedrige Temperaturen garantiert, was hohe Solarerträge bringt.

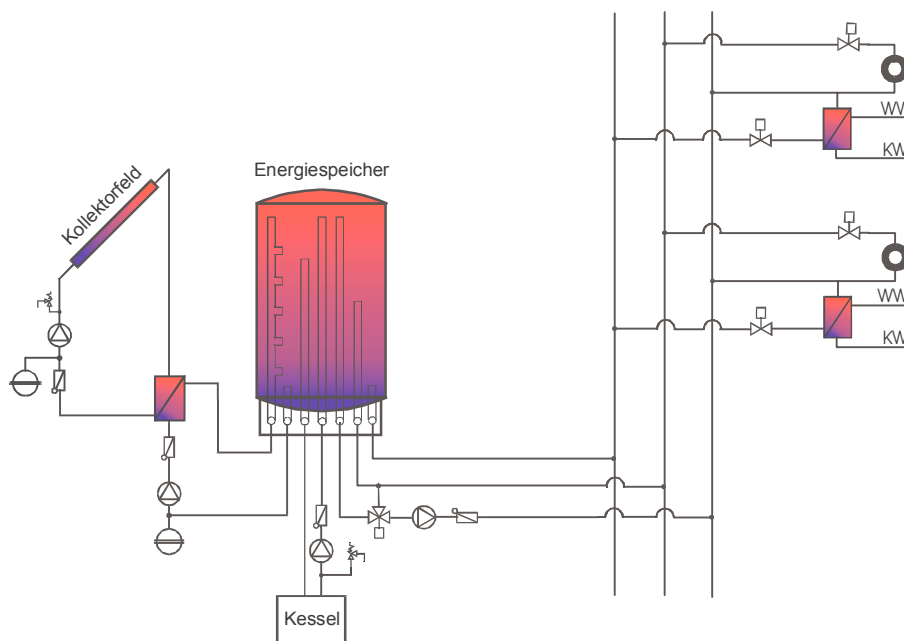


Abbildung 5: Drei-Leiter-Netz mit zentralem Energiespeicher und dezentraler Brauchwarmwassererwärmung und optionaler Einbindung einer Solaranlage (Streicher et al. 2001)

2.3.3 Zwei-Leiter-Netze

Als Zwei-Leiter-Netze bezeichnet man Verteilsysteme, die für die Brauchwarmwassererwärmung und Raumwärmeversorgung zwei Stränge aufweisen (als Beispiel siehe Abbildung 6). Der wesentliche Unterschied zum Vier-Leiter-Netz ist, dass die Brauchwarmwassererwärmung dezentral in den einzelnen Wohnungen erfolgt und aufgrund der Systembeschaffenheit die solaren Erträge zur Brauchwarmwassererwärmung und Heizungsunterstützung verwendet werden können. Da nur ein gemeinsamer Versorgungsstrang sowie ein gemeinsamer Rücklaufstrang durch das Gebäude geführt wird, muss die Versorgungstemperatur immer den aktuell höheren Wert aus Raumwärmeversorgung und Brauchwarmwassererwärmung erreichen. Bei Niedrigenergie- und Passivhäusern wird dies zumeist durch die Brauchwarmwassertemperatur vorgegeben (55-60°C Vorlauftemperatur). Um die Temperatur zu senken können dezentrale Brauchwarmwasserspeicher eingesetzt werden, die innerhalb von gewissen Zeitfenstern mit höheren Temperaturen geladen werden; außerhalb der Zeitfenster wird nur die von der Heizung vorgegebene Temperatur im Vorlauf gefahren. Allerdings treten hier höhere Investitionskosten und Platzbedarf für die dezentralen Brauchwarmwasserspeicher auf. Die Zweileiter-Netze mit Durchlauferhitzer benötigen am Verbraucher immer eine Temperatur von ca. 55°C um die Brauchwarmwasserbereitung zu gewährleisten. Durch derzeit am Markt befindliche kompakte Übergabestationen ist der Platzbedarf jedoch sehr gering. Bei beiden Systemen kann die Rücklauftemperatur auf ca. 35-40°C gehalten werden, womit hohe Solarerträge erzielbar sind, Außerdem kann über eine

Wärmemengenmessung der Wärmebedarf für Brauchwarmwasser und Heizung gemeinsam verrechnet werden.

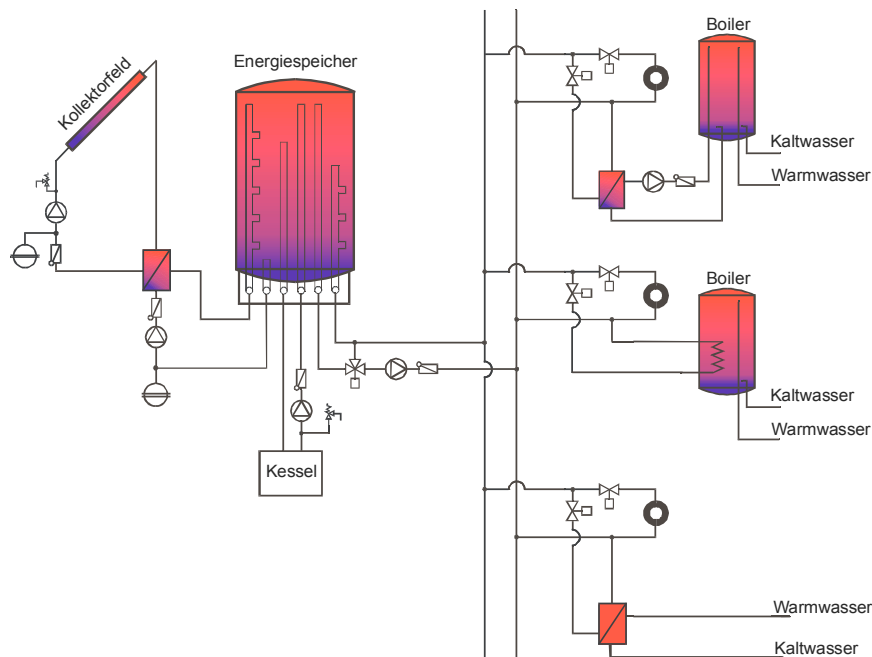


Abbildung 6: Zwei-Leiter-Netz mit zentralem Energiespeicher und dezentraler Brauchwarmwassererwärmung (verschiedene Varianten) und Einbindung einer Solaranlage. (Streicher et al. 2001)

2.4 Wärmeerzeuger und Pufferspeicher

Unabhängig davon, wie die Wärme an den Raum abgegeben wird, gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese Wärme zu erzeugen. Die Bandbreite reicht von konventionellen Gas- und Ölkesseln zu Pelletskesseln, Pelletskaminöfen und Kachelöfen zu Wärmepumpen und direkter Verwendung von Strom. Eine Gegenüberstellung der Eigenschaften verschiedener Wärmeerzeuger zeigt Tabelle 3.

2.4.1 Emissionen von Heizkesseln

Die maximalen Emissionen von Heizkesseln im Stationärbetrieb sind in diversen Normen festgelegt und sind in den letzten Jahrzehnten deutlich gesunken. Beim Anfahren und Abschalten haben sie aber deutlich höhere Emissionen als im stationären Betrieb, wie in Abbildung 7 qualitativ zu sehen ist.

Die Höhe der Start- und Stoppemissionen hängt stark von der Bauart des Brenners und des Kessels ab. Gaskessel haben typischerweise bei einem Anfahr- und Stop Vorgang 4-fach höhere CO- und 6-10-fache CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Pfeiffer et al., 1999). Biomassekessel haben im Taktbetrieb, (Anfahren, Laufzeit, Abschalten, Gluterhaltung) 3 – 20mal höhere CO- und bis zu 26 mal höhere CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Baumbach, et al., 1995). Diese Werte können aber je nach Bauart auch höher oder tiefer liegen.

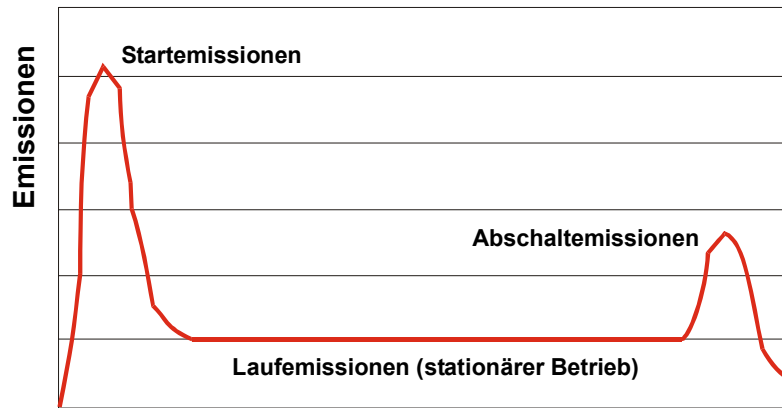


Abbildung 7: Start- und Stoppemissionen von Heizkesseln (Buderus, 1994)

Durch den niedrigen Heizwärmebedarf von Niedrigenergie- und Passivhäusern sind handelsübliche Gas-, Öl- oder Pelletskessel bzw. -thermen meist überdimensioniert. Das heißt, dass die Leistung des Kessels wesentlich höher liegt, als zur Deckung des Heizbedarfs (auch an einem sehr kalten Wintertag) notwendig ist. Der Kessel würde daher immer anfahren, bis er nach kurzer Zeit die maximal erlaubte Temperatur erreicht, und dann wieder abschalten. Daher ist es sinnvoll, einen Pufferspeicher zu verwenden. So kann der Kessel über einen längeren Zeitraum den Kessel laden und braucht dann, solange der Speicher entladen wird, nicht wieder anzuspringen. Das folgende Beispiel zeigt die Auswirkung eines Pufferspeichers.

Beispiel: Laufzeit Gastherme mit und ohne Pufferspeicher

Eine Gas-Therme liefert zum Beispiel auf niedrigster Stufe 5 kW. Ohne Pufferspeicher ist die Speichermasse (Therme, Leitungen und Wärmetauscher) sehr gering, daher ist die Brennerlaufzeit, bis die erlaubte Maximaltemperatur erreicht ist, meist unter einer Minute. Das bedeutet, dass der Kessel jeweils nach weniger als einer Minute abschaltet und kurze Zeit später wieder einschaltet, wenn die Temperatur entsprechend gesunken ist. Bei solchem Taktverhalten sind 30 000 Brennerstarts oder mehr pro Jahr und damit wesentlich höhere Emissionen als im Stationärbetrieb zu beobachten.

Durch Einsatz eines Pufferspeichers wird ein größeres Wasservolumen aufgeheizt, so dass der Brenner längere Zeit am Stück laufen kann und dann längere Zeit ausgeschaltet bleibt, bis der Speicher entladen ist. Mit einem Pufferspeicher von 200 l würde die Therme beispielsweise 28 Minuten brauchen, um den Speicher um 10 K zu erwärmen. Die Anzahl der Anfahrvorgänge wird also durch den Pufferspeicher stark reduziert. Der 200 l-Puffer kann damit im oberen Bereich bei vernünftigen Laufzeiten über 20 Minuten zwischen 50 und 60°C gehalten werden (siehe folgende Berechnung).

$$\dot{Q} = \frac{V \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot c_p \cdot \Delta T}{t}$$

$$t = \frac{0,2 \text{ m}^3 \cdot 1,16 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K}}{5 \text{ kW}} = 0,464 \text{ h} = 28 \text{ Minuten}$$

2.4.2 Generelle technische Hinweise für Pufferspeicher

Für Puffer- und Brauchwarmwasserspeicher ist eine gute Wärmedämmung ohne Wärmebrücken wichtig. Aus diesem Grund muss die Wärmedämmung fest am Speicher anliegen, da ein Luftspalt zwischen Dämmung und Speicher zu Naturzirkulation der Luft und damit einer vergrößerten Wärmeabfuhr führen kann. Trotzdem ist auch bei guten Speichern eine Verdoppelung der Speicherverluste gegenüber einer idealen Berechnung der vorhandenen Wärmedämmung festzustellen (z.B. Vajen, 1996).

Rohrleitungen, die vom Speicher wegführen, sollten zudem immer zuerst nach unten geführt werden. Dadurch wird verhindert, dass warmes Wasser vom Speicher in die Rohrleitungen aufsteigt. Dieses warme Wasser wird an den Rohrwänden gekühlt. Dies passiert vornehmlich an schlecht oder gar nicht wärmegeprägten Stellen wie Pumpen oder Armaturen, jedoch auch abgeschwächt bei gut wärmegeprägten Leitungen. Das gekühlte Wasser sinkt an den Rohrwänden nach unten und horizontal in den Speicher, wo es sich mit dem dort befindlichen Wasser mischt und dieses kühlt. Warmes Wasser wird aus dem Speicher abgezogen und fließt in der Rohrmitte nach oben. Über solche Leitungen können beträchtliche Energiemengen verloren gehen. Abhilfe kann ein so genannter Thermosiphon schaffen. Wird die Leitung zuerst nach unten verlegt, so sammelt sich das kalte Wasser am Grund des Siphons und kann nicht weiter in den Speicher fließen. Abbildung 8 zeigt den zugehörigen Mechanismus.

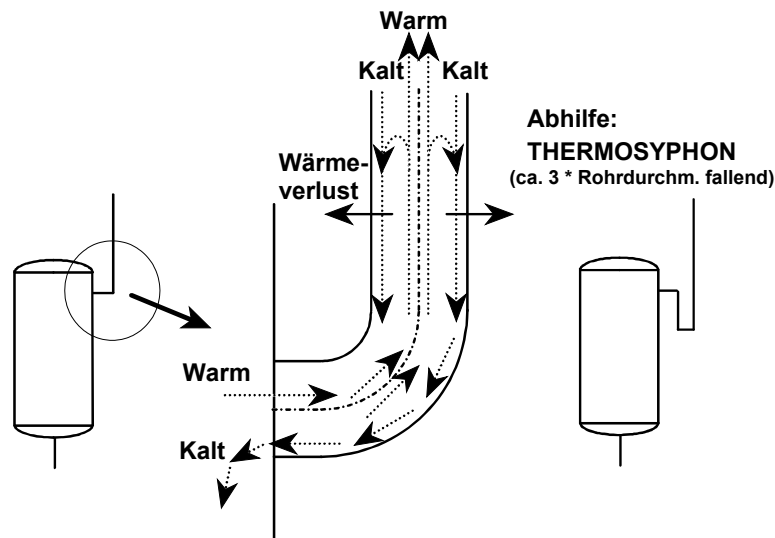


Abbildung 8: Naturzirkulation innerhalb eines Rohres und Vermeidung durch Thermosiphon (Streicher, 2003)

Detaillierte Informationen über das Verhalten von Wasserspeichern können z.B. Streicher, 2003 entnommen werden.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Systeme zur Wärmeerzeugung

	Öl	Gas		Pellets		Holz	Strom					Sonne
	Ölkessel zentral	Gastherme dezentral	Gaskessel Zentral	Pelletsessel (zentral)	Pellets-Kaminofen (dezentral)	Kachelofen-Ganzhausheizung (dezentral)	Kleinstwärmepumpe (Abluft, dezentral)	Sole-Wärmepumpe, dezentral)	E-Heizstab (Lüftung, dezentral)	E-Heizstab (WW), (dezentral)	el. Untertischboiler (WW) (nicht weiter behandelt)	Solaranlage
Energiequelle												
erneuerbar?	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Strom-mix	Strom-mix	Strom-mix	Strom-mix	Strom-mix	Ja
Rauchfang nötig?	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Brennstofflager nötig?	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Staub, Lärm?	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
importabhängig?	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	teilw.	teilw.	teilw.	teilw.	teilw.	Nein
Hohe Emissionen bei Taktbetrieb?	Mittel	Mittel	Mittel	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	--
Explosiv?	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Geeignet für Einsatzgebiete												
Luftheizungssystem	X	X	X	X	X		gut	Schlecht	X			
Wandflächenheizung	X	X	X	X	X	X	--	Sehr gut	--	--		X
Fußbodenheizung	X	X	X	X	X	X	--	Sehr gut	--			X
Radiator	X	X	X	X	X	X	--	Sehr gut	--			

Tabelle 3 (Fortsetzung): Vergleich verschiedener Systeme zur Wärmeerzeugung

	Öl	Gas		Pellets			Holz	Strom				Sonne
	Ölkessel zentral	Gastherme dezentral	Gaskessel zentral	Pelletsessel (zentral)	Pellets-Kaminofen (dezentral)	Kachelofen-Ganzhausheizung (dezentral)	Kleinstwärmepumpe (Abluft, dezentral)	Sole-Wärmepumpe (zentral)	E-Heizstab (Lüftung, dezentral)	E-Heizstab (WW), (dezentral)	el. Untertischboiler (WW) (nicht handelt)	Solaranlage
Eigenschaften der Erzeuger												
Wirkungsgrad / Leistungszahl (Heizbetrieb nach Jungmeier et al. 1995)	0,80	0,80	0,80	0,75	0,75	0,60	3,5	4,0	1			
Wirkungsgrad / Leistungszahl (Warmwasserbetrieb) Heizbetrieb nach Jungmeier et al. 1995)	0,80	0,80	0,80	0,75	0,75	0,60	2,5	3,5	1	1	1	
Erhältlich im Leistungsbereich...[kW]	>4,5	>3	>3	>3			>0,5	>3	>0,5	>0,5	>0,5	
Pufferspeicher notwendig	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	--	--	Ja
Brauchwarmwasserspeicher notwendig	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	--	Ja	klein	Ja
Kältemittelproblematik	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Platzbedarf	Hoch (Tankraum)	Gering	Gering	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Gering, Garten :	Mittel	Gering	Gering	Dach: Mittel Haus: Mittel
Aufstellung im Wohnbereich möglich	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	--
Systemverluste	Gering	Gering	Hoch	Hoch	Gering	Gering	Gering	Hoch	Gering	Gering	Gering	mittel
Kompakte Systemtechnik							ja					
Probleme bei Warmwasserbereitung im Sommer	Nein	Nein	Nein	Nein	Aufheizung des Aufstellraumes	Aufheizung des Aufstellraumes	Aufheizung der Zuluft	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Erfahrungsschatz bei der Planung von Anlagen	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	mittel	mittel	Gering	Gering	mittel	mittel	Sehr gut	Sehr gut	Gut

2.5 Qualitative Bewertung von Heizungssystemkomponenten aus Nutzersicht

Wie die bisherigen Ausführungen zu Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen Systemvarianten bereits gezeigt haben unterscheiden sich die Heizungssysteme nicht nur hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer (Effizienz, Emissionen) Charakteristika, sondern vielfach auch in der Wahrnehmung durch die BewohnerInnen des Gebäudes. Unterschiede aus Nutzerperspektive ergeben sich dabei aus den unterschiedlichen Formen der Wärmeabgabe (z.B. gleichmäßige Temperaturverteilung im Gebäude bei Luftheizung vs. punktuelle Wärmequellen wie Radiatoren oder Pelletseinzelöfen), unterschiedlichen Bediencharakteristika der Heizsysteme (Arbeitsaufwand, Regelmöglichkeiten, ‚Flinkheit‘ der Heizung) und möglichen Disfunktionalitäten (v.a. bei nicht optimaler Planung – etwa Lärmentwicklung, starke Konvektion und Staubeentwicklung, etc.). Die markantesten dieser Punkte wurden in den vorangehenden Listen bereits angeführt. Neben diesen isoliert darstellbaren Kriterien wird das Bild, das sich NutzerInnen von Heizsystemen machen, aber auch durch diffusere Einschätzungen und Einstellungen zu unterschiedlichen Heizsystemen geprägt, die von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden können – Marketingaktivitäten inkl. der Darstellung und Beratung durch ‚Multiplikatoren‘ wie Installateure oder Energieberatungsstellen, Einzelerfahrungen mit unterschiedlichen Heizungsformen (die auch weit zurückliegen können), tradierte Vorstellungen, Leitbilder, Konnotationen zu unterschiedlichen Heizungsformen (z.B. Bedeutung von Holz als Energieträger, Vorstellungen über Sicherheit der Energieversorgung, Modernität, Zuverlässigkeit etc.), Erfahrungen von Bekannten, Freunden usw.

Die Einschätzungen und Bewertungen unterschiedlicher Heizsysteme durch NutzerInnen wurde bisher relativ wenig untersucht. Für die folgende Darstellung wird vor allem auf mehrere Nutzerbefragungen im Rahmen des Programms ‚Nachhaltig Wirtschaften‘ – ‚Haus der Zukunft‘ des BMVIT sowie auf einzelnen deutsche Studien Bezug genommen (siehe Literaturliste). Auch in der diesem Leitfaden zugrunde liegenden Studie wurden PassivhausbewohnerInnen bezüglich ihrer Einschätzung unterschiedlicher Heizsysteme (nicht nur Erfahrungen mit dem eigenen) befragt. Allerdings beziehen sich die Studien meist auf Erfahrungen und Einstellungen bei ausgewählten Heizsystemen. Eine systematische Analyse der Erfahrungen mit unterschiedlichen Heizsystemen (etwa der bisher diskutierten verschiedenen Systemvarianten) liegt leider bisher nicht vor. Die folgende Darstellung beschränkt sich daher auf eine kurze Übersicht der Einschätzungen ausgewählter Gruppen (z.B. PassivhausbewohnerInnen, NutzerInnen von Niedrigenergiehäusern mit Lüftungsanlagen), die interessante Hinweise geben können aber nicht repräsentativ für die österreichische Bevölkerung sind, und die exemplarische Darstellung zweier Heizungsformen – Luftheizung in Niedrigenergie- und Passivhäusern sowie Heizen mit Holz – zu welchen ausführlichere Untersuchungen vorliegen.

2.5.1 Einschätzung unterschiedlicher Heizsysteme

Im vorliegenden Projekt wurde eine Befragung von BewohnerInnen in mehrgeschossigen Passivhaus- oder Niedrigenergiesiedlungen in Salzburg durchgeführt, die sich mit der Frage auseinandersetzt, wie sich BewohnerInnen von Niedrigenergie- und Passivhäusern in ihren Wohnungen verhalten, wie sie mit den darin vorhandenen Heizsystemen zurechtkommen, wie zufrieden sie damit sind, welche Schwierigkeiten es gibt und welche Heizsysteme sie für ein Niedrigenergie- oder Passivhaus geeignet halten.

Insgesamt wurden 53 Interviews in fünf Wohnanlagen durchgeführt, die genauen Ergebnisse dieser Befragung sind im Projektbericht dargestellt. Nachstehend werden einige Ergebnisse herausgegriffen, die in Bezug auf die Fragestellung der Zufriedenheit mit und der Einstellung zu Heizungsanlagen und Wärmeabgabesystemen interessant sind.

Einschätzung verschiedener Heizungssysteme

In einer Fragebatterie konnten acht Heizsystemen zehn verschiedene Vor- und Nachteile zugeordnet und diese bewertet werden. In der untenstehenden Tabelle sind alle Antworten bzgl. der verschiedenen Heizsysteme zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die zentrale Pelletsheizung als am wünschenswertesten für ein Niedrigenergie- oder Passivhaus angesehen wird, gefolgt von der teilsolaren Heizung (unabhängig von der eingesetzten konventionellen Energie) und der Heizung über die Lüftung. Der Pelletsheizung und der teilsolaren Heizung werden die wenigsten Nachteile zugeordnet, ebenso wie gute Erfahrungen damit (gilt auch für den Kachelofen und das Heizen über die Lüftung). Die Investitionskosten werden bei der Öl- oder Gasheizung als eher niedrig eingestuft, beim Kachelofen als eher hoch. Die Betriebskosten wiederum gelten bei der Pelletsheizung, dem Heizen über die Lüftung, der teilsolaren Heizung und dem Kachelofen als niedrig. Als sehr fehleranfällig wird eigentlich kein Heizsystem eingestuft, dafür werden das Heizen über die Lüftung und der Kachelofen als alleiniges Heizsystem meist für ungeeignet gehalten. Die teilsolare Heizung und die Pelletsheizung, aber auch das Heizen über die Lüftung bieten hohen Komfort. Unzureichende Regelungsmöglichkeiten werden nur dem Kachelofen attestiert. Die Elektroheizung und das Heizen über die Lüftung werden am bedienerfreundlichsten eingestuft.

Die Ergebnisse bzgl. der Wärmepumpe und des Pelletskaminofens können nicht dargestellt werden, weil hier die Antwortzahlen zu gering für eine seriöse Auswertung waren.

Erklärung zur Tabelle 4:

- Die Antwortkategorien „trifft sehr zu“ und „trifft etwas zu“ sind zusammengefasst zu „trifft zu“
- Alle Angaben sind in Prozent
- - : Fallzahlen sind zu gering für eine Aussage
- Ergebnisse unter 20% und ab 80% sind fett dargestellt

Tabelle 4: Einschätzung von verschiedenen Heizformen für ein Niedrigenergie- oder Passivhaus (alle Angaben in %)

Angaben in %	sehr wünschenswert bei einem NEH	hat eine Reihe von Nachteilen	zu hohe Investitionskosten	günstige Betriebskosten	eher fehleranfällig	als alleiniges System schlecht geeignet	bietet hohen Komfort	gibt meines Wissens gute Erfahrungen damit	lässt sich unzureichend regeln	ist bedienerfreundlich
Heizen über die Lüftung	80	53,8	53,8	95,5	27,3	73,9	87	83,3	38,1	100
Kachelofen	67,7	64,5	77,8	94,7	16,7	75	55,2	96,2	81,5	39,1
Teilsolare Heizung	95	20	68,2	96,7	28,6	72	100	100	-	87,5
Pelletsheizung im Keller	100	20	66,7	100	23,1	23,5	94,7	100	13,3	94,7
Wärmepumpe mit Erdreichwärmetauscher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Öl- oder Gasheizung	34,6	76,5	45	32	20,8	41,4	73,9	79,2	11,1	74,1
Elektroheizkörper	7,1	88,9	54,5	7,4	18,2	66,7	56	52,2	28	96,6
Pelletskaminofen im Wohnraum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die Vor und Nachteile verschiedener Heizsysteme wurden auch in einer offenen Fragestellung abgefragt, bei der die Befragten einfach frei zu Vor- und Nachteilen der einzelnen Heizformen assoziieren konnten.

So wurden als Vorteile der Heizform „Kachelofen“ vor allem die „behagliche, angenehme, wohlige, gemütliche“ Wärme angeführt; als Nachteile wurden vor allem der hohe Arbeitsaufwand, die damit verbundene Schmutzentwicklung und die schlechte Regelbarkeit ins Treffen geführt.

Die Pelletsheizung wurde vor allem als umweltfreundliche Heizform mit einem erneuerbaren, einheimischen Energieträger angesehen; der Platzbedarf für die Pellets und die hohen Anschaffungskosten wurden als Nachteil erlebt.

Das Heizen über die Lüftung wird als bedienungs- und benutzungsfreundlich angesehen, es wurden die Begriffe „frische Luft“ und „angenehmes Raumklima“ damit assoziiert. Die Wärmerückgewinnung wird als positiv eingestuft. Als Nachteile wurden Zugluft, eine hohe Geräuschbelastung und die Notwendigkeit eines Sicherungs-Zusatzheizsystems angegeben. Zu vergleichbaren Ergebnissen (wenn auch abweichender Reihung) kommt eine standardisierte Fragebogenerhebung von 144 BewohnerInnen von Niedrigenergiehäusern mit kontrollierter Wohnraumlüftung, d.h. mit Wärmerückgewinnung, aber nicht

notwendigerweise mit Heizung über die Lüftung (siehe Rohracher et al. 2001). Die Befragten gaben dabei auch Auskunft über ihre Vorstellung von Heizsystemen, die am besten für Niedrigenergiehäuser geeignet sind.

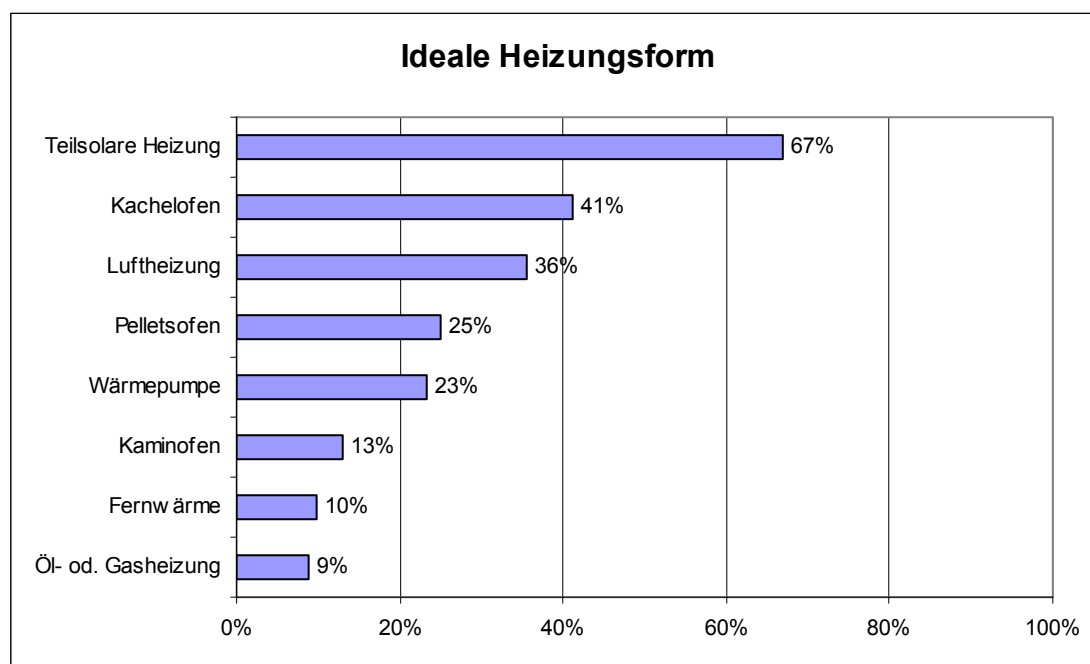


Abbildung 9: Ideale Heizungsform bei einem Niedrigenergiehaus in Prozenten

Abbildung 9 zeigt, welche Heizungssysteme sich BewohnerInnen von Niedrigenergiehäusern mit bestehenden Lüftungsanlagen am ehesten wünschen würden. Der teilsolaren Heizung mit Brauchwarmwasserbereitung (unabhängig von der eingesetzten konventionellen Energie) wird mit 66,9 Prozent eindeutig der Vorrang eingeräumt. Aber sowohl der Kachelofen mit 41,1 Prozent als auch die Luftheizung (38,2%) werden als gute Alternativen gesehen. Vor allem beim Kachelofen ist die Diskrepanz zwischen der bereits im Gebäude bestehenden (13%) und gewünschten (41%) Heizungsform am größten, bei Lüftungsanlagen decken sich die beiden Werte in etwa, d.h. diejenigen befragten NutzerInnen, die derzeit keine alleinige Luftheizung haben, wünschen sich im Fall dieser Befragung auch keine.

Vor der traditionellen Fernwärme bzw. Öl- oder Gasheizung rangieren schließlich noch der Pelletsofen, die Wärmepumpe und der Kaminofen.

Fast die Hälfte der Befragten (45,2%) meinen in dieser Studie darüber hinaus, es gebe eine ausreichende Auswahl an Heizsystemen, die auch für sehr geringen Energieverbrauch ausgelegt sind – immerhin 27% der Befragten können dem jedoch nicht zustimmen.

Einschätzung verschiedener Wärmeabgabesysteme

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die BewohnerInnen auch zur Einschätzung verschiedener Wärmeabgabesysteme (Heizkörper, Fußbodenheizung, Wandheizung) befragt. Bei der Frage, welches System sie bevorzugen, nannten die meisten Befragten Heizkörper, gefolgt von der Fußbodenheizung und schon abgeschlagen die Wandheizung.

Bzgl. Fußbodenheizung/Wandheizung wurde vor allem das Argument der angenehmen Wärme ins Treffen geführt, eine Heizform, die vor allem für das Badezimmer als geeignet eingestuft wird. Als nachteilig angesehen werden bei der Fußbodenheizung mögliche

gesundheitliche Bedenken (z.B. Venenprobleme) und die hohen Anschaffungskosten sowohl bei Fußboden- als auch Wandheizung.

Wie weiter oben erwähnt, sollen nun etwas detaillierter zwei Heizformen herausgegriffen werden, zu denen ausführlichere Untersuchungen vorliegen.

2.5.2 Heizen mit Biomasse aus Sicht der NutzerInnen – eine Sekundäranalyse

Zum Thema „Heizen mit Holz“ wurden in Österreich sowohl im Eigenheimbereich als auch im mehrgeschossigen Wohnbau in den letzten Jahren einige Studien durchgeführt (nicht zuletzt im der Programmlinie „Haus der Zukunft“), die sich mit den Erfahrungen, Problemen und Wünschen von betroffenen BewohnerInnen beschäftigten (siehe Literaturliste). Diese Ergebnisse werden hier zusammengefasst dargestellt, um eine Bewertung der Heizsysteme, die auf Biomassebasis beruhen, auch aus Sicht der BewohnerInnen vornehmen zu können.

Biomasse-Kleinanlagen in Ein-/Zweifamilienhäusern

Die Ergebnisse der Biomassestudie von Rohracher, Suschek-Berger (1997) zeigen, dass Hackschnitzelheizungen und Stückholzkessel im Eigenheimbereich vor allem von Personen eingesetzt werden, die leichten Zugang zum erforderlichen Brennstoff Holz haben oder diesen selbst besitzen. Daher ist das landwirtschaftliche Segment hier auch relativ bedeutend. Es muss auch genügend Platz für die Aufstellung der Anlage und für das Lagern des Brennstoffs vorhanden sein. Vor allem in der Landwirtschaft spielen auch Förderungen für die Anlage eine große Rolle.

Weitere wichtige Motive, die für die Installation der Anlage eine Rolle spielten, sind die Bedienerfreundlichkeit der Anlage, die Unabhängigkeit vom Ausland und die niedrige Höhe der Betriebskosten. Auch der Aspekt des Umweltschutzes durch die Verwendung eines erneuerbaren Energieträgers spielt eine wesentliche Rolle.

Die Zufriedenheit mit den Heizanlagen in diesem Bereich ist recht groß. Sie sind wenig störanfällig und kleinere Reparaturen werden meist selbst ausgeführt. Technisches Know-how der BesitzerInnen spielt hier natürlich eine wichtige Rolle.

Biomasse-Kleinanlagen in Mehrgeschosswohnbauten

Wie der sozialwissenschaftliche Teil der Biomassestudie von Könighofer et al. (2001) zeigt, unterscheiden sich die Erfahrungen von BewohnerInnen in Eigenheimen und im Mehrgeschosswohnbauten vor allem dadurch, dass die Auseinandersetzung mit der Heizanlage in Ein- und Zweifamilienhäusern wesentlich intensiver ist. In Mehrgeschosswohnbauten ist es den BewohnerInnen am wichtigsten, dass die zentrale Heizanlage im Haus funktioniert und ihre Wohnung mit Wärme versorgt, egal, mit welcher Technologie oder mit welchem Heizsystem dies zustande gebracht wird. Meist wissen sie auch gar nicht, um welchen Heizungstyp es sich in ihrem Heizkeller handelt. Auch beim Interesse für eine Wohnung oder bei der Kaufentscheidung für eine Wohnung spielt die Art der Heizung keine Rolle.

Wenn eine Biomasseheizung in einem Mehrparteienhaus installiert ist, ist die Zufriedenheit damit nicht besser oder schlechter als mit anderen Heizformen – sowohl mit der Heiztechnik als auch dem eingesetzten Brennstoff.

Wichtig sind den Befragten in der Studie bei der Beurteilung des Heizsystems Kosten- und Umweltaspekte, Kriterien, die von einer gut eingestellten Biomassekleinanlage in positiver Weise erfüllt werden.

Da von den BewohnerInnen im Mehrgeschosswohnbau wenig Auseinandersetzung mit dem in ihrem Gebäude eingesetzten Heizsystem zu erwarten ist, sind in diesem Segment die Wohnbaugenossenschaften erste Ansprechpartner. Motivation für diese, Hackschnitzelheizungen im Mehrgeschosswohnbau zu forcieren, sind oft Interessen der Gemeinden, in denen die Bauten errichtet werden – die Bauern der Region haben großes Interesse, ihr Holz in Form von Hackgut zu verkaufen und die Wohnanlagen damit zu beliefern. Die niedrigen Betriebskosten sprechen für die Biomasseanlagen, die höheren Investitionskosten dagegen. Probleme mit den Anlagen gab es eher bei schon länger in der Vergangenheit installierten, manchmal gibt es auch Anfangsprobleme bei neueren Anlagen, die aber relativ leicht behoben werden können.

Kachelöfen in Ein-/Zweifamilienhäusern

Auch Kachelöfen werden forciert im Eigenheimbereich eingesetzt, und hier sehr oft als Zusatzheizung, eher selten als Ganzhausheizung. Als Zusatzheizung werden sie – wie die Kachelofenstudie von Adensam u.a. (2000) zeigt – intensiv genutzt. Die Kundenzufriedenheit mit der Heizform „Kachelofen“ ist weitgehend groß. Motive für die Anschaffung eines Kachelofens sind die behagliche Wärme, die er ausstrahlt und die Faszination des offenen Feuers, das mit dem Kachelofen in Verbindung gebracht wird. Die hohen Anschaffungskosten spielen eine geringe Rolle bei der Kaufentscheidung.

Als Hindernisse für die Forcierung von Kachelöfen kann hauptsächlich der erhöhte Bedienungsaufwand angeführt werden, der es Singles, Berufstätigen oder älteren Menschen erschwert, einen Kachelofen einzusetzen. Das aktive manuelle Einheizen und die Aschenentsorgung stellen hier mögliche Hinderungsgründe dar. Der Holzbezug stellt für diejenigen, die einen Kachelofen betreiben, kein großes Problem dar. Von den BetreiberInnen wird der Kachelofen auch als ökologische Heizform eingestuft. Nicht zuletzt spielt sicher auch eine Rolle, dass der Besitz eines Kachelofens eine Art „Statussymbol“ ist. Soll der Kachelofen als Ganzhausheizung genutzt werden, müssen schon bei der Planung des Gebäudes die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, zumindest muss der Kachelofen zentral gesetzt werden und kann dann sämtliche Räume mittels Strahlungswärme versorgen. Auch eine Versorgung über Leitungen oder Luftschächte (Wasser oder Hypokausten) ist denkbar und möglich.

Aufgrund der durchgeführten Interviews zeigt sich ein positives Bild des Kachelofens als Hauptheizung.

Kachelöfen in Mehrgeschosswohnbauten

Kachelöfen in Wohnungen sind naturgemäß weniger weit verbreitet. Wenn sie aber im mehrgeschossigen Wohnbau zum Einsatz kommen, dann zeigt sich bei den BenutzerInnen ein ebenso positives Bild wie bei den BewohnerInnen von Eigenheimen. Auch eine Wärmeversorgung der ganzen Wohnung mit dem Kachelofen ist in diesem Fall denkbar.

Pellets-Einzelöfen in Ein-/Zweifamilienhäusern/Wohnungen

Wie die Studie von Biermayr et al. (2001) zeigt, ist die Technologie der Pelletsöfen den KonsumentInnen relativ unbekannt. Dies erschwert natürlich auch ihren Einsatz als Ganzhaus- oder Ganzwohnungsheizung. Wenn Pelletsöfen bekannt sind oder vielleicht sogar eingesetzt werden, dann spielt sicher die „Kaminatmosphäre“ wie beim Kachelofen eine

wichtige Rolle. Pellets werden auch als heimischer, erneuerbarer Rohstoff angesehen, wenn sie auch vom Preis her von den meisten Befragten überschätzt werden, ebenso auch die Investitionskosten eines Pelletskaminofens. Als hemmende Faktoren können auch die Brennstoffbesorgung (der Pelletsmarkt ist noch immer relativ jung), das Brennstoffhandling (manuelles Einheizen) und die Aschenentsorgung angesehen werden.

Pelletsessel in Mehrgeschosswohnbauten

Für Pelletsessel (kleinster Leistung), die voll automatisierte Heizsysteme darstellen und durchaus – abgesehen vom verwendeten Brennstoff Holz – einer Öl-Zentralheizung im mehrgeschossigen Wohnbau entsprechen, gilt bzgl. der Informiertheit der KonsumentInnen dasselbe wie für die Pellets-Einzelöfen – sie sind den potentiellen BenutzerInnen meist unbekannt. Ebenso gilt hier als positives Signal wiederum die Verwendung eines heimischen, erneuerbaren Energieträgers und, dass es sich um ein vollautomatisches System handelt. Als negative Faktoren sind auch hier die Unsicherheit der Brennstoffversorgung, weiters die mögliche Geräusentwicklung durch die Heizanlage und die höheren Investitionskosten als bei einer Gas- oder Ölheizung anzuführen.

Allgemein gilt hier sicher wiederum das schon für die zentralen Hackschnitzelheizungen in Mehrfamilienwohngebäuden Gesagte, nämlich, dass den BewohnerInnen die Art der zentralen Heizanlage nicht besonders wichtig ist, solange diese gut funktioniert.

2.5.3 Heizen über die Lüftungsanlage aus Sicht der NutzerInnen

Auf Lüftungsanlagen und Luftheizungen in Niedrigenergie- und Passivhäusern wird in mehreren Studien ausführlich Bezug genommen. Dies hat nicht zuletzt den Grund darin, dass kontrollierte Wohnraumlüftung bei hocheffizienten Niedrigenergiehäusern zu einer Notwendigkeit wird und das Passivhauskonzept explizit darauf ausgerichtet ist, dass eine Energieversorgung ausschließlich über die Lüftungsanlage möglich ist (und zumindest ökonomisch gesehen daher auch nahe liegt, da eine kontrollierte Wohnraumlüftung ohnehin erforderlich ist). Lüftungsanlagen sind eine Haustechnikkomponente, die darüber hinaus für BewohnerInnen durchaus einen Unterschied machen und als anders wahrgenommen werden (im Gegensatz etwa dazu, ob im Keller ein Pellets- oder Ölkessel oder eine Fernwärmeübergabestation steht). Der zentrale Stellenwert der Lüftungsanlage in solchen Konzepten führt daher vielfach zu kontroversiellen Diskussionen über die Vor- und Nachteile dieser Entwicklung.

Im Rahmen eines Projektes der Programmlinie ‚Haus der Zukunft‘ (Rohracher et al. 2001) wurde eine Befragung von 144 Einfamilienhäusern und Wohnungen mit kontrollierter Wohnraumlüftung durchgeführt. Bei den positiven und negativen Erfahrungen in Abbildung 10 zeigen sich vor allem auch große Unterschiede zwischen Anlagen in Ein/Zweifamilienhäusern und in Geschosswohnbauten. Das zeigt auch, wie wichtig der Kontext der Lüftungsanlage ist: Haben sich die BewohnerInnen selbst für dieses System entschieden? Haben Sie frühzeitig ausreichende Informationen erhalten? Gibt es ausreichende Flexibilität bei der Bedienung der Luftheizung? Solche Fragen müssen für Luftheizungen in Geschosswohnbauten und in Eigenheimen oft sehr unterschiedlich beantwortet werden und führen auch zu unterschiedlicher Zufriedenheit mit dem Heizsystem.

Grundsätzlich ist die Zufriedenheit mit Lüftungsanlagen (oft mit Luftheizungen) sehr hoch. Geschätzt werden besonders das gute Innenraumklima und die frische Luft. An den negativen Erfahrungen – vor allem Geräusentwicklung oder trockene Luft – zeigt sich jedoch, dass

die Planung und Errichtung der Lüftungsanlage häufig nicht optimal erfolgt, bzw. dass Luftheizungen sensitiv gegenüber Planungsfehlern sind. Denn ein Großteil der Probleme mit kontrollierter Wohnraumlüftung hängt nicht mit unausgereiften technischen Komponenten zusammen, sondern mit der Planung und Ausführung der Anlage, der Integration in das Gesamtgebäude, der Information der NutzerInnen, dem Kostendruck, der Einregulierung der Anlage nach Fertigstellung, etc. Zwar lassen sich deutliche Lernprozesse und ein Know-how Zuwachs bei spezialisierten Planern, Architekten und Herstellern konstatieren, doch ist für einen großen Teil der einschlägigen Professionisten die Planung und Errichtung von Lüftungsanlagen im Wohnbau - insbesondere wenn über die Lüftungsanlage teilweise oder vollständig geheizt werden soll - ein Aufgabenfeld, in dem sie noch nicht über ausreichende Erfahrungen und Kompetenzen verfügen.

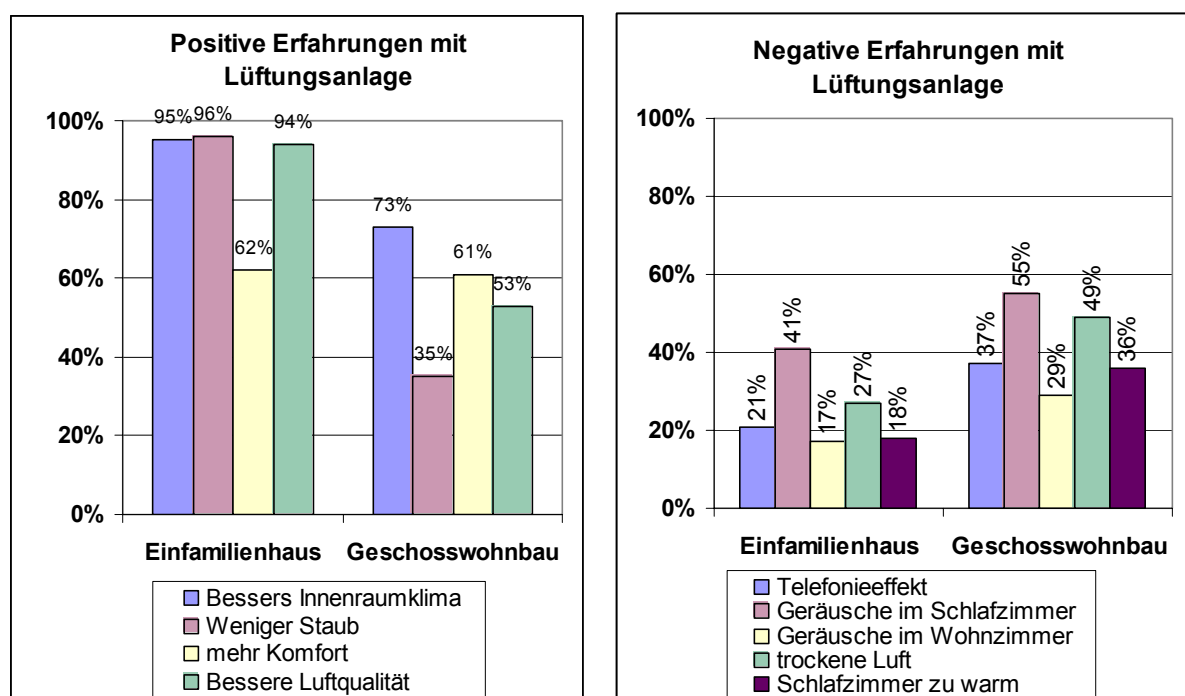


Abbildung 10: Positive und negative Erfahrungen mit Lüftungsanlagen

Auch die im Rahmen der vorliegenden Studie erhobenen Erfahrungen von BewohnerInnen in ausgewählten Passivhausanlagen zeigen die beträchtliche Streuung zwischen den unterschiedlichen Objekten (siehe Abbildung 11).

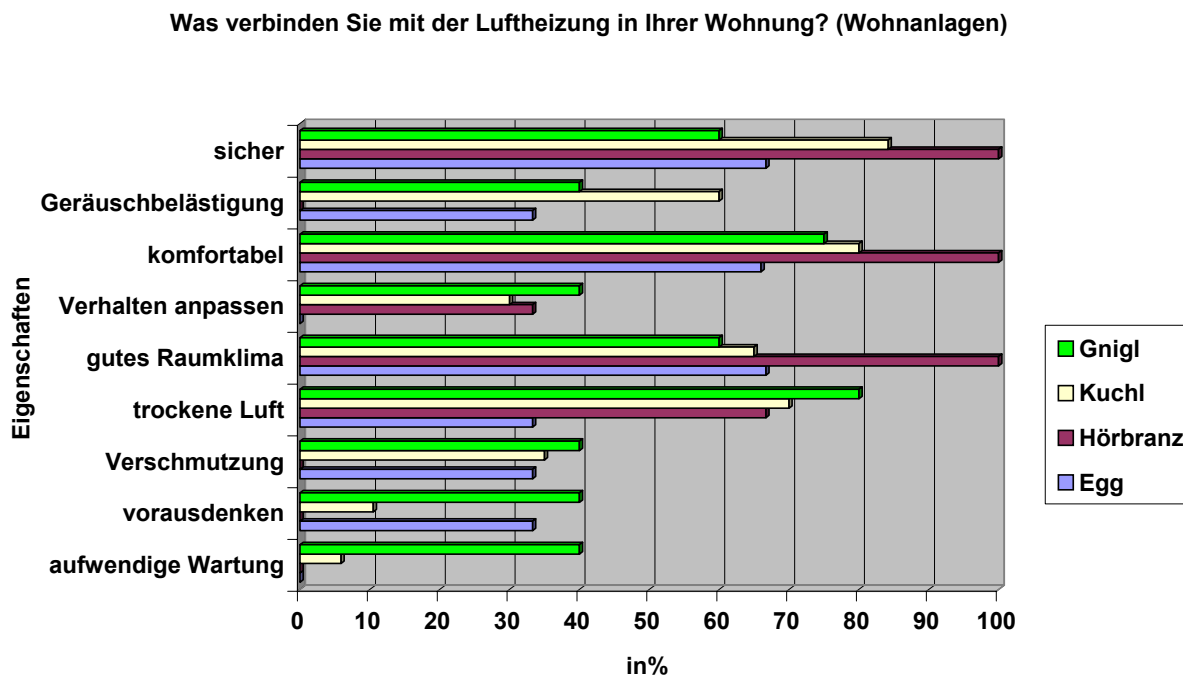


Abbildung 11: Erfahrungen mit Luftheizung in vier Passivhausanlagen

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch mehrere deutsche Studien – vor allem Begleitforschungen zu Passivhäusern und Niedrigenergiehäusern in Deutschland (Rohrman 1994, 1995), und das vor kurzem abgeschlossene Synergiehausprojekt, bei dem bei 400 Niedrigenergiehäusern mit Lüftungsanlagen eine Begleitforschung durchgeführt wurde.

Aus Sicht der BewohnerInnen fällt daher die Beurteilung der Luftheizung durchaus ambivalent aus: Sehr positiven Erfahrungen von BewohnerInnen in Gebäuden mit gut geplanten und installierten Anlagen stehen oft sehr negative Erfahrungen von NutzerInnen schlecht funktionierender Anlagen gegenüber. Solche Erfahrungen unterstreichen auch, wie sehr die in der Darstellung der Systemvarianten angeführten Charakteristika der Systeme mit ihren Vor- und Nachteilen von der tatsächlichen Ausführungsqualität beeinflusst werden. Es erfordert langfristige Lernprozesse der Herausbildung entsprechender Kompetenzen, Erfahrungen und Qualitätsstandards, bis die technischen Potentiale bisher wenig gebräuchlicher Technologien (in diesem Fall Luftheizungen, vor nicht langer Zeit etwa Wärmepumpen oder Hackschnitzelheizungen) auch auf breiter Front genutzt werden.

3 Qualitative Beschreibung ausgewählter Heizungssysteme

Im Folgenden werden nun verschiedene Heizsysteme, die für Niedrigenergie- und Passivhäuser geeignet sind, mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. In Kapitel 4 werden die Referenzgebäude beschrieben, anhand derer vier dieser Systeme verglichen werden. In Kapitel 6 werden dann diese Ergebnisse der Vergleichsrechnungen dieser vier Systeme dargestellt und verglichen.

Es gibt eine große Anzahl von Möglichkeiten, Niedrigenergie- und Passivhäuser mit Wärme zu versorgen. Die folgenden Systemvarianten wurden aufgrund der in den im EU-Projekt CEPHEUS untersuchten Gebäude, den Ergebnissen eines Workshops mit Experten im Bereich Heizungssysteme vom 4. Oktober 2001 am Institut für Wärmetechnik, den am Projekt beteiligten Firmen ausgewählt. Zudem wurde das österreichische Spezifikum des Pelletskaminofens berücksichtigt, welcher sich durch die Entwicklungen der Warmwasserauskopplung für Heizung und Brauchwarmwasser zunehmender Beliebtheit in Österreich erfreut. Ölheizungen wurden nicht berücksichtigt, sie haben aber sehr ähnliche Charakteristiken wie die Gaskessel, benötigen jedoch einen Tankraum ähnlich wie Pelletskessel. Für dezentrale Systeme sind die Ölkessel vom Leistungsbereich her zu groß.

Die folgenden Kombinationen wurden in diese Studie aufgenommen und in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt und bewertet:

- Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral
(detailliert in Kap. 5 behandelt)
- Gastherme – Luftheizung – dezentral
- Gastherme – Wasserheizung – dezentral
- Pelletskaminofen – Luftheizung – dezentral
- Pelletskaminofen – Wasserheizung – dezentral
- Sole-Wärmepumpe – Wasserheizsystem – zentral (mit Speicherbeladung)
(detailliert in Kap. 5 behandelt)
- Pellets- oder Gaskessel – Luftheizsystem – zentral
- Pellets- oder Gaskessel – Wasserheizsystem – zentral
(detailliert als Gas- und Pelletskessel in Kap. 5 behandelt)
- Kachelofen – Wasserheizung – dezentral

Unter dezentral werden Systeme verstanden, bei denen in jeder Wohneinheit separate Systeme eingesetzt werden, zentrale Systeme hingegen bestehen aus einem zentralen gemeinsamen Teil für alle Wohneinheiten und dezentralen Übergabestationen.

3.1 Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral

3.1.1 Systembeschreibung

Bei diesem System handelt es sich um ein speziell für Passivhäuser entwickeltes Kompaktsystem mit kontrollierter Wohnungslüftung, bei dem die Heizung ausschließlich durch erwärmte Frischluft erfolgt. Ein Luftwechsel durch die Lüftungsanlage ist daher zwingend erforderlich, um Heizen zu können. Voraussetzung ist eine maximale Heizlast von 10 bis 12 W/m², damit mit dem hygienisch notwendigen Luftwechsel und einer Zulufttemperatur unter 50°C der Heizbedarf gedeckt werden kann. Dafür muss die Infiltration in das Gebäude auf ein Minimum reduziert sein. Daher ist es wichtig, die Infiltrationsbegrenzung bautechnisch zu planen und bei der Ausführung durch Qualitätsbegleitmaßnahmen sicherzustellen. Dies ist besonders bei Lüftungssystemen, welche in den Wohnräumen die vorgewärmte Luft einblasen und in den Feuchträumen absaugen notwendig. Gewünscht wird bei diesen Systemen, dass von den Räumen mit leichtem Überdruck (Einblasräume) die Luft im Gebäude zu den Räumen mit leichtem Unterdruck (Absaugerräumen) gelangt und nicht durch Undichtigkeiten von den Räumen mit Überdruck ins Freie geblasen und in die Räume mit Unterdruck aus der Umgebung angesaugt wird. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten sollten Überströmöffnungen zwischen Zuluft-, Überström- und Abluftzonen so beschaffen sein, dass sie keinen relevanten Druckverlust darstellen und der Druckunterschied zwischen den Räumen gering bleibt. Bei Lüftungssystemen mit Einblase- und Absaugstellen in jedem Raum, wird das Gebäude tatsächlich drucklos betrieben. Die Undichtigkeiten bewirken hier „nur“ zusätzliche Infiltrationsverluste.

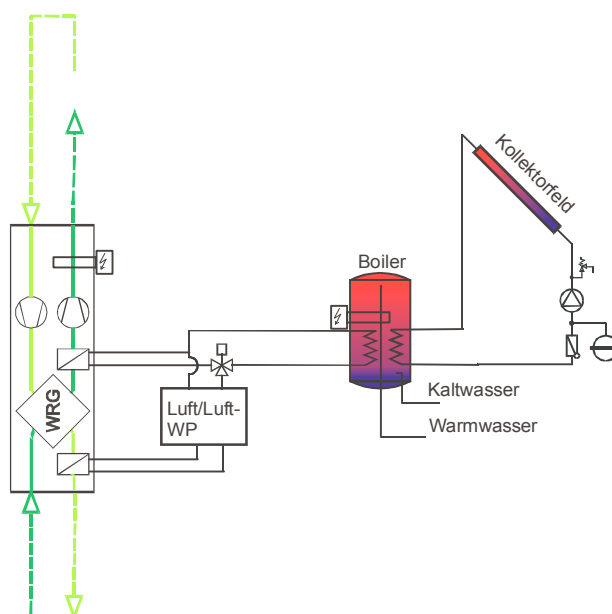


Abbildung 12: System 1 – Kleinstwärmepumpe mit Luftheizung – dezentral (Kollektorfeld und EWT empfohlen)

Über einen Luft/Luft-Wärmetauscher wird der Abluft aus den Räumen Wärme entzogen und der Zuluft zugeführt. Üblicherweise wird dabei eine Wärmerückgewinnung von 75-90 % realisiert. Dies kann zu einer Abkühlung der Abluft an den Wärmetauscherflächen unter Null Grad führen, was eine Vereisung des Wärmetauschers bewirkt. Wird hier keine Abtauschaltung vorgesehen, so „wächst“ der Wärmetauscher zu, es kann keine Abluft mehr strömen, die

Zuluft kann nicht mehr vorgewärmt werden und die Heizung kann nicht mehr funktionieren. Die Außenluft sollte daher bei Reihenhäusern über einen Erdreichwärmetauscher angesaugt und dadurch (bei richtiger Auslegung des Erdreichwärmetauschers) immer über 0°C vorgewärmt werden. Damit wird ein Vereisen des Wärmerückgewinnungswärmetauschers komplett vermieden. Trotzdem muss der Verdampfer der Abluftwärmepumpe, welcher die Abluft weiter abkühlt, mit einer Abtauschaltung versehen sein. Die Abluft-Zuluftwärmepumpe heizt entweder über ein Luft-Heizregister die Zuluft nach Vorwärmung durch den Abluftwärmetauscher oder einen Brauchwarmwasserspeicher. Der Kompressor der Abluftwärmepumpe verbraucht dabei elektrische Energie. Er ist im Zuluftstrom angeordnet, so dass seine Abwärme ebenfalls der Zuluft zugute kommt. Im Sommerbetrieb ist dies allerdings ein unerwünschter Effekt. Für extrem kalte Tage, an denen mehr als 10 bis 12 W/m² Heizleistung für Transmission und Infiltration nötig ist, kann zusätzlich elektrisch nachgeheizt werden. Diese Nachheizung muss dann aber nur einen sehr geringen Anteil des Heizwärmebedarfs decken. Der Brauchwarmwasserspeicher kann ebenfalls mit einem Elektroheizstab nachgeheizt werden. Die Einbindung einer Solaranlage zur Brauchwarmwasserbereitung ist möglich. Erdreichwärmetauscher eignen sich besonders für Reihenhäuser, im Geschosswohnbau führt die Luftvorwärmung über Erdreichwärmetauscher zu unnötigen Verlängerungen der Rohrleitungen im Gebäude.

Im Sommer kann der Luft/Luft-Wärmetauscher umgangen werden, so dass die Zuluft nicht erwärmt wird. Der Luft/Luft-Wärmetauscher wird dafür manuell oder automatisch durch zwei aneinander vorbeiführende Rohrleitungen ersetzt. Wenn ein Erdreichwärmetauscher vorhanden ist, kann die angesaugte Luft zusätzlich leicht gekühlt werden. Dies ist keine Klimaanlage, aber eine unnötige Erwärmung der Zuluft wird so vermieden. Alternativ kann im Sommer tagsüber auch nur der Zuluftventilator betrieben werden. Die Abluft wird dann über die Fenster abgeführt. Auf diese Art und Weise findet auch keine Wärmerückgewinnung statt und die Zuluft wird über den Erdreichwärmetauscher gekühlt. Die Nachheizung des Brauchwarmwasserspeichers sollte im Sommer möglichst nachts stattfinden. Die Abluft erfolgt dann über das Lüftungsgerät, so dass die Wärmepumpe arbeiten kann, die Luft wird über die Fenster zugeführt, so dass eine Beheizung durch die Abwärme des Kompressors vermieden wird.

Die Wärmepumpe arbeitet um so effizienter, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle (Abluft) und der gewünschten Vorlauftemperatur ist. Für den Heizbetrieb reichen Vorlauftemperaturen von 35-40°C an den meisten Tagen aus. Typische Leistungszahlen liegen bei etwa 3,5 (Maico, 1999). Das heißt, dass, wenn der Kompressor 1 kWh Strom verbraucht, 2,5 kWh aus der Abluft genutzt und 3,5 kWh der Zuluft zugeführt werden können. Zur Brauchwarmwasserbereitung ist dagegen eine Temperatur von mindestens 45°C nötig. Bei dieser Temperaturspreizung arbeitet die Wärmepumpe nur mit einer reduzierten Leistungszahl von etwa 2,5 (Sommerbetrieb), im Winter liegt die Leistungszahl bei etwa 3, da die Abwärme des Kompressors für die Heizung der Zuluft genutzt werden kann (Bühning, 2001).

Typische Jahresarbeitszahlen (Leistungszahl über ein Jahr gemittelt, einschließlich Verluste durch Anfahrvorgänge etc.) liegen bei knapp über 3 (Bühning, 2001).

Das System wird dezentral verwendet. Das heißt, jede Wohneinheit hat ein eigenes Lüftungsgerät mit Wärmepumpe, einen eigenen Brauchwarmwasserspeicher und ggf. eine eigene Solaranlage. Das Lüftungsgerät mit Wärmepumpe und Brauchwarmwasserspeicher kann auch im Wohnbereich, z.B. in einem Abstellraum oder im Vorraum installiert werden.

Der Platzbedarf für dieses Kompaktgerät mit Abluftwärmerückgewinnung, Ventilatoren und Wärmepumpe sowie einem Brauchwarmwasserspeicher von etwa 200 l liegt bei etwa 1 m². Zusätzlich ist schon bei der Bauplanung zu berücksichtigen, dass Platz für Zu- und Abluftrohre vorhanden sein muss. Rohrdurchmesser liegen für Wohnungen und Einfamilienhäuser aus Geräuschgründen typischerweise zwischen DN 80 und DN 160, je nach Luftvolumenstrom und Rohrleitungslänge. Die Rohre werden üblicherweise unter der Fußbodenkonstruktion oder unter einer in Teilbereichen abgehängten Decke verlegt. Dadurch verliert der Raum (bspw. Flure, Bad, WC) etwa 15-20 cm an Raumhöhe. Als Variante kommt auch eine offene oder kaschierte Führung der Rohrleitungen im Raum zum Einsatz. Bei Einsatz einer Solaranlage (mit 6-8 m² Kollektorfläche) ist etwa 0,4 m² zusätzlicher Platzbedarf für einen größeren Brauchwarmwasserspeicher (ca. 400 l) und eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.1.2 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Wärmepumpe
 - Kompakte Systemtechnik
 - Einfache Energieversorgung durch Strom
 - Relativ geringe Systemverluste (Kompaktgerät, Verluste gehen in die Wohneinheit)
 - Kein Rauchfang nötig
 - Kein Brennstofflager nötig
 - Kein Staub, Geruch,...
 - Aufstellung des Systems auch im Wohnbereich möglich.
- Luftheizsystem
 - Permanent frische Luft in allen Räumen
 - Energiesparen durch Wärmerückgewinnung
 - Keine kalte Zugluft durch Fensterlüften
 - kein Arbeitsaufwand bzw. keine Notwendigkeit für regelmäßiges Fensterlüften
 - Gefilterte Luft für Pollenallergiker
 - Lärmschutz durch geschlossene Fenster
 - Keine Heizkörper oder Heizflächen notwendig
 - Über einen Erdreichwärmetauscher ist im Sommer ein Luftwechsel möglich, der keinen zusätzlichen Energieeintrag ins Gebäude bringt.

Nachteile

- Wärmepumpe
 - Treibhausgasproblematik (bei Einsatz von Fluor-Kohlenwasserstoffe als Kältemittel)
 - Gefahr der Aufheizung der Zuluft während Brauchwarmwasserbereitung (Sommerproblem, kann durch Einsatz einer Solaranlage minimiert werden)
- Luftheizsystem
 - Kleine Heizleistung (max. 10-14 W/m² für Transmission und Infiltration) bei Luftwechselraten von 0,4 - 0,5 h⁻¹ und begrenzter Einblasetemperatur. Daher reagiert das Luftheizungssystem in diesem Anwendungsfall sehr träge in der Wiederaufheizung aber schnell in der Abkühlung.
 - Luftkanäle und Lüftungsgerät haben für Wohnungen rel. große Dimensionen
 - Lärmbelästigung bei unsachgemäßer Planung bzw. Ausführung (durch zu enge Rohrquerschnitte, schlechte Dämmung des Zentralgeräts, falsches Design der Luftauslässe, etc)
 - Zumeist gleiche Temperatur in allen Räumen (kann auch positiv gesehen werden)

- Fensteröffnung im Winter kann zu Problemen bei der Beheizung des Gebäudes führen (Wärmerückgewinnung wird umgangen)
- Keine Heizung bei abgeschalteter Lüftungsanlage
- Dichte Gebäudehülle erforderlich damit Abluftwärmerückgewinnung funktioniert.
- Funktioniert nur zufrieden stellend bei einwandfreier Planung des Gesamtgebäudes; Fehler und dadurch zu hohe Luftwechselraten etc. wirken sich negativ auf die Wohnqualität aus

3.1.3 Einsatzbereiche

Mit Luftheizungen lassen sich nur sehr geringe Heizleistungen (etwa 10-14 W/m² Netto-Wohnfläche) realisieren. Die Heizleistung von Kompaktgeräten mit Abluftwärmepumpe ist ebenfalls sehr gering, so dass diese Geräte nur für Passivhäuser geeignet sind.

Im Brauchwarmwasserbetrieb arbeiten Wärmepumpen durch die höheren Temperaturen mit niedrigeren Leistungszahlen.

Das System kann bei Mehrfamilienhäusern sowohl im Reihnhaus als auch im Geschosswohnungsbau (hier jedoch eher ohne Erdreichwärmetauscher mit Luftvorwärmung) eingesetzt werden.

3.2 Gastherme – Luftheizung – dezentral

3.2.1 Systembeschreibung

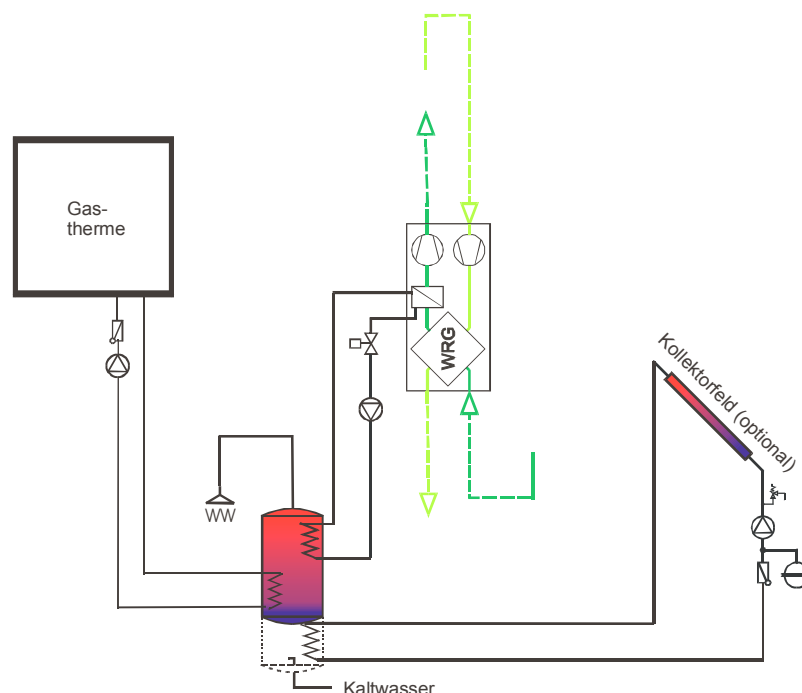


Abbildung 13: System 2 – Gastherme mit Luftheizung - dezentral (Kollektorfeld und EWT optional).

Bei diesem System handelt es sich um eine kontrollierte Wohnungslüftung, bei der die Heizung ausschließlich durch erwärmte Zuluft erfolgt. Ein Luftwechsel durch die Lüftungsanlage ist daher zwingend erforderlich, um heizen zu können. Voraussetzung ist eine maximale Heizlast von 10 bis 14 W/m². Dafür muss die Infiltration in das Gebäude auf

ein Minimum reduziert sein. Das kann durch ein Gebäude mit geringer Infiltration und eine gut ausbalancierte Lüftungsanlage erreicht werden.

Über einen Luft/Luft-Wärmetauscher wird der Abluft aus den Räumen Wärme entzogen und der Zuluft zugeführt. Üblicherweise wird dabei eine Wärmerückgewinnung von 75-90 % realisiert. Die Außenluft kann bei Reihenhäusern über einen Erdreichwärmetauscher angesaugt und damit auf über 0°C vorgewärmt werden. Dadurch wird ein Zufrieren des Wärmerückgewinnungswärmetauschers Gerätes vermieden. Im Geschosswohnbau führt ein Erdreichwärmetauscher oft zu relativ langen Rohrleitungen bis zu den Wohnungen führen.

Im Sommer kann der Luft/Luft-Wärmetauscher umgangen werden, so dass die Zuluft nicht erwärmt wird. Der Luft/Luft-Wärmetauscher wird dafür manuell oder automatisch durch zwei aneinander vorbeiführende Rohrleitungen ersetzt. Wenn ein Erdreichwärmetauscher vorhanden ist, kann die angesaugte Luft zusätzlich leicht gekühlt werden. Dies ist keine Klimaanlage, aber eine unnötige Erwärmung der Zuluft wird so vermieden. Alternativ kann im Sommer auch nur der Zuluftventilator betrieben werden. Die Abluft wird dann über die Fenster abgeführt. Auf diese Art und Weise findet auch keine Wärmerückgewinnung statt.

Eine Gastherme beheizt einen Brauchwarmwasserspeicher, aus dem sowohl warmes Wasser gezapft als auch die Zuluft über ein Wasser/Luft-Heizregister beheizt wird.

Optional kann an den Brauchwarmwasserspeicher auch eine Solaranlage angeschlossen werden.

Dieses System wird dezentral verwendet, das heißt jede Wohneinheit hat ein eigenes Lüftungsgerät, einen eigenen Brauchwarmwasserspeicher und eine eigene Gastherme. Der Platzbedarf für dieses System ist etwas höher als für das Lüftungskompaktgerät, da zwar die Wärmepumpe im Lüftungsgerät eingespart jedoch zusätzlich noch die Gastherme untergebracht werden muss. Eine wandhängende Brennwert-Gastherme hat einen Platzbedarf an der Wand von etwa 0,5 m², so dass man auf etwa 1,5 m² kommt. Zusätzlich ist schon bei der Bauplanung zu berücksichtigen, dass Platz für Zu- und Abluftrohre vorhanden sein muss. Rohrdurchmesser liegen für Wohnungen und Einfamilienhäuser aus Geräuschgründen typischerweise zwischen DN 80 und DN 160, je nach Luftvolumenstrom und Rohrleitungslänge. Die Rohre werden üblicherweise unter der Fußbodenkonstruktion oder unter einer in Teilbereichen abgehängten Decke verlegt. Dadurch verliert der Raum (bspw. Flure, Bad, WC) etwa 15-20 cm an Raumhöhe. Als Variante kommt auch eine offene oder kaschierte Führung der Rohrleitungen im Raum zum Einsatz. Bei Einsatz einer Solaranlage (mit 6-8 m² Kollektorfläche) ist etwa 0,4 m² zusätzlicher Platzbedarf für einen größeren Brauchwarmwasserspeicher und eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.2.2 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Luftheizung
 - Permanent frische Luft in allen Räumen
 - Energiesparen durch Wärmerückgewinnung
 - Keine kalte Zugluft durch Fensterlüften
 - kein Arbeitsaufwand bzw. keine Notwendigkeit für regelmäßiges Fensterlüften
 - Gefilterte Luft für Pollenallergiker
 - Lärmschutz durch geschlossene Fenster

- Keine Heizkörper oder Heizflächen notwendig
- Über einen Erdreichwärmetauscher ist im Sommer ein Luftwechsel möglich, der keinen zusätzlichen Energieeintrag ins Gebäude bringt.
- Gastherme
 - Viel Erfahrung bei Installateuren mit dieser Technik
 - Hohe Leistung im Brauchwarmwasserbetrieb möglich

Nachteile

- Luftheizung
 - Kleine Heizleistung (max. 10-14 W/m² für Transmission und Infiltration) bei Luftwechselraten von 0,4 - 0,5 h⁻¹ und begrenzter Einblasetemperatur. Daher reagiert das Luftheizungssystem in diesem Anwendungsfall sehr träge in der Wiederaufheizung aber schnell in der Abkühlung.
 - Luftkanäle und Lüftungsgerät haben für Wohnungen rel. große Dimensionen
 - Lärmbelästigung bei unsachgemäßer Planung bzw. Ausführung (durch zu enge Rohrquerschnitte, schlechte Dämmung des Zentralgeräts, falsches Design der Luftauslässe, etc)
 - Zumeist gleiche Temperatur in allen Räumen (kann auch positiv gesehen werden)
 - Fensteröffnung im Winter kann zu Problemen bei der Beheizung des Gebäudes führen (Wärmerückgewinnung wird umgangen)
 - Keine Heizung bei abgeschalteter Lüftungsanlage
 - Dichte Gebäudehülle erforderlich damit Abluftwärmerückgewinnung funktioniert
 - Funktioniert nur zufrieden stellend bei einwandfreier Planung des Gesamtgebäudes; Fehler und dadurch zu hohe Luftwechselraten etc. wirken sich negativ auf die Wohnqualität aus.
- Gastherme
 - Niedrige Leistung (0,5 – 5 kW) nicht am Markt verfügbar
 - Für die Gastherme ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Brauchwarmwasserspeicher gegeben).
 - Fossiler Energieträger
 - Kamin
 - Explosionsgefahr
 - Importabhängig
 - Anschluss an Gasleitung notwendig oder Gastank
 - Spezielle Anforderungen im Passivhausbereich nur bei wenigen Installateuren bekannt (siehe Abschnitt 2.4)

3.2.3 Einsatzbereiche

Da für die Brauchwarmwasserbereitung im Durchlaufverfahren etwa 25 kW Spitzenleistung erforderlich sind und auf dem Markt erhältliche Gasthermen nur bis etwa 30% Leistung heruntermodulieren können, wäre eine solche Gastherme ohne Pufferspeicher immer noch stark überdimensioniert, da für die Luftheizung nur sehr geringe Leistungen benötigt werden. Dies würde zu sehr häufigem Takten und daher hohen Emissionswerten führen. Daher ist ein Speicher von etwa 200 l pro Wohneinheit vorzusehen. Bei Einsatz einer Solaranlage sollte der Speicher entsprechend größer sein. Verringertes Takten kann auch die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Das System kann bei Mehrfamilienhäusern sowohl im Reihenhaus als auch im Geschößwohnungsbau (hier allerdings eher ohne Erdreichwärmetauscher für die Luftvorwärmung) eingesetzt werden.

3.3 Gastherme – Wasserheizung – dezentral

3.3.1 Systembeschreibung

In diesem System wird ein Pufferspeicher mit einer Gastherme beheizt. Aus diesem Pufferspeicher werden dann die Radiatoren oder auch Fußboden- oder Wandheizung mit warmem Wasser versorgt. Außerdem kann aus diesem Speicher mit unterschiedlichen Verfahren Brauchwarmwasser gezapft werden. Hier ist beispielhaft ein innen liegender Wellrohrwärmetauscher dargestellt, in dem eine bestimmte Menge Wasser auf Temperatur gehalten wird. Andere Alternativen zur Brauchwarmwasserbereitung sind in Abschnitt 3.4 und 3.5 beschrieben. Optional kann an den Pufferspeicher auch eine Solaranlage angeschlossen werden.

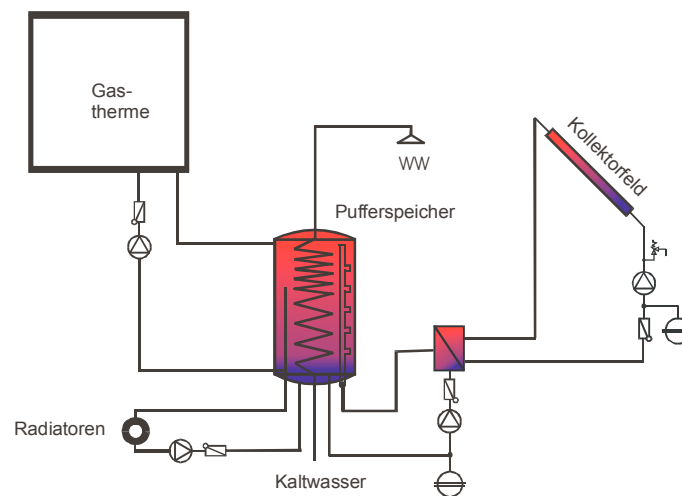


Abbildung 14: System 3 – Gastherme mit Wasserheizung - dezentral (Kollektorfeld optional)

Das System wird dezentral verwendet. Das heißt, jede Wohneinheit hat eine eigene Gastherme und einen eigenen Pufferspeicher. Der Platzbedarf für Therme und einen Pufferspeicher von etwa 400 l beträgt etwa 1 m². Die Rohrleitungen zu den Radiatoren verbrauchen im Gegensatz zu Luftheizsystemen kaum Platz, für die Radiatoren selbst hingegen muss in den Räumen ein Aufstellungsort (möglichst unter Fenstern) vorgesehen werden. Auch bei Einsatz einer Solaranlage (mit 6-8 m² Kollektorfläche) reicht ein 400 l Pufferspeicher aus. Daher ist nur ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.3.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Gastherme
 - Viel Erfahrung bei Installateuren mit dieser Technik
 - Hohe Wiederaufheizleistung
- Wasserheizung mit Radiatoren
 - Flexible schnelle Regelmöglichkeit mit Raumthermostaten
 - Einzelraumregelung möglich
 - Radiatoren als „Warmplatz“ in der Wohnung
 - Hohe Wiederaufheizleistung (abhängig von Radiatorfläche und möglicher Vorlauftemperatur)

- Wandheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Gute Raumtemperaturverteilung
 - Schnell regelbar (je nach Wandaufbau)
- Fußbodenheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Große Speicherkapazität (Dämpfung der Raumtemperaturschwankung)
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Heizfläche Boden ist meist frei
 - Selbstregelungseffekt bei Sonnenstrahlung bei richtiger Dimensionierung (Oberflächentemperatur max. 2 K über Raumtemperatur)
 - Gute Raumtemperaturverteilung

Nachteile:

- Gastherme
 - Niedrige Leistung derzeit nicht am Markt verfügbar
 - Für die Gastherme ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).
 - Fossiler Energieträger
 - Kamin
 - Explosionsgefahr
 - Importabhängig
 - Anschluss an Gasleitung notwendig oder Gastank
 - Spezielle Anforderungen im Passivhausbereich nur bei wenigen Installateuren bekannt (siehe Abschnitt 2.4)
- Wasserheizung mit Radiatoren
 - Höhere Luft- und Heizflächentemperaturen, Oberflächentemperatur von Wand und Boden unter Lufttemperatur
 - Höherer Konvektionsanteil als Strahlung
 - Platzbedarf in jedem Raum
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
 - Lärmbelästigung bei falscher Rohrdimensionierung
 - Durch Konvektionsströmung kann Staub aufgewirbelt werden.
- Wandheizung
 - Heizwand muss im wesentlichen frei bleiben
 - Befestigungen an einer Heizwand nur mit Vorsicht (mit Thermopapier kann die Lage der Rohre ermittelt werden)
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Fußbodenheizung
 - Große Speicherkapazität (Wiederaufheizen)
 - Je nach Auslegung eher träges System
 - Eingeschränkte Auswahl von Bodenbelägen
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)

3.3.3 Einsatzbereiche

Es gibt kaum Gasthermen im für Niedrigenergiehäuser notwendigen niedrigen Leistungsbereich. Daher wird die Gastherme ganz besonders in der Übergangszeit meist überdimensioniert sein. Das wiederum führt zu häufigem Takten und daher hohen Emissionswerten. Die Einbindung eines Pufferspeichers sollte daher unbedingt vorgesehen werden. Verringertes Takten kann die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Das System kann bei Mehrfamilienhäusern sowohl im Reihenhauses als auch im Geschößwohnungsbau eingesetzt werden.

3.4 Pelletskaminofen – Luftheizung – dezentral

3.4.1 Systembeschreibung

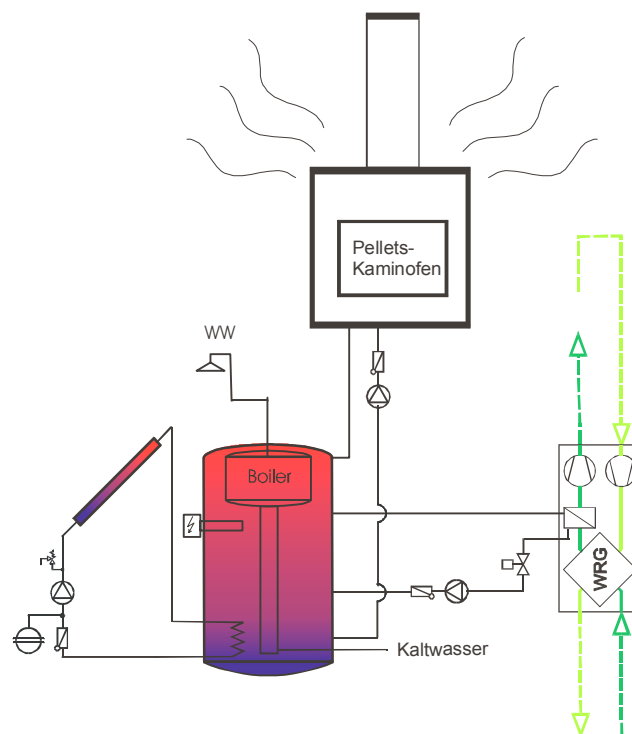


Abbildung 15: System 4 – Pelletskaminofen mit Luftheizung – dezentral (Kollektorfeld und EWT optional)

Bei diesem dezentralen Heizsystem bildet ein Pelletskaminofen im Wohnbereich das Kernstück. Der Pelletskaminofen gibt typischerweise etwa 20-30% seiner Leistung an die Luft im Aufstellraum ab. Es sollte jedenfalls weniger als 30% der Leistung über die Luft abgegeben werden, um Überhitzung im Aufstellraum zu vermeiden. Der Rest wird über einen Wärmetauscher ausgekoppelt und in einem Pufferspeicher gespeichert. Aus dem Pufferspeicher wird dann die Brauchwarmwasserbereitung und auch das Wasser/Luft-Heizregister der Lüftungsanlage versorgt. Es gibt verschiedene Methoden der Brauchwarmwasserbereitung aus einem Pufferspeicher. Hier ist beispielhaft ein Tank in Tank System dargestellt, bei dem ein innenliegender Tank Brauchwarmwasser auf Temperatur hält. Andere Alternativen zur Brauchwarmwasserbereitung sind in Abschnitt 3.3 und 3.5 beschrieben.

Die Außenluft kann bei Reihenhäusern über einen Erdreichwärmetauscher angesaugt und vorgewärmt werden. Dadurch wird ein Zufrieren des Luft/Luft-Wärmetauschers der

Wärmerückgewinnung vermieden. Über einen Luft/Luft-Wärmetauscher wird dann der Abluft aus den Räumen Wärme entzogen und der Zuluft zugeführt. Üblicherweise wird dabei eine Wärmerückgewinnung von 75-90 % erreicht. Im Geschosswohnbau führt die Luftvorwärmung über Erdreichwärmetauscher oft zu sehr langen Rohrleitungen im Gebäude.

Der Speicher kann zusätzlich über eine Solaranlage bzw. mit einer Elektroheizpatrone beheizt werden (nur Brauchwarmwassernachheizung im Sommer).

Dieses System wird dezentral verwendet. Das heißt, jede Wohneinheit hat ein Lüftungsgerät, einen Pufferspeicher und einen Pelletskaminofen im Wohnraum. Idealerweise befindet sich der Pufferspeicher mit Übergabestation und Lüftungsgerät in einem direkt angrenzenden Abstellraum. Der Platzbedarf ist durch die drei Komponenten Kaminofen, Pufferspeicher und Lüftungsgerät relativ groß. Kaminofen und Lüftungsgerät benötigen jeweils etwa 0,5 m², ein Pufferspeicher von 400-600 l noch mal etwa 0,8 m². Die Pellets können entweder sackweise mit der Hand nachgefüllt werden oder über eine Fördereinrichtung automatisch. Für die Aufbewahrung der Pellets muss ebenfalls zusätzlicher Raum vorgesehen werden. Bei Handbefüllung reicht 1 m³ pro Heizsaison für ein Passivhaus mit Wärmerückgewinnung aus. Zusätzlich ist schon bei der Bauplanung zu berücksichtigen, dass Platz für Zu- und Abluftrohre vorhanden sein muss. Rohrdurchmesser liegen typischerweise zwischen DN 80 und DN 160, je nach Luftvolumenstrom und Rohrleitungslänge. Die Rohre werden üblicherweise unter der Fußbodenkonstruktion oder unter einer in Teilbereichen abgehängten Decke verlegt. Dadurch verliert der Raum (bspw. Flure, Bad, WC) etwa 15-20 cm an Raumhöhe. Als Variante kommt auch eine offene oder kaschierte Führung der Rohrleitungen im Raum zum Einsatz. Auch bei Einsatz einer Solaranlage (mit 6-8 m² Kollektorfläche) reicht ein 400-600 l Pufferspeicher aus. Daher ist nur ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.4.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Pelletskaminofen
 - Erneuerbare Energie
 - Heimischer, krisensicherer Energieträger
 - Ungefährlicher Brennstoff
 - Hohe Leistung im Brauchwarmwasserbetrieb, schnell regelbar
 - Außer Abgasverlusten keine Systemverluste, da innerhalb der gedämmten Hülle
 - Notheizung bei nicht arbeitender Lüftungsanlage
 - Gemütliche Atmosphäre, „Warmplatz“ in der Wohnung
- Luftheizung
 - Permanent frische Luft in allen Räumen
 - Energiesparen durch Wärmerückgewinnung
 - Keine kalte Zugluft durch Fensterlüften
 - kein Arbeitsaufwand bzw. keine Notwendigkeit für regelmäßiges Fensterlüften
 - Gefilterte Luft für Pollenallergiker
 - Lärmschutz durch geschlossene Fenster
 - Außer dem Pelletsgerät selbst keine Heizkörper oder Heizflächen notwendig
 - Über einen Erdreichwärmetauscher ist im Sommer ein Luftwechsel möglich, der keinen zusätzlichen Energieeintrag ins Gebäude bringt.

Nachteile:

- Pelletskaminofen

- Für den Pelletskaminofen ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben)
- Platzbedarf durch Rauchfang, Brennstofflager
- Nachfüllen der Pellets händisch (Staub) oder automatisch (Laut)
- Geräusch der Schnecke ist akustisch wahrnehmbar
- Warmwasserbereitung nur bei gleichzeitigem Aufheizen des Aufstellraumes des Pelletskaminofens (Einsatz einer Solaranlage ist daher für den Sommer sinnvoll, alternativ kann ein Elektro-Heizstab eingesetzt werden)
- Luftheizung
 - Kleine Heizleistung (max. 10-14 W/m² für Transmission und Infiltration) bei Luftwechselraten von 0,4 - 0,5 h⁻¹ und begrenzter Einblasetemperatur. Daher reagiert das Luftheizungssystem in diesem Anwendungsfall sehr träge in der Wiederaufheizung aber schnell in der Abkühlung.
 - Luftkanäle und Lüftungsgerät haben für Wohnungen rel. große Dimensionen
 - Lärmbelästigung bei unsachgemäßer Planung bzw. Ausführung (durch zu enge Rohrquerschnitte, schlechte Dämmung des Zentralgeräts, falsches Design der Luftauslässe, etc)
 - Zumeist gleiche Temperatur in allen Räumen (kann auch positiv gesehen werden)
 - Fensteröffnung im Winter kann zu Problemen bei der Beheizung der nicht direkt durch das Pelletsgerät beheizten Räume führen (Wärmerückgewinnung wird umgangen)
 - Eingeschränkte Heizung bei abgeschalteter Lüftungsanlage (nur im Aufstellraum des Pelletskaminofens)
 - Dichte Gebäudehülle erforderlich damit Abluftwärmerückgewinnung funktioniert.
 - Funktioniert in den luftbeheizten Räumen nur zufrieden stellend bei einwandfreier Planung des Gesamtgebäudes; Fehler und dadurch zu hohe Luftwechselraten etc. wirken sich negativ auf die Wohnqualität aus

3.4.3 Einsatzbereiche

Bei einer den Räumen mit reiner Luftheizung ist der max. Leistungseintrag bei einer Luftwechselrate von 0,4 - 0,5 h⁻¹ etwa 10-14 W/m² Netto-Wohnfläche. In die Räume, welche direkt über den Pellets-Kaminofen und die Luftheizung beheizt werden liegen die Werte höher.

Der Pelletskaminofen kann nur in der Heizsaison zur Brauchwarmwasserbereitung verwendet werden, sonst wird der Aufstellort (zumeist Wohnraum) mitbeheizt. Deshalb ist eine Solaranlage für die Brauchwarmwasserbereitung im Sommer notwendig, wenn der Brauchwarmwasserbedarf nicht über den E-Heizstab gedeckt werden soll.

Ein Pufferspeicher ist unbedingt notwendig, um das Takten zu minimieren. Biomassekessel haben beim Takten (Anfahren, Laufzeit, Abschalten, Gluterhaltung) 3 – 20 mal höhere CO- und bis zu 26 mal höhere CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Baumbach, et al., 1995). Verringertes Takten kann die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Die Verbrennungsluft sollte nicht aus dem Wohnraum sondern extern zugeführt werden, z.B. durch ein doppelwandiges Abgasrohr (innen Abgas, außen Frischluft, Achtung: Kondensation im Abgasrohr durch Kesseltemperaturanhebung im Wasserkreis vermeiden).

Pelletskaminöfen werden bei Mehrfamilienhäusern typischerweise in Reihenhäusern und weniger im Geschoßwohnbau eingesetzt.

3.5 Pelletskaminofen – Wasserheizung – dezentral

3.5.1 Systembeschreibung

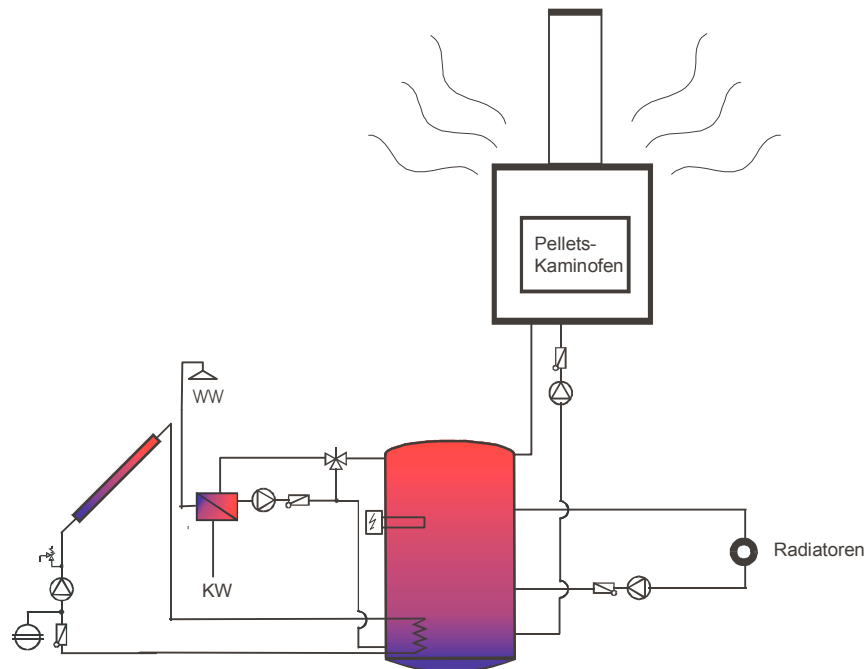


Abbildung 16: System 5 – Pelletskaminofen mit Wasserheizung - dezentral (Kollektorfeld empfohlen)

Bei diesem dezentralen Heizsystem bildet ein Pelletskaminofen im Wohnbereich das Kernstück. Der Pelletskaminofen gibt typischerweise etwa 20-30% seiner Leistung an die Luft im Aufstellraum ab. Es sollte jedenfalls weniger als 30% der Leistung über die Luft abgegeben werden, um Überhitzung im Aufstellraum zu vermeiden. Der Rest wird über einen Wärmetauscher ausgekoppelt und in einem Pufferspeicher gespeichert. Aus diesem Pufferspeicher wird dann die Brauchwarmwasserbereitung und auch der Heizkreis mit Radiatoren oder auch Fußboden- oder Wandheizung mit Wärme versorgt. Es gibt verschiedene Verfahren, aus einem Pufferspeicher Brauchwarmwasser zu bereiten. Beispielhaft ist in dieser Zeichnung ein externer Plattenwärmetauscher dargestellt. Die primärseitige Pumpe wird drehzahl-geregelt, so dass das gezapfte Wasser die gewünschte Temperatur erreicht. Andere Alternativen zur Brauchwarmwasserbereitung sind in Abschnitt 3.3 und 3.4 beschrieben. Der Speicher kann zusätzlich über eine Solaranlage bzw. mit einer Elektroheizpatrone beheizt werden.

Dieses System wird dezentral verwendet. Das heißt, jede Wohneinheit hat einen Pufferspeicher und einen Pelletskaminofen im Wohnraum. Idealerweise befindet sich der Pufferspeicher mit Übergabestation in einem direkt angrenzenden Abstellraum. Der Kaminofen benötigt etwa 0,5 m² Stellfläche, ein Pufferspeicher von 400-600 l benötigt noch einmal etwa 0,8 m². Zusätzlich benötigen die Radiatoren in den einzelnen Räumen (möglichst unter Fenstern) Platz. Die Pellets können entweder sackweise mit der Hand nachgefüllt werden oder über eine Fördereinrichtung automatisch. Für die Aufbewahrung der Pellets muss ebenfalls zusätzlicher Raum vorgesehen werden. Bei Handbefüllung reicht 1,5 m³ für eine Heizsaison für ein Niedrigenergiehaus ohne Wärmerückgewinnung aus. Auch bei Einsatz einer Solaranlage (mit 6-8 m² Kollektorfläche) reicht ein 400-600 l Pufferspeicher aus. Daher ist nur ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.5.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Pelletskaminofen
 - Erneuerbare Energie
 - Heimischer, krisensicherer Energieträger
 - Ungefährlicher Brennstoff
 - Hohe Leistung, schnell regelbar
 - Außer Abgasverlusten keine Systemverluste, da innerhalb der gedämmten Hülle
 - Notheizung bei nicht arbeitender Lüftungsanlage
 - Gemütliche Atmosphäre, „Warmplatz“ in der Wohnung
- Wasserheizung mit Radiatoren
 - Flexible schnelle Regelmöglichkeit mit Raumthermostaten
 - Einzelraumregelung möglich
 - Radiatoren als „Warmplatz“ in der Wohnung
 - Hohe Wiederaufheizleistung (abhängig von Radiatorfläche und maximaler Vorlauftemperatur)
- Wandheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Gute Raumtemperaturverteilung
 - Schnell regelbar (je nach Wandaufbau)
- Fußbodenheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Große Speicherkapazität (Dämpfung der Raumtemperaturschwankung)
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Heizfläche Boden ist meist frei
 - Selbstregelungseffekt bei Sonnenstrahlung bei richtiger Dimensionierung (Oberflächentemperatur max. 2 K über Raumtemperatur)
 - Gute Raumtemperaturverteilung

Nachteile:

- Pelletskaminofen
 - Braucht Puffer, um Takten niedrig zu halten
 - Für den Pelletskaminofen ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).
 - Nachfüllen der Pellets händisch (Staub) oder automatisch (Laut)
 - Geräusch der Schnecke ist akustisch wahrnehmbar
 - Warmwasserbereitung nur bei gleichzeitigem Aufheizen des Aufstellraumes des Pelletskaminofens (Einsatz einer Solaranlage ist sinnvoll, alternativ kann ein Elektro-Heizstab eingesetzt werden)
- Wasserheizung mit Radiatoren
 - Höhere Luft- und Heizflächentemperaturen, Oberflächentemperatur von Wand und Boden unter Lufttemperatur
 - Höher Konvektionsanteil als Strahlung

- Platzbedarf in jedem Raum
- Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Lärmbelästigung bei falscher Rohrdimensionierung
- Durch Konvektionsströmung kann Staub aufgewirbelt werden.
- Wandheizung
 - Heizwand muss im wesentlichen frei bleiben
 - Befestigungen an einer Heizwand nur mit Vorsicht (mit Thermopapier kann die Lage der Rohre ermittelt werden)
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Fußbodenheizung
 - Große Speicherkapazität (Wiederaufheizen)
 - Je nach Auslegung eher träges System
 - Eingeschränkte Auswahl von Bodenbelägen
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)

3.5.3 Einsatzbereiche

Der Pelletskaminofen kann nur in der Heizsaison zur Brauchwarmwasserbereitung verwendet werden, sonst wird der Aufstellort (zumeist Wohnraum) mitbeheizt. Deshalb ist eine Solaranlage für die Brauchwarmwasserbereitung im Sommer notwendig, wenn der Brauchwarmwasserbedarf nicht über den E-Heizstab gedeckt werden soll.

Ein Pufferspeicher ist unbedingt notwendig, um das Takten zu minimieren. Biomassekessel haben beim Takten (Anfahren, Laufzeit, Abschalten, Gluterhaltung) 3 – 20 mal höhere CO- und bis zu 26 mal höhere CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Baumbach, et al., 1995). Verringertes Takten kann die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Die Verbrennungsluft sollte nicht aus dem Wohnraum sondern extern zugeführt werden, z.B. durch ein doppelwandiges Abgasrohr (innen Abgas, außen Frischluft, Achtung: Kondensation im Abgasrohr durch Kesseltemperaturerhebung im Wasserkreis vermeiden).

Pelletskaminöfen werden bei Mehrfamilienhäusern typischerweise in Reihenhäusern und weniger im Geschoßwohnbau eingesetzt.

3.6 Sole-Wärmepumpe – Wasserheizsystem – zentral (mit Speicherbeladung)

3.6.1 Systembeschreibung

In diesem System gibt es eine zentrale Sole-Wärmepumpe, die Niedertemperatur-Energie über einen Solekreis aus dem Erdreich entnimmt und, auf nutzbares Temperaturniveau angehoben, in ein Zweileiterteilverteilsystem einspeist. Der Kompressor der Sole-Wärmepumpe verbraucht dabei elektrische Energie. Für den Solekreis gibt es verschiedene Ausführungsvarianten:

1. Erdsonden (Bohrloch): Die Wärme wird dem Erdreich hier über ein oder mehrere Bohrungen bis zu 100 m Tiefe mit 5 bis 10 m Abstand entzogen. Nach VDI 4640 , Blatt 2, (2001) kann für Erdwärmesonden in kleineren Anlagen zwischen 20 W/m (schlechter Untergrund, trockene Lockergesteine) und 84 W/m (Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit) Wärme entzogen werden.
2. Grundwasser: zwei Brunnen müssen gegraben werden (einer, um das Grundwasser zu fördern, und einer, um das abgekühlte Grundwasser wieder dem Grundwasserkreislauf zuzuführen). Bei einer Leistungszahl von 4 und einer Abkühlung des Grundwassers um

- 3 K müssen etwa 220 l Grundwasser pro Stunde je kW Heizleistung der Wärmepumpe gefördert werden (Vaillant 2000).
3. Flächenkollektor: Die erforderliche Fläche ist einerseits vom Wärmebedarf des Wohnhauses abhängig, andererseits aber auch von der Zusammensetzung und Feuchtigkeit des Erdreichs. Nach VDI 4640, Blatt 2, (2001) kann dem Boden durchschnittlich zwischen 10 -15 W/m² (trockener sandiger Boden) und 30 – 40 W/m² (wassergesättigter Sand/Kies) Wärme entzogen werden. Die Wärmeentnahme erfolgt über kunststoffummantelte Kupferrohre oder Kunststoffrohre aus einer Tiefe von 1 bis 1,5 Meter, der Rohrabstand beträgt ca. 80 cm.
 4. Grabenkollektor: Die erforderliche Grabenlänge ergibt sich aus der berechneten Heizlast des Gebäudes und hängt ebenfalls von der Zusammensetzung und Feuchtigkeit des Bodens ab. Als Richtwert kann 2,5 m pro kW Heizlast verwendet werden. Der Verlegeabstand der Rohre beträgt hier nur 5-10 cm. Diese Methode ist platzsparend, sollte aber vermieden werden, da z.B. Flächenkollektoren durch die größere Speichermasse dem Erdreich wesentlich mehr Energie entziehen können (Vaillant, 2000).

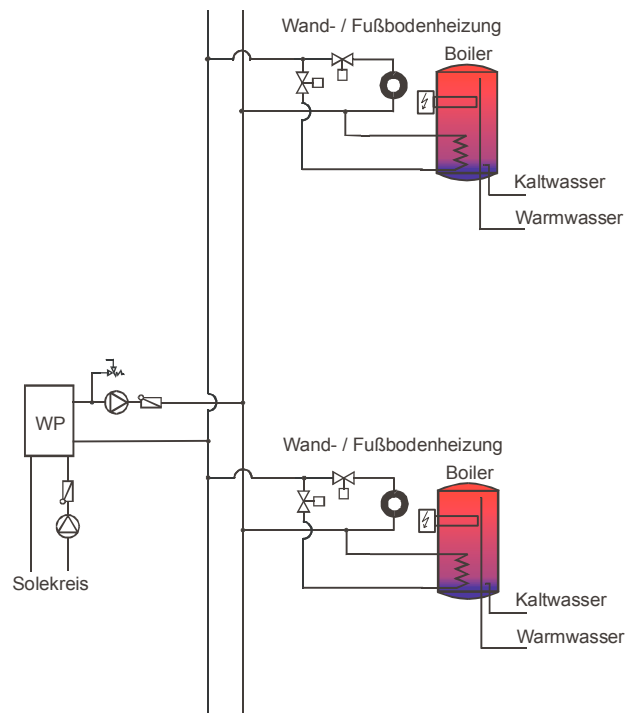


Abbildung 17: System 6: Solewärmepumpe -zentral mit Zweileiternetz

Ein Zweileiterteilsystem verbindet die Wärmepumpe mit den einzelnen Wohneinheiten und versorgt die Wand- bzw. Fußbodenheizungen mit Wärme. Der Fußboden bzw. die Wandheizung muss hierfür mit thermischen Massen ausgeführt sein, um eine Speicherfunktion zu gewährleisten, so dass die Wärmepumpe nicht häufig taktet und die Räume, wenn die Wärmepumpe die Brauchwarmwasserspeicher nachlädt, nicht auskühlen. In jeder Wohneinheit gibt es außerdem einen eigenen Brauchwarmwasserspeicher. In bestimmten Zeitfenstern (z.B. nachts) wird dann das Zweileiterteilsystem nicht mehr für die Heizkreise verwendet, sondern um die dezentralen Brauchwarmwasserspeicher zu beladen. Aus diesen Brauchwarmwasserspeichern kann dann jederzeit Brauchwarmwasser entnommen werden. Zur Nachheizung der Brauchwarmwasserspeicher gibt es außerdem jeweils einen Elektroheizstab als Spitzenabdeckung bzw. falls außerhalb der Ladezeiten eine größere Menge Brauchwarmwasser gebraucht wird.

Für eine Sole-Wärmepumpe mit bis zu 50 kW Heizleistung reicht 1 m² Platz in einem zentralen Technikraum. Zusätzlich wird im Garten je nach Ausführung entsprechend Platz für den Solekreis benötigt. In jeder Wohneinheit braucht man außerdem etwa 0,5 m² Standfläche für den Brauchwarmwasserspeicher bzw. Wandfläche bei einem Hängespeicher. Eine Fußbodenheizung hat keinen zusätzlichen Platzbedarf, bei einer Wandflächenheizung muss berücksichtigt werden, dass die Heizwände nicht komplett mit Möbeln zugestellt werden dürfen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.6.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Sole-Wärmepumpe
 - Geringer Platzbedarf
 - Einfachste Energieversorgung durch Strom
 - Kein Rauchfang nötig
 - Kein Brennstofflager
 - Kein Staub, Geruch,...
- Zweileiterteilsystem mit Brauchwarmwasserspeicher
 - Durch Beladung der Speicher keine zusätzliche Zirkulationsleitung nötig bzw. niedrige VL-Temperatur bei Heizbetrieb möglich (hohe Leistungszahl der Wärmepumpe)
 - Kleine Verteilverluste im Vergleich zu 4-Leiternetz wegen Beladung in Zeitfenstern
 - Brauchwarmwasserspeicherverluste sind in der Heizperiode nicht verloren sondern dienen zur Raumheizung (besonders positiv bei Plazierung im Bad)
 - Warmwasserversorgung ist durch Elektroheizpatrone unabhängig vom zentralen Heizungssystem (z.B. bei Wartungsarbeiten)
- Wandheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Gute Raumtemperaturverteilung
 - Schnell regelbar (je nach Wandaufbau)
- Fußbodenheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Große Speicherkapazität (Takten der Wärmepumpe wird minimiert, Dämpfung der Raumtemperaturschwankung)
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Heizfläche Boden ist meist frei
 - Selbstregelungseffekt bei Sonnenstrahlung bei richtiger Dimensionierung (Oberflächentemperatur max. 2 K über Raumtemperatur)
 - Gute Raumtemperaturverteilung

Nachteile:

- Sole-Wärmepumpe
 - Warmwasserbereitung auf über 50°C reduziert die Leistungszahl stark
 - Treibhausgasproblematik (bei Einsatz von Fluor-Kohlenwasserstoffe als Kältemittel)

- Braucht Puffer (=verstärkter Fußboden, Speichermasse des Gebäudes), um Takten niedrig zu halten
- Zweileitersystem
 - Erhöhte Verteilverluste durch lange Leitungen im Vergleich zu dezentralen Systemen (wenn im unbeheizten Bereich)
 - Nachheizung der Brauchwarmwasserspeicher nur in bestimmten Zeitfenstern sinnvoll möglich
 - Warmwassermenge durch Brauchwarmwasserspeichergröße begrenzt
- Wandheizung
 - Heizwand muss im wesentlichen frei bleiben
 - Befestigungen an einer Heizwand nur mit Vorsicht (mit Thermopapier kann die Lage der Rohre ermittelt werden)
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
 - Für diesen Fall ohne Heizungspuffer ähnlich träges System wie Fußbodenheizung da die Wand eine thermische Speicherkapazität aufweisen muss, um ein Takten der Wärmepumpe zu verringern (Wiederaufheizen)
- Fußbodenheizung
 - Große Speicherkapazität (Wiederaufheizen)
 - Je nach Auslegung eher träges System
 - Eingeschränkte Auswahl von Bodenbelägen
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)

3.6.3 Einsatzbereiche

Während der Beladung der Brauchwarmwasserspeicher ist kein Heizbetrieb möglich. Die Wärmepumpe, Speichergröße und die Zeitfenster müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass die Beladung der dezentralen Speicher innerhalb der Zeitfenster möglich ist. Die Verteilleitungen zwischen den einzelnen Abnehmern sollten nicht zu lang sein, um die Verteilverluste gering zu halten.

Die Leistungszahl einer Sole-Wärmepumpe liegt bei 0°C Soletemperatur und 35°C Wassertemperatur bei 4,3-4,7, bei 50°C Wassertemperatur bei 2,8-3,1 (Vaillant 2001). Im Brauchwarmwasserbetrieb liegt die Vorlauftemperatur bei 60°C, das heißt, dass die Leistungszahl dann noch niedriger liegen wird. Typische Jahresarbeitszahlen (Leistungszahl über ein Jahr gemittelt, einschließlich Verluste durch Anfahrvorgänge etc.) liegen bei 3,5 – 4.

Diese Systeme können bei Mehrfamilienhäusern in Reihenhäusern und im Geschößwohnbau eingesetzt werden.

3.7 Pellets- oder Gaskessel zentral – Luftheizsystem dezentral

3.7.1 Systembeschreibung

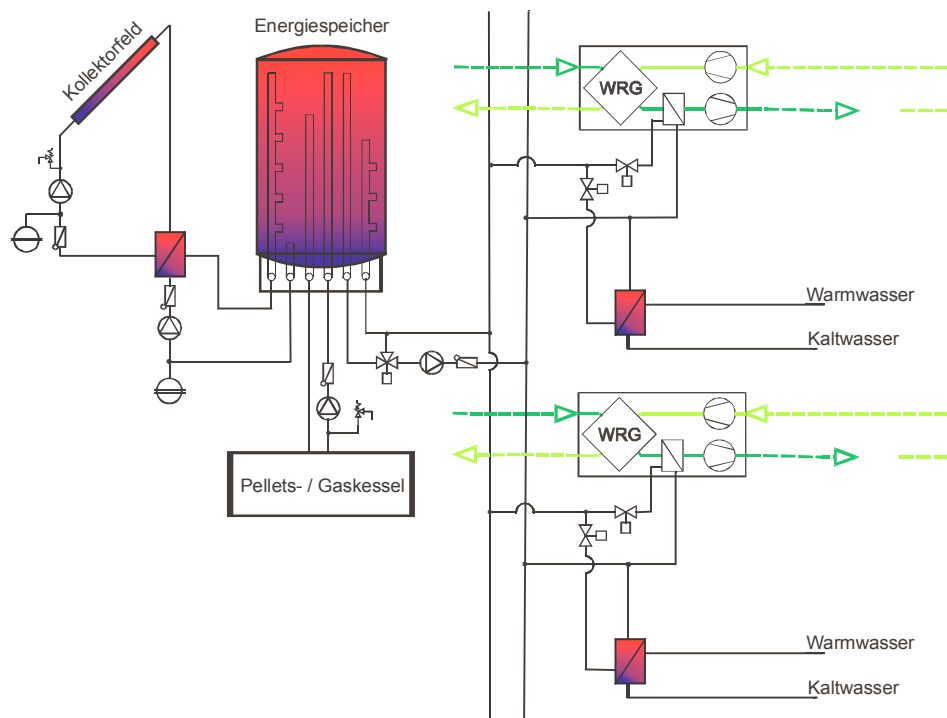


Abbildung 18: System 7 – Pellets- oder Gaskessel -zentral mit Zweileiternetz und Luftheizung – dezentral (Kollektorfeld optional)

Dieses System besteht aus einem zentralen Pellets- oder Gaskessel, der einen Pufferspeicher lädt. Jede Wohneinheit verfügt außerdem über ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung. Die Außenluft kann bei Reihenhäusern über einen Erdreichwärmetauscher angesaugt und vorgewärmt werden. Dadurch wird ein Abtauen des Luft/Luft-Wärmetauschers der Wärmerückgewinnung vermieden. Im Geschosswohnbau lässt sich ein Erdreichwärmetauscher nur schwer einsetzen, da es zu langen Rohrleitungen bis in die Wohnungen kommt. Dann wird mit einem Luft/Luft-Wärmetauscher die Wärme der Abluft an die Zuluft übertragen. Zur Nachheizung gibt es dann ein Wasser/Luft-Heizregister in der Zuluft, das aus dem Pufferspeicher über ein Zweileiterteilsystem gespeist wird. Außerdem gibt es in jeder Wohneinheit eine Frischwasserstation, wo im Durchlaufverfahren aus dem Zweileiterteilsystem Brauchwarmwasser bereitet wird. An den Frischwasserstationen kann jederzeit Brauchwarmwasser gezapft werden, ohne durch die Größe des Brauchwarmwasserspeichers limitiert zu sein. Dafür muss das Verteilnetz auf mindestens 60-65°C gehalten werden.

An den Pufferspeicher kann optional eine Solaranlage angeschlossen werden.

Für ein Gebäude mit 12 Wohneinheiten reicht ein zentraler Pelletskessel bis etwa 40 kW Heizleistung, der einen Platzbedarf von ca. 1,5 m² hat. Dazu kommt das Pelletslager, das für ein Passivhaus mit Wärmerückgewinnung inklusive Fördereinrichtungen etwa 3 m³ bei zweimaliger Beladung pro Jahr pro Wohneinheit braucht. Bei Einsatz eines Gaskessels reicht 1 m² aus. Der Pufferspeicher hat für 12 Wohneinheiten ohne Solaranlage ein Volumen von etwa 1 m³ mit etwa 1 m² Platzbedarf.

In jeder Wohneinheit gibt es außerdem das Lüftungsgerät mit etwa 0,5 m² Platzbedarf und die Übergabestation mit etwa 0,5 m² Wandfläche. Zusätzlich ist schon bei der Bauplanung zu berücksichtigen, dass Platz für Zu- und Abluftrohre vorhanden sein muss. Rohrdurchmesser liegen für Wohnungen und Einfamilienhäuser aus Geräuschgründen typischerweise zwischen DN 80 und DN 160, je nach Luftvolumenstrom und Rohrleitungslänge. Die Rohre werden üblicherweise unter der Fußbodenkonstruktion oder unter einer in Teilbereichen abgehängten Decke verlegt. Dadurch verliert der Raum (bspw. Flure, Bad, WC) etwa 15-20 cm an Raumhöhe. Als Variante kommt auch eine offene oder kaschierte Führung der Rohrleitungen im Raum zum Einsatz.

Bei Einsatz einer Solaranlage (mit 3-4 m² Kollektorfläche pro Wohneinheit) vergrößert sich der Pufferspeicher um 150 – 200 Liter/Wohneinheit. Daher ist nur ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.7.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Pelletskessel
 - Erneuerbare Energie
 - Heimischer, krisensicherer Energieträger
 - Ungefährlicher Brennstoff
 - Hohe Leistung bei der Brauchwarmwasserbereitung, schnell regelbar
- Gaskessel
 - Viel Erfahrung bei Installateuren mit dieser Technik
 - Hohe Leistung bei der Brauchwarmwasserbereitung, schnell regelbar
- Zweileiterteilsystem mit Frischwasserstationen
 - Hygienische Brauchwarmwasserbereitung im Direktdurchlauf
 - Warmwassermenge nicht durch Brauchwarmwasserspeichervolumen begrenzt
- Luftheizsystem
 - Permanent frische Luft in allen Räumen
 - Energiesparen durch Wärmerückgewinnung
 - Keine kalte Zugluft durch Fensterlüften
 - Kein Arbeitsaufwand bzw. keine Notwendigkeit für regelmäßiges Fensterlüften
 - Gefilterte Luft für Pollenallergiker
 - Lärmschutz durch geschlossene Fenster
 - Keine Heizkörper oder Heizflächen notwendig
 - Über einen Erdreichwärmetauscher ist im Sommer ein Luftwechsel möglich, der keinen zusätzlichen Energieeintrag ins Gebäude bringt.

Nachteile:

- Pelletskessel
 - Für den Pelletskessel ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).
 - Platzbedarf durch Kamin, Brennstofflager Das Brennstofflager kann mittlerweile auch mit Außenlagerung (z.B. PE-Erdtanks) also raumschonend realisiert werden.
- Gaskessel
 - Für den Gaskessel ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren ((in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).

- Fossiler Energieträger
- Kamin
- Explosionsgefahr
- Importabhängig
- Anschluss an Gasleitung notwendig oder Gastank
- Spezielle Anforderungen im Passivhausbereich nur bei wenigen Installateuren bekannt (siehe Abschnitt 3.2.2)
- Zweileitersystem mit Frischwasserstationen
 - Erhöhte Verteilverluste durch lange Leitungen im Vergleich zu dezentralen Systemen
 - Erhöhte Verteilverluste durch hohes Temperaturniveau im Verteilnetz, Vorlauf mindestens 60°C, Rücklauf 50-55°C im Heizbetrieb und 40-45°C im Brauchwarmwasserbetrieb
- Luftheizsystem
 - Kleine Heizleistung (max. 10-14 W/m² für Transmission und Infiltration) bei Luftwechselraten von 0,4 - 0,5 h⁻¹ und begrenzter Einblasetemperatur. Daher reagiert das Luftheizungssystem in diesem Anwendungsfall sehr träge in der Wiederaufheizung aber schnell in der Abkühlung.
 - Luftkanäle und Lüftungsgerät haben für Wohnungen rel. große Dimensionen
 - Lärmbelästigung bei unsachgemäßer Planung bzw. Ausführung (durch zu enge Rohrquerschnitte, schlechte Dämmung des Zentralgeräts, falsches Design der Luftauslässe, etc)
 - Zumeist gleiche Temperatur in allen Räumen (kann auch positiv gesehen werden)
 - Fensteröffnung im Winter kann zu Problemen bei der Beheizung des Gebäudes führen (Wärmerückgewinnung wird umgangen)
 - Keine Heizung bei abgeschalteter Lüftungsanlage
 - Dichte Gebäudehülle erforderlich damit Abluftwärmerückgewinnung funktioniert.
 - Funktioniert nur zufrieden stellend bei einwandfreier Planung des Gesamtgebäudes; Fehler und dadurch zu hohe Luftwechselraten etc. wirken sich negativ auf die Wohnqualität aus

3.7.3 Einsatzbereiche

Ein Pufferspeicher ist unbedingt notwendig, um das Takten zu minimieren. Biomassekessel haben beim Takten (Anfahren, Laufzeit, Abschalten, Gluterhaltung) 3 – 20 mal höhere CO- und bis zu 26 mal höhere CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Baumbach, et al., 1995). Beim Gaskessel sind die Emissionen etwa 6-10-mal höher (Pfeiffer, 1999). Verringertes Takten kann die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Die Verteilleitungen zwischen den einzelnen Abnehmern sollten nicht zu lang sein, um die Verteilverluste gering zu halten.

Durch die Luftheizung ist die maximale Heizleistung auf etwa 10-14 W/m² Netto-Wohnfläche bei einer Luftwechselrate von 0,4 - 0,5 h⁻¹ begrenzt.

Das System ist bei Mehrfamilienhäusern sowohl im Reihenhaus- als auch im Geschoßwohnbaubereich (hier allerdings eher ohne Erdreichwärmetauscher für die Luftvorwärmung) einsetzbar.

3.8 Pellets- oder Gaskessel – Wasserheizsystem – zentral

3.8.1 Systembeschreibung

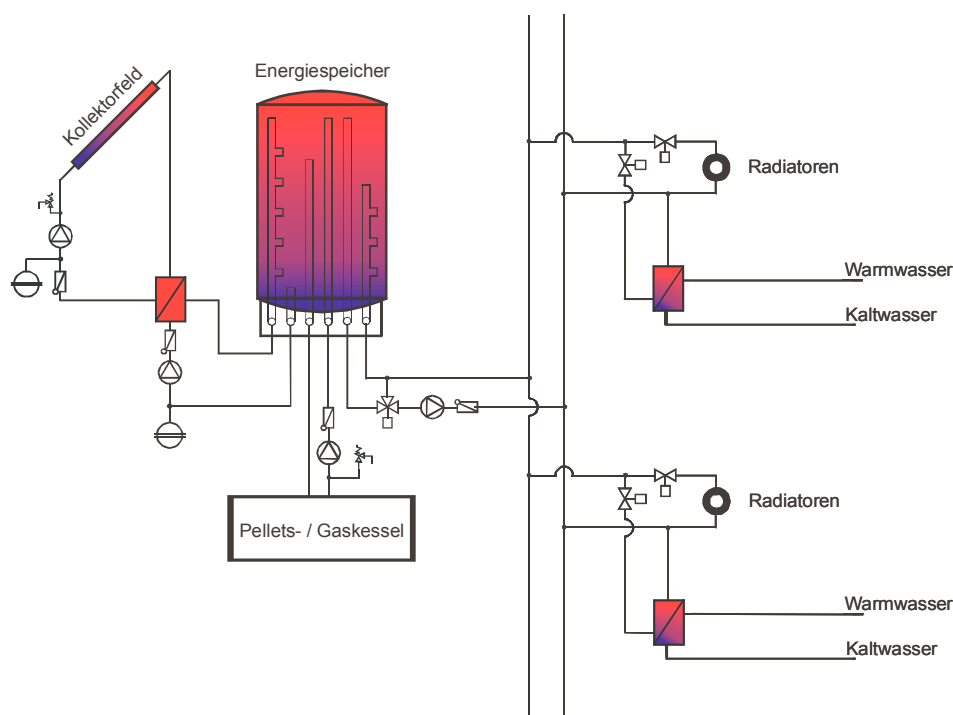


Abbildung 19: System 8 – Pellets- oder Gaskessel mit Zweileiternetz und Wasserheizung - zentral (Kollektorfeld optional)

Dieses System besteht aus einem zentralen Pellets- oder Gaskessel, der einen Pufferspeicher lädt. Von diesem Pufferspeicher werden über ein Zweileiternetz sowohl die Radiatoren (bzw. Wand- oder Fußbodenheizungen) als auch die Frischwasserstationen in den Wohneinheiten mit Wärme versorgt. An den Frischwasserstationen in jeder Wohneinheit kann jederzeit Brauchwarmwasser gezapft werden, ohne durch die Größe eines Brauchwarmwasserspeichers limitiert zu sein. Dafür muss das Verteilnetz auf mindestens 60-65°C gehalten werden.

Für ein Gebäude mit 12 Wohneinheiten reicht ein zentraler Pelletskessel bis etwa 40 kW Heizleistung, der einen Platzbedarf von ca. 1,5 m² hat. Dazu kommt das Pelletslager, das für ein Passivhaus mit Wärmerückgewinnung inklusive Fördereinrichtungen etwa 3 m³ bei zweimaliger Beladung pro Jahr pro Wohneinheit braucht. Bei Einsatz eines Gaskessels reicht 1 m² aus. Der Pufferspeicher hat bei einem Volumen von etwa 1 m³ etwa 1 m² Platzbedarf.

In den einzelnen Wohneinheiten gibt es nur eine Übergabestation, die etwa 0,5 m² Platz an der Wand benötigt. Außerdem muss in jedem Raum Platz für Radiatoren (möglichst unter Fenstern) vorgesehen werden.

Bei Einsatz einer Solaranlage (mit 3-4 m² Kollektorfläche pro Wohneinheit) vergrößert sich der Pufferspeicher um 150 – 200 Liter/Wohneinheit. Daher ist ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.8.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Pelletskessel
 - Erneuerbare Energie
 - Heimischer, krisensicherer Energieträger
 - Ungefährlicher Brennstoff
 - Hohe Leistung, schnell regelbar
- Gaskessel
 - Viel Erfahrung bei Installateuren mit dieser Technik
 - Hohe Leistung, schnell regelbar
- Zweileiterteilsystem mit Frischwasserstationen
 - Hygienische Brauchwarmwasserbereitung im Direktdurchlauf
 - Warmwassermenge nicht durch Brauchwarmwasserspeichervolumen begrenzt
 - Rücklauftemperatur niedriger als bei Luftheizsystem (ca. 30-40°C), wenn gut einreguliert, daher weniger Verluste
- Wasserheizsystem mit Radiatoren
 - Flexible schnelle Regelmöglichkeit mit Raumthermostaten
 - Einzelraumregelung möglich
 - Radiatoren als „Warmplatz“ in der Wohnung
 - Hohe Wiederaufheizleistung (abhängig von Radiatorfläche und möglicher Vorlauftemperatur)
- Wandheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Gute Raumtemperaturverteilung
 - Schnell regelbar (je nach Wandaufbau)
- Fußbodenheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Große Speicherkapazität (Takten der Wärmepumpe wird minimiert, Dämpfung der Raumtemperaturschwankung)
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Heizfläche Boden ist meist frei
 - Selbstregelungseffekt bei Sonnenstrahlung bei richtiger Dimensionierung (Oberflächentemperatur max. 2 K über Raumtemperatur)
 - Gute Raumtemperaturverteilung

Nachteile:

- Pelletskessel
 - Für den Pelletskessel ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).
 - Kamin
 - Platzbedarf durch Kamin, Brennstofflager Das Brennstofflager kann mittlerweile auch mit Außenlagerung (z.B. PE-Erdtanks) also raumschonend realisiert werden.

- Gaskessel
 - Für den Gaskessel ist ein Lastausgleichsspeicher notwendig, um das Takten und damit die Emissionen zu minimieren (in der vorliegenden Schaltung ist dies durch den Pufferspeicher gegeben).
 - Fossiler Energieträger
 - Kamin
 - Explosionsgefahr
 - Importabhängig
 - Anschluss an Gasleitung notwendig oder Gastank
 - Spezielle Anforderungen im Passivhausbereich nur bei wenigen Installateuren bekannt (siehe Abschnitt 3.2.2)
- Zweileiterteilsystem mit Frischwasserstationen
 - Erhöhte Verteilverluste durch lange Leitungen im Vergleich mit dezentralen Systemen
 - Erhöhte Verteilverluste durch hohes Temperaturniveau im Verteilnetz, Vorlauf mindestens 60°C
- Wasserheizsystem mit Radiatoren
 - Höhere Luft- und Heizflächentemperaturen, Oberflächentemperatur von Wand und Boden unter Lufttemperatur
 - Höherer Konvektionsanteil als Strahlung
 - Platzbedarf in jedem Raum
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
 - Lärmbelästigung bei falscher Rohrdimensionierung
 - Durch Konvektionsströmung kann Staub aufgewirbelt werden..
- Wandheizung
 - Heizwand muss im wesentlichen frei bleiben
 - Befestigungen an einer Heizwand nur mit Vorsicht (mit Thermopapier kann die Lage der Rohre ermittelt werden)
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Fußbodenheizung
 - Große Speicherkapazität (Wiederaufheizen)
 - Je nach Auslegung eher träges System
 - Eingeschränkte Auswahl von Bodenbelägen
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
 -

3.8.3 Einsatzbereiche

Ein Pufferspeicher ist unbedingt notwendig, um das Takten zu minimieren. Biomassekessel haben beim Takten (Anfahren, Laufzeit, Abschalten, Gluterhaltung) 3 – 20 mal höhere CO- und bis zu 26 mal höhere CH-Emissionen als im kontinuierlichen Betrieb (Baumbach, et al., 1995). Beim Gaskessel sind die Emissionen etwa 6-10-mal höher (Pfeiffer, 1999). Verringertes Takten kann die Lebensdauer der Zündeinrichtung verlängern.

Die Leitungslänge zwischen den Abnehmern sollte nicht zu groß sein, um die Verteilverluste gering zu halten.

Das System ist bei Mehrfamilienhäusern sowohl im Reihenhaus- als auch im Geschosswohnbau einsetzbar.

3.9 Kachelofen – Wasserheizung – dezentral

3.9.1 Systembeschreibung

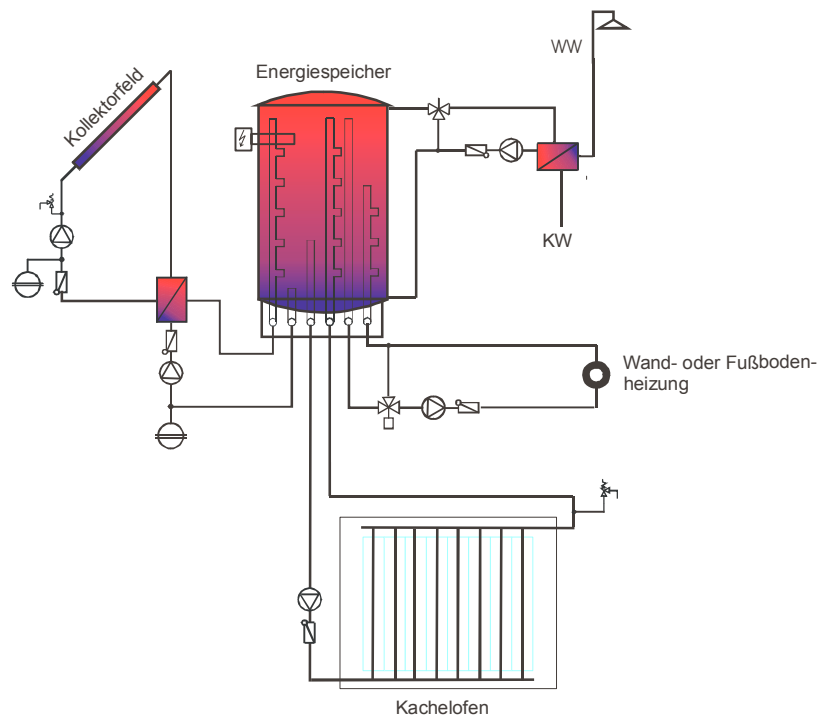


Abbildung 20: System 9 – Kachelofen als Ganzhausheizung – dezentral (Kollektorfeld empfohlen)

Zentraler Bestandteil dieses Systems ist ein Kachelofen, der als Ganzhausheizung ausgeführt ist. In jeder Wohneinheit steht ein Kachelofen im Wohnraum, der über Strahlung den Wohnraum auch beheizt. Der Kachelofen hat einen Wärmetauscher integriert, über den Wärme an einen Pufferspeicher abgeführt werden kann. Der Temperaturverlauf und die Energieabgabe beim Kachelofen ist während des Betriebes nicht konstant. Die Temperatur steigt nach dem Abbrand sehr rasch (1 bis 2 Stunden) auf ein Maximum an und sinkt nach überschreiten der Maximaltemperatur (abhängig von der Brennstoffmenge) dann kontinuierlich (6 bis 12 Stunden) ab. Um die Temperatur bzw. Energie aus dem Kachelofen maximal zu nutzen, wird er über eine Schichtladeeinheit in den Pufferspeicher eingebunden. Es können bis zu 50% der Energie an den Pufferspeicher abgeführt werden.

Zusätzlich ist an den Pufferspeicher eine Solaranlage angeschlossen, die die Brauchwarmwasserbereitung im Sommer sicherstellt, da der Kachelofen nicht betrieben werden kann, ohne die Wohnung zu heizen. Für die Tage, an denen nicht genug Solarenergie zur Verfügung steht, ist in den Speicher außerdem eine Elektroheizpatrone integriert. In der Übergangszeit, wenn der Pufferspeicher durch die Solaranlage beladen ist, kann auch der Kachelofen als Wärmeabgabesystem genutzt werden, in dem Wasser aus dem Pufferspeicher in den Wärmetauscher des Kachelofens gepumpt wird.

Dieses System wird dezentral verwendet. Das heißt jede Wohneinheit hat einen Pufferspeicher und einen Kachelofen im Wohnraum. Der Platzbedarf der Komponenten Kachelofen und Pufferspeicher von 400-600 l beträgt etwa 2 m². Der Kachelofen wird mit Holz befeuert. Für die Lagerung des Brennholzes wird zusätzlicher Raum benötigt (ca. 2 m³). Auch bei Einsatz einer Solaranlage (mit 3-4 m² Kollektorfläche pro Wohneinheit) reicht ein

400-600 l Pufferspeicher aus. Daher ist nur ein geringfügig größerer Platzbedarf für eine Solarstation zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den angegebenen Quadratmetern ist um die Geräte herum genügend Platz für Anschlüsse und Rohrleitungen vorzusehen.

3.9.2 Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Kachelofen
 - Erneuerbare Energie
 - Heimischer, krisensicherer Energieträger
 - Ungefährlicher Brennstoff
 - Außer Abgasverlusten keine Systemverluste, da innerhalb der gedämmten Hülle
 - Notheizung bei Stromausfall
 - Gemütliche Atmosphäre, „Warmplatz“ in der Wohnung
- Wandheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Schnell regelbar (je nach Wandaufbau)
- Fußbodenheizung
 - Gleichmäßig niedriges Temperaturniveau, daher keine Aufwirbelung durch Konvektion
 - Große Speicherkapazität (Dämpfung der Raumtemperaturschwankung)
 - Geringe Vorlauftemperaturen, daher ideal für erneuerbare Energiesysteme (WP, Solarenergie)
 - Langwellige Strahlungswärme
 - Heizfläche Boden ist meist frei
 - Selbstregelungseffekt bei Sonnenstrahlung bei richtiger Dimensionierung (Oberflächentemperatur max. 2 K über Raumtemperatur)
 - Gute Raumtemperaturverteilung
- Wasserheizsystem mit Radiatoren
 - Flexible schnelle Regelmöglichkeit mit Raumthermostaten
 - Einzelraumregelung möglich
 - Hohe Wiederaufheizleistung (abhängig von Radiatorfläche und möglicher Vorlauftemperatur)

Nachteile:

- Kachelofen
 - Braucht Pufferspeicher
 - Platzbedarf durch Rauchfang, Brennstofflager
 - manuelle Befuerung, Staub, Schmutz
 - Warmwasserbereitung nur bei gleichzeitigem Aufheizen des Aufstellraumes (nur mit Solaranlage sinnvoll)
 - Höchste Emissionen aller betrachteten Systeme
 - Trägheit, geringe Regelbarkeit
- Wasserheizsystem mit Radiatoren
 - Höhere Luft- und Heizflächentemperaturen, Oberflächentemperatur von Wand und Boden unter Lufttemperatur
 - Höherer Konvektionsanteil als Strahlung

- Platzbedarf in jedem Raum
- Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Durch Konvektionsströmung kann Staub aufgewirbelt werden
- Wandheizung
 - Heizwand muss im wesentlichen frei bleiben
 - Befestigungen an einer Heizwand nur mit Vorsicht (mit Thermopapier kann die Lage der Rohre ermittelt werden)
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)
- Fußbodenheizung
 - Große Speicherkapazität (Wiederaufheizen)
 - Je nach Auslegung eher träges System
 - Eingeschränkte Auswahl von Bodenbelägen
 - Kein kontrollierter Luftwechsel mit Wärmerrückgewinnung (nach Definition Kap.1.3)

3.9.3 Einsatzbereiche

Der Kachelofen kann nur in der Heizsaison zur Brauchwarmwasserbereitung verwendet werden, sonst wird der Aufstellort (zumeist Wohnraum) mitbeheizt. Deshalb ist eine Solaranlage für die Brauchwarmwasserbereitung im Sommer notwendig, wenn der Brauchwarmwasserbedarf nicht über den E-Heizstab gedeckt werden soll.

Da nur etwa 50% der Energie des Kachelofens über den Wärmetauscher abgeführt werden können, muss die Wohnung zu einem großen Teil über den Kachelofen direkt beheizt werden können (offene Architektur).

Die Verbrennungsluft sollte nicht aus dem Wohnraum sondern extern zugeführt werden, z.B. durch ein doppelwandiges Abgasrohr (innen Abgas, außen Frischluft, Achtung: Kondensation im Abgasrohr durch Kesseltemperaturerhöhung im Wasserkreis vermeiden).

Kachelöfen zur Ganzhausheizung werden bei Mehrfamilienhäusern typischerweise in Reihenhäusern und weniger im Geschoßwohnbau eingesetzt.

3.10 Zusammenfassung der qualitativen Bewertung

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der oben qualitativ beschriebenen Heizungssysteme. Hierbei wurden die Kriterien Einsatzgebiet, Wärmequelle, Platzbedarf, mögliche Wärmeabgabesysteme, Wärmeträger für die Heizung sowie einige Vor- und Nachteile aufgenommen, um einen schnellen Vergleich zwischen den Systemen zu ermöglichen. Der Platzbedarf für zentrale Systeme bezieht sich auf ein Gebäude mit 12 Wohneinheiten (siehe Kapitel 4).

Tabelle 5: Übersicht der Eigenschaften der qualitativ beschriebenen Systeme

	Kleinwärmepumpe – Luftheizung – dezentral	Gastherme – Luftheizung – dezentral	Gastherme – Wasserheizung – dezentral	Pelletskaminofen – Luftheizung – dezentral	Pelletskaminofen – Wasserheizung – dezentral	Sole-Wärmepumpe – Wasserheizsyst. – zentral (mit Speicherbeladung)	Pellets- oder Gaskessel zentral – Luftheizsystem dezentral	Pellets- oder Gaskessel – Wasserheizsystem – zentral	Kachelofen – Wasserheizung – dezentral
<i>Einsatzgebiete</i>									
Einfamilienhäuser	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Reihenhäuser	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Geschosswohnbau	b	b	x	b	b	x	x	x	
<i>Wärmequelle</i>									
Außenluft	x	x		x			x		
Abluft	x	x		x			x		
Erdreich						x			
Biomasse				x	x		x(o)	x(o)	x
Fossil (Gas, Öl)		x	x				x(o)	x(o)	
Strom	x					x			
Solar	e	o	o	o	o	b	o	o	e
<i>Ca. Platzbedarf (Wärmeerzeuger und Speicher ohne Rohrleitungen) *) [m²]</i>	1,0 (+0,4) /WE	1,5 (+0,4) /WE	1,0 (+0,4) /WE	2,8 (+0,1) /WE	2,5 (+0,1) /WE	0,5 /WE 1,0 /Geb.	0,8 /WE 3,0 /Geb.	0,5 /WE 3,0 /Geb.	4 (+0,1) /WE
<i>Mögliche Wärmeabgabe:</i>									
Radiator			x		x	b		x	x
Fußbodenheizung			x		x	x		x	x
Wandheizung			x		x	x		x	x
Deckenheizung			x		x	x		x	x
Luftheizung	x	x		x			x		
<i>Wärmeträger Heizung</i>									
Luft	x	x		x			x		x
Wasser			x		x	x		x	
<i>Vorteile</i>									
Lüftung durch Heizsyst. Heizung stromunabh.	x	x		x			x		b
<i>Nachteile</i>									
Kleine Heizlast notw. Pufferspeicher notwendig Fläche für Erdkollektor	x	x	e	x	x	x	x	x	x

x: trifft zu; b: trifft bedingt zu

e: empfohlen; o: optional

*)WE: Wohneinheit, Geb. Gebäude, Werte in Klammern für Solaranlage

4 Referenzgebäude

Zwei Wohngebäude in Hörbranz und Egg, die im Rahmen des EU-Projektes CEPHEUS (2001) (Cost Efficient Passive Houses as EUropean Standards) vermessen wurden, dienten als Vergleichsgebäude für die Aufstellung der Simulationenmodelle für die Referenzgebäude der simulationstechnischen Untersuchungen für diesen Leitfaden.

Bei den Messungen wurden Energieflüsse über die Gebäudegrenzen, Klimadaten, Komfortparameter, Heizenergiebedarf, hydraulische und elektrische Energieflüsse im Haus sowie Ein- und Austrittstemperaturen der Erdwärmetauscher aufgezeichnet. Zu den Energieflüssen über die Gebäudegrenze gehören Strom, Gas und Solarenergie. Zu den Klimadaten zählen die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung. Als Komfortparameter wurden die Raumtemperatur und die Raumluftfeuchte und als hydraulische Energieflüsse der Brauchwarmwasserverbrauch und der Gesamtwasserverbrauch gemessen. Die elektrischen Energieflüsse wurden für Haushalt, Lüftung, Heizung, Wärmepumpe, Allgemein- und Hilfsenergie getrennt aufgenommen.

Mit diesen Messwerten wurden die folgenden Simulationsmodelle der Referenzgebäude abgestimmt. Messergebnisse von 8 CEPHEUS-Projekten dienten zudem als Basis für realistische Randbedingungen zum Verhalten der Bewohner wie Lüftungsprofil, Anwesenheit von Personen und Haushaltsstromverbrauch. Unter diesen Randbedingungen wurden dann die Referenzgebäude mit jeweils 4 unterschiedlichen Heizungssystemen simuliert. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dargestellt.

4.1 Gemeinsame Annahmen für die Referenzgebäude

Die Dämmung und Verglasung der Gebäude wurde entsprechend dem Reihenhaus in Hörbranz modelliert. In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Konstruktionsaufbauten der Außenwände, des Daches und der Decken aufgelistet.

Die Simulationen verwenden einen Klimadatensatz mit Stundenwerten aus Graz, erstellt mit Meteonorm 4 (1999). Die Norm-Außentemperatur für die Heizlast wurde mit -14°C festgelegt. Die Raumtemperatur (T_{raum}) wurde gemäß der gemessenen Mitteltemperaturen aus dem CEPHEUS (2001) Projekt mit $22,5^{\circ}\text{C}$ angenommen. Die Heizperiode wurde von 1. Oktober bis 30. April fixiert. Die Energiebilanzen aus Kapitel 5 beziehen sich bis auf den Brauchwarmwasserbedarf, welcher über das ganze Jahr bilanziert wird, nur auf die Heizperiode.

Die Lüftung wurde entweder über Fensterlüftung oder über kontrollierten Luftwechsel mit einer übers Jahr gemittelten Luftwechselrate von $0,4 \text{ h}^{-1}$ bezogen auf die Nettogeschossfläche angenommen. Tagsüber (von 7 – 22 Uhr) wird der Luftwechsel hierbei mit $0,45 \text{ h}^{-1}$ und nachts mit $0,3 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Die Infiltration durch Undichtigkeiten im Gebäude wurde konstant auf $0,06 \text{ h}^{-1}$ gesetzt. Für eine Lüftungsanlage beträgt der Auslegungsluftwechsel für den Heizbetrieb $0,54 \text{ h}^{-1}$ ($162 \text{ m}^3/\text{h}$ für das Referenzgebäude 1).

Tabelle 6: Konstruktionsaufbauten des Gebäudes in Hörbranz - Teil 1

Konstruktionsaufbauten in Hörbranz						
	Bauteilschicht	Dicke [m]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Wärmekapazität [kJ/(kgK)]	U - Wert [W/(m ² K)]
Dach <i>DAf</i>	Gipskarton (2 lagig)	0,025	900	0,210	1,00	0,092
	Luftschicht	0,030	-	-	-	
	OSB-Platte	0,022	630	0,130	2,10	
	Zellulose	0,402	60	0,045	2,20	
	OSB-Platte	0,022	630	0,130	2,10	
Dach <i>DAk</i>	Gipskarton (2 lagig)	0,025	900	0,210	1,00	0,283
	Lattung	0,030	600	0,130	2,10	
	OSB-Platte	0,022	630	0,130	2,10	
	TJI - Träger	0,402	800	0,150	2,10	
	OSB-Platte	0,022	630	0,130	2,10	
Außenwand <i>AW1</i>	Kalkzementmörtel	0,020	1800	0,870	1,00	0,137
	Ziegelmauerwerk	0,180	1107	0,390	1,00	
	Korkplatte	0,350	180	0,052	2,10	
	Kalkzementmörtel	0,010	1800	0,870	1,00	
Außenwand Fassadenkollektoren <i>AWFK</i>	Kalkzementmörtel	0,020	1800	0,870	1,00	0,107
	Ziegelmauerwerk	0,180	1107	0,390	1,00	
	OSB-Platte	0,011	630	0,130	2,10	
	Zellulose	0,302	60	0,045	2,20	
	OSB-Platte	0,016	630	0,130	2,10	
	Steinwolle	0,030	40	0,033	1,00	
Kelleraußenw. <i>KAW</i>	Stahlbetonplatte	0,200	2400	2,100	1,00	3,770
Kellerboden <i>KEB</i>	Stahlbetonplatte	0,200	2400	2,100	1,00	3,460
	Magerbeton	0,050	2400	2,100	1,00	
Kellerdecke <i>KED</i>	Parkett	0,016	800	0,200	2,10	0,108
	Kork	0,003	180	0,052	2,10	
	OSB-Platte	0,020	630	0,130	2,10	
	Zellulose	0,350	60	0,045	2,20	
	Stahlbetondecke	0,180	2400	2,100	1,00	
Decke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss <i>DEO</i>	Parkett	0,016	800	0,200	2,10	1,189
	Kork	0,003	180	0,052	2,10	
	Estrich	0,070	2400	2,100	1,00	
	Trittschalldämmung	0,015	115	0,035	1,00	
	Stahlbetondecke	0,180	2400	2,100	1,00	
	Kalkzementmörtel	0,020	1800	0,870	1,00	
Wohnungstrennwand <i>WTW</i>	Kalkzementmörtel	0,020	1800	0,870	1,00	1,766
	Ziegelmauerwerk	0,180	1107	0,390	1,00	
	Luftschicht	0,040	-	-	-	
	Ziegelmauerwerk	0,200	1107	0,390	1,00	
	Kalkzementmörtel	0,020	1800	0,870	1,00	

Tabelle 7: Konstruktionsaufbauten des Gebäudes in Hörbranz – Teil 2

Konstruktionsaufbauten in Hörbranz						
	Bauteilschicht	Dicke [m]	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleit- fähigkeit [W/(mK)]	Wärme- kapazität [kJ/(kgK)]	U - Wert [W/(m ² K)]
Innenwand <i>IW1</i>	Gipskarton	0,013	900	0,210	1,00	0,451
	Mineralwolle	0,030	18	0,039	1,00	
	Gipskarton	0,013	900	0,210	1,00	
Kellerwand 1 <i>KW1</i>	Stahlbeton	0,200	2400	2,100	1,00	3,770
Kellerwand 2 <i>KW2</i>	Stahlbeton	0,300	2400	2,100	1,00	3,196
Kellerwand 3 <i>KW3</i>	Stahlbeton	0,180	2400	2,100	1,00	3,911

Den Wärmeverlusten stehen die so genannten Fremdgewinne gegenüber, die sich aus den solaren Gewinnen und den internen Gewinnen durch Personen und den Betrieb von Elektrogeräten zusammensetzen.

Die in der Heizperiode nutzbaren solaren Gewinne hängen von der Einstrahlung, der Gebäudehülle und der Verschattung vor den Fenstern ab. Bei der Verschattung handelt es sich um eine externe Jalousie mit einem b-Wert von ca. 0,15 (VDI 2078, 1996). Damit ergibt sich ein Verschattungsfaktor von 88,15 %. Für die Verschattung wird auf eine einfache Regelung zurückgegriffen, wobei bei einer Raumtemperatur von mehr als $T_{\text{raum}} + 1,5^{\circ}\text{C}$ die Jalousien aktiviert werden. Die Deaktivierung der Jalousien findet bei $T_{\text{raum}} + 0,5^{\circ}\text{C}$ statt.

Die internen Gewinne aufgrund der Nutzung von Elektrogeräten und der Beleuchtung werden basierend auf den Messergebnissen der CEPHEUS (2001) Studie mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von $3,3 \text{ W/m}^2$ und einem Wärmefreisetzungsgrad von 60 % auf 2 W/m^2 festgelegt. Dies ergibt einen jährlichen spezifischen Strombedarf von $29 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und eine spezifische innere Last für das gesamte Jahr von $17,5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Bezogen auf die Heizperiode sind dies ca. $10,1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Feist gibt dagegen in PHPP (1999) einen Strombedarf von $2,1 \text{ W/m}^2$ ($18,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) an der allerdings ebenfalls mit 2 W/m^2 wärmewirksam ist. Zu diesen internen Gewinnen durch Elektrogeräte und Beleuchtung kommt die Personenabwärme. Das Anwesenheitsprofil wird mit 4 Personen je Wohneinheit berechnet. Die durchschnittliche Anwesenheit beträgt aber im Schnitt nur 2,8 Personen/WE werktags und 3,2 Personen am Wochenende, da tagsüber nicht alle Personen anwesend sind. Als spezifische innere Last durch Anwesenheit von Personen ergeben sich übers Jahr $13,7 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und $1,57 \text{ W/m}^2$ (für die Heizperiode ca. $8 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$). Die Summe der spezifischen internen Gewinne liegt somit bei $27,5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ (Heizperiode ca. $18,1$) bzw. $3,57 \text{ W/m}^2$.

Der Brauchwarmwasserbedarf kann sehr stark von den Benutzern abhängen. Hier wurden statistisch generierte Zapfprofile verwendet, die mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion den Jahresverlauf, unterschiedliche Wochentage, den Tagesverlauf und auch Urlaubszeiten berücksichtigen. Als Datengrundlage dienten hierfür verschiedene Studien, die von Telefonumfragen bis hin zur detaillierten Leistungsmessung reichen (Jordan U., Vajen K., 2001). Für die Vergleichsrechnungen wird ein Brauchwarmwasserverbrauch von $50 \text{ l/d}_{\text{Pers}}$ bei 45°C verwendet. Tabelle 8 zeigt den sich hiermit ergebenden Energieverbrauch für eine Wohneinheit und die beiden Referenzgebäude und zusätzlich für einen reduzierten Brauchwarmwasserbedarf von $30 \text{ l/d}_{\text{Pers}}$ bei 45°C für jeweils das gesamte Jahr.

Tabelle 8: gewählte Brauchwarmwassermengen, für eine Wohneinheit (WE), 3 WE und 12 WE für die beiden in Kap. 5.2 definierten Extremszenarien

gewählte WW-Profile Standardbeleg.	Standard 4 Personen / WE 50 l/d _{pers-45°C}	Ex 1, hohe Heizlast 2 Personen / WE 50 l/d _{pers-60°C}	Ex 2, niedrige Heizlast, 6 Personen / WE 30 l/d _{pers-45°C}
1 WE ¹	200 l/d - 2990 kWh/a	100 l/d – 2137 kWh/a	180 l/d - 2688 kWh/a
3 WE ²	600 l/d - 8980 kWh/a	300 l/d – 6399 kWh/a	540 l/d - 8091 kWh/a
12 WE ³	1700 l/d - 25470 kWh/a	850 l/d – 18141 kWh/a	1530 l/d - 22874 kWh/a

¹ 120 m² Wohnnutzfläche je Wohnung d.h. ca. 4 Personen bei Standardvariante

² 360 m² Wohnnutzfläche in drei Wohnungen d.h. ca. 12 Personen bei Standardvariante

³ 929,7 m² Wohnnutzfläche in zwölf Wohnungen d.h. ca. 34 Personen bei Standardvariante

4.2 Referenzmehrfamilienhaus Typ 1, Reihenhaus, 3 Wohneinheiten (WE)



Abbildung 21: Reihenhaus in Hörbranz, Quelle: KRAPMEIER, Energieinstitut Vorarlberg, Architekt: Richard Caldonazzi, Frastanz, Bezugsfertig: Juli 1999

Das Referenzgebäude 1 wurde in Anlehnung an ein Passiv-Reihenhaus in der Gemeinde Hörbranz (Vorarlberg) mit drei Wohneinheiten und 360 m² aufgestellt. Das Gebäude ist mit seiner zum Großteil verglasten Fassade nach Süden ausgerichtet. Nach Norden, Osten und Westen sind nur sehr kleine Fensterflächen zu finden. Abbildung 18 zeigt eine Ansicht des Gebäudes von Südosten, und in Abbildung 19 sind Baupläne zu sehen.

Die Werte für die Nettoflächen der Zonenbegrenzungen des thermischen Modells von Hörbranz sind in Tabelle 9 aufgelistet.

In Anlehnung an das Vergleichsgebäude in Hörbranz wurden für das Referenzgebäude 1 folgende Annahmen getroffen:

Die Wohnnutzfläche wurde je Wohnung mit 120 m² festgelegt, die Gesamtnettokubatur beträgt 906 m³.

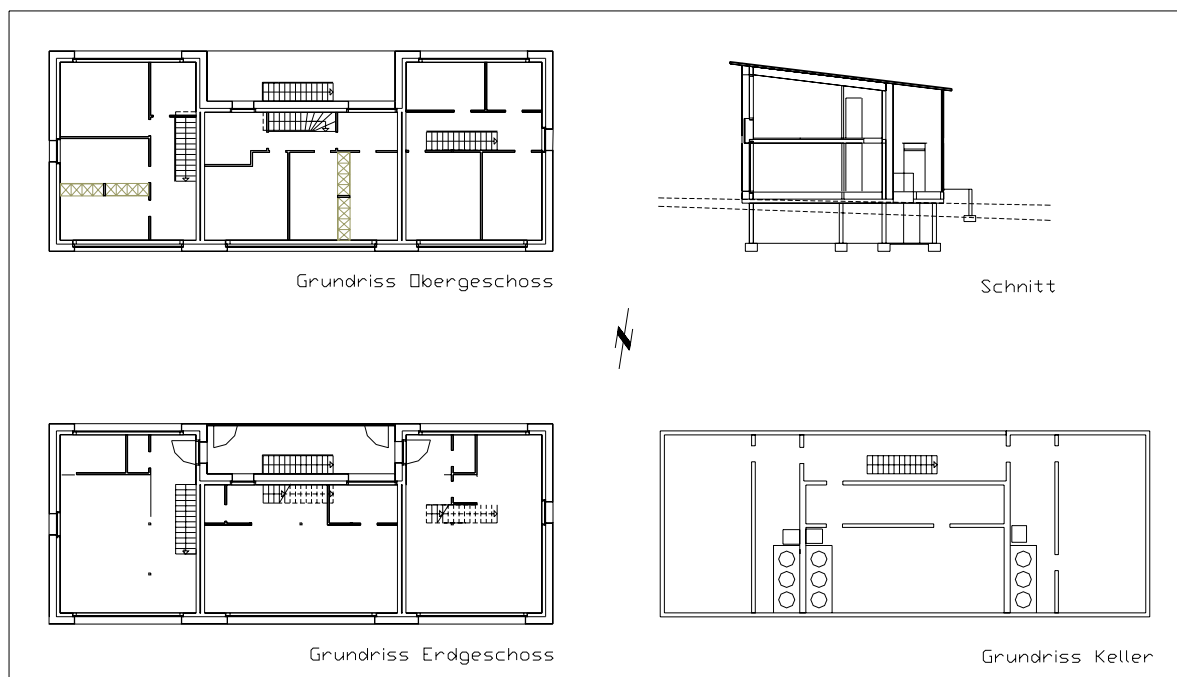


Abbildung 22: Pläne vom Reihenhaus in Hörbranz, Quelle: Caldo Bau GmbH

Tabelle 9: geometrische Auswertung (netto) des Modells von Hörbranz

geometrische Auswertung (netto) - Hörbranz														
		Volumen	Höhe Süd	Höhe Nord	Zonenbegrenzungsflächen									
					horizontal		vertikal							
					Deck	Grund	Nord		Süd		Ost		West	
							Länge	Fläche	Länge	Fläche	Länge	Fläche	Länge	Fläche
[m ³]	[m]	[m]	[m ²]	[m]	[m ²]	[m]	[m ²]	[m]	[m ²]	[m]	[m ²]			
OG	Zone 1	154,26	3,13	2,04	60,12	59,67	6,72	13,71	6,72	21,03	8,88	22,95	8,88	22,95
	Zone 2	165,25	3,13	2,34	60,87	60,42	9,53	22,30	9,53	29,83	6,38	17,45	6,38	17,45
	Zone 3	154,26	3,13	2,04	60,12	59,67	6,72	13,71	6,72	21,03	8,88	22,95	8,88	22,95
EG	Zone 5	143,22	2,4	2,4	59,67	59,67	6,72	16,13	6,72	16,13	8,88	21,31	8,88	21,31
	Zone 6	145,92	2,4	2,4	60,80	60,80	9,53	22,87	9,53	22,87	6,38	15,31	6,38	15,31
	Zone 7	143,22	2,4	2,4	59,67	59,67	6,72	16,13	6,72	16,13	8,88	21,31	8,88	21,31
KG	Zone 8	371,91	2	2	185,95	185,95	23,88	47,76	23,88	47,76	8,88	17,76	8,88	17,76
WF	Zone 4	170,64	7,54	7,24	23,47	23,09	-	68,86	-	71,75	-	17,75	-	17,75

Die spezifischen Gesamtverluste des Gebäudes über die Gebäudehülle durch Transmission, Lüftung und Infiltration liegen bei diesen Annahmen und idealer Beheizung bei 79,4 kWh/(m²a). Die Summe der spezifischen Fremdwärmegewinne beträgt für das Referenzgebäude 1 während der Heizperiode 34,9 kWh/(m²a) (16,8 kWh/(m²a) nutzbare solare Gewinne und 18,1 kWh/(m²a) interne Gewinne).

Damit ergibt sich ein spezifischer Heizenergiebedarf von 44,5 kWh/(m²a), der vom Heizsystem gedeckt werden muss. Dies entspricht einem guten Niedrigenergiehaus. Wenn eine Wärmerückgewinnungsanlage mit 75 % Wärmerückgewinnungsgrad eingesetzt wird, reduziert sich der spezifische Heizenergiebedarf auf 18,2 kWh/(m²a). Bei einem

Wärmerückgewinnungsgrad von 85 % beträgt der spezifische Heizenergiebedarf nur mehr 14,7 kWh/(m²a). Dann erreicht das Gebäude den Passivhaus-Energiebedarf trotz höherer Innentemperatur von 22,5°C statt 20°C. Abbildung 23 zeigt die Energiebilanz für das Referenzgebäude 1 ohne Abluftwärmerückgewinnung.

Der Energiebedarf für die Brauchwarmwasserbereitung beträgt 8980 kWh/a für das gesamte Gebäude. Dies entspricht bezogen auf die Nettonutzfläche von 360 m² 25 kWh/m²a.

Die Heizlast für das Gebäude ist die Last, für die das Heizsystem ausgelegt sein muss, damit das Gebäude am kältesten Tag des Jahres ohne interne und solare Gewinne noch beheizt werden kann. Die Auslegungstemperatur wurde mit -14°C angenommen. Für das Referenzgebäude 1 beträgt die Heizlast für alle 3 Wohneinheiten 11,1 kW (ohne Abluftwärmerückgewinnung) und 6 kW (mit 100 % Abluftwärmerückgewinnung). Letzterer Wert entspricht einer spezifischen Heizlast von 16,7 W/m² Wohnnutzfläche und liegt damit an sich leicht über der Obergrenze für die reine Luftheizung (vgl. Kap. 2.2.1). Unter Berücksichtigung der Fremdwärmegewinne und der Speichermassen des Gebäudes kann aber auch hier mit einer reinen Luftheizung das Auslangen gefunden werden (vgl. Ergebnisse in Kap. 5). Ein Wärmeerzeuger mit einer Leistung von 20 kW für zentrale Systeme ohne Abluftwärmerückgewinnung bzw. etwa 2 kW für eine Wohnung mit 120 m² bei dezentralen Systemen mit Abluftwärmerückgewinnung wurde gewählt, um das Gebäude zu beheizen und Brauchwarmwasser zu erzeugen.

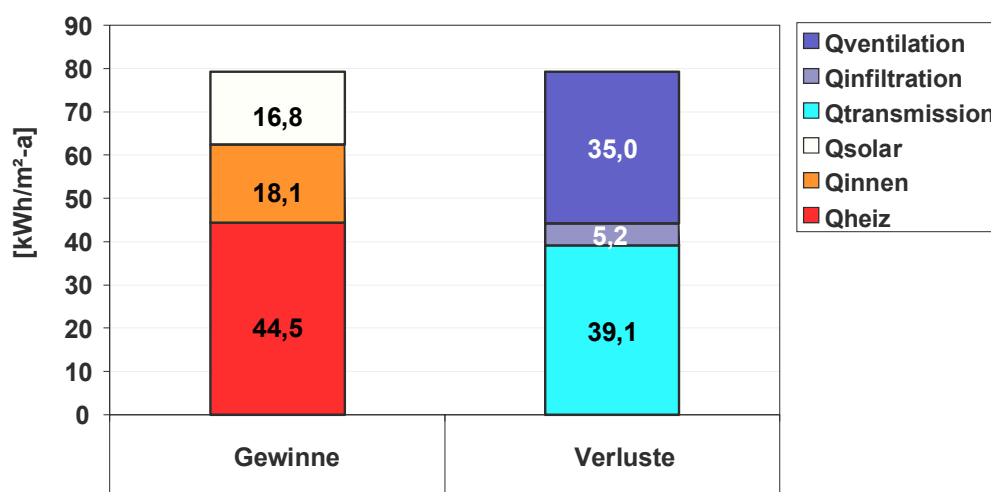


Abbildung 23: Heizenergiebilanz für das Referenzgebäude 1 über die Heizperiode ($T_{\text{raum}} = 22,5^{\circ}\text{C}$)

4.3 Referenzmehrfamilienhaus Typ 2, mehrgeschossiger Wohnbau, 12 WE)

Als Basis für die Wandaufbauten diente hier ebenfalls das 3-Familienhaus in Hörbranz. Diese Wandaufbauten wurden auf ein Gebäude mit 12 Wohneinheiten, welches in Könighofer et al. (2001) entwickelt wurde, angewendet, um ein typisches Referenzgebäude im mehrgeschossigen Wohnbau zu bekommen.

Beim Referenzgebäude 2 handelt es sich um einen dreigeschossigen lang gestreckten Baukörper in Ost – West Ausrichtung mit linearer und offener Erschließung an der nördlichen Längsseite. Jedes der drei Geschosse besteht aus vier Wohneinheiten mit 50, 70, 90 und

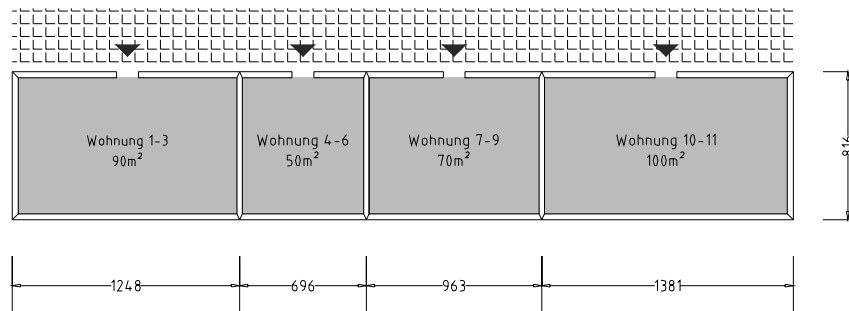
100 m² Wohnfläche. Der Baukörper wird als vollständig unterkellert angenommen. Der Fensterflächenanteil der Südfassade liegt in der Basisvariante bei 33,25%, der Fensterflächenanteil Nordfassade bei 12,7%. Die Ost- und Westfassade wird fensterlos ausgebildet. Aufgrund der gewählten Baukörperabmessungen ergibt sich ein A/V – Verhältnis von 0,51 m⁻¹. Abbildung 24 zeigt das Gebäude in Grund- und Aufriss.

Die Nettonutzfläche des gesamten Gebäudes liegt bei 930 m². Die Werte für die Nettoflächen der Zonenbegrenzungen des thermischen Modells von Hörbranz sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Flächen und Kubaturen des Referenz-Wohngebäudes mit 12 Wohneinheiten

	Nettowerte						Bruttowerte						
	Abmessungen			Wohnnutzfläche exl. Innenwände	Fassadenfläche Nord bzw. Süd	Volumen	Abmessungen			Grundfläche	Fassadenfläche Nord bzw. Süd	Seitenfläche	Volumen
	L [m]	B [m]	H [m]	L x B [m ²]	L x H [m ²]	L x B x H [m ³]	L [m]	B [m]	H [m]	L x B [m ²]	L x H [m ²]	B x H [m ²]	L x B x H [m ³]
Wohnung 1	12,0	7,5	2,6	90,0	31,2	234,0	12,5	8,2	3,1	101,8	38,9	25,4	317,2
Wohnung 2	12,0	7,5	2,6	90,0	31,2	234,0	12,5	8,2	2,9	101,8	36,3	23,7	296,3
Wohnung 3	12,0	7,5	2,6	90,0	31,2	234,0	12,5	8,2	3,1	101,8	38,6	25,3	315,2
Wohnung 4	6,7	7,5	2,6	50,0	17,3	129,9	7,0	8,2	3,1	56,8	21,7	25,4	176,9
Wohnung 5	6,7	7,5	2,6	50,0	17,3	129,9	7,0	8,2	2,9	56,8	20,3	23,7	165,3
Wohnung 6	6,7	7,5	2,6	50,0	17,3	129,9	7,0	8,2	3,1	56,8	21,5	25,3	175,8
Wohnung 7	9,3	7,5	2,6	70,0	24,3	181,9	9,6	8,2	3,1	78,6	30,0	25,4	244,8
Wohnung 8	9,3	7,5	2,6	70,0	24,3	181,9	9,6	8,2	2,9	78,6	28,0	23,7	228,7
Wohnung 9	9,3	7,5	2,6	70,0	24,3	181,9	9,6	8,2	3,1	78,6	29,8	25,3	243,2
Wohnung 10	13,3	7,5	2,6	100,0	34,7	259,9	13,8	8,2	3,1	112,7	43,0	25,4	351,0
Wohnung 11	13,3	7,5	2,6	100,0	34,7	259,9	13,8	8,2	2,9	112,7	40,2	23,7	327,9
Wohnung 12	13,3	7,5	2,6	100,0	34,7	259,9	13,8	8,2	3,1	112,7	42,7	25,3	348,8
Summe				929,7	322,3	2417,2				1049,7	391,1		3191,1

SYSTEMGRUNDRISS



SYSTEMSCHNITT

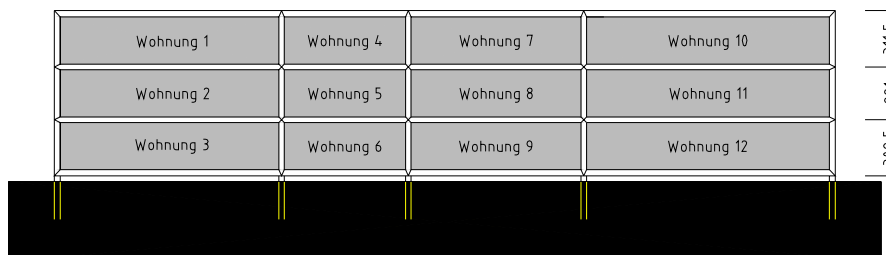


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Mehrfamilienhauses mit 12 Wohnungen

Die spezifischen Gesamtverluste des Gebäudes über die Gebäudehülle durch Transmission, Lüftung und Infiltration liegen bei diesen Annahmen und idealer Beheizung bei 77,9 kWh/(m²a) und damit nur geringfügig unter den Werten des Referenzgebäude 1. Die Summe der spezifischen Fremdwärmegevinne beträgt für das Referenzgebäude 2 während der Heizperiode 36,2 kWh/(m²a) (18,2 kWh/(m²a) nutzbare solare Gewinne und 18,0 kWh/(m²a) interne Gewinne).

Damit ergibt sich ein spezifischer Heizenergiebedarf von 41,7 kWh/(m²a), der vom Heizsystem gedeckt werden muss. Hierbei schlägt sich die größere Kompaktheit des Gebäudes gegenüber dem Referenzhaus 1, welches 44,5 kWh/(m²a) spezifischen Heizenergiebedarf hatte, wieder. Dies entspricht einem sehr guten Niedrigenergiehaus. Wenn eine Wärmerückgewinnungsanlage mit 75 % Wärmerückgewinnungsgrad eingesetzt wird, reduziert sich der spezifische Heizenergiebedarf für das gesamte Gebäude auf 14,5 kWh/(m²a), was bereits trotz erhöhter Raumtemperatur ($T_{\text{raum}} = 22,5^{\circ}\text{C}$ anstatt 20°C) Passivhausstandard entspricht. Die Randwohnungen mit größerer Oberfläche haben dann aber immer noch einen spezifischen Heizenergiebedarf von 20,5 kWh/m²a. Bei einem Wärmerückgewinnungsgrad von 85 % beträgt der spezifische Heizenergiebedarf für das gesamte Gebäude nur mehr 10,9 kWh/(m²a) und 16,8 kWh/(m²a) für die Randwohnung.

Der Energiebedarf für die Brauchwarmwasserbereitung beträgt 25470 kWh/a für das gesamte Gebäude. Dies entspricht bezogen auf die Nettonutzfläche von 930 m² wie beim Referenzhaus 1 27,4 kWh/(m²a). Abbildung 25 zeigt die Energiebilanz für das Referenzgebäude 1 ohne Abluftwärmerückgewinnung.

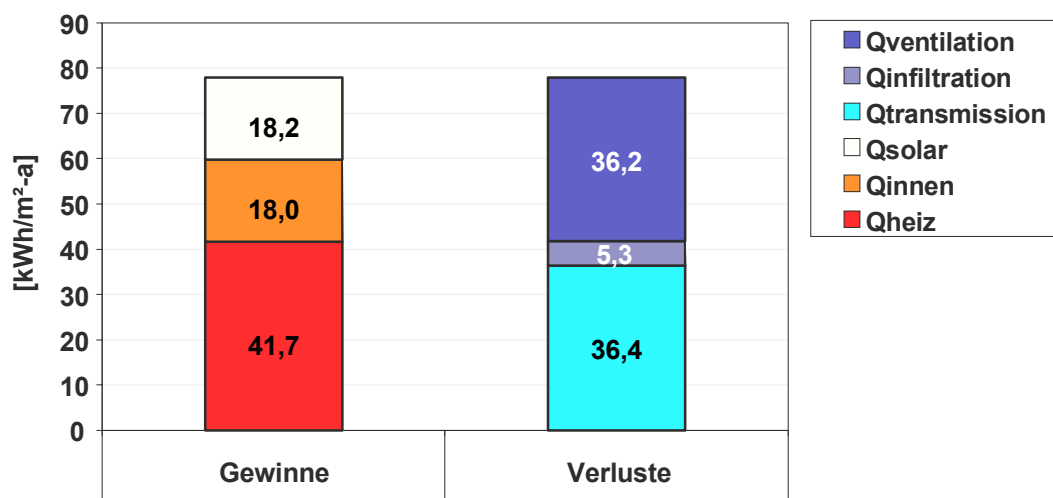


Abbildung 25: Heizenergiebilanz für das Referenzgebäude 2

Die Heizlast für das Gebäude ist die Last, für die das Heizsystem ausgelegt sein muss, damit am kältesten Tag des Jahres ohne interne und solare Gewinnen das Gebäude noch beheizt werden kann. Die Auslegungstemperatur wurde mit -14°C angenommen. Für das Referenzgebäude 2 beträgt die Heizlast für alle 12 Wohneinheiten 28,4 kW (ohne Abluftwärmerückgewinnung) und 13,4 kW (mit 100 % Abluftwärmerückgewinnung). Letzterer Wert entspricht einer spezifischen Heizlast von 14,4 W/m² Wohnnutzfläche und stellt die Obergrenze für die reine Luftheizung dar (vgl. Kap. 2.2.1). Ein Wärmeerzeuger mit einer Leistung von 40 kW für zentrale Systeme ohne Abluftwärmerückgewinnung bzw. etwa 1,7 kW für eine Wohnung mit 120 m² bei dezentralen Systemen mit Abluftwärmerückgewinnung wurde gewählt, um das Gebäude zu beheizen und Brauchwarmwasser zu erzeugen.

5 Quantitativer Vergleich von vier ausgewählten Heizungssystemen mittels Simulationen

Von den in Kapitel 3 beschriebenen Systemen wurden 4 ausgewählt und für die Referenzgebäude mit dem Simulationsprogramm TRNSYS (2000) detailliert simuliert. Die Auswahl erfolgte aufgrund bisher eingesetzter Systeme im Mehrfamilienhausbau sowie zur Erfassung einer Bandbreite von verschiedenen Möglichkeiten.

Die Pellets-Kaminöfen wurden in diesem Projekt nicht betrachtet, da es keine ausreichenden Unterlagen und Simulationsmodelle darüber gibt. Die detaillierte Betrachtung weiterer Systeme könnte bei Bedarf in Folgeprojekten durchgeführt werden. Die für diese Studie ausgewählten Systeme sind:

- Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral (ohne und mit Solaranlage) (Kap. 3.1), System 1 (nur für Referenzgebäude 1, da mit Erdreichwärmetauscher im Geschosswohnbau schwierig anwendbar). Dieses System stellt das „klassische“ Passivhausheizungskonzept dar, wie es vom Passivhausinstitut Darmstadt vorgestellt wird. Das Lüftungsgerät mit Brauchwarmwasserbereitung wurde in Österreich entwickelt.
- Sole-Wärmepumpe – Wasserheizsystem – zentral (nur ohne Solaranlage) mit dezentralen Brauchwarmwasserspeichern mit Zweileiterverteilnetz (Kap. 3.6), System 6. Erdreich-Wärmepumpen benötigen aufgrund ihrer hohen Jahresarbeitszahlen wenig Strom. Sie stellen in der hier vorgestellten Konfiguration eine energetische Alternative (bei gleichem Endenergieträger Strom) zur klassischen Passivhausvariante dar, wenn auf die Abluftwärmerückgewinnung verzichtet wird.
- Pelletskessel – Wasserheizsystem – zentral (ohne und mit Solaranlage) mit Zweileiterverteilnetz und Brauchwarmwasserdurchlauferhitzer (Kap. 3.8), System 8. Dieses System bringt den erneuerbaren Energieträger Biomasse in das Niedrigstenergie- und Passivhaus. Somit ist diese Variante als ökologische Vergleichsvariante von großem Interesse. Biomasse-Pellets Kessel werden zudem in Österreich entwickelt und gefertigt (und auch nach Deutschland exportiert). Durch den geringen Wartungsaufwand stellen sie eine Alternative zu konventionellen fossilen Energieträgern dar.
- Gaskessel – Wasserheizsystem – zentral (ohne und mit Solaranlage), mit Zweileiterverteilnetz und Brauchwarmwasserdurchlauferhitzer als konventionelles Referenzsystem (Kap. 3.8) , System 8. Dieses System ist das konventionelle Referenzsystem, wobei bewusst der Gaskessel mit etwas höherem Wirkungsgrad und geringeren CO₂-äquivalent Emissionen verglichen mit einem Ölkessel gewählt wurde, um ein sehr günstiges Referenzsystem basierend auf fossilen Energieträgern zu wählen.

In den folgenden Tabellen werden die untenstehenden Abkürzungen für die betrachteten Systeme verwendet:

- PmS – System 8, zentraler Pelletskessel mit Solaranlage
- PoS – System 8, zentraler Pelletskessel ohne Solaranlage
- GmS – System 8, zentraler Gaskessel mit Solaranlage
- GoS – System 8, zentraler Gaskessel ohne Solaranlage
- SWP – System 6, zentrale Solewärmepumpe mit dezentralen Brauchwarmwasserspeichern
- Luft oS - System 1, Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral ohne Solaranlage
- Luft mS – System 1, Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage

Diese Systeme wurden mit jeweils drei verschiedenen Varianten jeweils für die beiden Referenzgebäude untersucht:

- **Standardvariante** mit dem in den Referenzgebäuden in Kap. 4 vorgegebenem Benutzerverhalten
- Zwei **Extremszenarien** mit
 - Randbedingungen für eine hohe Heizlast (hohe Raumtemperatur und Luftwechsel sowie ein Brauchwarmwasserbedarf mit höherer Temperatur) und geringe interne Gewinne
 - Randbedingungen für eine niedrige Heizlast (niedrigere Raumtemperatur, geringer Luftwechsel und Brauchwarmwasserbedarf) und hohe interne Gewinne
 wurden definiert, um auszuloten, wie flexibel die Systeme auf unterschiedliche Nutzeranforderungen reagieren
- Zwei **Winter - „Härtetests“**, die
 - eine Wiederaufheizung nach zweiwöchiger Absenkung (Urlaubssituation) und
 - eine Wiederaufheizung nach für vier Stunden geöffnetem Fenster simulieren und zeigen, wie die Systeme auf Nutzungsfehler reagieren.

Somit ergeben sich die folgenden Berechnungsvarianten

Tabelle 11: Darstellung aller Berechnungsvarianten

	Referenzgebäude 1 (3 Wohneinheiten)								Referenzgebäude 1 (12 Wohneinheiten)				
	Pellets System 1		Gas System 1		SWP Syst. 6	Luft Syst. 8		Pellets System 1		Gas System 1		SWP Syst. 6	
Szenario	oS	mS	oS	mS	oS	oS	mS	oS	mS	oS	mS	oS	
Standard	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Extrem 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Extrem 2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
14 Tage Urlaub	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Fenster offen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

oS: ohne Solaranlage

mS: mit Solaranlage

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Simulationen dargestellt und analysiert.

5.1 Standardvariante

Die Standardvariante wird für alle 5 Systeme mit den folgenden Randbedingungen gerechnet:

- Raumtemperatur: 22,5°C
- Luftwechsel normal: 0,4 h⁻¹ (im Mittel)
- Interne Lasten normal: 4 Personen pro WE, 9,6 kWh pro Tag Stromverbrauch (60 % hiervon wärmewirksam)
- Warmwasserbedarf normal: 50 l/(d Person 45°C)

Tabelle 12 zeigt die für die Berechnung gewählte Dimensionierung der Wärmespeicher sowie Größe und Art der verwendeten thermischen Solaranlage. Der Anlagentyp 4 wurde hierbei nach Herstellerangaben gewählt. Für Anlagentyp 1 und 3 wurden die technischen Daten für die Wärmeerzeuger (Biomassekessel, Wärmepumpe) ebenfalls nach Herstellerangaben gewählt. Die restliche Anlagendimensionierung erfolgte nach Erfahrungswerten bzw. vorangegangenen Forschungsprojekten (z.B. Streicher et al. 2002, Könighofer et al. 2001).

Tabelle 12: Dimensionierung von Sonnenkollektoren und Wärmespeichern für alle Berechnungsvarianten

	Kollektorgröße [m ²]	Kollektortyp	Speichergröße zentral [m ³]	Speichergröße dezentral [m ³]
System 1 ohne Solar				
je Wohneinheit	-	-	-	0,19
System 1 mit Solar				
je Wohneinheit	7	Selektiv beschichteter Flachkollektor	-	0,4
System 6 und 8 ohne Solar				
Referenzgebäude 1	-		0,5 System 8	0,25 System 6
Referenzgebäude 2	-		0,9 System 8	0,25 System 6
System 8 solar				
Referenzgebäude 1	30	Selektiv beschichteter	2	-
Referenzgebäude 2	70	Flachkollektor	3,5	-

5.1.1 Energiebilanz des Systems im Gebäude

Für jedes System werden alle Energielieferanten (Gas, Pellets, Solar etc.) sowie die Hilfsenergieverbräuche von Pumpen, Ventilatoren, Regelungen, Brenner etc. gelistet und die Wärmegestehungskosten erfasst. Dabei werden jeweils alle 4 Systeme für das gesamte Gebäude gegenübergestellt.

Abbildung 26 zeigt beispielhaft für das System 1 den in der Simulation berücksichtigten Energiefluss. Der umrandete Bereich stellt hierbei die Systemgrenze des Gebäudes dar. Ähnliche Energieflüsse wurden für die anderen Systeme aufgestellt. Bei diesem System gibt es folgende Energiequellen, die den Brauchwarmwasserbedarf und die Lüftungs- und Transmissionsverluste decken:

- Wärmepumpenstrom (Stromaufnahme des Kompressors und des Zuluftventilators)
- Wärmepumpe (Verdampfer) – Energie, die die Wärmepumpe am Verdampfer aus der Fortluft aufnimmt (enthält einen latenten und einen sensiblen Anteil)
- Wärmerückgewinnung (WRG)
- Ggf. aktive Solaranlage (für die Brauchwarmwassererwärmung)
- Erdreichwärmetauscher (EWT)
- E-Patronen (in der Zuluft und im Brauchwarmwasserspeicher)
- Passive solare Gewinne
- Interne Gewinne (durch Personen und Haushaltsstrom)

Die eingetragene Energie wird folgendermaßen genutzt:

- Brauchwarmwasserverbrauch
- Transmissions- und Infiltrationsverluste: Diese werden gedeckt durch die solaren und internen Gewinne und die Luftheizung (Zuluft wird wärmer als mit Raumtemperatur dem Raum zugeführt)
- Reine Lüftungsverluste (ohne Infiltration): Der Großteil der Energie in der Abluft wird über die Wärmerückgewinnung (WRG) bzw. über den Verdampfer der Wärmepumpe wieder zurück gewonnen. Am Verdampfer kann aber nur im Winter Energie zurück gewonnen werden, da im Sommer die Lüftungsanlage nicht in Betrieb ist. Die für die Brauchwarmwasserbereitung notwendige Verdampfungsenergie wird im Sommer aus der Umgebungsluft gewonnen. Ebenso wird der latente Anteil der Verdampfungsenergie nicht zurück gewonnen, da er nicht über die Zuluft dem Raum zugeführt wurde sondern über latente interne Gewinne, die in den rein sensiblen internen Gewinnen in der Bilanz nicht enthalten sind.
- Die Systemverluste sind zusammengesetzt aus den Anteilen Speicherverluste, Verluste der Zuluftleitung, im Sommer nicht nutzbare Abwärme des Kompressors und Fortluftverluste, da die Fortluft, über die Heizperiode gemittelt, mit leicht über der Außentemperatur liegender Temperatur abgegeben wird.

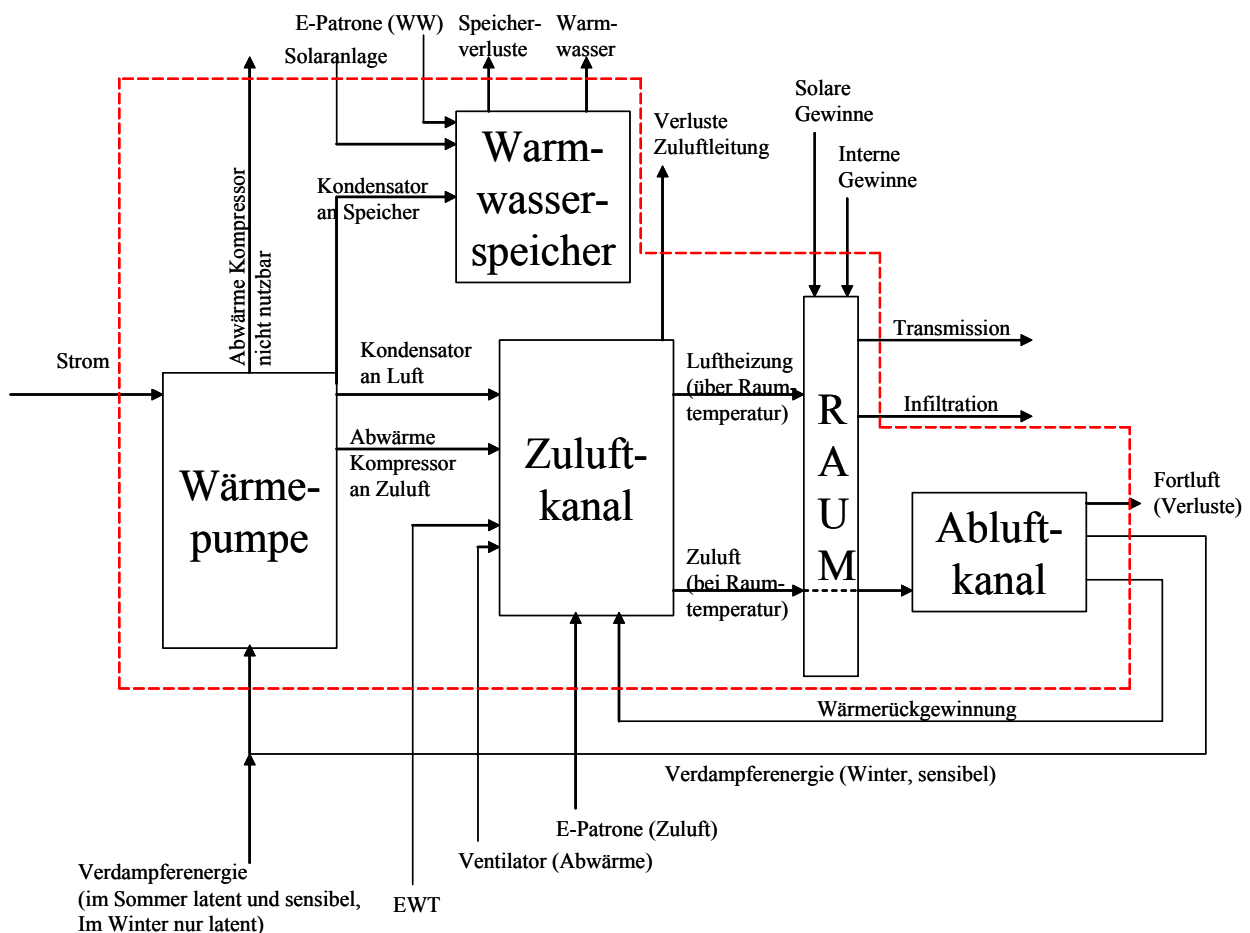


Abbildung 26: Energieflussbild für Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral (Kap. 3.1), System 1

Tabelle 13 zeigt die Energiebilanz für die Standardvariante für das System 1 Pelletskessel – Wasserheizungssystem – zentral für das Referenzgebäude 1 mit 30 m² Solaranlage. Der Energie-

bedarf stellt den Bedarf des Gebäudes an sich dar. Unter der Spalte Pellets-Wasser+Solar+Strom Eintrag sind alle Energieflüsse in das System zusammengefasst. In der Spalte Pellets-Wasser + Solar Verbrauch sind die Abgaben der Systeme (sowohl an das Haus, wie die Verluste) aufgeführt. Die Wärmeverluste werden in wärmewirksam und nicht wärmewirksam unterschieden. Wärmewirksam wird der Teil der Wärmeverluste bezeichnet, welcher bei Heizbedarf im Gebäude anfällt.

Tabelle 13: Jahres-Energiebilanz, Standardvariante für das System 8 Pelletskessel – Wasserheizungssystem – zentral Referenzgebäude 1 (Kap. 3.8) mit Solaranlage, 30 m² (Werte in Klammern sind Detaillierungen des Energiebedarfs)

	Energiebedarf kWh/a	Wärme Eintrag durch Pellets-Wasser+ Solar+Strom kWh/a	Pellets-Wasser + Solar Wärme- verbrauch kWh/a
Strombilanz			
Haustechnikstrom gesamt, nicht wärmewirksam, hiervon		1464	
Pumpe Solaranlage (120+31 W)		(277)	
Pumpe Wärmeverteilung (83 W)		(366)	
Pumpe Pelletskessel (65 W)		(287)	
Strom Pelletsk. (120 W + Zündung)		(535)	
Haushaltsstrom	10440		
Haushaltsstrom nicht wärmewirksam		6802	6802
Thermische Bilanz			
Pellets		29709	
Solaranlage		13150	
Interne Gewinne Summe, hiervon		6381	6381
Personen		(2743)	(2743)
Haushaltsstrom (wärmewirksam)		(3638)	(3638)
Solare Gewinne		5794	5794
Wärmeverluste (wärmewirksam)			3021
Radiatoren/Flächenheizung			13510
Brauchwarmwasser	8956		8956
Systemverluste (nicht wärmewirksam)			8898
Kesselverluste			8499
Transmission	14408		
Lüftung	14299		
Summe thermisch (ohne Strom)	37663	55034	55060
Summe gesamt	48103	63300	63325

Der Haustechnikstrom wird als nicht wärmewirksam für das Gebäude angenommen (die Wärme wird im Haustechnikraum, der nicht zur Wohnnutzfläche zählt und unbeheizt ist, abgegeben). Ein Teil der Wärmeverluste der Verteilungen wird als wärmewirksam für das Gebäude angesehen. Der Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes beträgt 28707 kWh/a. Dieser Wert unterscheidet sich etwas vom Wert des reinen Referenzgebäudes, da hier systembedingte Raumtemperaturschwankungen auftreten. Auch die Summenwerte der Spalten der Bilanz stimmen nicht ganz exakt überein, da in der Simulation mit dem Programmpaket TRNSYS kleine Iterationsungenauigkeiten auftreten.

Der Haushaltsstrom macht fast ein Viertel des Wärmebedarfs aus. Er ist nur zu etwa einem Drittel wärmewirksam in der Heizperiode. Der Haustechnikstrom für die Heizungsanlage liegt

bei 14 % des Haushaltsstroms. Die nicht wärmewirksamen Wärmeverluste liegen in der gleichen Größenordnung wie der Brauchwarmwasserbedarf.

Abbildung 27 schlüsselt die Wärmeverluste von Speicher, Rohrleitungen und Wärmetauscher desselben Heizungssystems, beginnend mit den Wärmeeinträgen von Kessel und Solaranlage in den Wärmespeicher, für die Heizperiode auf. Der Brauchwarmwasserbedarf ist hier auch nur für die Heizperiode angegeben. Die größten Wärmeverluste entstehen somit in der Wärmeverteilung im Gebäude. Nur ein Teil dieser Verluste kann während der Heizperiode genutzt werden. Dies zeigt, wie wichtig die hydraulische Verteilungsstrategie im Gebäude für den Energiebedarf ist.

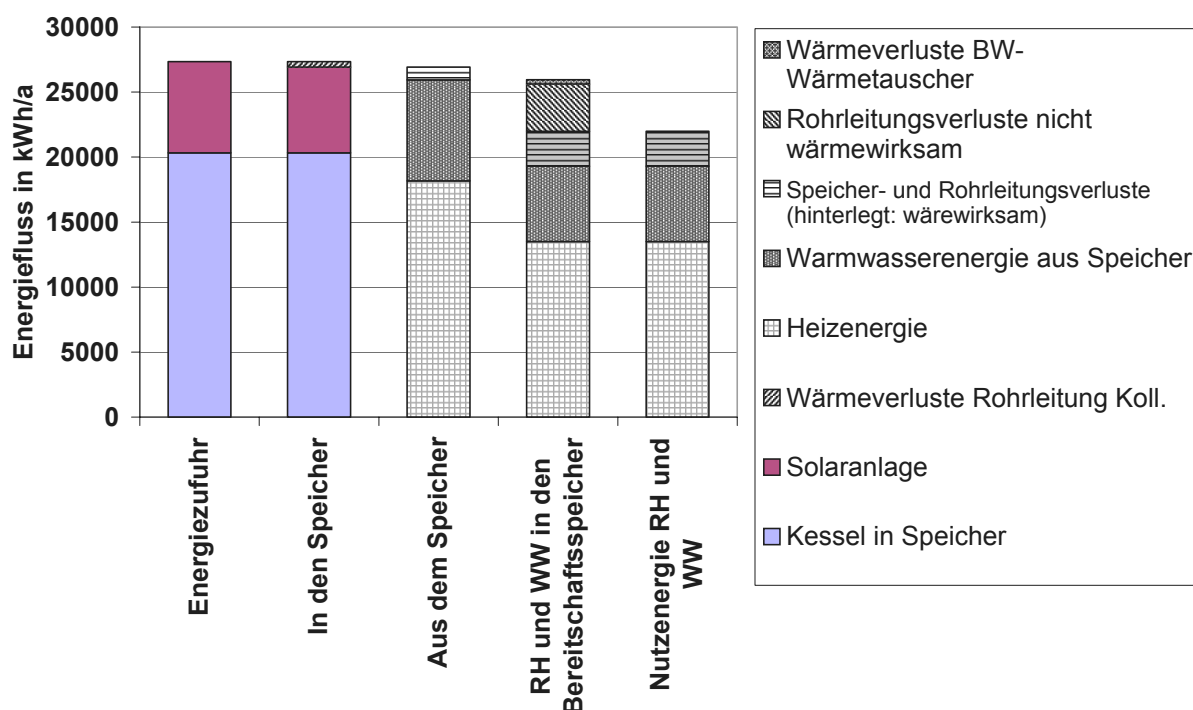


Abbildung 27: Energiebilanz für die Heizperiode, Standardvariante für das System 8 Pelletskessel – Wasserheizungssystem – zentral Referenzgebäude 1 (Kap. 3.8) mit Solaranlage, 30 m²

Abbildung 28 zeigt die spezifische Energiebilanz aller simulierten Systeme. Die Säule ganz links zeigt die Lasten, die durch das Heizsystem zu decken sind. Diese bestehen aus dem Brauchwarmwasserbedarf, den Lüftungsverlusten, die auch die Infiltrationsverluste enthalten, und den Transmissionsverlusten. Im Folgenden sind die Energiebilanzen der Systeme mit jeweils Energieeintrag und Energieverbrauch im Gebäude aufgeführt. Wärmerückgewinnung (WRG) und Erdreichwärmetauscher (EWT), die in gewissem Sinne die Lüftungsverluste reduzieren gehen wie aktive Systeme in die Bilanz ein. Sie tragen ihren Anteil dazu bei, die Lüftungsverluste des Gebäudes zu decken. Das heißt, dass die Lüftungsverluste auf der Eintragsseite mitbilanziert werden und auf der Lastseite des Gebäudes keine Änderung bewirken. Auf der anderen Seite wird die Energie der WRG direkt im Gebäude verwendet und scheint somit auch auf der Verbrauchsseite auf. Ebenso scheinen interne Gewinne und solare Gewinne sowohl auf der Eintrags- wie auf der Verbrauchsseite auf.

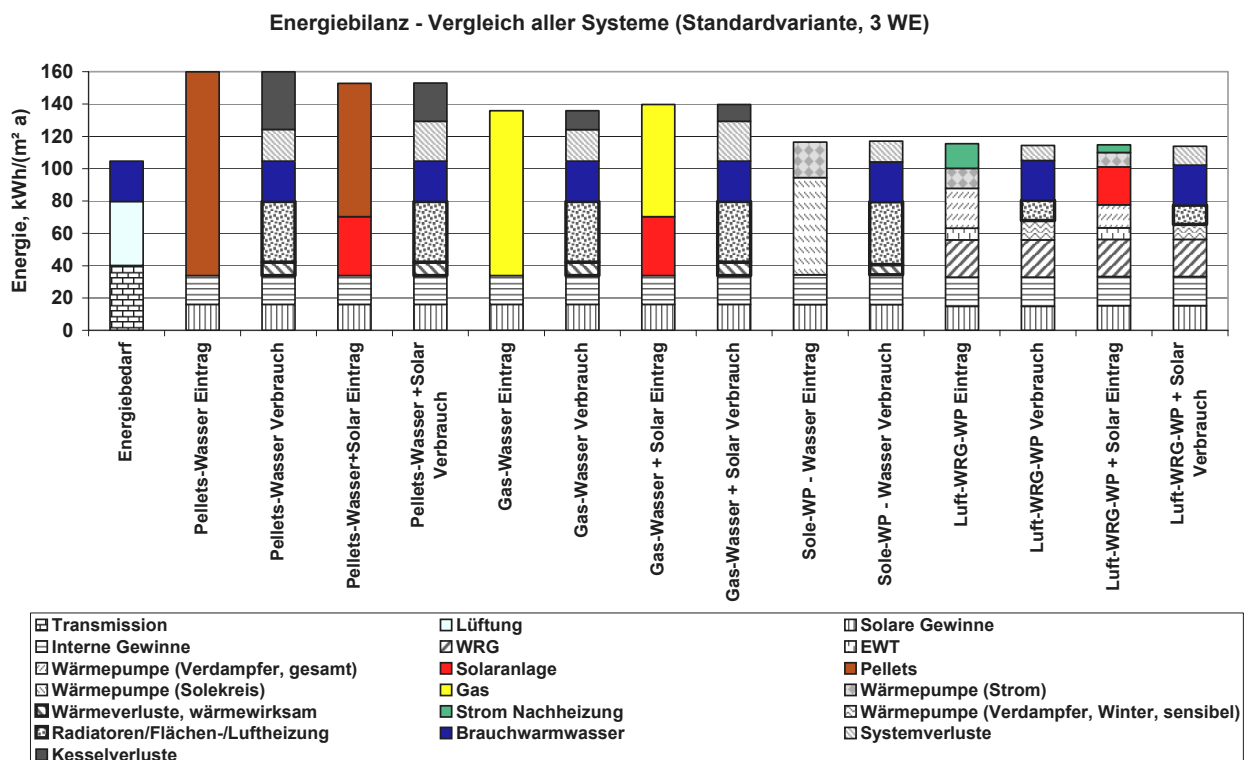


Abbildung 28: Energiebilanz aller simulierten Systeme (Standardvariante, Referenzgebäude 1, 3 WE) ohne Haustechnik- und Haushaltsstrom

Die Säulen der verschiedenen Systeme in Abbildung 28 sind nicht alle gleich hoch. Gründe dafür sind die unterschiedlichen System- und Wärmeerzeugerverluste, die zusätzlich zu den Lasten gedeckt werden müssen sowie die nicht vollständig gleichen Raumtemperaturen aufgrund der verschiedenen Charakteristiken der Wärmeabgabesysteme (Radiators, Fußbodenheizung, Luftheizung). Solaranlagen bewirken z.B. aufgrund höherer Speichertemperaturen höhere Systemverluste, demgegenüber sinken die Kesselverluste aufgrund der längeren Stillstandszeiten des Kessels im Sommer aufgrund der Solaranlage. Von den zentralen Systemen hat die Sole-Wärmepumpenanlage die geringsten Systemverluste, da das Wärmeverteilnetz außer beim Nachladen der dezentralen Speicher nur mit den niedrigen Heizungs-temperaturen betrieben wird. Die beiden anderen zentralen Systeme mit der Erzeugung von Brauchwarmwasser im Durchlauferhitzerprinzip müssen dahingegen den Vorlauf des Wärmeverteilnetzes immer auf ca. 60°C halten. Der höhere Endenergiebedarf des Pellets-Kessels gegenüber dem Gaskessel ergibt sich aufgrund dessen geringeren Jahresnutzungs-grades von 72 % gegenüber 89 %. Die Sole-Wasser Wärmepumpe hat eine Jahresarbeitszahl von 3,41 (inklusive des Strombedarfs der Solepumpe). Das System Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral hat ebenfalls geringe Systemverluste (hauptsächlich Wärmeverluste des Brauchwasserspeicher). Trotz der Abluftwärmerückgewinnung (WRG) und des Erdreichwärmetauschers (EWT) ist der Strombedarf des Gesamtsystems ohne Solaranlage etwas höher als beim Sole-System, da die Nachheizung im Brauchwasserspeicher und in der Zuluft elektrisch erfolgt und die Abwärme des Zuluftventilators vollständig als elektrische Nachheizung mitgerechnet wird. Mit Solaranlage wird dieser Strombedarf wesentlich kleiner. Dann hat das System den geringsten Energiebedarf aller untersuchten Systeme, obwohl die Jahresarbeitszahl der Luft-Luft(Wasser)-Wärmepumpe dann auf 3,05 sinkt. Die Solaranlage liefert nämlich dann Energie, wenn die Wärmepumpe auch mit hoher Leistungszahl betrieben würde.

Der spezifische Solarertrag der gewählten Solaranlagen liegt bei den zentralen Systemen bei ca. 440 kWh/(m²a) bezogen auf die Kollektorfläche, was durch die geringen Rücklauf-temperaturen des Wärmeverteil- und - abgabesystems erreicht wird. Der solare Deckungsgrad liegt bei 35 % [(Energie-Bedarf ohne Solaranlage minus Energie-Bedarf mit Solaranlage) dividiert durch (Energie-Bedarf ohne Solaranlage)] und ohne Berücksichtigung des Mehrstrombedarfs der Solaranlage). Beim dezentralen System Kleinstwärmepumpe – Luftheizung sinkt der spezifische Ertrag geringfügig auf 400 kWh/(m²a), da nur die Brauchwarmwasserzeugung von der Solaranlage bedient wird.

Vergleicht man die Systeme mit dem Passivhaus-Kriterium Gesamt-Endenergiebedarf unter 42 kWh/m²a (vgl. Kap. 1.3) und berücksichtigt man den mit 3,3 W/m² (29 kWh/(m²a)) eher hoch angenommenen Strombedarf, so erkennt man, dass nur die Wärmepumpensysteme (sowohl zentrale Sole WP mit einem Strombedarf von 22 kWh/(m²a) als auch die dezentrale Luft-WRG-WP mit einem Strombedarf von 27,5 kWh/(m²a) ohne und 13,7 kWh/(m²a) mit Solaranlage) dieses Kriterium bei einem geringeren Strombedarf für Haustechnik, Beleuchtung und Elektrogeräte erfüllen könnten. Die zentralen Pellets- und Gasvarianten liegen bei dem Endenergiebedarf rein für die Heizung auch bei Einbindung der hier angenommenen Solaranlage deutlich über diesem Kriterium. Allerdings wird in diesem Bericht eine Raumtemperatur von 22,5°C gegenüber 20°C für die Passivhaus-Berechnungen angenommen.

5.1.2 Ökonomische Analyse

5.1.2.1 Einleitung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde nach der dynamischen Annuitätenmethode nach VDI 2067:1999 durchgeführt.

Diese Norm gilt unter anderem für die Berechnung der Kosten von Zentralheizungsanlagen. Es werden bei dieser Berechnungsmethode mehrere Kostengruppen unterschieden:

- kapitalgebundene Kosten
- verbrauchsgebundene Kosten
- betriebsgebundene Kosten

Der Zweck dieser Berechnung ist, die Kosten von verschiedenen Wärmeversorgungsanlagen zu berechnen und den daraus resultierenden Preis für die gelieferte Wärme zu vergleichen.

Der Wärmepreis ist wie folgt definiert:

$$WP = \frac{\text{Kapitalkosten} + \text{Betriebskosten} + \text{verbrauchsgebundene Kosten}}{Q_{\text{Nutz}}}$$

In den folgenden Tabellen werden die einzelnen Kostengruppen für die betrachteten Heizsysteme für beide Referenzgebäude dargestellt. In Tabelle 21 und Tabelle 22 steht der jeweilige Wärmepreis pro gelieferter kWh, der sowohl Investitionskosten als auch Betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten des Heizsystems enthält.

In den Tabellen werden die folgenden Abkürzungen für die betrachteten Systeme verwendet:

PmS – System 8,	zentraler Pelletskessel mit Solaranlage
PoS – System 8,	zentraler Pelletskessel ohne Solaranlage
GmS – System 8,	zentraler Gaskessel mit Solaranlage
GoS – System 8,	zentraler Gaskessel ohne Solaranlage
SWP – System 6,	zentrale Solewärmepumpe, dezentralen Brauchwarmwasserspeicher
Luft mS – System 1,	Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage
Luft oS - System 1,	Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral ohne Solaranlage

Im oberen Teil von Tabelle 14 und Tabelle 15 sind für jedes System die solaren Erträge (wenn vorhanden), die benötigte Nachheizenergie (Energiegehalt von Pellets, Gas, Strom) und der Warmwasser- und Heizwärmebedarf eingetragen. Die Werte wurden den Ausgabe-files der Simulation des jeweiligen Systems entnommen. Der Raumwärmebedarf für die Kleinstwärmepumpe – Luftheizung – dezentral liegt aufgrund der höheren Luftwechselrate ($0,54^{-1}$ gegenüber $0,4 \text{ h}^{-1}$) 5 % höher als bei den anderen Systemen (Kap. 4.1).

5.1.2.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten in Tabelle 14 und Tabelle 15 beziehen sich auf folgende Komponenten inklusive Montagekosten exklusive Mehrwertsteuer ohne Berücksichtigung von Förderungen oder bei dachintegrierten Kollektoren Minderkosten für den Dachanteil, der durch die Kollektoren ersetzt wird:

- 1) Solaranlage:
 - a) Dachintegrierte Kollektoren
 - b) Verrohrung: Solarrohrleitungen, Pumpen, Wärmetauscher, Armaturen, Wärmeträgermedium, Ausdehnungsgefäß, Regelung
- 2) Verteilnetz
 - a) Vor- und Rücklaufleitungen des 2-Leiternetzes
 - b) Pumpen, Ventile, Armaturen, Regelung
- 3) Wohnung
 - a) Wärmeübergabestation
 - b) dezentrale Boiler mit Wärmetauscher
 - c) Heizkörper oder Fußbodenheizung
 - d) Rohrleitungen mit Armaturen in den Wohnungen
- 4) Wärmemessung: Erstausrüstung der Wärmezähler
- 5) Wärmeerzeuger
 - a) Anschlusskosten (Leitung geht direkt am Haus vorbei) bei Gaskesseln
 - b) Rauchfang für Heizkessel
 - c) Kessel bzw. Wärmepumpe, bei Pellets mit Pelletsförderanlage und Lagerraum, bei Solewärmepumpe mit Solekreis
- 6) Pufferspeicher bzw. Trinkwasserspeicher mit Isolierung

Die Investitionskosten für die Verteilnetze, Wärmeübergabestationen, dezentralen Boiler, Wärmemessung, Heizkörper, Solarkollektoren mit Verrohrung, Pufferspeicher mit Isolierung und die Anschlusskosten für Gaskessel wurden dem Haus der Zukunft Projekt ‚Solarunterstützte Wärmenetze‘ (Streicher et al. 2001) entnommen.

Für die Kosten für Fußbodenheizung wurde aufgrund von Angeboten von 5 Ein- und Mehrfamilienhäusern mit etwa 40 €/m^2 angesetzt. Die Daten stammen einerseits aus dem Projekt ‚Solarunterstützte Wärmenetze‘ (Streicher et al. 2001), andererseits aus Kaltschmitt et al.

(2003) und aus einem vorliegenden Angebot für ein konkretes Bauvorhaben eines Passiv-Bürogebäudes (MIVA 2003).

Bei den Pelletskesseln stand eine Marktübersicht der Energieverwertungsagentur (EVA 2002) zur Verfügung. Sie beinhaltet Kessel verschiedener Hersteller im Leistungsbereich zwischen 10 und 22 kW. Zusätzlich lag ein Angebot für zwei konkrete Bauprojekte vor (Zelger (2003) und Pettnau (2001)). Bei Neubarth, Kaltschmitt (2000) finden sich ebenfalls Investitionskosten für Pelletskessel. Beim Pelletskessel müssen außerdem noch die Kosten für eine Förderungsanlage für Pellets berücksichtigt werden. Raumkosten für den Pelletslagerraum wurden allerdings nicht betrachtet. Hierfür standen Daten aus der EVA Marktübersicht und einem konkreten Angebot (Zelger 2003) zur Verfügung.

Für Sole-Wärmepumpen standen Preislisten der Firmen Vaillant (2001) und Paul (2002) zur Verfügung, außerdem Angaben aus Kaltschmitt et al. (2003) und Angebote für ein Mehrfamilien- und ein Bürogebäude (Egg (1999) und MIVA (2003)). Montagekosten wurden nach den Angaben aus Kaltschmitt et al. (2003) für die anderen Preise hochgerechnet.

Beim Solekreis wurde von einem Erd-Flachkollektor ausgegangen. Hierfür standen Angaben aus Kaltschmitt et al. (2003) und Angaben von einem Projektpartner (Firma Vaillant) zur Verfügung. Hierbei wurden von einer durchschnittlichen Wärmeleistung des Bodens von 25 W/m^2 ausgegangen. Für das Referenzgebäude 2 wurde davon ausgegangen, dass der Quadratmeterpreis durch die große Fläche etwas niedriger liegt als beim Referenzgebäude 1.

Die Investitionskosten für einen Rauchfang wurden aus vorhandenen konkreten Angeboten abgeschätzt und von am Projekt teilnehmenden Firmen bestätigt.

Die Investitionskosten für die Lüftungsverrohrung, die Abluftwärmepumpe, den Erdreich-wärmetauscher für die Lüftungsanlage und die Abluftwärmepumpe selbst wurde aus vorliegenden Angeboten (Egg (1999)) ermittelt und von den am Projekt teilnehmenden Firmen bestätigt. Eine Abschätzung von Kosten für Wärmepumpenheizungen findet sich auch bei Afjei (2000). Die in Tabelle 14 angegebenen Werte gelten jeweils für drei Geräte, da es sich hier um dezentrale Geräte handelt. Das heißt, es wird für jede Wohneinheit ein Gerät benötigt.

Beim Einsatz eines Luftheizungssystems ist im Gegensatz zu den wassergeführten Systemen bautechnisch die Forderung einer erhöhten Luftdichtheit ($n_{50} < 0,6$) zu erfüllen, da sonst ein unzulässig hoher Anteil des Luftwechsels an der Lüftungsanlage und damit an der Wärmerückgewinnung und der Luftnachheizung vorbei geführt wird. Um diese möglichen Mehrkosten für dieses Heizsystem zu erfassen, wurde unter mehreren österreichischen Experten, die anerkanntermaßen Erfahrung im Passivhausbau haben, eine telefonische Umfrage durchgeführt. Gefragt wurde nach den Mehrkosten für:

1. die Planung der Luftdichtheit eines Einfamilienhauses, um $n_{50} < 0,6$ zu erreichen
2. den erhöhten Bauaufsichtsaufwand, den ein Architekt oder Baumeister hat

Zusammengefasst kann das Ergebnis der Befragungen wie folgt dargestellt werden:

1. Planungsmehraufwand

Der Planungsmehraufwand beim Holzbau ist praktisch Null, da aus bauphysikalischer Sicht die Luftdichtheit sowieso nötig ist, um Feuchteschäden zu vermeiden. Beim Massivbau muss beim Einstieg als Planer in die Passivhaustechnologie bei den ersten Projekten mit einem Mehraufwand von bis zu maximal 30% gerechnet werden, nach einigen durchgeführten Pro-

jekten pendelt sich der Mehraufwand praktisch vernachlässigbaren Größenordnungen ein. Die konkreten Angaben der Experten lagen bei „ca. 2%“ bzw. einem Tag Planungsmehraufwand.

2. Bauaufsichtsmehraufwand

Der Bauaufsichtsmehraufwand beim Holzbau ist natürlich auch hier praktisch Null. Beim Massivbau muss ebenfalls unterschieden werden zwischen den ersten Projekten der Beteiligten und dem Routinefall. Beim Einstieg in die Passivhaustechnologie wurden Mehraufwände für die Bauaufsicht von „plus 15%“ für den Architekten bzw. „plus 150%“ für den Baupolier genannt. Für den Routinefall wurden keine Mehrkosten mehr nach rund 3 Projekten angegeben bzw. bis zu „plus 2%“ oder „ein Tag“.

Tabelle 14: Eckdaten und Investitionskosten für das Referenzgebäude 1

		3 WE (120 m ² pro WE)							
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	Luft mS	Luft oS	
Eckdaten:	Bruttofläche Solar	30	0	30	0	0	21	0	m ²
	Solar Ertrag	13150	0	13120	0	0	8463	0	kWh/a
	Nachheizenergie	29709	45373	24983	36700	7920	4916	9895	kWh/a
	Solarer Deckungsgrad	30,7% Hzg. + WW		34,4% Hzg. + WW			95,1% nur WW		
	Raumwärmebedarf	16531	16512	16541	16508	16240	17304	17501	kWh/a
	Warmwasserbedarf	8956	8956	8956	8956	8913	8900	8859	kWh/a
	Summe Wärmebedarf (ohne Verteilverluste)	25487	25468	25497	25464	25153	26204	26360	kWh/a
	Energieform für Zusatzenergie:	Pellets	Pellets	Gas	Gas	WP	WP	WP	
Solaranlage:	Solar Kollektor	7650		7650			5355		EUR
	Solar Verrohrung	3000		3000			4500		EUR
	Investitionskosten Solaranlage	10.650	0	10.650	0	0	9.855	0	EUR
Verteilnetz:	Heizung (VL, RL)	1380	1380	1380	1380	1380			EUR
	Pumpen/Ventile/Armaturen/Regelung	2650	2650	2650	2650	2940			EUR
	Investitionskosten Verteilnetz	4.030	4.030	4.030	4.030	4.320			EUR
Wohnungen:	Wärmeübergabestation dezentrale Boiler inkl. WT	3780	3780	3780	3780				EUR
	Heizkörper/Fussbodenheizung	3640	3640	3640	3640	6440			EUR
	Rohrleitung in den Wohnungen	3400	3400	3400	3400	14400			EUR
	Investitionskosten Wohnungen	10.820	10.820	10.820	10.820	20.840	1.000	1.000	EUR
	Investitionskosten Lüftungsanlage						4.800	4.800	EUR
	Investitionskosten EWT						3.700	3.700	EUR
	Planungsmehraufwand für Passivhäuser						1.000	1.000	EUR
Wärmemessung:	Erstausrüstung der Wärmezähler	794	794	794	794	794	0	0	EUR
	Investitionskosten Wärmemessung:	794	794	794	794	794	0	0	EUR
Wärmeerzeuger:	Anschlusskosten (Leitung geht direkt am Wohnhaus vorbei)	0	0	3600	3600	0			EUR
	Investitionskosten Rauchfang	2000	2000	2000	2000	0			EUR
	Investitionskosten Kessel bei Gaskessel kein Brennwertgerät altern. Wärmeübergabestation, Hydraulik, Montage und Inbetriebnahme	9600	9600	8300	8300	0			EUR
	Investitionskosten Kessel	11.600	11.600	13.900	13.900	0	0	0	EUR
	Investitionskosten Wärmepumpe					10.000	23.700	23.700	EUR
	Investitionskosten Solekreis					4.300			EUR
Pufferspeicher	Investitionskosten Pufferspeicher	2.500	1.000	2.500	1.000	0	9.000	8.400	EUR
	Gesamtinvestitionskosten	40.394	28.244	42.694	30.544	40.254	53.055	42.600	EUR

Schlussfolgerung:

Da es im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht sinnvoll erscheint, die „Einstiegsprobleme“ zu bewerten, bleiben letztendlich nur marginale Größenordnungen, die sich (wie auch mehrfach bei der Umfrage erwähnt) als Kosten für den Endkunden nicht gesondert niederschlagen. Der Luftdichtheitstest ist letztendlich der einzige Kostenpunkt, der

für das PH mit dem Luftheizsystem als heizsystembedingte Mehrkosten in einer Höhe von 1000,- EUR inkl. Bauaufsichtsaufwand berücksichtigt wird.

Tabelle 15: Eckdaten und Investitionskosten für das Referenzgebäude 2

		12 WE (77.5 m ² pro WE)					
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	
Eckdaten:	Bruttofläche Solar	70	0	70	0	0	m ²
	Solar Ertrag	29950	0	29830			kWh/a
	Nachheizenergie	71182	105055	58799	88608	23110	kWh/a
	Solarer Deckungsgrad bezogen auf	29,6% Hzg. + WW		33,7% Hzg. + WW			
	Raumwärmebedarf	39799	39837	39790	39841	40030	kWh/a
Warmwasserbedarf	25370	25370	25370	25370	25240	kWh/a	
Summe Wärmebedarf (ohne Verteilverluste)	65169	65207	65160	65211	65270	kWh/a	
Energieform für Zusatzenergie:		Pellets	Pellets	Gas	Gas	WP	
Solaranlage:	Solar Kollektor	16800	0	16800	0	0	EUR
	Solar Verrohrung	6000	0	6000	0	0	EUR
	Investitionskosten Solaranlage	22.800	0	22.800	0	0	EUR
Verteilnetz:	Heizung (VL, RL)	1810	1810	1810	1810	1810	EUR
	Pumpen/Ventile/Armaturen/Regelung	3546	3546	3546	3546	5180	EUR
	Investitionskosten Verteilnetz	5.356	5.356	5.356	5.356	6.990	EUR
Wohnungen:	Wärmeübergabestation dezentrale Boiler inkl. WT	14767	14767	14767	14767	25760	EUR
	Heizkörper/Fussbodenheizung	12598	12598	12598	12598	37200	EUR
	Rohrleitung in den Wohnungen	5764	5764	5764	5764	0	EUR
	Investitionskosten Wohnungen	33.129	33.129	33.129	33.129	62.960	EUR
	Investitionskosten Lüftungsverrohrung						EUR
	Investitionskosten EWT						EUR
	Planungsmehraufwand für Passivhäuser						EUR
Wärmemessung:	Erstausrüstung der Wärmezähler	3.050	3.050	3.050	3.050	3.050	EUR
	Investitionskosten Wärmemessung:	3.050	3.050	3.050	3.050	3.050	EUR
Wärmeerzeuger:	Anschlusskosten (Leitung geht direkt am Wohnhaus vorbei)	0	0	3600	3600	0	EUR
	Investitionskosten Rauchfang	3000	3000	3000	3000	0	EUR
	Investitionskosten Kessel bei Gaskessel kein Brennwertgerät altern. Wärmeübergabestation, Hydraulik, Montage und Inbetriebnahme	14500	14500	12000	12000	0	EUR
	Investitionskosten Kessel	17.500	17.500	18.600	18.600	0	EUR
	Investitionskosten Wärmepumpe					14.000	EUR
	Investitionskosten Solekreis					7.500	EUR
Pufferspeicher	Investitionskosten Pufferspeicher	3.500	1.200	3.500	1.200	0	EUR
Gesamtinvestitionskosten		85.336	60.236	86.436	61.336	94.500	EUR

5.1.2.3 Annuitätenfaktoren und Kapitalkosten

Für die Bestimmung der Kapitalkosten sind zunächst die allgemeinen Rahmenbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung detailliert zu erfassen und festzulegen. Es wird von einer realen - also um die Inflationsrate bereinigten – Diskontrate i in Höhe von 4,5 % ausgegangen (entspricht der über 35 Jahre gemittelten Diskontrate in Österreich (ÖNB, 2000)).

Da einige Kostenpunkte aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Investitionskosten und unterschiedlichen Nutzungsdauern zusammengesetzt sind, wird eine gewichtete Nutzungsdauer berechnet. Mit dieser gewichteten Nutzungsdauer wird dann wiederum der gewichtete Annuitätenfaktor berechnet.

$$\text{gewichtete Nutzungsdauer} = \frac{\text{InvestKostenKomp1} * \text{LebensdauerKomp1} + \text{InvestKostenKomp2} * \text{LebensdauerKomp2} + \dots}{\text{Summe der InvesKosten aller Komponenten}}$$

$$\text{gewichteter Annuitätenfaktor} = \frac{(1+i)^{\text{gewichtete Nutzungsdauer}} * i}{(1+i)^{\text{gewichtete Nutzungsdauer}} - 1}$$

i.....realer Zinssatz

Mit diesem gewichteten Annuitätenfaktor werden dann die jährlichen Kapitalkosten der verschiedenen Komponenten berechnet.

In Tabelle 16 ist die jeweilige Nutzungsdauer für die verschiedenen Komponenten sowie der daraus resultierende Annuitätenfaktor dargestellt.

Tabelle 16: Nutzungsdauern und Annuitätenfaktoren für die verschiedenen betrachteten Systeme

Allgemeine Parameter	3 WE						12 WE					
	Pellets m.S.	Pellets o.S.	Gas m.S.	Gas o.S.	Sole-WP	Luft m.S.	Luft o.S.	Pellets m.S.	Pellets o.S.	Gas m.S.	Gas o.S.	Sole-WP
realer Zinssatz (kalk Zinssatz) ir	4,5% Über 35 Jahre gemittelter Diskontsatz in Österreich /ÖNB 2000/											
Nutzungsdauer Solaranlage:												
Kollektor	20	VDI 204 (Koll, Regelung)										
Verrohrung	30	VDI 204 (Verrohrung, Kleinmaterial, Armaturen)										
gewichtete Nutzungsdauer Solaranlage	22,82		22,82			24,57		22,63	0,00	22,63	0,00	0,00
gewichtete Annuitätenfaktor	0,071		0,071			0,068		0,071	0,000	0,071	0,000	0,000
Nutzungsdauer Verteilnetz:												
Heizung (VL, RL)	40	VDI 2067										
Pumpen/Ventile/Armaturen/Regelung	15	VDI 2067										
gewichtete Nutzungsdauer Verteilnetz	23,56	23,56	23,56	23,56	22,99			23,45	23,45	23,45	23,45	21,47
gewichtete Annuitätenfaktor	0,070	0,070	0,070	0,070	0,071			0,070	0,070	0,070	0,070	0,074
Nutzungsdauer Wohnungskomponenten:												
Wärmeübergabestation	20	VDI 2067										
dezentrale Boiler inkl. WT	15	VDI 2067										
Heizkörper/Fußbodenheizung	20	VDI 2067										
Rohrleitung in den Wohnungen	30	VDI 2067										
gewichtete Nutzungsdauer Wohnungskomponenten:	23,14	23,14	23,14	23,14	18,45			21,74	21,74	21,74	21,74	17,95
gewichtete Annuitätenfaktor	0,070	0,070	0,070	0,070	0,081			0,073	0,073	0,073	0,073	0,082
Nutzungsdauer Wärmeübergabe:						Nutzungsdauer Wärmepumpe:						
Wärmeübergabekomponenten	15	VDI 2067				18	VDI 2067					
Annuitätenfaktor	0,093					0,082						
Nutzungsdauer Wärmemessgeräte:						Nutzungsdauer Solekreis:						
Wärmemessgeräte	25	VDI 2067				20	VDI 2067					
Annuitätenfaktor	0,067					0,077						
Nutzungsdauer Kessel:						Nutzungsdauer Lüftungsanlagen:						
Kessel	15	VDI 2067				15	Lüftungsanlagen RAVEL					
Annuitätenfaktor	0,093					0,093						
Nutzungsdauer Pufferspeicher:						Planungsmehraufwand:						
Pufferspeicher	25	VDI 2067				50	Nutzungsdauer Gebäude VDI 2067					
Annuitätenfaktor	0,067					0,051						

Als nächster Schritt werden die Kapitalkosten aus den Investitionskosten mithilfe der jeweiligen Annuitätenfaktoren der jeweiligen Kostengruppe berechnet (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19).

5.1.2.4 Betriebsgebundene Kosten

Die betriebsgebundenen Kosten bestehen aus Wartung und Instandhaltung der einzelnen Komponenten sowie Rauchfangkehrerkosten. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung sind nach VDI 2067:1999 und einem Leitfaden vom Schweizer Bundesamt für Konjunkturfragen (Müller und Walter, 1992) als Anteil zwischen 1 und 3,5% (je nach Art der Komponente) der Investitionskosten veranschlagt worden. Die Rauchfangkehrerkosten sind aus (Streicher et al. (2001)). Die betriebsgebundenen Kosten für die einzelnen Komponenten sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgelistet.

5.1.2.5 Kosten der Heizkostenabrechnung

Bei zentralen Systemen mit 2-Leiter Netz müssen außerdem noch Kosten für die Wärmemessung, d.h. für die Aufteilung der Heizkosten auf die einzelnen Wohneinheiten berücksichtigt werden.

In der Tabelle 17 sind die Wärmeabrechnungskosten für ein 2-Leiter Netz und die Kosten für die Erstausrüstung der notwendigen Komponenten angeführt. Bei 2-Leiter Netzen benötigt man einen Wärmemengenzähler pro Wohneinheit für die Erfassung von Heiz- und Warmwasserenergiebedarf. Die Kosten für die Wärmemessung bestehen aus einem Investitionsanteil und den jährlichen Abrechnungskosten. Sie sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 17: Kosten Wärmeabrechnung

Heizkostenabrechnung 2 Leiternetz, Ermittlung des Energiebedarfs mittels WMZ			
		3 WE	12 WE
Leistung	kW	20,00	40,00
Anzahl der Wohneinheiten		3,00	12,00
Nutzfläche	m ²	360,00	930,00
Erstausrüstung:			
Wärmemengenzähler (Aufputz)	Preis pro Stück	160	160
Einbauset	Preis pro Stück	17	17
Beglaubigungsgebühr	Preis pro Stück	54	54
Kosten für die WMZ	Preis pro Haus	697	2.789
Weg und Fahrzeitpauschale (1 Einheit)	einmalige Gebühr	42	42
WMZ - Zählereinbau	Preis pro Stück	18	18
Kosten für WMZ - Einbau	Preis pro Haus	55	219
Gesamtkosten der Erstausrüstung für Heizkostenermittlung		794	3.050
Abrechnungskosten			
Grundgebühr pro Gebäude	Preis pro Jahr und Haus	21	21
Grundgebühr pro Wärmeabnehmer	Preis pro Stück	3	3
Wärmemengenzähler	Preis pro Stück	7	7
Energieermittlung und Trennung des Warmwasseranteils	Preis pro Jahr und Haus	16	16
Weg und Fahrzeitpauschale (1 Einheit)	Preis pro Jahr und Haus	42	42
Anlage- und Versandkosten	Preis pro Jahr und Haus	5	5
Zwischensumme		114	204
Geräte Erneuerungs- und Eichpauschale	Preis pro Stück	44	44
Abrechnungskosten gesamt		246	731
Abrechnungskosten pro Wohnung und Jahr		82	61
		EUR/Wohnung	

Tabelle 18: Betriebsgebundene und Kapitalkosten für das Referenzgebäude 1

		3 WE (120 m ² pro WE)							
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	Luft mS	Luft oS	
Betriebsgebundene	Investitionskosten Solaranlage	10650	0	10650	0	0	9855	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung Solar	2	2	2	2	2	2	2	%
Kosten	Wartung, Instandhaltung Solar	213	0	213	0	0	197	0	EUR/a
	Kapitalkosten Solar	756	0	756	0	0	671	0	EUR/a
Kapitalkosten									
	Investitionskosten Verteilnetz	4030	4030	4030	4030	4320	0	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2			%
	Wartung, Instandhaltung Verteilnetz	81	81	81	81	86			EUR/a
	Kapitalkosten Verteilnetz	281	281	281	281	305			EUR/a
	Investitionskosten Wohnungscomponenten	10820	10820	10820	10820	20840	1000	1000	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2	2	2	%
	Wartung, Instandhaltung Wohnungscomponenten	216	216	216	216	417	20	20	EUR/a
	Kapitalkosten Wohnungscomponenten	762	762	762	762	1.686	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Lüftungsanlage mit EWT	0	0	0	0	0	8500	8500	EUR
	Wartung, Instandhaltung	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	%
	Wartung, Instandhaltung Lüftungsanlage	0	0	0	0	0	298	298	EUR/a
	Kapitalkosten Lüftungsanlage	0	0	0	0	0	791	791	EUR/a
	Investitionskosten Wärmemessung	794	794	794	794	794	0	0	EUR
	Kapitalkosten Wärmemessung	54	54	54	54	54			EUR/a
	Abrechnungskosten	246	246	246	246	246			EUR/a
	Investitionskosten Planungsmehraufwand	0	0	0	0	0	1000	1000	EUR
	Kapitalkosten Planungsmehraufwand	0	0	0	0	0	51	51	EUR/a
	Investitionskosten Kessel	9600	9600	8300	8300	0	0	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	1	1	1	1	1	1	1	%
	Wartung, Instandhaltung	96	96	83	83	0	0	0	EUR/a
	Rauchfangkehrer	117	117	117	117	0	0	0	EUR/a
	Kapitalkosten Kessel	894	894	773	773	0	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Wärmepumpe	0	0	0	0	10000	23700	23700	EUR
	Wartung, Instandhaltung	3	3	3	3	3	3	3	%
	Wartung, Instandhaltung	0	0	0	0	300	711	711	EUR/a
	Kapitalkosten Wärmepumpe	0	0	0	0	822	1.949	1.949	EUR/a
	Investitionskosten Solekreis	0	0	0	0	4300	0	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	%
	Wartung, Instandhaltung	0	0	0	0	22	0	0	EUR/a
	Kapitalkosten Solekreis	0	0	0	0	331	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Pufferspeicher	2500	1000	2500	1000	0	9000	8400	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2	2	2	%
	Wartung, Instandhaltung Pufferspeicher	50	20	50	20	0	180	168	EUR/a
	Kapitalkosten Pufferspeicher	169	67	169	67	0	607	566	EUR/a
	Summe Kapitalkosten	2.915	2.058	2.794	1.937	3.198	4.069	3.358	EUR/a
	Summe betriebsgebundene Kosten	1.019	776	1.006	763	1.071	1405,6	1196,5	EUR/a

Tabelle 19: Betriebsgebundene und Kapitalkosten für das Referenzgebäude 2

		12 WE (77.5 m ² pro WE)					
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	
Betriebsgebundene Kosten	Investitionskosten Solaranlage	22800	0	22800	0	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung Solar	2		2	2	2	%
Kapitalkosten	Wartung, Instandhaltung Solar	456	0	456	0	0	EUR/a
	Kapitalkosten Solar	1.627	0	1.627	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Verteilnetz	5356	5356	5356	5356	6990	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2	%
	Wartung, Instandhaltung Verteilnetz	107	107	107	107	140	EUR/a
	Kapitalkosten Verteilnetz	374	374	374	374	514	EUR/a
	Investitionskosten Wohnungskomponenten	33129	33129	33129	33129	62960	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2	%
	Wartung, Instandhaltung Wohnungskomponenten	663	663	663	663	1.259	EUR/a
	Kapitalkosten Wohnungskomponenten	2.420	2.420	2.420	2.420	5.186	EUR/a
	Investitionskosten Lüftungsanlage mit EWT	0	0	0	0	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	%
	Wartung, Instandhaltung Lüftungsanlage	0	0	0	0	0	EUR/a
	Kapitalkosten Lüftungsanlage	0	0	0	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Wärmemessung	3050	3050	3050	3050	3050	EUR
	Kapitalkosten Wärmemessung	206	206	206	206	206	EUR/a
	Abrechnungskosten	731	731	731	731	731	EUR/a
	Investitionskosten Planungsmehraufwand	0	0	0	0	0	EUR
	Kapitalkosten Planungsmehraufwand	0	0	0	0	0	EUR/a
	Investitionskosten Kessel	17500	17500	18600	18600	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	1	1	1	1	1	%
	Wartung, Instandhaltung	175	175	186	186	0	EUR/a
	Rauchfangkehrer	117	117	117	117	0	EUR/a
	Kapitalkosten Kessel	1.629	1.629	1.732	1.732	0	EUR/a
	Investitionskosten Wärmepumpe	0	0	0	0	14000	EUR
	Wartung, Instandhaltung	3	3	3	3	3	%
	Wartung, Instandhaltung	0	0	0	0	420	EUR/a
	Kapitalkosten Wärmepumpe	0	0	0	0	1.151	EUR/a
	Investitionskosten Solekreis	0	0	0	0	7500	EUR
	Wartung, Instandhaltung	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	%
	Wartung, Instandhaltung	0	0	0	0	38	EUR/a
	Kapitalkosten Solekreis	0	0	0	0	577	EUR/a
	Investitionskosten Pufferspeicher	3500	1200	3500	1200	0	EUR
	Wartung, Instandhaltung	2	2	2	2	2	%
	Wartung, Instandhaltung Pufferspeicher	70	24	70	24	0	EUR/a
	Kapitalkosten Pufferspeicher	236	81	236	81	0	EUR/a
Summe Kapitalkosten		6.493	4.711	6.595	4.813	7.634	EUR/a
Summe betriebsgebundene Kosten		2.319	1.817	2.330	1.828	2.587	EUR/a

5.1.2.6 Verbrauchsgebundene Kosten

Die dritte Komponente der Kosten eines Heizungssystems sind die verbrauchsgebundenen Kosten. Sie liegen bei Niedrigenergie- und Passivhäusern deutlich unter den verbrauchsgebundenen Kosten von Standardwohngebäuden. Die verbrauchsgebundenen Kosten eines Heizsystems setzen sich aus mehreren Anteilen zusammen:

- Brennstoffkosten (Pellets, Gas, etc.) bzw. Stromkosten für elektrische Heizgeräte wie Wärmepumpen oder elektrische Heizstäbe
- Kosten für Haustechnikstrom (Stromverbrauch von z.B. Brenner, Gebläse, Pumpen)
- Fixkosten für Gaszähler bzw. zusätzliche Stromzähler

Die ersten beiden Kostenarten wurden mithilfe der simulierten Laufzeiten bzw. des Brennstoffverbrauchs der einzelnen Komponenten erfasst. Die dabei verwendeten Kosten der einzelnen Energieträger sind im folgenden Abschnitt aufgeführt.

Tabelle 20 zeigt durchschnittliche Kosten für die verschiedenen Energieträger in Österreich. Die Gas- und Stromtarife wurden den Internetseiten einer Reihe von Energieversorgern¹ (Stand Herbst 2002) entnommen, der Pelletspreis stammt von, Regionalenergie Steiermark² (www.regionalenergie.at, Stand Mai 2002) für eingeblasene Holzpellets.

Tabelle 20: Kosten verschiedener Energieträger

	Energiekosten inkl. Abgaben und Steuern		Fixkosten(zus. Stromzähler, etc. inkl. Steuern
	EUR/Einheit	EUR/kWh	EUR/Jahr
Pellets (kg)	0,165	0,034	--
Erdgas (Bm ³)	0,47	0,043	60
Strom „normal“ (kWh)	0,15	0,15	--
Strom „Heizen“ (kWh)	0,10	0,10	28

Die Stromtarife schwanken stark je nach Anbieter. Häufig gibt es Tarife, die günstigen Strom für Heizung, Warmwasser oder speziell Wärmepumpen anbieten. Meistens ist der Tarif dann nachts wesentlich günstiger als tagsüber. Diese Tarife wurden gemittelt und unter dem Stichwort Strom „Heizen“ in Tabelle 20 zusammengefasst. Für die Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten wurde für Wärmepumpen der Tarif Strom „Heizen“ und für alle anderen Stromverbräuche der normale Stromtarif verwendet.

Beim Tarif „Heizen“ werden auch noch die zusätzlichen Fixkosten für einen weiteren Stromzähler berücksichtigt. Beim normalen Stromtarif wird davon ausgegangen, dass der Stromzähler für den Haushaltsstrom sowieso vorhanden ist. Deshalb werden die Kosten für den Stromzähler nicht als Zusatzkosten berücksichtigt.

Bei den Gastarifen gibt es wie auch beim Strom Förderungen oder Rabatte zum Beispiel für Brennwertgeräte und auch für bestimmte Zahlungsmodalitäten, Treue etc. Diese wurden aber zur Ermittlung des Erdgastarifs in Tabelle 20 nicht berücksichtigt. Die Fixkosten für einen Gasanschluss betragen im Durchschnitt 60 EUR im Jahr.

Die verbrauchsgebundenen Kosten für die einzelnen Systeme sind im oberen Teil von Tabelle 21 und Tabelle 22 zusammengefasst.

¹

www.grazer-stadtwerke.at	www.ooferngas.at
www.vkw.at	www.tigas.at
www.tiroler-wasserkraft.at	www.veg.at
www.kelag.at	www.begas.at
www.bewag.at	www.wiengas.at
www.energieag.at	www.linzag.at
www.salzburg-ag.at	www.steirische.ferngas.at
	www.ikb.at

5.1.2.7 Wärmegestehungskosten

Im unteren Teil von Tabelle 21 und Tabelle 22 werden nochmals die einzelnen Kostengruppen aufgelistet und die Gesamtkosten berechnet. Diese Summe an jährlichen Kosten wird dann durch den jährlichen Energiebedarf für Warmwasser und Raumheizung dividiert. Das Resultat sind die Wärmegestehungskosten pro kWh gelieferte Energie.

Tabelle 21: Verbrauchsgebundene Kosten und Wärmegestehungskosten für das Referenzgebäude 1

		3 WE (120 m ² pro WE)							
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	Luft mS	Luft oS	
verbrauchsgebundene Kosten	Energiepreis für Pellets/Gas/Strom(Heizung)	0.034	0.034	0.043	0.043	0.100	0.100	0.100	EUR/kWh
	Energieinput Pellets/Gas/WP	29709	45373	24983	36700	7920	4916	9895	kWh/a
	Fixkosten (Strom- Gaszähler etc)	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	EUR/a
	Energiekosten	1 038	1 571	1 102	1 606	820	520	1 018	EUR/a
	Energiepreis für Haustechnikstrom	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	EUR/kWh
Summe Stromkosten Haustechnik		220	118	186	112	247	192	81	EUR/a
Summe Kapitalkosten		2 915	2 058	2 794	1 937	3 198	4 069	3 358	EUR/a
Summe betriebsgebundene Kosten		1 019	776	1 006	763	1 071	1 406	1 197	EUR/a
Summe verbrauchsgebundene Kosten		1 038	1 571	1 102	1 606	820	520	1 018	EUR/a
Summe verbrauchsgebundene Kosten pro WE		346	524	367	535	273	173	339	EUR/(WE a)
Summe aller Kosten		4 972	4 405	4 903	4 306	5 089	5 994	5 572	EUR/a
Summe aller Kosten (pro m ²)		13.8	12.2	13.6	12.0	14.1	16.7	15.5	EUR/(m ² a)
Summe aller Kosten (pro WE)		1 657	1 468	1 634	1 435	1 696	1 998	1 857	EUR/(WE a)
Energieverbrauch WW + Hz (ohne Verluste)		25487	25468	25497	25464	25153	26204	26360	kWh/a
Wärmegestehungskosten		0.195	0.173	0.192	0.169	0.202	0.229	0.211	EUR/kWh

Tabelle 22: Verbrauchsgebundene Kosten und Wärmegestehungskosten für das Referenzgebäude 2

		12 WE (77.5 m ² pro WE)					
		PmS	PoS	GmS	GoS	SWP	
verbrauchsgebundene Kosten	Energiepreis für Pellets/Gas/Strom(Heizung)	0.034	0.034	0.043	0.043	0.100	EUR/kWh
	Energieinput Pellets/Gas/WP	71182	105055	58799	88608	23110	kWh/a
	Fixkosten (Strom- Gaszähler etc)	0.00	0.00	60.00	60.00	28.00	EUR/a
	Energiekosten	2 420	3 572	2 588	3 870	2 339	EUR/a
	Energiepreis für Haustechnikstrom	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	EUR/kWh
Summe Stromkosten Haustechnik		384	235	352	299	531	EUR/a
Summe Kapitalkosten		6 493	4 711	6 595	4 813	7 634	EUR/a
Summe betriebsgebundene Kosten		2 319	1 817	2 330	1 828	2 587	EUR/a
Summe verbrauchsgebundene Kosten		2 420	3 572	2 588	3 870	2 339	EUR/a
Summe verbrauchsgebundene Kosten pro WE		202	298	216	323	195	EUR/(WE a)
Summe aller Kosten		11 232	10 100	11 513	10 511	12 561	EUR/a
Summe aller Kosten (pro m ²)		12	11	12	11	14	EUR/(m ² a)
Summe aller Kosten (pro WE)		936	842	959	876	1 047	EUR/(WE a)
Energieverbrauch WW + Hz (ohne Verluste)		65169	65207	65160	65211	65270	kWh/a
Wärmegestehungskosten		0.172	0.155	0.177	0.161	0.192	EUR/kWh

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen zusammenfassend die Wärmegestehungskosten aller betrachteten Systeme für die beiden Referenzgebäude.

Die niedrigsten Wärmepreise ergeben sich unter den betrachteten Randbedingungen für die zentralen Kesselsysteme ohne Solaranlage mit ca. 18 cent/kWh für Referenzgebäude 1 und ca. 16 cent/kWh für Referenzgebäude 2. Mit Solaranlage liegen diese Systeme etwa auf dem

gleichen Niveau wie die zentrale Sole-Wärmepumpe und die dezentralen Abluftwärmepumpen ohne Solaranlage bei etwa 22 cent/kWh für das Referenzgebäude 1 und bei etwa 18-19 cent/kWh für das Referenzgebäude 2. Die dezentralen Abluftwärmepumpen mit Solaranlage liegen mit etwa 25 cent/kWh noch etwas darüber. Generell liegen die Wärmegestehungskosten beim Referenzgebäude 2 niedriger als beim Referenzgebäude 1, da hier die Investitionskosten weniger ins Gewicht fallen.

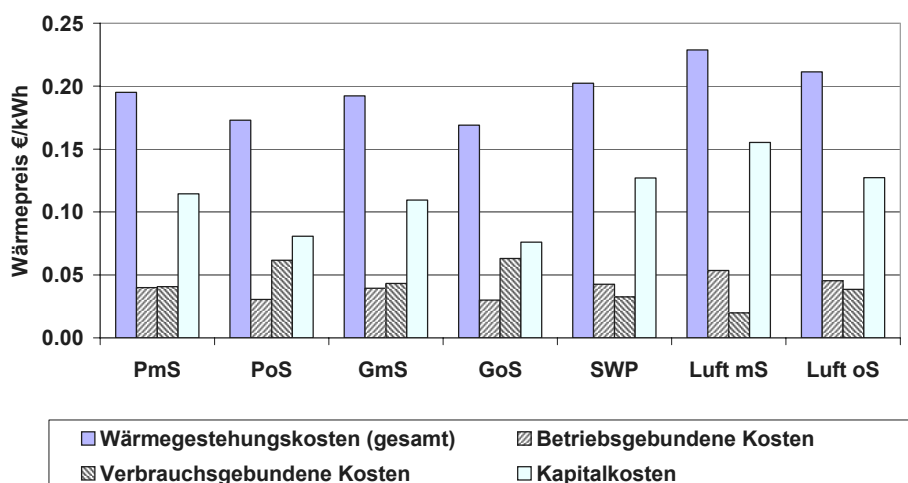


Abbildung 29: Wärmegestehungskosten pro kWh Nutzenergie für Referenzgebäude 1 bezogen auf kWh gelieferter Wärme (Heizung und Brauchwarmwasser)

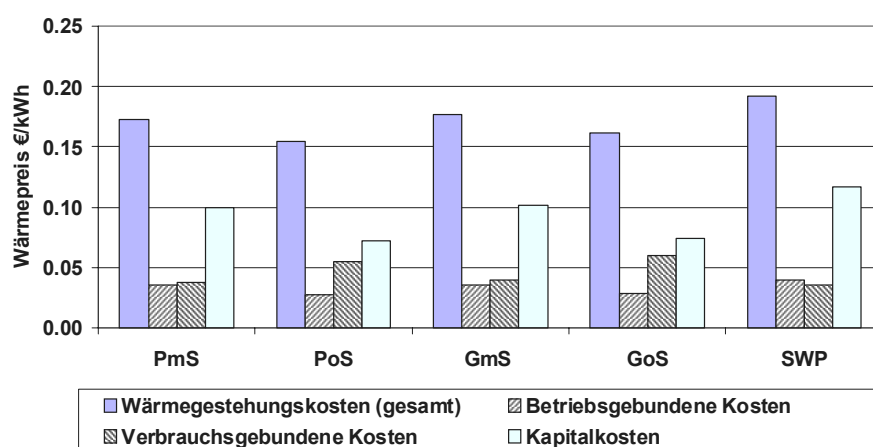


Abbildung 30: Wärmegestehungskosten pro kWh Nutzenergie für Referenzgebäude 2 bezogen auf kWh gelieferter Wärme (Heizung und Brauchwarmwasser)

Dieser Vergleich der Wärmegestehungskosten ist nur als Anhaltspunkt zu sehen. Die Investitionskosten wurden wie oben beschrieben aus verschiedenen Quellen abgeschätzt. Für ein konkretes Projekt können sie aber durchaus deutlich von den hier angenommenen Werten abweichen. Die örtlichen Gegebenheiten wie die Gebäudearchitektur beeinflussen den Aufwand für Lüftungsverrohrung, Wand- oder Fußbodenheizungen, Abgasführung und Pelletslager und Pelletsfördereinrichtung. Die Kosten der eigentlichen Systeme hängen zudem vom Hersteller, Rabatten und lokalen Förderungen ab.

5.1.3 End-, Primärenergie, CO₂-äquivalent Emissionen und Wärmegestehungskosten pro Wohnnutzfläche

Neben dem Wärmebedarf und den bereits in Kap. 5.1.2 behandelten Kosten wurde für die Beurteilung der Heizungssysteme auch der Primärenergiebedarf welcher den Wirkungsgrad der Brennstoffbereitstellung und der Stromerzeugung sowie den Materialeinsatz für Wärmeerzeuger und Speicher beinhaltet sowie die spezifische CO₂-äquivalent Emissionen (Summe aus Treibhausgasen mit Ihren spezifischen Wirkungsfaktoren CO₂ (1), CH₄ (23), N₂O (296), SF₆ (22200) ...) zur Beurteilung der Treibhausrelevanz für alle Systeme ermittelt. Hierbei wurden die folgenden Annahmen, basierend auf Gemis 4.1, 2003 (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme), zugrunde gelegt:

Stromerzeugung

Stromerzeugungsmix : EU-17 (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz)
 Kumulierter Energieaufwand (KEA): 2,710 TJ_{prim}/TJ_{Strom}
 CO₂-äquivalent Emissionen : 119 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Strom} (0,43 kg_{CO2-äquivalent}/kWh_{Strom})

Pellets-System

Bezugs-Stromerzeugungsmix : EU-17 (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz)
 Gemis Datenbasis : Holz-Pellets-Heizung D-100%, 80 % Wirkungsgrad (1,57 TJ_{prim}/TJ_{Wärme} und 22,34 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Wärme}) mit Stromerzeugung aus Netz-el-D-lokal-HH/KV (2,982 TJ_{prim}/TJ_{Strom} und 198,6 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Strom})
 Annahmen für Strommixumrechn. : ca. 1,7 % Haustechnikstrom im Betrieb (nach Simulation ohne Solaranlage), es wird ein Wert von 4 % angenommen, um den Stromanteil der Pelletsbringung und Erzeugung von 2 % (Stockinger, Obernberger, 1998) zu berücksichtigen.
 Umrechn. D-lokal auf EU-17 Mix : Der Anteil der Emissionen im Betrieb werden von Netz-el-D-lokal-HH/KV auf EU-17 CO₂ Emissionen umgerechnet. Die restlichen Emissionen aus dem Betrieb werden gleich wie im Gemis Datensatz für Deutschland angenommen. Zudem wird darauf Rücksicht genommen, dass sich die Werte in Gemis auf gelieferte Wärme beziehen, in dieser Studie jedoch bereits die eingesetzte Brennstoffenergie ermittelt wurde (Jahreswirkungsgrad Pelletskessel errechnet: 72%). Damit ergeben sich die folgenden Ergebnisse für das hier betrachtete Pellets-System
 Kumulierter Energieaufwand (KEA): 1,25 TJ_{prim}/TJ_{Pellets}
 CO₂-äquiv. Emissionen : 17,6 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Pellets} (0,063 kg_{CO2-äquivalent}/kWh_{Pellets})

Gaskessel-System

Bezugs-Stromerzeugungsmix : EU-17 (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz)
 Gemis Datenbasis : Gas-Heizung atmosphärisch D, 100% Wirkungsgrad (1,17 TJ_{prim}/TJ_{Wärme} und 70,59 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Wärme}) mit Stromerzeugung aus Netz-el-D-lokal-HH/KV (2,982 TJ_{prim}/TJ_{Strom} und 198,6 kg_{CO2-äquivalent}/GJ_{Strom})

- Annahmen für Strommixumrechn. : ca. 1 % Haustechnikstrom in Betrieb (nach Simulation ohne Solaranlage) und Anteil der Emissionen bei Bau der Anlage (sehr gering nach Neubarth, Kaltschmitt, 2000)
- Umrechn. D-100 auf EU-17 Mix : Da kaum Strom bei Bau und Betrieb anfällt, wird auf eine Umrechnung verzichtet. Da ein Datensatz von GEMIS mit 100 % Wirkungsgrad eingesetzt wurde, besteht auch kein Unterschied zur in dieser Studie verwendeten eingesetzten Brennstoffenergie. Der Jahreswirkungsgrad des Gaskessels wurde mit 89% errechnet. Damit ergeben sich die folgenden Ergebnisse für das hier betrachtete Gas-System
- Kumulierter Energieaufwand (KEA): $1,17 \text{ TJ}_{\text{prim}}/\text{TJ}_{\text{Gas}}$
 $\text{CO}_2\text{-äquiv. Emissionen}$: $70,6 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{GJ}_{\text{Gas}}$
 ($0,25 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{kWh}_{\text{Gas}}$)

Wärmepumpensysteme

- Bezugs-Stromerzeugungsmix : EU-17 (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz)
 Anteil $\text{CO}_2\text{-äquiv. Emis. für Bau}$: ca. 5 % (Neubarth, Kaltschmitt, 2000)
 Berechnung System : Es werden sowohl dem Primärenergiebedarf als auch den Emissionen 5 % als Anteil für den Bau der Wärmepumpenanlage auf die Werte für die Stromerzeugung der EU-17 hinzugerechnet. Damit ergeben sich die folgenden Ergebnisse für die hier betrachteten Wärmepumpensysteme
- Sole WP (System 6)
 Kumulierter Energieaufwand (KEA): $2,85 \text{ TJ}_{\text{prim}}/\text{TJ}_{\text{Strom}}$
 $\text{CO}_2\text{-äquiv. Emissionen}$: $125 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{GJ}_{\text{Strom}}$
 ($0,45 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$)

Dezentral Luft/Luft/Wasser WP (System 1)

- Kumulierter Energieaufwand (KEA): $2,85 \text{ TJ}_{\text{prim}}/\text{TJ}_{\text{Strom}}$
 $\text{CO}_2\text{-äquiv. Emissionen}$: $125 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{GJ}_{\text{Strom}}$
 ($0,45 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$)

Solaranlage

- Bezugs-Stromerzeugungsmix : EU-17 (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz)
 Anteil $\text{CO}_2\text{-äquiv. Emis. für Bau}$: ca. 50 % (Neubarth, Kaltschmitt, 2000)
 Berechnung System : Die $\text{CO}_2\text{-äquiv.}$ -Emissionen aus dem errechneten Strombedarf für die Solaranlage werden zur Berücksichtigung des Baus der Solaranlage verdoppelt und dem Haustechnikstrom zugeschlagen. Sie liegen aber mit ca. $0,3 - 0,4 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-äquiv.}} \text{ Emissionen } /(\text{m}^2\text{a})$ sehr niedrig.

In der Betrachtung des Primärenergiebedarfs wurde der Haustechnikstrom berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wurden bei der Materialbilanz die Wärmeverteilsysteme, da hier keine Daten gefunden werden konnten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Verhältnisse

der Anlagen zueinander kaum ändern werden, da die Wasserverteilungen bei den zentralen Systemen zwar länger, aber weniger materialintensiv als die Luftkanäle bei den dezentralen Systemen sind.

Abbildung 31 zeigt einen Vergleich der vier untersuchten Systeme in Bezug auf Endenergie, Primärenergie, CO_2 -äquivalent-Emissionen und Wärmegestehungskosten vorerst ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms, um die reinen Heizungssysteme miteinander vergleichen zu können. Während der Endenergiebedarf bereits oben diskutiert wurde, werden die Ergebnisse der anderen Kriterien im Folgenden kommentiert.

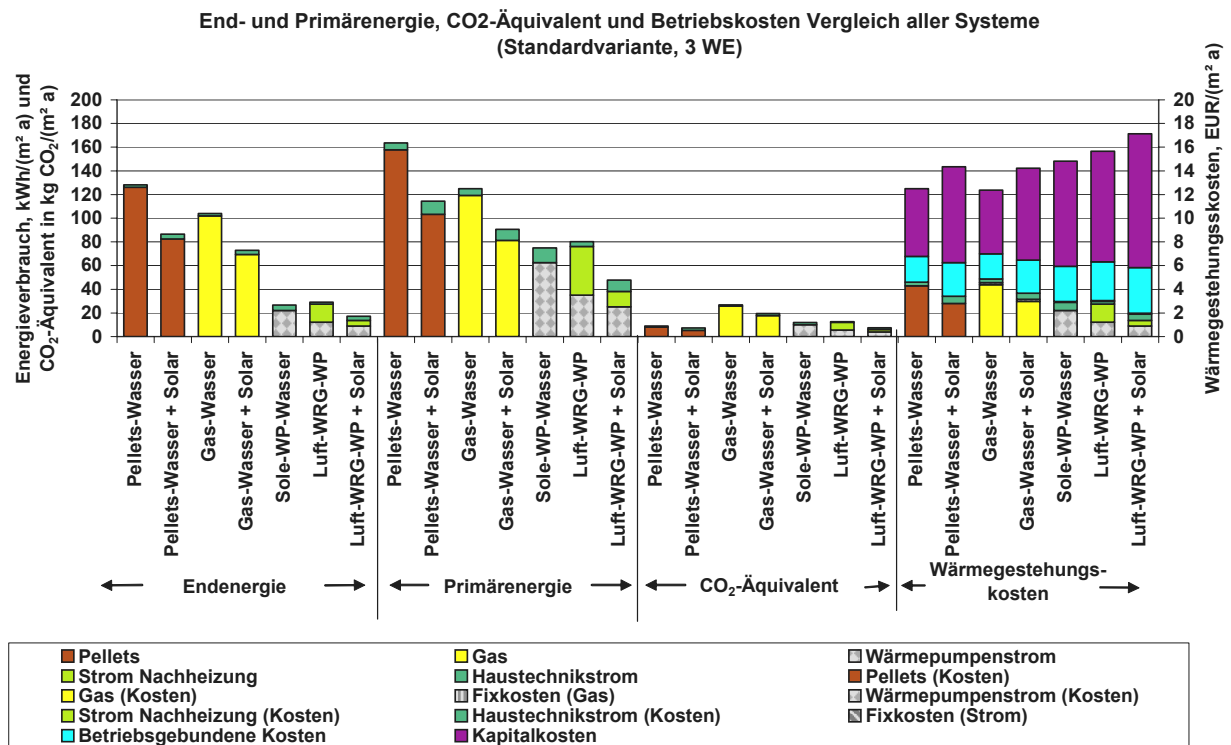


Abbildung 31: End- und Primärenergiebedarf, CO_2 -äquivalent-Emissionen sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme **ohne Haushaltsstrom** (Standardvariante, Referenzgebäude 1, 3 WE)

Primärenergiebedarf

Vergleicht man die Systeme mit dem Passivhaus-Kriterium Gesamt-Primärenergiebedarf unter $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (vgl. Kap. 1.3) so wird wiederum ersichtlich, dass die Wärmepumpensysteme und hier insbesondere die dezentralen Luft/Luft/Wasser-Systeme gekoppelt mit Solaranlage sowie ev. das System Gas-Wasser + Solar dieses Kriterium erreichen können (sofern der Haushaltsstrom nicht zu hoch ist). Bei zentralen Systemen auf Basis Heizkessel kann der Primärenergiebedarf durch den Einsatz einer Solaranlage verringert werden (sofern die Solarenergie nicht zur Primärenergie hinzugerechnet wird).

CO_2 -äquivalent-Emissionen

Ein ganz anderes Bild ergibt sich bei den CO_2 -äquivalent-Emissionen. Hier sind die niedrigsten Werte beim Pelletssystem zu finden, da Biomasse an sich CO_2 -neutral ist und nur bei der Holzbringung, der Pelletserzeugung und der Kesselherstellung CO_2 -äquivalent-Emissionen anfallen. Eine Koppelung des Pelletssystems mit einer Solaranlage bringt bzgl. der CO_2 -äquivalent-Emissionen kaum eine Verringerung, da zwar Pellets eingespart werden, jedoch

die Solaranlage elektrischen Strom für den Betrieb der Umwälzpumpen benötigt und zusätzlich der Materialeinsatz steigt. Auf etwa gleich geringe Werte kommt das dezentrale Luft/Luft/Wasser-System gekoppelt mit einer Solaranlage. Die höchsten Werte hat das System mit Gaskessel. Sole-Wärmepumpe und dezentrales Luft/Luft/Wasser-System ohne Solaranlage liegen etwa gleichauf und etwa 60 % über dem Pelletssystem.

Wärmegestehungskosten

Aufgrund der geringeren Kosten von Pellets gegenüber Erdgas liegen die Systeme Pellets und Gas trotz des höheren Endenergiebedarfs von Pellets auf gleicher Höhe. Die Kapitalkosten sind aufgrund der Gasanschlusskosten in etwa gleich hoch. Durch die Solaranlage erhöhen sich die Kapitalkosten beider Anlagen. Die Betriebskosten der zentralen Sole-Wärmepumpe liegen unter den Werten der Kessel-Varianten mit Solaranlage. Unter Berücksichtigung der Kapitalkosten ergeben sich jedoch höhere Wärmegestehungskosten als bei den Kesselvarianten mit Solaranlage. Die dezentralen Luft/Luft/Wasser-Systeme schneiden aufgrund der Nachheizung von Zuluft und Brauchwarmwasser über E-Patronen trotz Abluftwärmerückgewinnung in den Betriebskosten ähnlich ab, wie die Sole-Wärmepumpe. Die Kapitalkosten sind aufgrund der Kosten für die Luftverteilung jedoch wiederum höher. Allerdings wird hierbei auch eine kontrollierte Lüftungsanlage mitgeliefert, welche bei den anderen Systemen separat zugekauft werden müsste.

Wird eine Solaranlage mit dem dezentralen Luft/Luft/Wasser-System gekoppelt, so sinken die Betriebskosten aufgrund des reduzierten Strombedarfs für die Wärmepumpe und die E-Patrone für die Warmwasserbereitung auf den geringsten Wert aller betrachteten Systeme. Es ergeben sich jedoch aufgrund des hohen Anlagenaufwandes die höchsten Wärmegestehungskosten

Generell erscheint bei allen Vergleichen das dezentrale Luft/Luft/Wasser-System mit Abluftwärmerückgewinnung, Erdreichwärmetauscher und Solaranlage bei den energetischen und Emissionsvergleichen sehr günstig. Es hat jedoch aufgrund hoher Investitionskosten die höchsten Wärmegestehungskosten.

End und Primärenergiebilanz mit Haushaltsstrom

In Abbildung 32 ist End- und Primärenergiebilanz nochmals, diesmal aber mit dem Haushaltsstrom angeführt, um die Erreichung der Passivhauskriterien von 42 kWh/(m²a) Endenergiebedarf bzw. 120 kWh/(m²a) Primärenergiebedarf zu überprüfen. Der Haushaltsstrom wurde hierbei für die beiden linken Blöcke so angenommen, wie in dieser Studie aufgrund der Messungen im Projekt CEPHEUS (2001) ermittelt (3,3 W/m²) und für die beiden rechten Blöcke mit dem Wert belegt, den Feist in seinem Passivhaus Projektierungspaket (PHPP 1999) vorgibt (2,1 W/m²).

Der in den bisherigen Passivhaus-Kriterien aufgestellt Zielwert von 42 kWh/(m²a) für den gesamten Endenergiebedarf des Gebäudes wird nur unter Zugrundelegung des in CEPHEUS (2001) gemessenen Haushaltsstroms für keines der untersuchten Systeme erreicht. Wird der in (PHPP 1999) angenommene Wert für den Haushaltsstrom eingesetzt so können beiden Wärmepumpensysteme den Zielwert erfüllen. Beim Primärenergiebedarf ergibt sich ein ähnliches Bild. Man erkennt deutlich den hohen Einfluss den der Haushaltsstrom und damit energieeffiziente Haushaltsgeräte auf den Gesamtenergiebedarf von Gebäude haben.

Der Überlegung, dass dem Gebäude das Nutzerverhalten bzgl. Haushaltgeräte nicht angelastet werden kann, wurde auch in den neuesten Passivhaus-Förderkriterien von der deutschen Kreditanstalt für Wiederaufbau Rechnung (Mai 2003) getragen. Als Nachweisverfahren dient

jetzt das Passivhaus Projektierungs- Paket PHPP (Neuaufgabe 2003) und nicht mehr die Passivhaus-Vorprojektierung (PHVP). Nachzuweisen sind der Jahres-Heizwärmebedarf von max. 15 kWh/(m²a), Energiebezugsfläche hierfür ist die Wohnfläche innerhalb der thermischen Hülle (zur genauen Definition siehe PHPP, Feist 2001) und – das ist neu - der Jahresprimärenergiebedarf von max. 40 kWh/(m²a), Bezugsfläche hierfür ist die Gebäudenutzfläche A_N nach Energieeinsparverordnung (EnEV). Im Jahresprimärenergiebedarf sind der Jahresheizwärmebedarf, der Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung, die Energieverluste des Wärmeversorgungssystems, der Hilfsenergiebedarf für Heizung und Brauchwarmwasserbereitung sowie der Energieverbrauch für die Bereitstellung der Energieträger enthalten. Nicht enthalten ist der Primärenergiebedarf für den Haushaltsstrom (<http://www.passiv.de>).

Dieses Kriterium wird in der vorliegenden Studie mit den hier gewählten Annahmen annähernd nur vom dezentralen Luft/Luft/Wasser-Systemegekoppelt mit Solaranlage erreicht. Allerdings wurden andere Randbedingungen als im PHPP-Programm angenommen (z.B. Raumtemperatur von 22,5°C im Gegensatz zum PHPP-Program von 20°C, vgl. auch Tabelle 1). Daher sind die Ergebnisse nur in der Relation zueinander aber nicht absolut vergleichbar.

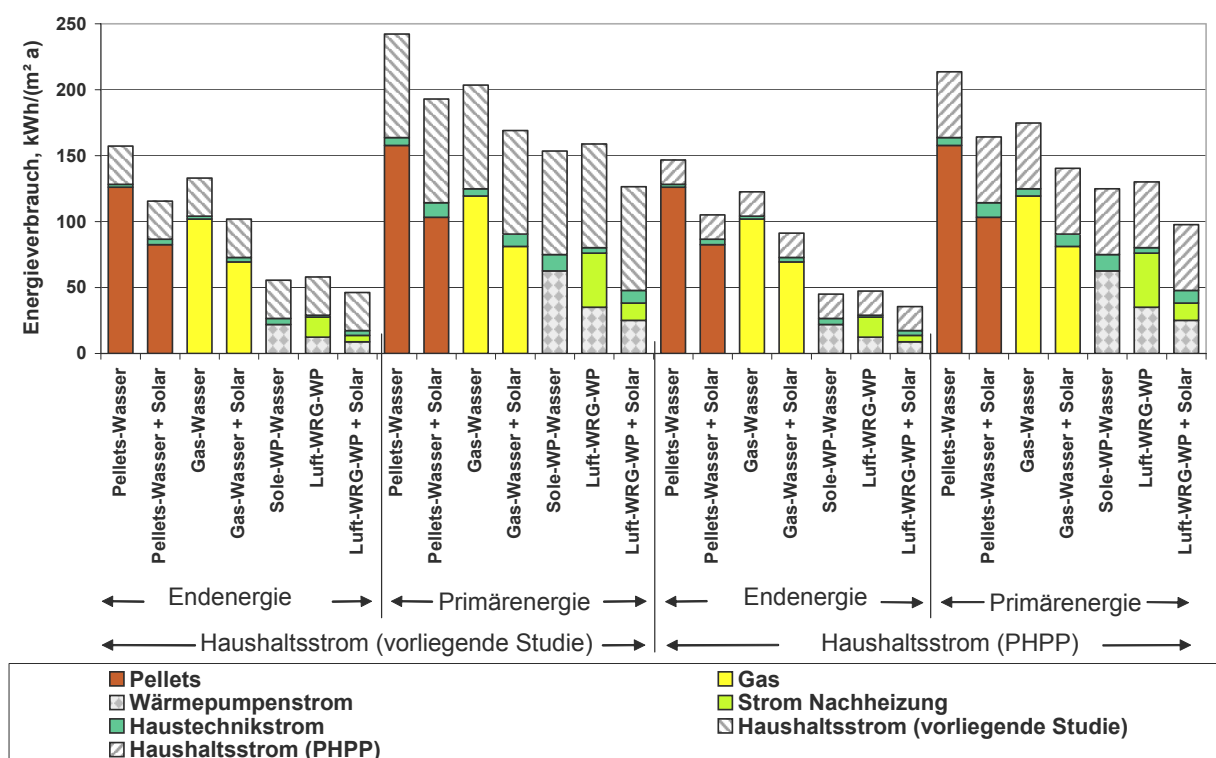


Abbildung 32: End- und Primärenergiebedarf der simulierten Heizungssysteme **mit Haushaltsstrom** nach Messung im Projekt CEPHEUS (2001) und nach Feist (PHPP, 1999) (Standardvariante, Referenzgebäude 1, 3 WE)

5.2 Extremszenarien (Referenzgebäude 1)

Mit Hilfe dieser Szenarien soll jetzt untersucht werden, wie die verschiedenen Systeme auf unterschiedliches Benutzerverhalten reagieren. Dazu werden zwei Extremszenarien definiert.

Ex 1) Randbedingungen für eine **hohe Heizlast** und geringe interne Gewinne:

Raumtemperatur 25°C

Luftwechsel „Frischluftfanatiker“ stark: Doppelter Luftwechsel ($0,8 \text{ h}^{-1}$)

Interne Lasten niedrig: 2 Personen pro WE, 3 kWh pro Tag Stromverbrauch

Warmwasserbedarf stark 50 l/(d Pers 60°C)

Ex 2) Randbedingungen für eine **niedrige Heizlast** und hohe interne Gewinne:

Raumtemperatur 20°C

Luftwechsel „Muffel“: Halber Luftwechsel ($0,2 \text{ h}^{-1}$)

Interne Lasten hoch: 6 Personen pro WE, 15 kWh pro Tag Stromverbrauch

Warmwasserbedarf niedrig 30 l/(d Pers 45°C)

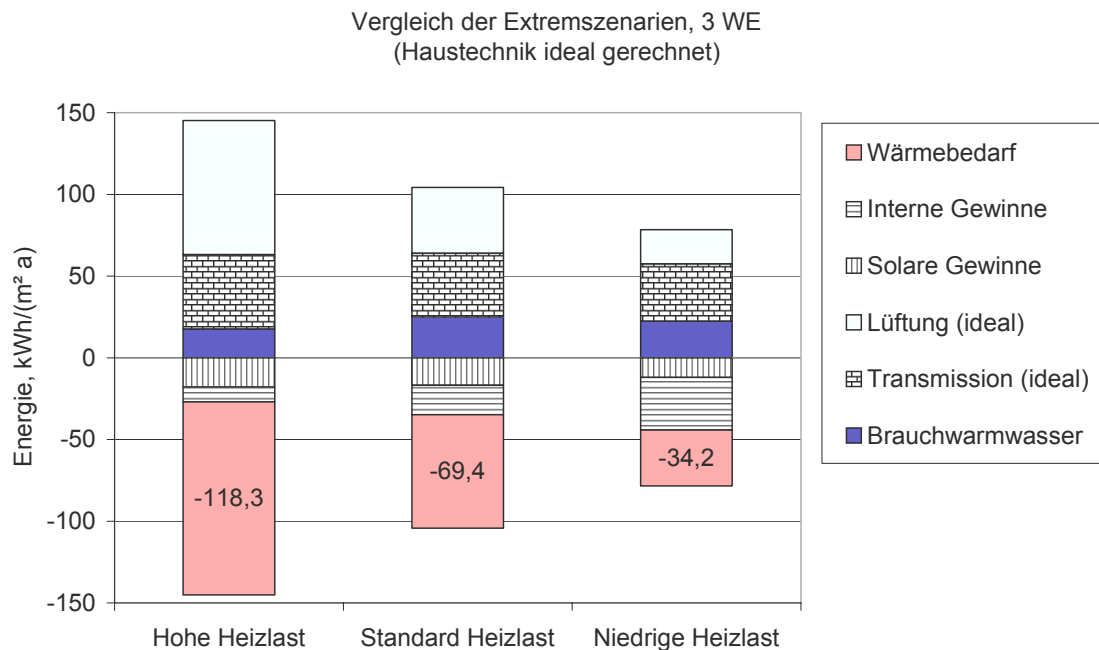


Abbildung 33: Vergleich der Extremszenarien für ideale Heizung (Referenzgebäude 1)

Abbildung 33 zeigt die Auswirkungen dieser Referenzszenarien auf die Energiebilanz des ideal beheizten Referenzgebäudes 1. Der Wärmebedarf (Heizung und Brauchwarmwasser) zwischen den beiden Extremszenarien schwankt zwischen 118 und 34 kWh/(m²a), also um den Faktor 3,5. Nimmt man den reinen Heizwärmebedarf, so ergibt sich eine Schwankungsbreite von 11,6 – 100,7 kWh/(m²a) vgl. Tabelle 1. Dies zeigt wiederum, welchen großen Einfluss das Benutzerverhalten auf den Energiebedarf solcher Niedrigstenergiegebäude hat. Neben den reinen Benutzerauswirkungen gehen die nutzbaren solaren Gewinne bei geringerem Energiebedarf des Gebäudes zurück, da das Gebäude über die relativ und absolut größeren internen Wärmegewinne bereits längere Zeit mit diesen beheizt werden kann und die passive Solarstrahlung daher nur mehr geringer zum Heizen genutzt werden kann.

Die folgenden Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen für das Referenzgebäude 1, wie sich die verschiedenen Systeme bei solchen Extremszenarien verhalten. Hierbei wurden die Wärmeerzeuger nicht verändert, sodass es bei dem Extremszenario mit hoher Heizlast zu Leistungsengpässen kommen kann. Dies entspricht der Realität, da die Heizung- und Lüftungsanlage zumeist nach Normbedingungen ausgelegt wird.

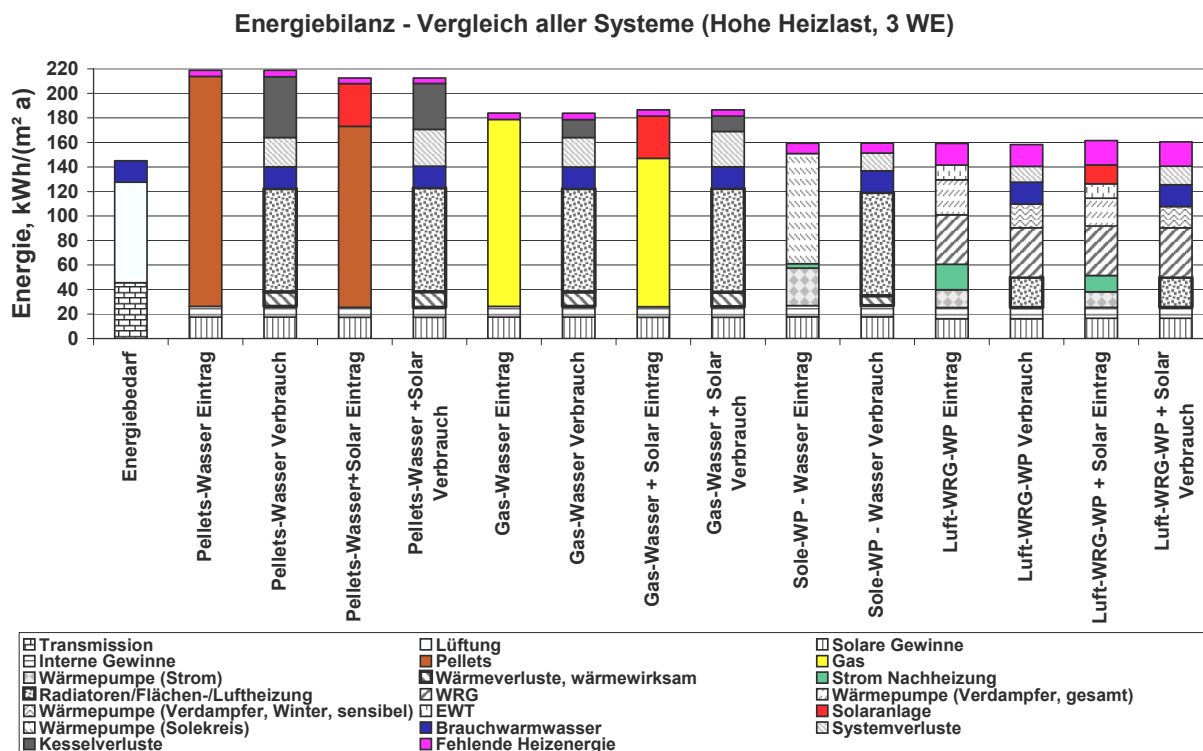


Abbildung 34: Vergleich des Extremszenarios 1 für alle untersuchte Varianten (Referenzgebäude 1)

Deckung der Heizlast

Während es beim Standardszenario und bei dem Extremszenario mit geringer Heizlast für kein System ein Problem mit der Bereitstellung der erforderlichen Wärme gibt, so haben im Extremszenario 1 (hohe Heizlast) alle System mehr oder weniger Unterdeckung (über gewisse Zeiträume geringere Raumtemperaturen als gewünscht).

Der Pellets- und der Gaskessel haben aufgrund Ihrer Leistung von 20 kW (Heizlast des Gebäudes 11,1 kW) genügend Reserve, um das Extremszenario hohe Heizlast annähernd zu bewältigen. Die geringfügigen Unterdeckungen von etwa 3 % sind dadurch gegeben, dass die Rohrhydraulik und Pumpenauslegung auf 22,5°C Raumtemperatur erfolgte.

Die zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe kann bei dem Extremszenario 1 mit hoher Heizlast den Bedarf nur mehr zu 94,3 % decken (5,7 % Unterdeckung). Hier wirken sich die Zeitfenster zum Nachladen der Brauchwarmwasserspeicher aus, bei denen das Haus unter die Solltemperatur von in diesem Fall 25°C abkühlt.

Den größten „Einbruch“ hat für das Extremszenario hohe Heizlast das dezentrale Luft/Luft/Wasser-System. Dadurch dass die einbringbare Heizenergie durch maximale Einblasetemperatur und Luftvolumenstrom begrenzt ist, kann für dieses Szenario die gewünschte hohe Lufttemperatur oft nicht mehr gehalten werden. Die Unterdeckung beträgt hier etwa 12%.

Die Unterdeckung ist hierbei auf den gesamten Wärmebedarf (Transmission, Lüftung, Brauchwarmwasser) berechnet, der jedoch zum Teil von inneren Wärmen und solaren Gewinnen gedeckt wird.

Dies zeigt auf der einen Seite die Einsatzgrenzen des Luft/Luft/Wasser-Systems auf. Der Komfortverlust durch Unterdeckung des Heizenergiebedarfs könnte auf der anderen Seite aber auch positiv gesehen werden, da einige Systeme eine unnötig hohe Raumtemperatur systembedingt einfach nicht zulassen. Allerdings wird sich ein Benutzer, der solche Bedingungen wünscht, eventuell eine Zusatzheizung in das Haus stellen.

Energiebilanz - Vergleich aller Systeme (Niedrige Heizlast, 3 WE)

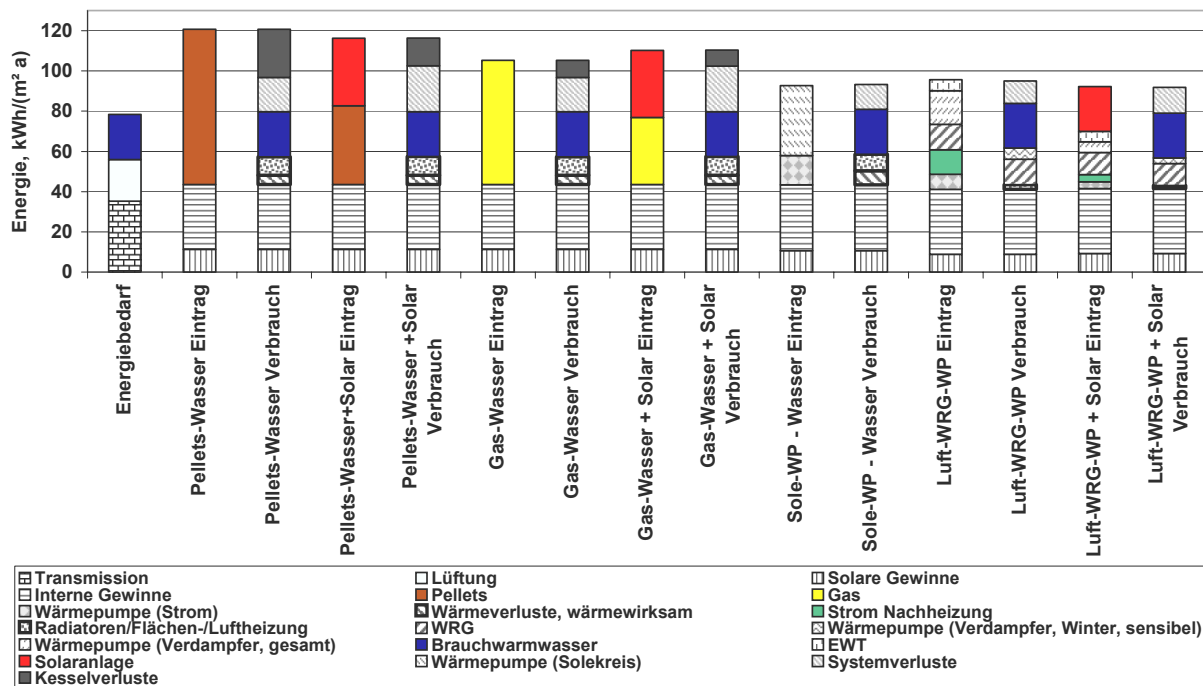


Abbildung 35: Vergleich des Extremszenarios 2 für alle untersuchte Varianten (Referenzgebäude 1)

Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger

Der Jahreswirkungsgrad des Pelletskessels sinkt bei geringerer Abnahme und Solaranlage (bedingt durch längere Stillstände mit Gluterhaltung) auf 65 %, bei dem Extremszenario mit hoher Heizlast steigt er auf 75 %. Absolut gesehen steigen die Verluste jedoch mit höherer Heizlast, insbesondere da Brauchwasser mit 60°C gezapft wird, wodurch die Vorlauftemperatur des gesamten Wärmeverteilnetzes bei dieser Schaltung auf höhere Temperatur gehalten werden muss. Bei niedriger Heizlast kann aufgrund der geringeren Raumtemperatur die Rücklauftemperatur des Wärmeverteilsystems gesenkt werden, was die Wärmeverluste weiter verringert.

Ein ganz ähnliches Bild zeigt sich beim Gaskessel. Hier variiert der Wirkungsgrad des Kessels zwischen 77 % bei niedriger Last und Solaranlage und 90 % bei hoher Last.

Die Jahresarbeitszahl der zentralen Sole Wärmepumpe schwankt zwischen 3,1 bei dem Szenario niedriger Heizlast bis 3,6 bei dem Szenario hoher Heizlast. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Wärmepumpe im Szenario mit geringer Heizlast häufiger bei geringeren Außentemperaturen betrieben wird. Im Szenario hohe Heizlast reicht die Heizperiode auch in die Übergangszeit hinein, bei welcher höhere Erdreichtemperaturen auftreten. Außerdem wird

eine allfällige Minderdeckung des Brauchwarmwassers durch eine E-Patrone im Brauchwarmwasserspeicher gedeckt.

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe beim dezentralen Luft/Luft/Wasser-System schwankt zwischen 3,5 bei dem Szenario mit niedriger Heizlast bis 3,3 bei dem Szenario mit hoher Heizlast. Die Einbindung einer Solaranlage verringert die Jahresarbeitszahl, da die Solaranlage die Vorwärmung des Brauchwarmwassers übernimmt und die Wärmepumpe immer bei etwas höherem Kondensatortempeaturniveau arbeiten muss als ohne Solaranlage.

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen den End-, Primärenergie-, CO₂-äquivalent Bilanz sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme ohne Haushaltsstrom für die beiden Extremvarianten und das Referenzgebäude 1. Zusätzlich sind, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, die nicht gelieferte Heizenergie für das Extremszenario 1 (hohe Heizlast) mit eingetragen.

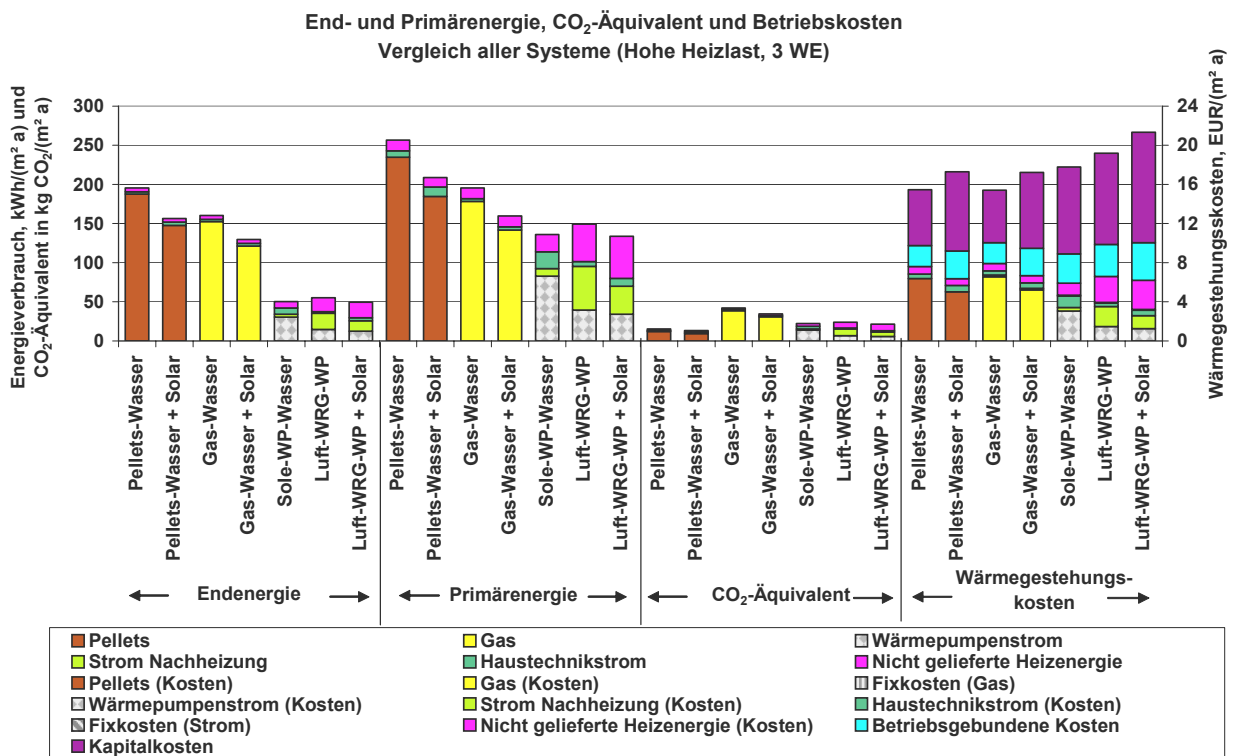


Abbildung 36: End- und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent-Emissionen sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme **ohne Haushaltsstrom** (Extremvariante 1, hohe Heizlast, Referenzgebäude 1, 3 WE)

Im Prinzip ändert sich bis auf die Wärmegestehungskosten, außer generell höheren bzw. niedrigeren Werten, nichts an den Aussagen der Referenzvariante. Die Variation des End- und Primärenergiebedarfs liegt allerdings im Bereich 1 : 2,5. Dies zeigt wiederum die große Abhängigkeit des Energiebedarfs vom Benutzerverhalten. Die Wärmegestehungskosten sind wesentlich geringer unterschiedlich, da die Kapitalkosten und die betriebsgebundenen Kosten konstant sind und den größten Teil der Wärmegestehungskosten ausmachen. Die hauptsächliche Vergrößerung der Kosten bei der hohen Heizlast ergibt sich durch die Kosten für die nicht gelieferte Energie, welche durch Strom Direktheizung abgedeckt wird, sowie durch die Erhöhung des Heizenergiebedarfs.

Bei den CO₂-äquivalent Emissionen hat das Pelletssystem bei hoher Heizlast die geringsten Emissionen aller betrachteten Systeme, da nur ein geringer Strombedarf besteht und der Kessel mit gleicher Leistung angenommen wurde.

Im Bereich des Energiebedarfs des Systems wird die Unterdeckung des Heizenergiebedarfs wesentlich deutlicher als bei der gesamten Energiebilanz der Systeme, da hier die internen und solaren Gewinne nicht berücksichtigt sind. Hier ergibt sich eine Unterdeckung im dezentralen Luft/Luft/Wasser-System von fast 40 %. Dadurch wird deutlich, dass Systeme mit größerer Unterdeckung des Heizenergiebedarfs, wenn dieser nicht berücksichtigt wird, wesentlich besser „aussteigen“ als welche, die den Bedarf annähernd decken.

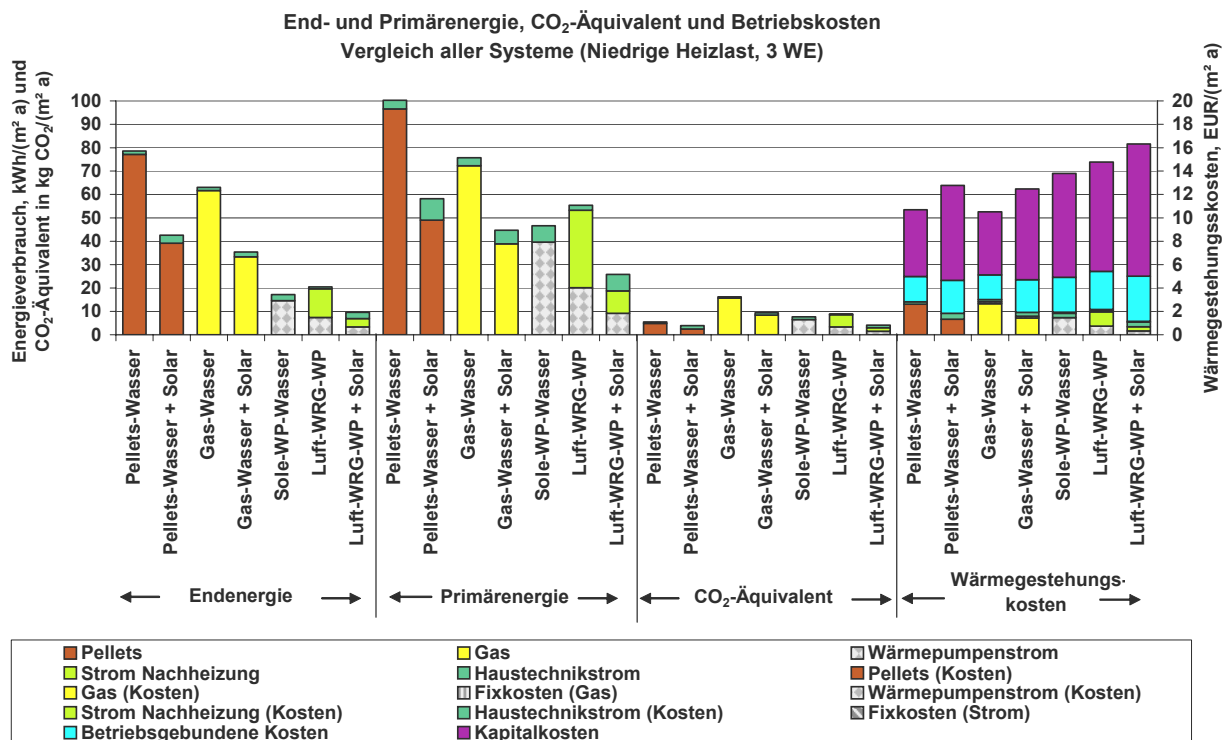


Abbildung 37: End- und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent-Emissionen sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme **ohne Haushaltsstrom** (Extremvariante 2, niedrige Heizlast, Referenzgebäude 1, 3 WE)

5.3 „Härtetest“ für alle Systeme (Referenzgebäude 1)

Um die Reaktion und die Robustheit der Heizungssysteme auf wechselndes Benutzerverhalten abzutesten wurden zwei zeitlich wechselnde Benutzerprofile auf die Systeme aufgeprägt:

- Fenster über einen Zeitraum von 4 Stunden nach Sonnenuntergang (ab 16 h) in einer Winterwoche mit mittleren Einstrahlung und anschließender tiefer Außentemperatur geöffnet. Die Heizung läuft weiter.
- Absenkung der Raum-Solltemperatur über 14 Tage im Winter auf 15°C mit Lüftungsverlusten nur durch Infiltration. Danach Wiederaufheizung auf 22,5°C Raumtemperatur.

Szenario a)

Hier wird verglichen, wie die verschiedenen Systeme reagieren, wenn die Fenster längere Zeit geöffnet waren und das Gebäude wieder auf Temperatur gebracht werden muss. Alle Systeme wurden ohne Solaranlage gerechnet.

Abbildung 38 zeigt im oberen Teil die operative und Zonen-Lufttemperatur, im unteren Teil die Außenlufttemperatur und die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche vor und während des Auskühlvorgangs sowie beim anschließenden Aufheizvorgang. Die operative Temperatur ergibt sich aus dem Mittelwert zwischen Umschließungsflächen und Lufttemperatur und stellt die Empfindungstemperatur des Menschen, der sich im Strahlungsaustausch mit den umschließenden Wänden befindet, dar. Die betrachteten Systeme sind das zentrale Pelletssystem (Pellets), das zentrale Sole-Wasser Wärmepumpensystem (SOL-WP) und das Luft/Luft/Wasser-System (LL-WP). Bei letzterem System wurde zur Erkennung der Notwendigkeit der im Zuluftstrom nach dem Kondensator befindlichen E-Patrone mit einer Heizleistung von 1,5 kW für die Nachheizung diese in der Simulation einmal weggeschaltet (LL-WP) und einmal dazugeschaltet (LL-WP_EP). Das zentrale Gasheizungssystem wurde nicht extra simuliert, da es sich genau wie das Pelletssystem verhält.

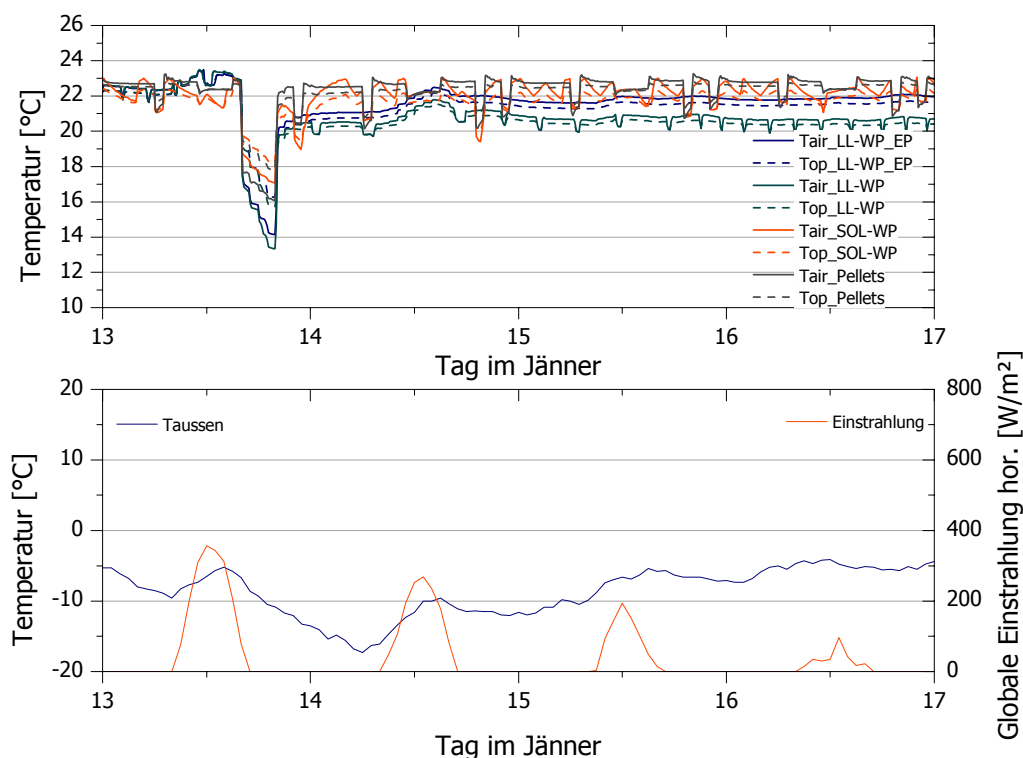


Abbildung 38: Verlauf von operativer (Top), Luft- (Tair) und Außentemperatur (Taussen) sowie Globalstrahlung auf die Horizontale für die verschiedenen Systeme (Pellets, Sole WP, LL-WP und LLWP_EP), Szenario a): 4 h Fensterlüftung

Vor dem Auskühlvorgang wird die Raumtemperatur von allen Systemen gehalten. Für das dezentrale Luft/Luft/Wasser-System LL-WP ist kein Unterschied zwischen dem Betrieb mit und ohne E-Patrone zu erkennen, d.h. die E-Patrone wird nicht verwendet. Bei diesem System ergibt sich in unterschiedlichen Zeitabständen ein kurzzeitiges Absinken der Raumtemperatur. Dies sind Abtauvorgänge am Verdampfer der Wärmepumpe, während denen die Wärmepumpe keine Heizleistung liefert. Die Reglereinstellung erlaubt eine Temperaturschwankung zwischen 22 und 23°C. Auch das zentrale Sole-Wasser-Wärmepumpensystem

(SOL-WP) zeigt Raumtemperaturschwankungen. Der Regelbereich ist gleich wie beim LL-WP System eingestellt. Bei Erreichen der oberen Temperatur schaltet sich das System ab und es dauert aufgrund der Speichermasse im Estrich einige Zeit bis die Raumtemperatur die untere Regelgrenze erreicht hat. Beim Wiederanfahren der Heizung kann es zu einer leichten Unterschreitung von 22°C kommen, da es einige Zeit dauert, bis die Speichermasse Estrich, welche bei diesem System im Gegensatz zu den anderen Systemen nicht über eine Trittschalldämmung wärmetechnisch entkoppelt ist, auf die Wärmezufuhr mit einer Wärmeabgabe an den Raum reagiert. Das Radiatorsystem mit der zentralen Pelletsanlage hält die Raumtemperatur über die Thermostatventile in den Radiatoren und die außentemperaturgeführte Vorlaufregelung sehr genau.

In der Auskühlphase erkennt man ebenfalls den Einfluss der Speichermassen. Das Luftheizungssystem reagiert am schnellsten auf die Fensteröffnung. Nach den 4 Stunden ist die Raumtemperatur auf 14°C und die operative Temperatur (aufgrund der langsamer auskühlenden Wände) auf 16°C abgesunken. Am langsamsten kühlt das zentrale Sole-Wasser Wärmepumpensystem aufgrund der Speichermassen des nicht über Trittschalldämmung entkoppelten Estrichs aus. Hier liegen die Temperaturen nach 4 Stunden bei 16,5 bzw. 17,5°C.

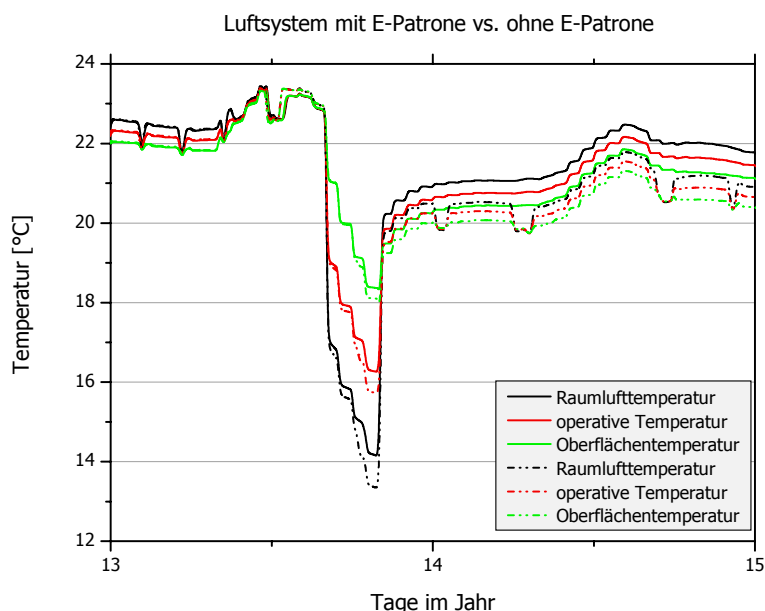


Abbildung 39: Verlauf von operativer (Top), Luft- (Tair) und Wand-Oberflächentemperaturen für die Systeme LL-WP und LLWP_EP), Szenario a): 4 h Fensterlüftung, durchgezogene Linien: mit E-Patrone, gestrichelte Linie: ohne E-Patrone

Beim Aufheizen hat das Radiator-Pellets System nach 1,2 h die untere Raum-Solltemperatur (22°C) erreicht. Die Fußbodenheizung (Sole WP) erreicht nach 5,2 h diese Temperatur, da auch hier die Trägheit des Estrichs zum Tragen kommt. Das Luftsystem (LL-WP mit zus. E-Patrone (1,5 kW)) benötigt bereits 16 h und ohne der zusätzlichen E-Patrone würde es 18,6 h benötigen, wobei das System zwar durch die Sonneneinstrahlung am Tag nach der Fensterlüftung annähernd die Solltemperatur erreicht, sich aber eine weitere Woche (kalt und sonnenarm) nicht vollständig erholt und die geforderte Solltemperatur nicht mehr erreicht. Dies liegt an der aufgrund des festgelegten Volumenstroms und der durch die maximale Einblasetemperatur beschränkten Heizleistung (vgl. Kap. 2.2.1).

Abbildung 39 zeigt den Temperaturverlauf für das System Luft/Luft/Wasser Wärmepumpe mit und ohne E-Patrone im Detail. Hier zeigt sich, dass die Auskühlung mit E-Patrone etwas

langsamer (die Heizung bleibt ja eingeschaltet) und der Aufheizvorgang schneller stattfindet, da durch die E-Patrone die Heizleistung erhöht wird.

Szenario b)

Abbildung 40 zeigt den Verlauf von operativer (Top), Luft- (Tair) und Außentemperatur sowie Globalstrahlung auf die Horizontale für die verschiedenen Systeme für das Szenario b) mit 14 Tagen Absenkung der Raumtemperatur auf 15°C im Winter mit anschließendem Wiederaufheizen. Das System zentrale Sole-Wasser Wärmepumpe kühlt auch hier aufgrund der Speichermassen langsamer aus als die anderen beiden Systeme. Beim Wiederaufheizen benötigt das Radiator – Pellets System 23,1 h, um die 22 °C zu erreichen. Beim System Fußbodenheizung und Sole-Wasser-Wärmepumpe dauert es 74,7 h, und das Luftsystem mit der zusätzlichen E-Patrone benötigt 211 h, um die 22°C zu erreichen. Ohne Verwendung der E-Patrone erreicht das Luftsystem im betrachteten Zeitraum nicht mehr den Bereich der Raumsolltemperatur. Auch hier zeigt sich wieder, wie im Szenario a), dass die Heizleistung der Luftsysteme sehr knapp bemessen ist und dass eine Nachheizung der Zuluft über ein Elektroregister notwendig ist. Aus diesem Grund werden häufig kleine Elektroheizgeräte mit dem System gekoppelt, welche allerdings nur für solche Aufheizvorgänge eingesetzt werden brauchen.

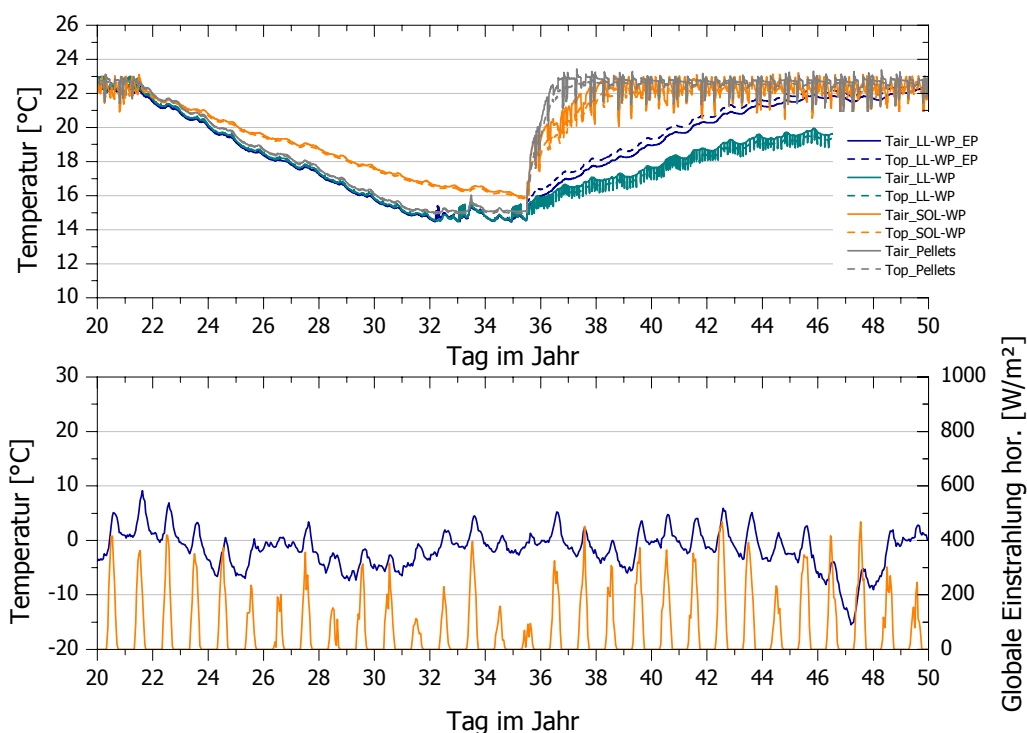


Abbildung 40: Verlauf von operativer (Top), Luft- (Tair) und Außentemperatur sowie Globalstrahlung auf die Horizontale für die verschiedenen Systeme (Pellets, Sole WP, LL-WP und LLWP_EP), Szenario b): 15 Tage auf 15°C abgesenkte Temperatur

5.4 Statistik Raumtemperaturen, Raumlufffeuchten und Heizlast (Referenzgebäude 1)

5.4.1 Raumlufftemperaturen

Mit den folgenden Auswertungen soll gezeigt werden, wie oft bei welchem System welche Raumtemperatur herrscht und wie das System die Raumlufffeuchten beeinflusst. Anhand von Raumtemperaturverläufen kann man zum Beispiel trägere von schnelleren Systemen unterscheiden.

Abbildung 41 zeigt die prozentuale Verteilung der Raumtemperatur im Vergleich zur Raumsolltemperatur für die Systeme dezentrale Luft/Luft/Wasser Wärmepumpe mit E-Patrone zur Nachheizung (Luft), zentrale Pelletsheizung mit Radiator (Rad) und Zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe mit Fussbodenheizung (Fubo). Wiederum wurde das System zentrale Gasheizung nicht betrachtet, da es idente Ergebnisse wie die Pellets-Anlage gibt. Die Auswertung der Raumtemperaturen erfolgte in Intervallen von 0,1 K. Generell werden für die Referenzbedingungen von allen Systemen die Raumtemperaturen gut eingehalten

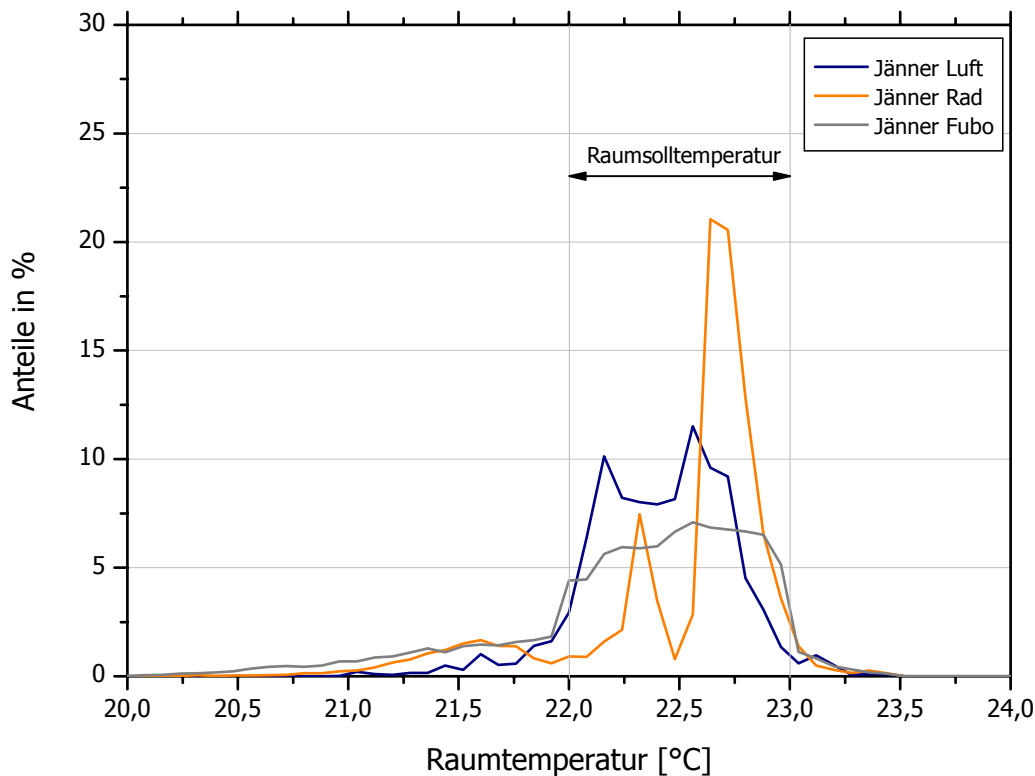


Abbildung 41 Histogramm der Raumlufftemperaturen (Monat Jänner)
 Luft: dezentrale Luft/Luft/Wasser Wärmepumpe mit E-Patrone,
 Rad: zentrale Pelletsheizung mit Radiator,
 Fubo: zentrale Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Fußbodenheizung

Das System dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpe mit E-Patrone (Luft) hat im Jänner (minimale Außentemperaturen bei bis zu -16°C) zwar noch keine Probleme, die Raumsolltemperatur aufrecht zu erhalten, hat aber im Schnitt weniger Anteile über $22,5^{\circ}\text{C}$ als die anderen zwei Systeme. Das System zentrale Pelletsheizung mit Radiator (Rad) hält die Raumlufftemperatur meist knapp über $22,5^{\circ}\text{C}$, wobei die Anteile unter $22,5^{\circ}\text{C}$ auf die Zeiten mit vorrangiger Warmwasserbereitung zurückzuführen sind. Beim System Fußbodenheizung

und Sole-Wärmepumpe (Fubo) kommt es aufgrund der trägen Fußbodenheizung und der regelmäßigen Ladung der dezentralen Warmwasserboiler zu einer gleichmäßigen Verteilung der Raumlufttemperaturanteile.

Abbildung 42 zeigt die Temperaturverteilung zusätzlich für die Monate Dezember und Februar. Das Luftsystem hat in den Monaten Dezember und Februar deutlich mehr Anteile über der geforderten Solltemperatur was die Vermutung aus der Abbildung 40 bestätigt, dass das Luftsystem im Jänner an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit ist.

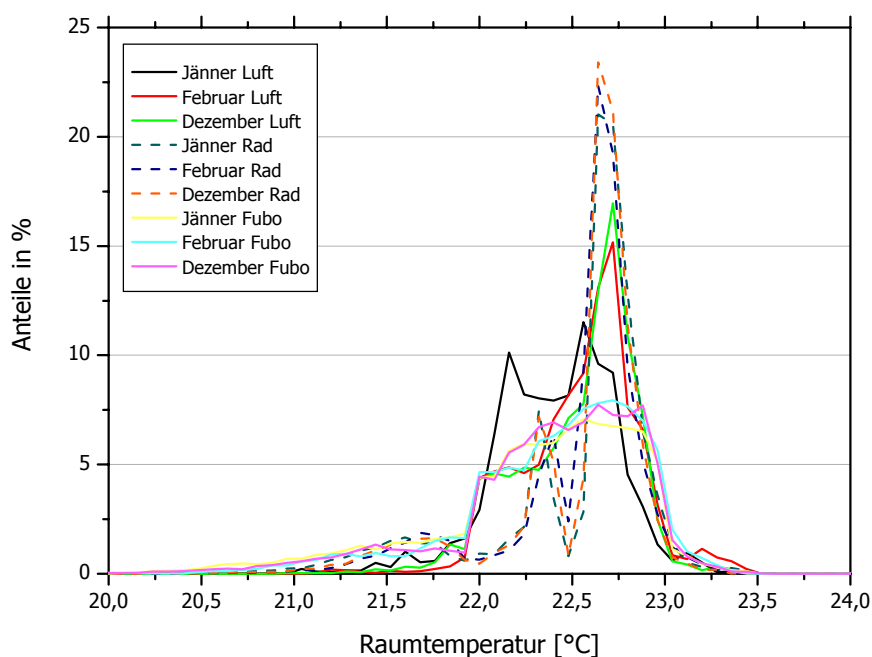


Abbildung 42 Histogramm der Raumlufttemperaturen (Monate Dezember Jänner Februar):
 Luft: dezentrale Luft/Luft/Wasser Wärmepumpe mit E-Patrone,
 Rad: zentrale Pelletsheizung mit Radiator,
 Fubo: zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe mit Fußbodenheizung

In Abbildung 43 wird nun der Frage nachgegangen, wie sich die Raumtemperaturen bei den beiden in Kap. 5.2 definierten Extremszenarien (Ex1, hohe Heizlast und Raumtemperatur, Ex2, niedrige Heizlast und Raumtemperatur) verhalten. Auch hier können alle Systeme die geforderten Raumtemperaturen auch bei 25°C Raumsolltemperatur halten. Das Radiator-system regelt hierbei die Temperatur sehr exakt ein. Bei der Fußbodenheizung kommt es bei den hohen Temperaturen zu Problemen, da das Zeitfenster für die Brauchwarmwasserbereitung beginnt, sich negativ auf das Halten der Raumtemperatur auszuwirken. Die Luftheizung hat eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des erlaubten Regelungsbereichs von 24,5°C bis 25,5°C. Wird also keine Zusatzheizlast für das Aufwärmen benötigt, so kann das dezentrale Luft/Luft/Wasser-System auch höhere Raumtemperaturen halten.

Im September beginnen sich die Raumtemperaturen im Extremszenario 1 (hohe Heizlast) zu ändern, da er außerhalb der Heizperiode liegt und die Heizung in der Simulation nicht eingeschaltet wird. Daraus sieht man, dass die betrachtete Heizperiode für diese Annahme eigentlich verlängert werden müsste. Für das Extremszenario 2 (niedrige Heizlast) zeigt sich, dass die Heizung im April und Oktober oft noch nicht eingeschaltet werden muss, da die Raumtemperaturen durch die passiven und inneren Gewinne hoch genug liegen. Dies ist auch

der Grund für die großen Heizenergieunterschiede für diese beiden Annahmen (vgl. auch Tabelle 1).

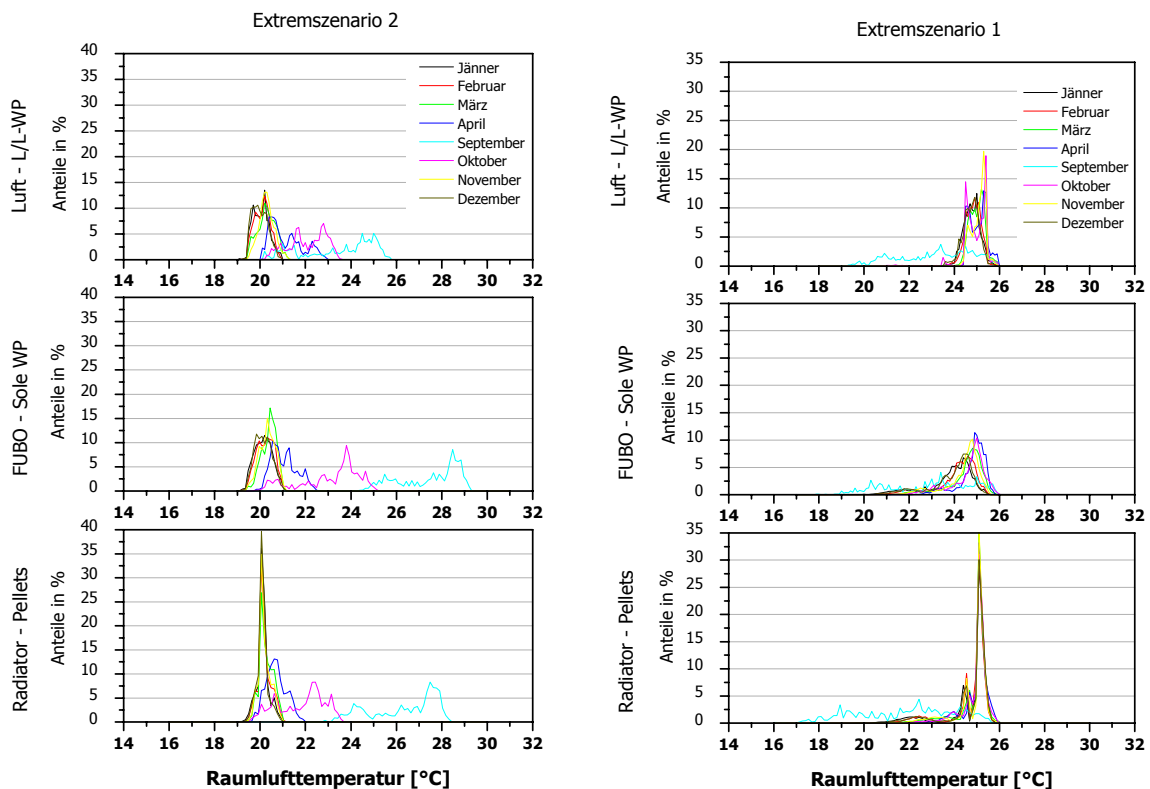


Abbildung 43 Histogramm der Raumlufttemperaturen (Heizperiode) für die beiden in Kap. 5.2 definierten Extremvarianten und die drei betrachteten Systeme

5.4.2 Raumlufffeuchten

Ein weiterer Punkt für die Bewertung der Heizungssysteme stellt die sich einstellende Raumlufffeuchte dar. Diese ist abhängig vom Luftwechsel und von den inneren Feuchtequellen wie Personen und Pflanzen. Je größer der Luftwechsel, desto mehr wird im Winter absolut trockenere Luft von außen in den Raum gebracht und dort aufgeheizt, was zu einer geringeren relativen Luftfeuchtigkeit führt.

Abbildung 44 zeigt die monatsweise Verteilung der Raumlufffeuchten für das zentrale Pellets-Wassersystem und das dezentrale Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem. Die Systeme unterscheiden sich primär im Luftwechsel, der beim Pellets-System konstant $0,4 \text{ h}^{-1}$ und beim dezentralen Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem während des Heizbetriebs $0,54 \text{ h}^{-1}$ ist, um ausreichend Heizleistung bereitstellen zu können. Die Raumlufffeuchten wurden mit einem Intervall von einem Prozent-Punkt ausgewertet.

Die monatlichen Verläufe der Raumlufffeuchten sind sehr ähnlich. Unterschiede sind vor allem bei den Anteilen der höheren Luftfeuchte erkennbar. So reichen z.B. die Feuchteanteile beim Radiatorsystem im Jänner bis knapp über die 40% Marke. Beim Luftsystem beträgt die maximale Luftfeuchte im Jänner maximal 35%. Diese Differenz von ca. 5% zeigt sich auch in den anderen Monaten. So ist der Anteil an Raumlufffeuchtigkeit von 25% in den Monaten Dezember bis Februar zwischen 9-10% für das dezentrale Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem und 6-7% beim Radiator System. Dieser Unterschied kann natürlich

durch Aufstellen von Pflanzen etc. wieder wettgemacht werden. Zieht man allerdings in Betracht, dass bei der winterlichen Fensterlüftung kaum die angenommenen $0,4 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden, fällt der Unterschied der Luftfeuchte entsprechend deutlicher aus.

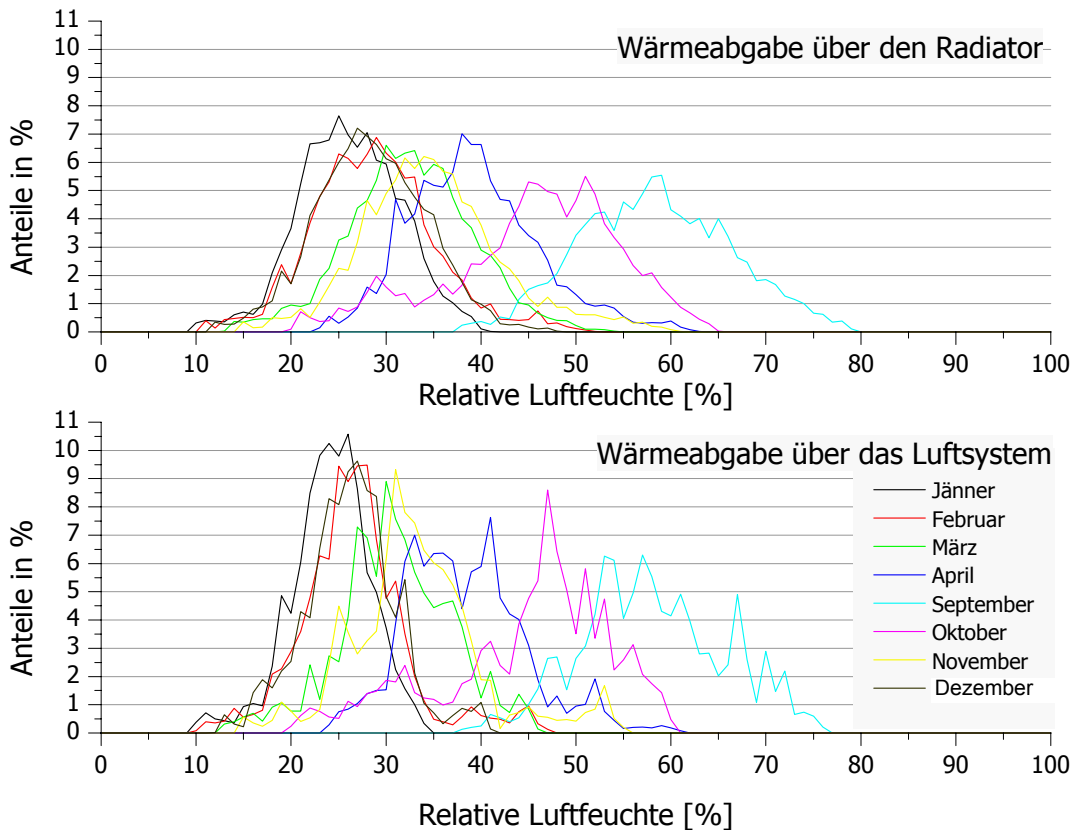


Abbildung 44 Histogramm der Raumluftheuchten (Monatsweise dargestellt) für die Referenzbedingungen

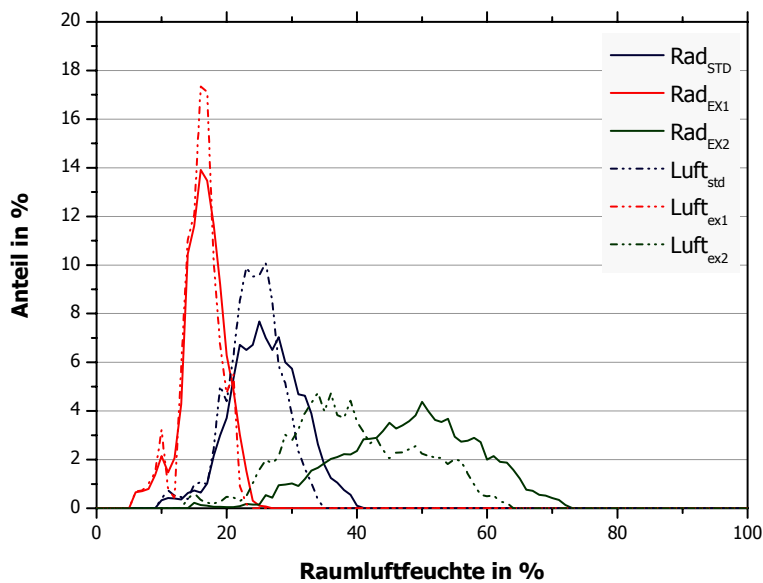


Abbildung 45 Histogramm der Raumluftheuchten (Heizperiode) für die in Kap. 5.2 definierten Extremszenarien und die Standardbedingungen

Der Vergleich der Raumluftfeuchte zwischen dem Radiatorsystem und dem Luftsystem in Abbildung 45 zeigt eine deutliche Tendenz zur geringeren Luftfeuchte bei der Verwendung von Luftsystemen bei geringeren Heizlasten (Ex 2 und Standard). Bei der niedrigen Heizlast wurde ein sehr niedriger Luftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$ angenommen. Bei Fensterlüftung wird dieser auch auf diesem Wert gehalten, bei der Luftheizung wird jedoch im Heizbetrieb ein Luftwechsel von $0,54 \text{ h}^{-1}$ gefahren, was zu deutlich höherem Luftwechsel und daher auch niedrigeren Luftfeuchtigkeiten führt. Bei hohen Heizlasten ist die Raumluftfeuchte beider System fast gleich, da hier zum einen ein Luftwechsel von $0,8 \text{ h}^{-1}$ für das Radiatorsystem und $0,67 \text{ h}^{-1}$ (für das gewählte Gerät maximal möglicher Volumenstrom) für das Luftsystem gewählt wurden und die höhere Raumtemperatur auch bei Fensterlüftung generell zu geringen Raumluftfeuchten führt. In diesem Fall muss der Luftwechsel zur Beheizung nicht erhöht werden.

5.4.3 Heizleistung

Als letzte Auswertung der Berechnungen für das Referenzgebäude 1 wurde der Verlauf der Heizlast in Abhängigkeit von solarer Einstrahlung und Außentemperatur analysiert. Abbildung 46 zeigt den Heizlastverlauf für eine typische Winterwoche mit einigen strahlungsarmen Tagen in der Mitte der Woche für das dezentrale Luft/Luft/Wasser Wärmepumpensystem ohne Sonnenkollektor und mit E-Patrone. Die maximale zuführbare Heizleistung der Wärmepumpe beträgt $12,5 \text{ W/m}^2$ bestehend aus der Abwärme des Kompressors, der Kondensatorleistung, der Zusatzheizung (E-Patrone) und der Ventilatorabwärme. Man sieht, dass die Wärmepumpe in der strahlungsarmen und kalten Zeit ohne Unterbrechung durchlaufen muss, um die Raumtemperatur zu halten.

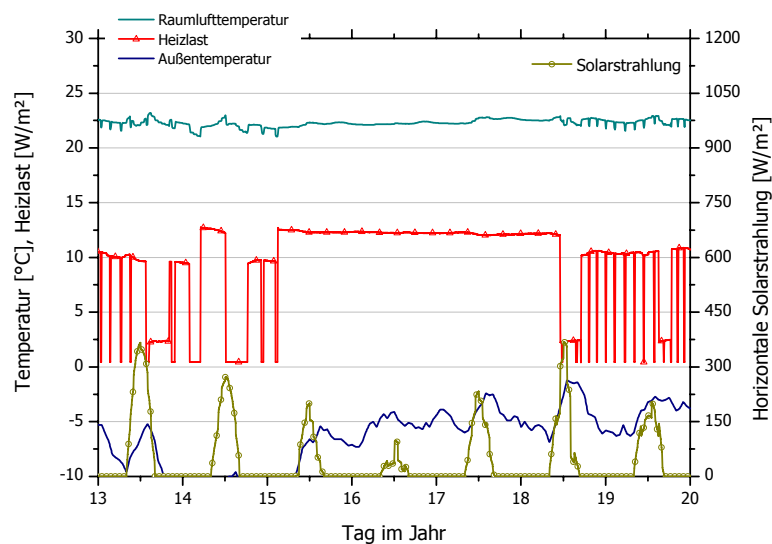


Abbildung 46 Heizlastverlauf für eine typische strahlungsarme Woche; dezentrales Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem ohne Sonnenkollektor mit E-Patrone

Abbildung 47 zeigt dasselbe System in einer sonneneinstrahlungsreichen Woche. Die maximal benötigte Heizleistung beträgt 11 W/m^2 , bestehend aus der Abwärme des Kompressors, der Kondensatorleistung und der Ventilatorabwärme. Man erkennt deutlich, dass die Wärmepumpe bei Sonneneinstrahlung selbst bei sehr geringen Außentemperaturen

am Ende der betrachteten Woche aufgrund der passiven solaren Gewinne im Gebäude immer abschalten kann.

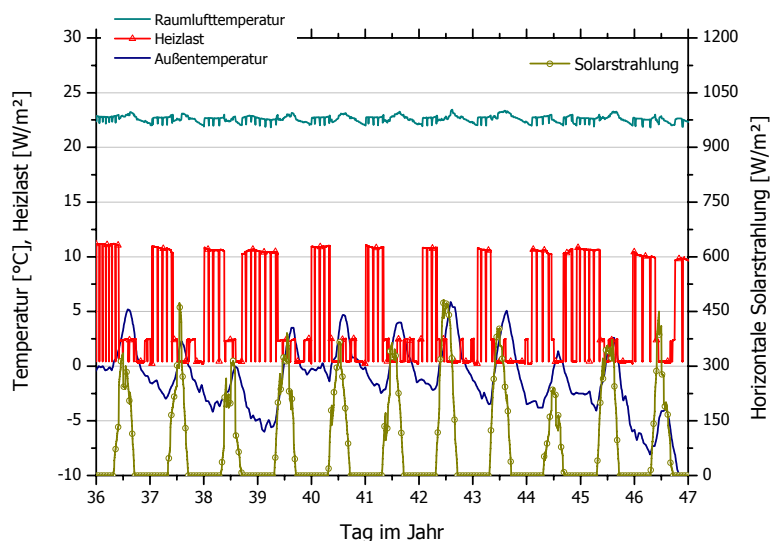


Abbildung 47 Heizlastverlauf für eine typische strahlungsreiche Woche; dezentrales Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem ohne Sonnenkollektor mit E-Patrone

Ein ähnliches Verhalten kann beim zentralen Pellets-System mit Radiatoren gesehen werden. Abbildung 48 zeigt das Verhalten für dieselben strahlungsarmen und strahlungsreichen Wochen. In diesem Fall wurde ein konstanter Luftwechsel über den Tag von $0,4 \text{ h}^{-1}$ angenommen. Wiederum ist das Durchlaufen der Heizung in der strahlungsarmen Zeit zu sehen. Die maximale Heizleistung unter dieser Lüftungsannahme beträgt für dieses System 25 W/m^2 . Wird allerdings das Fensterlüftungsprofil aus Kap. 4.1 der Simulation zugrunde gelegt, so steigt, aufgrund der stoßweisen Belastung, die notwendige Heizleistung auf 40 W/m^2 . Diese Werte liegen natürlich wesentlich höher, als bei dem dezentralen Luft/Luft/Wasser-System, da keine Abluftwärmerückgewinnung eingesetzt wird Abbildung 49.

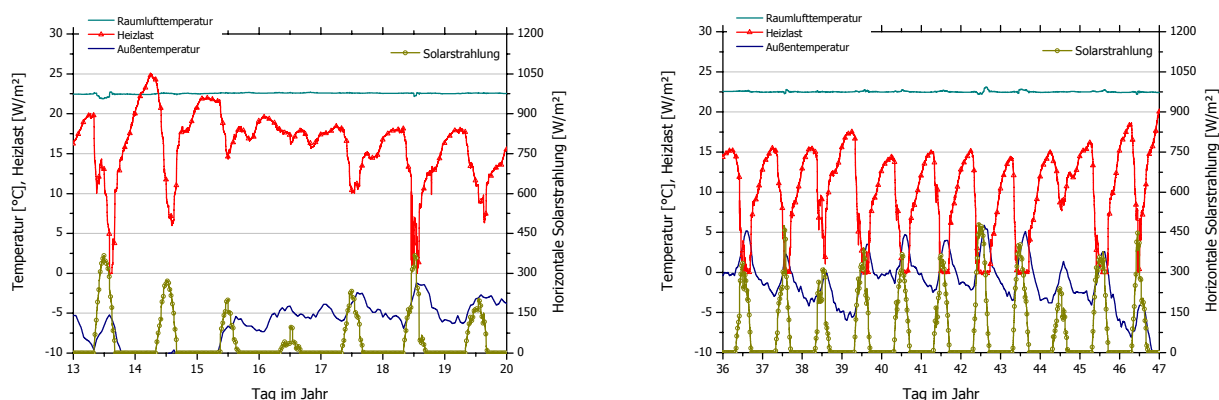


Abbildung 48 Typische strahlungsarme und strahlungsreiche Woche (Pellets-Radiatorsystem konstanter Luftwechsel)

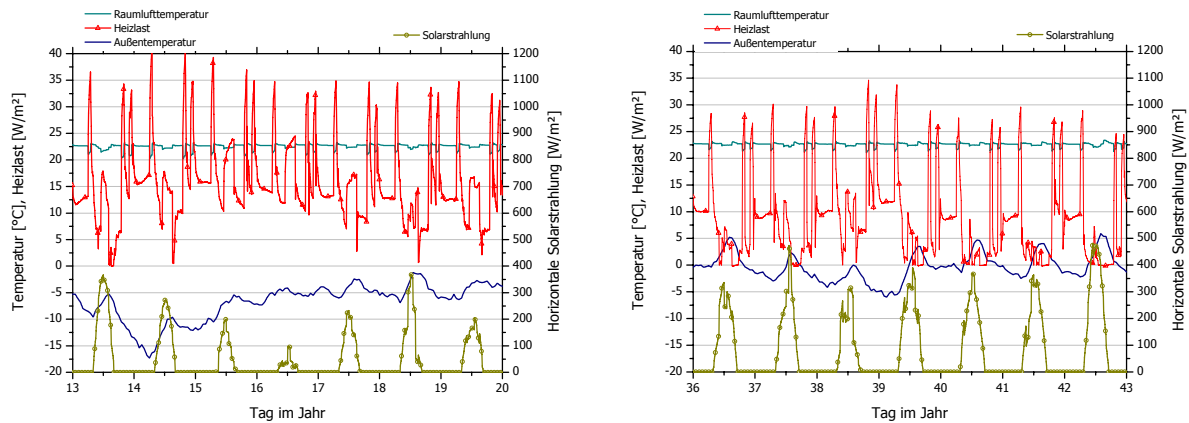


Abbildung 49 Typische strahlungsarme und strahlungsreiche Woche (Pellets-Radiatorsystem mit Fensterlüftungsprofil aus Kap. 4.1

5.5 Ergebnisse Referenzgebäude 2

Für das Referenzgebäude 2 (12 Wohneinheiten, vgl. Kap. 4.3) wurde ebenso alle Berechnungen durchgeführt. Allerdings wurde das dezentrale Luft/Luft/Wasser Wärmepumpensystem nicht berücksichtigt, da sich im dezentralen Teil keine Änderungen gegenüber dem Referenzgebäude 1 ergeben und nur bedingt ein zentraler EWT möglich ist, da er ein aufwändiges Luftverteilsystem im Gebäude benötigt.

Abbildung 50 bis Abbildung 56 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude 2 nach demselben Muster wie für das Referenzgebäude 1 in den vorangegangenen Kapiteln. Generell ist der Energieverbrauch aufgrund des etwas besseren Wirkungsgrades von größeren Wärmeerzeugern für alle Systeme und geringfügig wegen der größeren Kompaktheit des Gebäudes 5 – 10 % geringer als für das Referenzgebäude 1. An den Größen zueinander ändert sich im Referenzgebäude 2 gegenüber dem Referenzgebäude 1 aber nichts Relevantes.

Gleiches gilt auch für End-, Primärenergie-, CO_2 -äquivalent Bilanz sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme (Abbildung 51). Den geringsten Endenergiebedarf hat die zentrale Sole/Wasser Wärmepumpe, beim Primärenergiebedarf liegen Gas-Solar und Sole/Wasser mit $80 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gleichauf. Bei den Wärmegestehungskosten liegen die Systeme Gas und Pellets sowohl mit als auch ohne Sonne gleichauf. Die Sole/Wasser Wärmepumpe hat aufgrund der hohen Kapitalkosten die höchsten Wärmegestehungskosten. Das Kriterium $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Primärenergiebedarf erreichen jetzt annähernd die Systeme Gaskessel – Solar und Sole/Wasser Wärmepumpe bei einem Haushaltsstrombedarf nach Feist (PHPP, 1999) von $2,1 \text{ W/m}^2$ (Abbildung 52). Unter Zugrundelegung des bei CEPHEUS (2001) gemessenen Haushaltsstroms von $3,3 \text{ W/m}^2$ erreicht keines der angegebenen Systeme dieses Kriterium. Allerdings wurde andere Randbedingungen als im PHPP-Programm angenommen (z.B. Raumtemperatur von $22,5^\circ\text{C}$ im Gegensatz zum PHPP-Programm von 20°C , vgl. auch Tabelle 1). Daher sind die Ergebnisse nur in der Relation zueinander aber nicht absolut vergleichbar.

Vergleicht man den Gebäudeenergieverbrauch des Referenzgebäudes 2 (Abbildung 53) mit dem des Referenzgebäudes 1 (Abbildung 33) so wird praktisch kein Unterschied ersichtlich. Der Unterschied in Kompaktheit der Gebäude geht daher nur in geringem Maß in den Energiebedarf ein. Dies ist auf die generell sehr kompakte Bauweise beider Gebäude und den

geringen Einfluss der Transmissionswärmeverluste aufgrund der sehr guten Wärmedämmung der Außenhülle zurückzuführen.

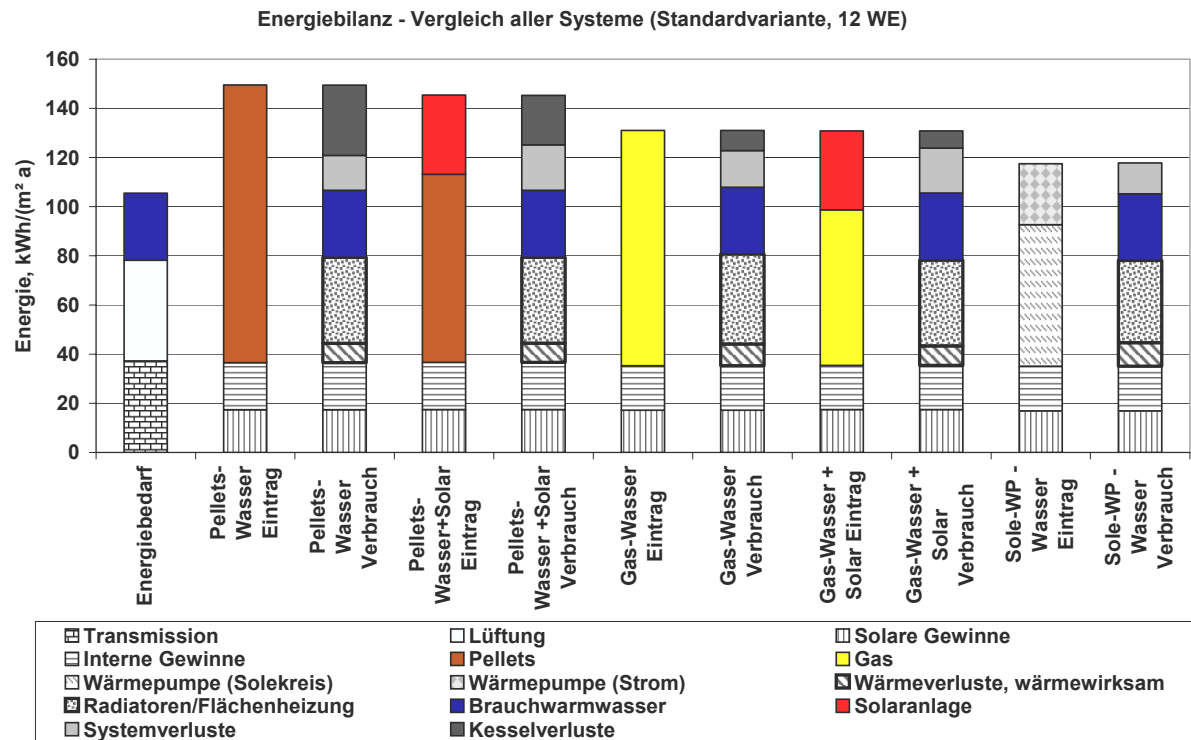


Abbildung 50 Energiebilanz aller simulierten Systeme (Standardvariante, Referenzgebäude 2, 12 WE) ohne Haustechnik- und Haushaltsstrom

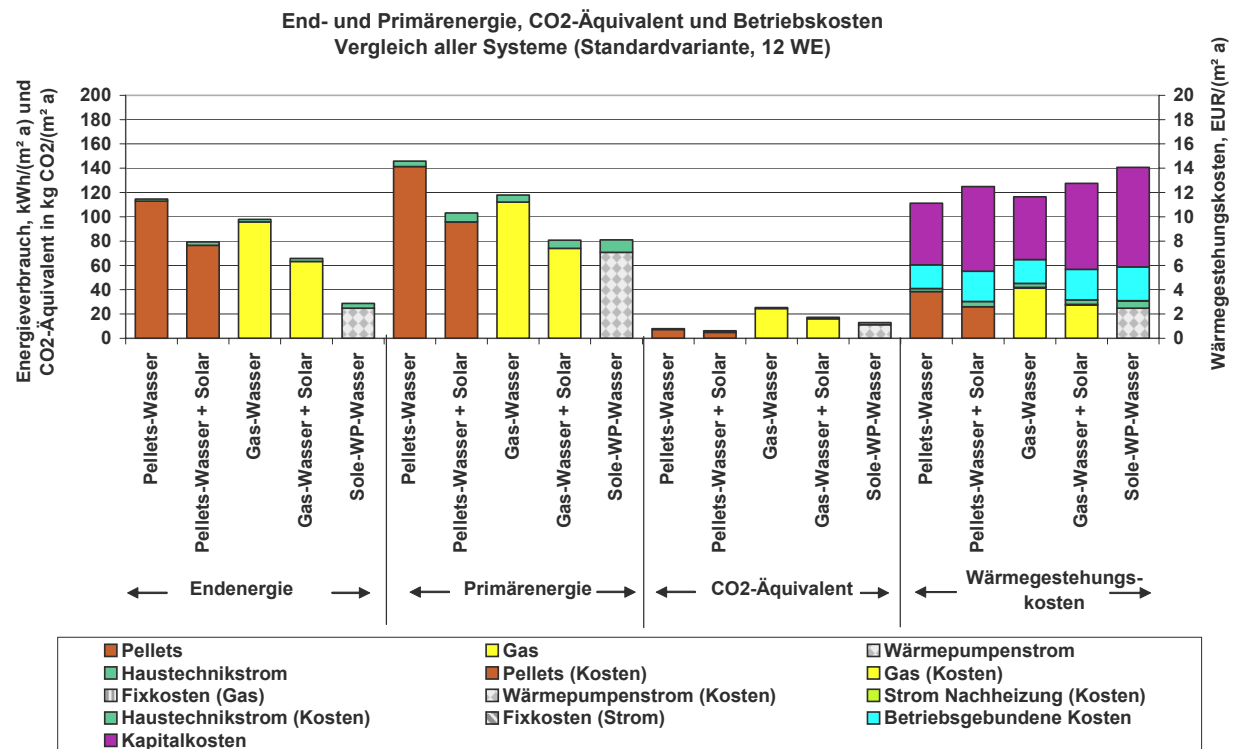


Abbildung 51 End- und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent-Emissionen sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme **ohne Haushaltsstrom** (Standardvariante, Referenzgebäude 2, 12 WE)

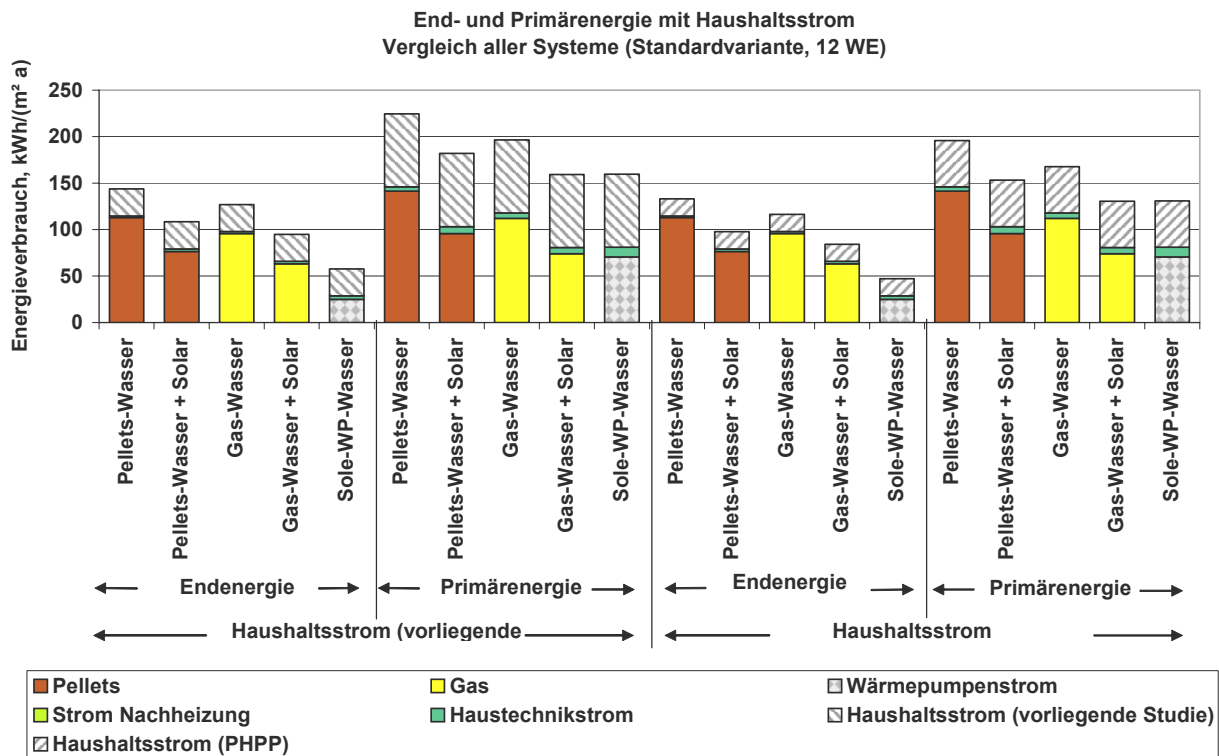


Abbildung 52 End- und Primärenergiebedarf der simulierten Heizungssysteme **mit Haushaltsstrom** nach Messung im Projekt CEPHEUS (2001) und nach Feist (PHPP, 1999) (Standardvariante, Referenzgebäude 2, 12 WE)

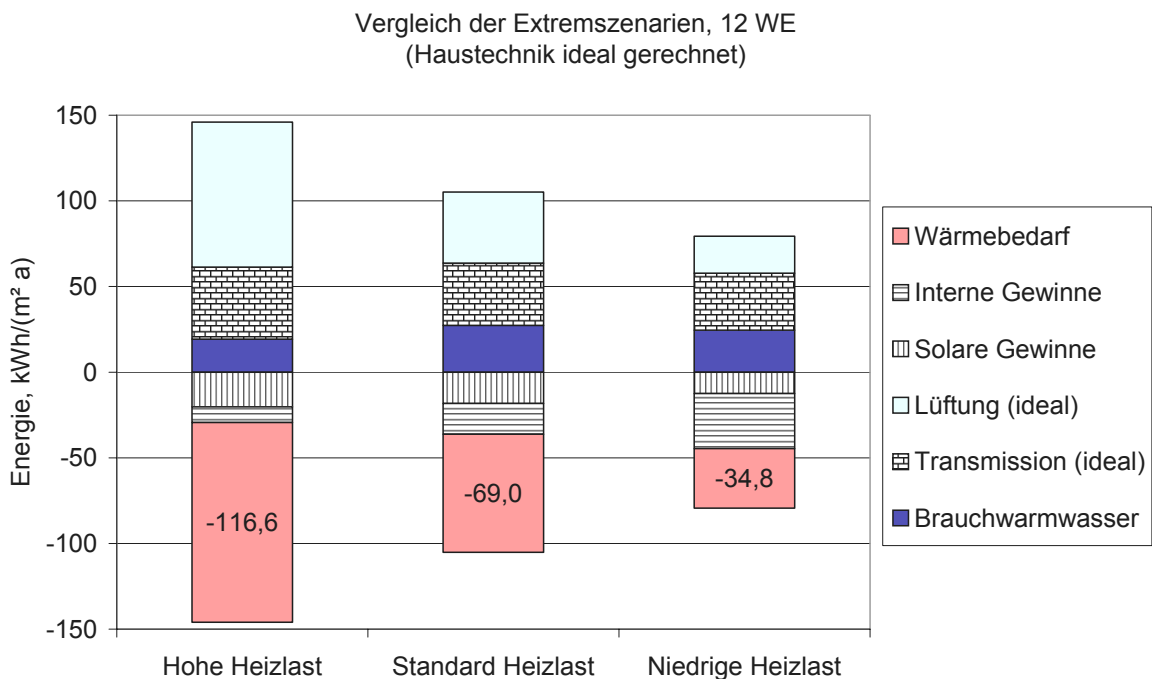


Abbildung 53 Vergleich der Extremszenarien für ideale Heizung (Referenzgebäude 2)

Auch bei Analyse der Extremszenarien zeigt sich ein für das Referenzgebäude 2 ein sehr ähnliche Bild wie beim Referenzgebäude 1. Der spezifische Energiebedarf des Gebäudes liegt gleich hoch und der Gesamtenergiebedarf der Heizungssysteme ist etwas geringer aber die

Verhältnisse relativ zueinander und auch die Unterdeckung im Szenario 1 (hohe Heizlast) liegen ähnlich wie beim Referenzgebäude 1 (Abbildung 54).

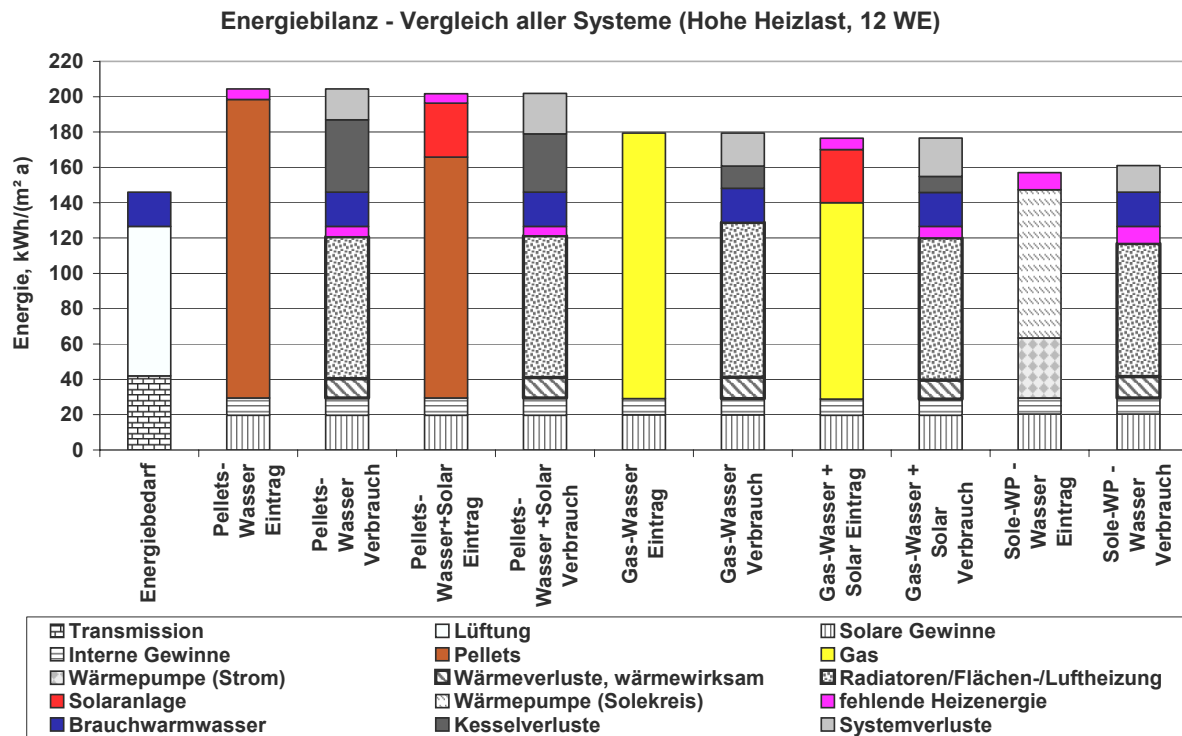


Abbildung 54 Vergleich des Extremszenarios 1 für alle untersuchte Varianten (Referenzgebäude 2)

Ebenso liegen die End-, Primärenergie-, CO₂-äquivalent Bilanz sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme für die beiden Extremszenarien etwas unter denen des Referenzgebäudes 1 (Abbildung 55 und Abbildung 56). Für das Szenario 2 (niedrige Heizlast) liegt der Primärenergiebedarf von Pellets-Solar und Gas Solar unter dem der Sole/Wasser Wärmepumpe, da deren Jahresnutzungsgrad, wie in Kap 5.2 beschrieben, für dieses Szenario sinkt.

Die Erhöhung der Wärmegestehungskosten für das Szenario hohe Heizlast liegt wiederum am erhöhten Heizenergiebedarf und an den durch Stromheizung abgedeckten nicht gelieferten Heizenergie des Heizungssystems.

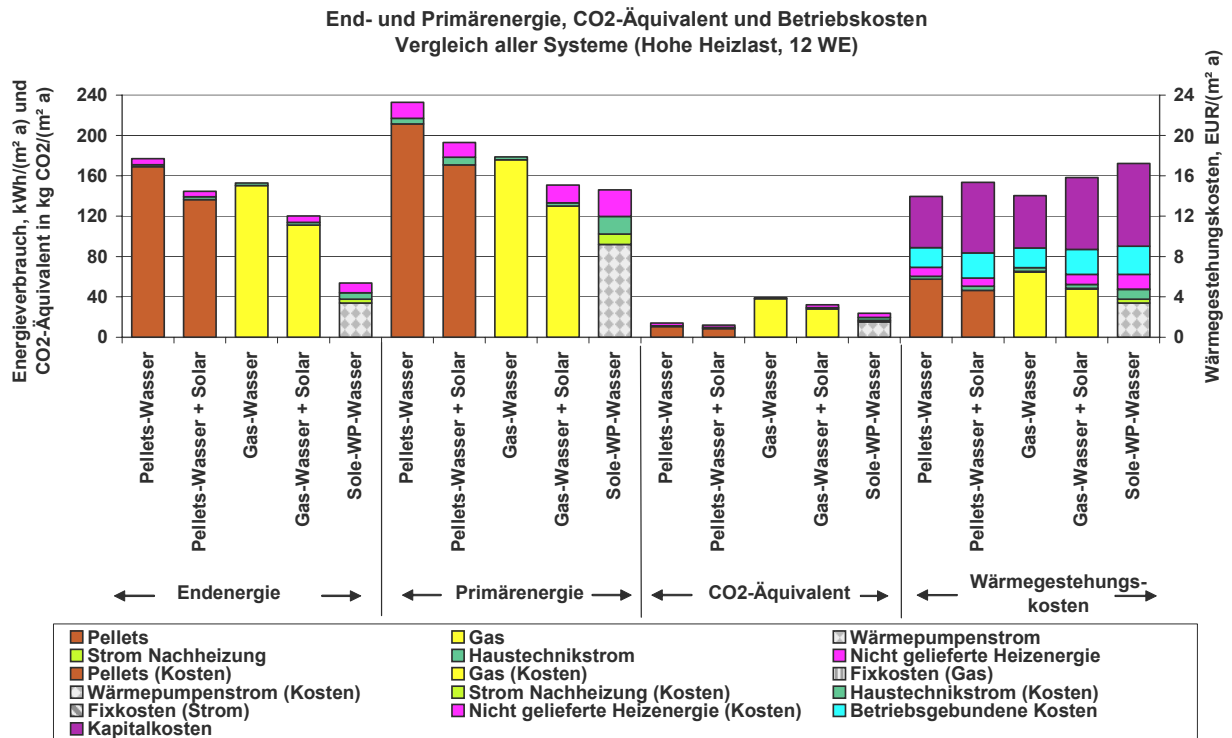


Abbildung 55 End- und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent-Emissionen Bilanz sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme ohne Haushaltsstrom (Extremvariante 1, hohe Heizlast, Referenzgebäude 2, 12 WE)

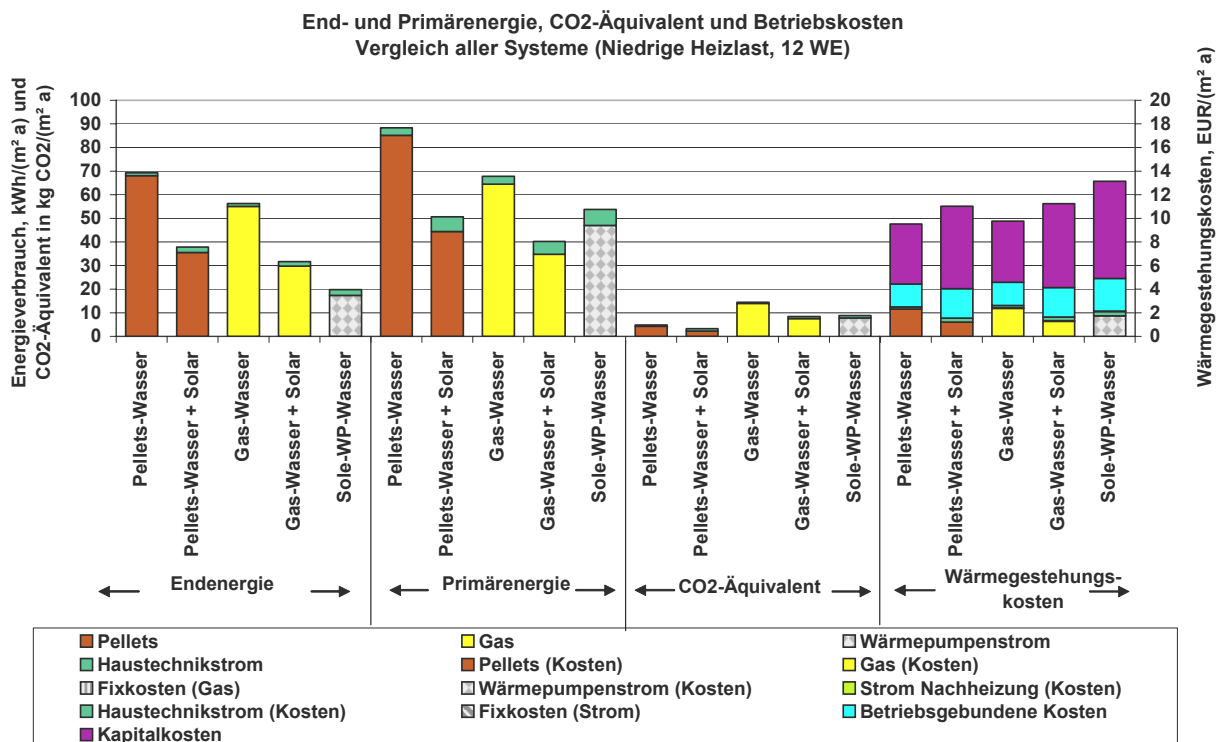


Abbildung 56 End- und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent-Emissionen sowie Wärmegestehungskosten der simulierten Heizungssysteme ohne Haushaltsstrom (Extremvariante 2, niedrige Heizlast, Referenzgebäude 2, 12 WE)

5.6 Übersicht über die quantitative Bewertung

Die Tabelle 23 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der quantitativen Bewertung für das Referenzgebäude 1. Da die Ergebnisse des Referenzgebäudes 2 sich nicht signifikant vom Referenzgebäude 1 unterscheiden (außer das der Energiebedarf aufgrund der größeren Kompaktheit der Gebäude etwas geringer ist) wird auf eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Referenzgebäudes 2 verzichtet.

Tabelle 23 Ergebniszusammenfassung der quantitativen Bewertung der Heizungssysteme

	PoS	PmS	GoS	GmS	SWP	Luft oS	Luft mS
Standardvariante							
Heizenergiebedarf kWh/m ² a	45,9	45,9	45,9	45,9	45,1	48,6	48,1
Brauchwarmwasserbedarf kWh/m ² a	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
Endenergiebedarf							
Pellets/Gas kWh/m ² a	126	82,5	102	69,4			
Strom Heizung kWh/m ² a					22,0	27,5	13,7
Strom Haustechnik kWh/m ² a	2,2	4,1	2,1	3,4	4,6	1,5	3,6
Primärenergiebedarf kWh/m ² a	163	114	125	91	75	80	45
CO ₂ -äquivalent-Emissionen kg/m ² a	8,9	7,3	26,8	19,4	11,9	12,7	7,6
Wärmegestehungskosten EUR/m ² a	12,5	14,3	12,4	14,2	14,8	15,6	17,1
Mittlere Raumtemperatur schwankung bei Heizbetrieb °C	±0,3	±0,3	±0,3	±0,3	±0,5	±0,4	±0,4
4 Stunden Winter Fensterlüftung Wiederaufheizzeit T _{op} =22°C h	3	3	3	3	6	18	18
14 Tage Winter Absenkung auf 15°C Wiederaufheizzeit T _{op} =22°C d	1	1	1	1	3	9	9
Extremszenario hohe Heizlast							
Heizenergiebedarf kWh/m ² a	101	101	101	101	101	101	101
Nicht gedeckter Heizbedarf kWh/m ² a	5,1	4,6	5,1	5,0	8,2	17,7	19,8
Wärmegestehungskosten EUR/m ² a	15,5	17,3	15,4	17,2	17,4	19,2	21,3
Extremszenario niedrige Heizlast							
Heizenergiebedarf kWh/m ² a	13,8	13,8	13,8	13,8	15,2	15,2	15,2
Wärmegestehungskosten EUR/m ² a	10,7	12,8	10,5	12,5	13,8	14,8	16,3

PoS – System 8, zentraler Pelletskessel ohne Solaranlage
 PmS – System 8, zentraler Pelletskessel mit Solaranlage
 GoS – System 8, zentraler Gaskessel ohne Solaranlage
 GmS – System 8, zentraler Gaskessel mit Solaranlage
 SWP – System 6, zentrale Solewärmepumpe mit dezentralen Brauchwarmwasserspeichern
 Luft oS - System 1, Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral ohne Solaranlage
 Luft mS – System 1, Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage
 Top operative Raumtemperatur (Mittelwert aus Lufttemperatur und Temperatur der Umschließungsflächen)

Als Ergebnis können die folgenden Aussagen getroffen werden:

Der Heizenergiebedarf für die Luftsysteme ist aufgrund des von 0,4 h⁻¹ auf 0,54 h⁻¹ erhöhten Luftwechsels etwas höher als bei den anderen Systemen. Der erhöhte Luftwechsel war zum Abdecken des Heizenergiebedarfs notwendig (vgl. Kap. 4.1).

Der Endenergiebedarf (Heizung, Bauchwarmwasser, Wärmeverluste) ist für die verschiedenen Systeme der Standardvariante sehr unterschiedlich. Die zentrale Pelletsheizung ohne Solaranlage (PoS) hat mit 126 kWh/m²a den höchsten und die Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage (Luft mS) mit 13,7 kWh/m²a Endenergiebedarf (ohne Haustechnikstrom). Es tritt also ein Verhältnis 1 : 9 zwischen diesen beiden Extremvarianten auf. Die mit Strom betriebenen Wärmepumpenvarianten (SWP und Luft) können den Endenergieeinsatz Strom aufgrund der Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen bei der Wärme vervielfachen.

Beim Primärenergiebedarf ist der Unterschied wesentlich geringer (Verhältnis 1 : 3,6). Die Reihenfolge der Systeme bleibt jedoch erhalten. Für den Primärenergiebedarf von Strom wurde hierbei der EU-17 Strommix (EU-Länder plus Norwegen und Schweiz) (vgl. Kap. 5.1.3) aus Gemis 4.1, 2003 zugrundegelegt.

Ein vollständig anderes Bild ergibt sich bei den CO₂-äquivalent-Emissionen. Hier hat das Pelletssystem mit Solaranlage (PmS) mit 7,3 kg/m²a die geringsten und das System Gas ohne Solaranlage (GoS) mit 26,8 kg/m²a die höchsten Emissionen. Das System Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage (Luft mS) liegt mit 7,6 kg/m²a allerdings nur knapp an zweiter Stelle. Dies ist durch die sehr geringen CO₂-äquivalent-Emissionen des Energieträgers Biomasse (nur geringe Emissionen durch Bau, Betrieb und Abriss) gegeben.

Die Wärmegestehungskosten bieten wiederum eine vollständig andere Reihenfolge. Hier schneidet das System Gaskessel ohne Solaranlage (GoS) mit 12,4 EUR/m²a am besten ab, knapp gefolgt vom System Pelletskessel ohne Solaranlage (PoS) mit 12,5 EUR/m²a. Hier halten sich besserer Wirkungsgrad und geringere Investitionskosten des Gaskessels bei höheren Anschluss- und Betriebskosten gegenüber dem Pelletskessel die Waage. Die Koppelung mit Solaranlagen verteuert die Systeme, da sich die zusätzlichen Investitionskosten nicht durch eingesparte Betriebskosten amortisieren lassen. Allerdings sind in dieser Betrachtung keine Förderungen für Solaranlagen berücksichtigt. Das teuerste System ist die Kleinstwärmepumpe Luftheizung dezentral mit Solaranlage (Luft mS) mit 17,1 EUR/m²a. Allerdings bekommt man hier auch eine kontrollierte Lüftungsanlage mitgeliefert, welche bei den anderen Systemen extra gekauft werden müsste.

Die Raumlufttemperatur wird für das Standardszenario bei allen Systemen gut gehalten. Leichte Vorteile haben die Radiatorsysteme, das Luftsystem liegt in der Mitte und die Fußbodenheizung liegt aufgrund Ihrer großen thermischen Masse mit ±0,5°C etwas schlechter.

Das Wiederaufheizverhalten der betrachteten Systeme nach einer definierten Abkühlung ist abhängig von der verfügbaren Leistung sowie der Trägheit des Wärmeabgabesystems. Am schnellsten reagieren hier die Radiatorsysteme mit zentraler Bereitung und Pufferspeicher. Der Pufferspeicher kann kurzfristig eine hohe Leistung abgeben und die Radiatoren sind relativ flink. Das System zentrale Sole Wärmepumpe Fußbodenheizung (SWP) ist zwar ebenfalls an einen Pufferspeicher gekoppelt, jedoch reagiert der Boden wesentlich langsamer. Für eine 4-stündige Fensterlüftung kühlt sich der Boden aufgrund dieser Trägheit jedoch auch wesentlich weniger stark ab, wie die anderen Systeme. Bei einer Abkühlung über 2 Wochen auf 15°C werden jedoch unter den getroffenen Annahmen 3 Tage bis zur Wiederaufheizung auf 22°C benötigt. Das Luftsystem hat aufgrund seiner durch den limitierten Luftwechsel und der maximalen Einblasetemperatur begrenzten Heizleistung die größten Probleme bei einer Wiederaufheizung bei geringen Außentemperaturen.

Das Szenario hohe Heizlast (25°C Raumtemperatur, Luftwechsel 0,8 h⁻¹, Brauchwassertemperatur 60°C, geringe Innenwärmen) erhöht den Heizenergiebedarf von 45 kWh/m²a bei der Standardvariante auf 101 kWh/m²a um mehr als das Doppelte gegenüber dem Standardszenario. Hier zeigt die Limitierung der verschiedenen Heizungssysteme (bei Auslegung auf die Standardvariante) auf unterschiedliches Benutzerverhalten. Während die zentralen Kesselsysteme mit Radiatoren die benötigte Wärme fast vollständig abdecken können (5 % Unterdeckung), so hat das System SWP bereits etwas mehr Probleme (8 % Unterdeckung). Signifikant sind jedoch die Unterdeckungen der Luftsysteme mit ca. 20 % Unterdeckung des Heizenergiebedarfs bedingt durch die begrenzte Heizleistung durch limitierten Luftwechsel und der maximalen Einblasetemperatur. Dies kann man natürlich auch als positiven Erziehungseffekt für die Benutzer interpretieren.

Das Szenario niedrige Heizlast (20°C Raumtemperatur, Luftwechsel 0,4 h⁻¹, Brauchwassertemperatur 45°C, Bedarf von 50 auf 30 l/d Person abgesenkt, hohe Innenwärmen) bringt eine Reduktion des Heizenergiebedarfs auf ca. 14 kWh/m²a. Die Wärmegestehungskosten sinken nur um 10%, da Kapital- und betriebsgebundene Kosten konstant sind.

6 Zusammenfassung

Der Energieverbrauch von neuen Gebäuden hat sich in den letzten 25 Jahren drastisch reduziert. Dies ist auf eine rasante Entwicklung von Baustoffen und Bautechnik zurückzuführen. Heute können Häuser mit nur einem Sechstel des Energieverbrauchs (50 kWh/(m²a)) im Vergleich zum Baustandard vor 30 Jahren ohne Mehrkosten gebaut werden. Mit geringen Mehrkosten kann der Energieverbrauch noch weiter gesenkt werden. Gebäude in Niedrigenergiebauweise (bzw. Passivhausstandard) stellen allerdings andere Anforderungen an das Heizungssystem als herkömmliche Gebäude. In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich Mehrfamilienhäuser, gedämmt nach Passivhausstandard, betrachtet.

Bei solchen Gebäuden spielt das Benutzerverhalten eine sehr große Rolle bei der Vorhersage des Energieverbrauchs. Eine Erhöhung der Raumtemperatur von 20°C auf 25°C bei dem in der Studie definierten Referenzgebäude 1 erhöht, bei sonst gleichbleibendem Verhalten, den Heizenergiebedarf um 57 % (vgl. Tabelle 1). Bei zwei angenommenen Extremszenarien des Benutzerverhaltens (Raumtemperatur, Innenwärmen und Lüftung) schwankt der Heizenergiebedarf zwischen 11,6 und 100,7 kWh/m²a (vgl. Tabelle 1).

Als Wärmeabgabesysteme eignen sich reine Luftheizungen (sofern die spezifische Heizlast aufgrund Transmission und Infiltration nicht 14 W/m² überschreitet) sowie alle gängigen Warmwasser-Wärmeabgabesysteme (Radiator-, Fußboden- und Wandheizung). Die Innenoberflächentemperatur der Außenbauteile bei solch hoch wärmedämmten Gebäuden liegen immer nahe der Raumtemperatur, womit generell ein gutes Raumklima gewährleistet ist. Die Wärmeabgabeflächen können, aufgrund der geringen Heizlast, mit geringen Übertemperaturen gegenüber der Raumtemperatur betrieben werden, womit ebenfalls eine gleichmäßige Raumtemperatur gewährleistet ist.

Die Benutzerwünsche von Bewohnern von Niedrigenergie-Mehrfamilienhäusern wurden in einer Befragung erhoben. Primäres Ergebnis ist, dass den Bewohnern die Art der Heizung nicht so wichtig ist, vorausgesetzt die Anlage ist einfach bedienbar, wenig fehleranfällig und arbeitet möglichst wartungsfrei. Auftretende Akzeptanzprobleme konnten immer wieder auf nicht optimal geplante und errichtete Heizanlagen (Dimensionierung, Regelung, Geräusentwicklung etc.) zurückgeführt werden – relativ unabhängig vom Typus des Heizsystems.

In einer, sicher nicht vollständigen, Betrachtung von 9 verschiedenen Heizungssystemen für solche Gebäude (4 Luftheizungs- und 5 Wasserheizungssysteme) mit den Wärmequellen dezentrale Abluftwärmepumpe, zentrale Erdreichwärmepumpe, zentraler Pellets- und Gaskessel sowie dezentraler Kaminofen und dezentraler Kachelofen wurden deren Eigenschaften, Vor- und Nachteile sowie der Platzbedarf beschrieben.

Vier dieser Systeme (dezentrale Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpe, zentrale Sole/Wasser-Wärmepumpe, zentraler Gas- und zentraler Pelletskessel (alle zentralen Systeme mit Zweileiternetzen) wurden in einer detaillierten Simulation auf ihre Eigenschaften, End-, und Primärenergiebedarf, CO₂-äquivalent Emissionen, Wärmegestehungskosten und auf den Einfluss von verschiedenem Benutzerverhalten getestet. Hierfür wurden zuerst zwei Referenzgebäude, ein Reihenhaus mit 3 Wohneinheiten und ein Geschosswohnbau mit 12 Wohneinheiten, basierend auf Untersuchungen aus vorausgegangenen Projekten (Cepheus, 2001, Könighofer et al., 2001) definiert. Das Benutzerverhalten wurde zum einen aus Messungen in Cepheus

(2001) sowie einer in dieser Arbeit durchgeführten Befragung in 52 Wohnungen von Mehrfamilien-Passiv- und Niedrigenergiehäusern erstellt. In diesen Erhebungen und Messungen zeigte sich, dass die durchschnittliche Raumlufttemperatur mit 22,5°C anzusetzen ist. Dies wurde für alle weiteren Betrachtungen angenommen.

Bis auf das System zentrale Sole/Wasser-Wärmepumpe wurden zudem alle Systeme mit und ohne Einbeziehung einer thermischen Solaranlage für Brauchwarmwasserbereitung und Heizung (Heizung nur bei den zentralen Systemen) betrachtet.

Den geringsten Energiebedarf hat das dezentrale System Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solaranlage, gefolgt vom zentralen Sole-Wasser-Wärmepumpensystem und etwa gleichwertig dem dezentralen Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystem ohne Solaranlage. Die geringsten CO₂-äquivalent Emissionen hat hingegen das zentrale Pelletssystem. Von großer Bedeutung für den gesamten Primärenergiebedarf ist der Haushaltsstrom, der eigentlich nichts mit dem Heizungssystem zu tun hat. Daher wurde er auch in den neuesten Passivhauskriterien in Deutschland aus der Betrachtung herausgenommen. Bei den Wärmegestehungskosten liegen die zentralen Kesselvarianten ohne thermische Solaranlage am günstigsten. Die dezentralen Luft/Luft/Wasser-Systeme schneiden aufgrund der Nachheizung von Zuluft und Brauchwarmwasser über E-Patronen trotz Abluftwärmerückgewinnung in den Betriebskosten ähnlich ab, wie die Sole-Wärmepumpe. Die Kapitalkosten der Luft/Luft/Wasser-Systeme sind aufgrund der Kosten für die Luftverteilung jedoch wesentlich höher, was zu den höchsten Wärmegestehungskosten führt. Allerdings wird hierbei auch eine kontrollierte Lüftungsanlage mitgeliefert, welche bei den anderen Systemen separat zugekauft werden müsste.

Für „normales“ Benutzerverhalten können alle Systeme die gewünschte Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte über die gesamte Heizperiode halten. Bei extremen Benutzerverhalten (hohe Heizlast durch hohe Raumtemperatur und geringe Innenwärmen) und nach Auskühlvorgängen wird jedoch die limitierte Heizlast des dezentralen Luft/Luft/Wasser-Wärmepumpensystems ersichtlich. Bei einer Wiederaufheizung reagiert die Fußbodenheizung naturgemäß träger als eine Radiatorheizung, allerdings ist auch die Auskühlung geringer.

Zwischen den beiden Referenzgebäuden konnten keine großen Unterschiede im Verhältnis der Energieverbräuche, Emissionen und Wärmegestehungskosten für die verschiedenen Heizungssysteme festgestellt werden. Der Endenergiebedarf war im größeren Gebäude aufgrund der höheren Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger (und weniger aufgrund der größeren Kompaktheit) allerdings um ca.10 % geringer. Auch die Wärmegestehungskosten liegen aufgrund der Investitionskostendegression bei größeren Einheiten und dem geringeren Energiebedarf im größeren Gebäude um 10 % günstiger.

Generell kann nicht gesagt werden, dass dieses oder jenes Heizungssystem das Beste darstellt – jeder Typus hat ein spezifisches Stärke-Schwächenprofil, dessen Gesamtbewertung letztlich von Art und Umfeld des Gebäudes und den jeweiligen Nutzerpräferenzen abhängt. Daher werden im Leitfaden vor allem die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme dargestellt und können von den Benutzern des Handbuchs selbst bewertet werden.

7 Literatur

Adensam, H. et al. (2000), Kachelöfen im nachhaltigen Energiekonzept, Projekt-Endbericht, Österreichisches Ökologie-Institut, Wien.

Afjei T. (2000), Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser, Technisches Handbuch, Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele, Schweizer Bundesamt für Energie, Dezember 2000.

Baumbach, G., Angerer, M., Zuberbühler, U., Straub, D. (1995), Schadstoffemissionen gewerblicher und industrieller Holzfeuerungen – Ergebnisse eines Feldmessprogrammes; im Selbstverlag des Institutes für Verfahrens- und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart.

Biermayr, P. et al. (2001), Analyse fördernder und hemmender Faktoren bei der Markteinführung von innovativen Wohnbauten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 25/2001, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

Buderus (1994), Buderus Heiztechnik Information 2/94, Buderus Heiztechnik GmbH, Wetzlar

Bühning A. (2001), Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Lüftungs-Kompaktgeräten mit integrierter Kompressionswärmepumpe, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg.

CEPHEUS (2001), Cost Efficient Passive Houses as EUropean Standard; Ein Projekt innerhalb des THERMIE-Programms der Europäischen Kommission, Generaldirektion Transport und Energie, Projekt-Nummer: BU/0127/97, Laufzeit: 1/98 bis 12/01

DIN 1946-2 (1994), Raumluftechnik; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln), Januar 1994.

Egg (1999), Angebot Wohnraumlüftung, Projekt Kohler Wohnbau, Egg der Firma Drexel Solarlufttechnik und Lüftungsbau GmbH

EN1264 (1997), Fußbodenheizung - Systeme und Komponenten, November 1997

EVA (2002), Marktübersicht für Pelletskessel der Energieverwertungsagentur, <http://www.eva.wsr.ac.at/service/pelletkessel.htm>

Feist, (2001), Passivhaus Projektierungs Paket PHPP, Passivhaus-Institut, Darmstadt

Feist, (2003), Was ist ein Passivhaus, Passivhaus-Institut, (<http://www.passiv.de/>)

Gemis 4.1 (2002), Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Ökoinstitut e.V., Freiburg, Deutschland, <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>

Imug, (2000), Beratungsgesellschaft für sozial-ökologische Innovationen mbH, Das SynergieHaus im Urteil seiner Bewohner. Gesamtauswertung der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung 1997-1999. Hannover 2000.

Jordan U., Vajen K. (2001), Realistisches Trinkwasser-Zapfprofil für bis zu 60 Wohneinheiten, OTTI '01, Tagungsbericht, 11. Symposium Thermische Solarenergie, 9.-11.5. 2001, Staffelstein.

Jungmeier et al. (1995), Emissionsfaktoren und energietechnische Parameter für die Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen i Bereich Raumwärme, Joanneum Research, Graz

- Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (2003)**, Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit und Umweltaspekte, 3. Auflage, Springer.
- Könighofer, K., Padinger, R., Suschek-Berger, H., Mach, Th., Streicher, W. (2001)**, Anforderungsprofile für Biomassefeuerungen zur Wärmeversorgung von Objekten mit niedrigem Energiebedarf, Endbericht zu „Haus der Zukunft“ Forschungsprojektes im Auftrag des BMVIT, Hrsg.: Joanneum Research, Institut für Energieforschung, Elisabethstr. 5, 8010 Graz
- Maico (1999)**, AEREX Planungsunterlagen
- Margreiter, G. (1987)**, Baubiologie und Heizung - Gesundheit in Wohnung und Haus, Jahrestagung 1987 des österreichischen Institutes für Baubiologie in St. Wolfgang / Salzkammergut
- Meteonorm**, Version 4.00, (1999), METEOTEST, Fabriksstrasse 14, CH-3012 Bern
- MIVA (2003)**, Kostenaufstellung für die Technikzentrale für das Christophorus-Haus von Ing. Schloßgangl, Stand: 5.5.2003
- Müller, A., Walter, F. (1992)**, Ravel zahlt sich aus - Praktischer Leitfaden für wirtschaftliche Berechnungen, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern.
- Neubarth, J., Kaltschmitt, M. (2000)**, Erneuerbare Energien für Österreich, Springer
- Ö-NORM B 8135**, Vereinfachte Berechnung des zeitbezogenen Wärmeverlustes (Heizlast) von Gebäuden
- Olesen B.W., Schøler M. und Fanger P.O. (1979)**, Indoor Climate 36. S. 561/579.
- Österreichische Nationalbank (2000)**, Diskont- und Lombardsätze der Österreichischen Nationalbank. (<http://www.oenb.co.at>) Wien, 2000
- Paul (2002)**, Preisliste Wärmerückgewinnungsgeräte und Wärmepumpen, Stand: 3.7.2002
- Pettneu (2001)**, Angebot der Firma Kaplenig GmbH, Kötschach-Mauthen vom 20.3.2001 für eine Pellets-Zentralheizungsanlage
- Pfeiffer F., Struschka M., von Lepel F. und Baumbach G. (1999)**, Start- und Stopp-Emissionen von Öl- und Gasfeuerungen, Wärmetechnik, Versorgungstechnik, 5/1999, S. 34-41.
- PHPP, (1999)**, Passivhaus Projektierungs Paket, Passivhaus Institut Darmstadt, Deutschland
- Recknagel H., Sprenger E., Schramek E-R. (2001)**, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag, München 2001
- Rohracher, H., Kukovetz, B., Ornetzeder, M., Zelger, T., Enzensberger, G., Gadner, J., Zelger, J., Buber, R. (2001)** Akzeptanzverbesserung von Niedrigenergiehaus-Komponenten als wechselseitiger Lernprozess von Herstellern und AnwenderInnen, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 26/01, Wien: BMVIT,.
- Rohracher, H., Suschek-Berger, J. (1997)**, Verbreitung von Biomasse-Kleinanlagen. Situationsanalyse und Handlungsempfehlungen. Projekt-Endbericht, IFZ, Graz.
- Rohrman, B. (1994), (EPSILON Team):** Sozialwissenschaftliche Evaluation des Passivhauses in Darmstadt. Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt.
- Rohrman, B. (1995), (EPSILON Team):** Sozialwissenschaftliche Evaluation hessischer Niedrigenergie-Häuser. Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt.
- Schweyer K. (2002)**, Messung und thermische Gebäudesimulation zweier Passivhäuser im Vergleich, Diplomarbeit Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik.
- Seitz G. (1993)**, Gesund heizen, Schriftenreihe der S-Bausparkasse, Band 2 Wien.

Stockinger, H., Oberberger, I. (1998), Systemanalyse der Nahwärmversorgung mit Biomasse, dbv –Verlag, Graz.

Streicher, W., (2003), Sonnenenergienutzung, Skriptum, Institut für Wärmetechnik, TU Graz, <http://wt.tu-graz.ac.at>

Streicher W., Fink C., Heimrath R., Heinz A., Riva R., Mach T. (2001), Solarunterstützte Wärmenetze Projekt der Programmlinie „Haus der Zukunft“, Endbericht 2002.

TRNSYS (2000), A Transient System Simulation Program – Version 15, Klein S.A., Beckmann W.A. et al., Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA.

Vaillant (2000), Seminar und Trainingshandbuch: Wärmepumpen für Sole-Wasser, Wasser-Wasser und Direktverdampfung, Ausgabe 12/2000.

Vaillant (2001), Preisliste 10 Heizungswärmepumpen Sole-Wasser GEOTHERM exklusiv.

Vajen, K., (1996), Systemuntersuchungen und Modellierung solarunterstützter Warmwasserbereitungssysteme in Freibädern. Dissertation. Universität Marburg,

VDI 2067, Blatt 1, (2000), Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung,

VDI 2078 (1996), Richtlinie VDI 2078 - Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume, VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

VDI 4640 Blatt 2 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI-Gesellschaft Energietechnik

Zelger (2003), Angebot der Firma Ing. Kerschbaum Haustechnik, Korneuburg, für eine Pelletsheizung für das Passivhaus Zelger in Korneuburg