



Nutzungsgradoptimierung von Biomasse-
und Biomasse/Solar- Heizsystemen
im kleinen Leistungsbereich

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
an der
Technischen Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Vorgelegt von: **Martin RAMMER, BSc.**
Betreuer: Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger
Dipl.-Ing. Klaus Supancic

Graz, 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources

Graz, am 06.12.2012

.....

(Unterschrift)

Danksagung

Die Diplomarbeit wurde für die Firma BIOS Bioenergiesysteme GmbH in Kooperation mit dem Institut Prozess und Partikeltechnik an der Technischen Universität Graz angefertigt. Ein herzliches Dankeschön gilt Herrn Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger, der die Betreuung seitens der TU Graz übernommen hat.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Klaus Supancic, ein Mitarbeiter der Firma BIOS Bioenergiesysteme GmbH, für sein Engagement, seine Ratschläge und den gemeinsamen Besprechungen sowie allen anderen Mitarbeitern der Firma BIOS Bioenergiesysteme GmbH, die mich bei meiner Arbeit durch Wort und Tat unterstützt haben.

Ferner möchte ich mich noch beim Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Heimrath, vom Institut für Wärmetechnik an der Technischen Universität Graz, für die Schulungen des Simulationsprogramm TRNSYS und der Bereitstellung von TRNSYS Types bedanken.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten und mich auch in allen anderen Bereichen des Lebens unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	1
ABSTRACT	3
1 EINLEITUNG.....	5
2 AUFGABENSTELLUNG	6
3 THEORIE.....	7
3.1 HEIZUNGSSYSTEME.....	7
3.1.1 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung im Stand-alone-Betrieb	7
3.1.2 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung und Pufferspeicher	8
3.1.3 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage.....	8
3.2 BIOMASSEKLEINFEUERUNGSANLAGEN AUF BASIS PELLETKESSEL	9
3.2.1 Fördertechnik.....	9
3.2.2 Feuerungstechnik	10
3.3 PUFFERSPEICHER	11
3.3.1 Kombinationsspeicher mit Warmwasserbereitung	11
3.3.2 Kombinationsspeicher mit Warmwasserbereitung plus integrierten Solarwärmetauscher.....	12
3.4 FLACHKOLLEKTOR.....	13
3.5 WIRKUNGSGRAD UND JAHRESNUTZUNGSGRAD	14
4 METHODIK	15
4.1 ERHEBUNG DER ALLGEMEINEN ANLAGENDATEN	15
4.2 MESSDATENERHEBUNG	15
4.2.1 Messgeräte	15
4.2.2 Messdaten.....	16
4.3 DATENAUSWERTUNG.....	16
4.3.1 Stundenauswertung	17
4.3.2 Wochen- und Monatsauswertung	21
4.3.3 Heizperiodenauswertung.....	24
4.4 SIMULATIONSPROGRAMM TRNSYS	26
4.4.1 Allgemeines	26
4.4.2 Komponenten	27
4.5 AUFBAU SIMULATIONSMODELL	36
4.5.1 Referenzmodell.....	36
4.5.2 Verifikation.....	36
4.5.3 Anpassung des Referenzmodells an die weiteren untersuchten Anlagen	37
4.5.4 Teststand für die Kesselwirkungsgradbestimmung	38
4.6 SENSITIVITÄTSANALYSE.....	39
4.6.1 Allgemein	39
4.6.2 Durchführung	39
4.6.3 Ranking	41
4.6.4 Optimierungen.....	41
4.7 HEIZUNGSSYSTEMVERGLEICH/VOLLKOSTENRECHNUNG.....	42

5	DISKUSSION UND ERGEBNISSE.....	45
5.1	ANLAGENCHARAKTERISTIK.....	45
5.2	FELDMESSDATEN.....	45
5.3	ANLAGENAUSWERTUNG.....	46
5.3.1	<i>Anlage A</i>	46
5.3.2	<i>Anlage B</i>	62
5.3.3	<i>Anlage G</i>	79
5.3.4	<i>Anlage I</i>	94
5.4	ANLAGENVERGLEICH.....	104
5.5	TRNSYS VERIFIKATION.....	107
5.5.1	<i>Referenzmodell</i>	107
5.5.2	<i>Teststandergebnisse für Kesselwirkungsgrade</i>	114
5.6	TRNSYS SENSIBILITÄTSANALYSE.....	115
5.6.1	<i>Ergebnis der Sensibilitätsanalyse</i>	115
5.6.2	<i>Ranking der Optimierungsmaßnahmen</i>	124
5.6.3	<i>Optimierungsmaßnahmen</i>	126
5.6.4	<i>Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen für andere Anlagenverschaltungen</i>	132
5.7	HEIZUNGSSYSTEMVERGLEICH/VOLLKOSTENRECHNUNG.....	139
6	ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN.....	148
6.1	DATENAUSWERTUNG.....	148
6.2	SIMULATION TRNSYS.....	149
6.3	SENSIBILITÄTSANALYSE ZUR IDENTIFIZIERUNG VON SCHWACHSTELLEN SOWIE DER DEFINITION VON OPTIMIERUNGSMAßNAHMEN.....	149
6.4	HEIZUNGSSYSTEMVERGLEICH/VOLLKOSTENRECHNUNG.....	155
6.5	GESAMTHEITLICHE BETRACHTUNG.....	156
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	162
	ANHANG	
	VOLLKOSTENRECHNUNGEN.....	A1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung im Stand-alone-Betrieb	7
Abbildung 2:	Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung und Pufferspeicher	8
Abbildung 3:	Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage	9
Abbildung 4:	Unterschubfeuerung (Retortenfeuerung)	10
Abbildung 5:	Pufferspeicher mit Warmwasserbereitung	12
Abbildung 6:	Pufferspeicher mit Warmwasserbereitung und integrierten Solarwärmetauscher	12
Abbildung 7:	Aufbau Flachkollektor	13
Abbildung 8:	Pufferspeicheranschlüsse	20
Abbildung 9:	Solarkreisumpfenregelung	31
Abbildung 10:	Kesselkreisumpfenregelung	32
Abbildung 11:	Rücklaufanhebungsregelung	33
Abbildung 12:	Verbraucherkreisregelung	34
Abbildung 13:	Hydraulische Verschaltung des Warmwasserkreises	35
Abbildung 14:	Kesselmesstands Aufbau in TRNSYS	38
Abbildung 15:	Pufferspeichertemperaturen der Anlage A	48
Abbildung 16:	Betriebsverhalten der Anlage A in der kältesten Winterwoche	50
Abbildung 17:	Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Winterwoche	51
Abbildung 18:	Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Sommerwoche	52
Abbildung 19:	Korrelation zwischen Kesselnutzungsgrad pro Woche und relative Kessellast pro Woche	54
Abbildung 20:	Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage A	57
Abbildung 21:	Wärmeproduktion, Wärmeverbrauch und Systemverluste der Anlage A	58
Abbildung 22:	Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage A	59
Abbildung 23:	Pufferspeichertemperaturen der Anlage B	65
Abbildung 24:	Betriebsverhalten der Anlage B in der kälteste Winterwoche	67
Abbildung 25:	Betriebsverhalten der Anlage B in einer durchschnittlichen Winterwoche	68
Abbildung 26:	Betriebsverhalten der Anlage B in einer durchschnittliche Sommerwoche	69
Abbildung 27:	Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselstarts pro Woche	71
Abbildung 28:	Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage B	73
Abbildung 29:	Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage B	74

Abbildung 30:	Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage B.....	75
Abbildung 31:	Wärmeproduktion Solaranlage vs. Wärmeverbrauch Gesamt und Warmwasserverbrauch der Anlage B	76
Abbildung 32:	Pufferspeichertemperaturen der Anlage G.....	81
Abbildung 33:	Betriebsverhalten der Anlage G in der kältesten Winterwoche	83
Abbildung 34:	Betriebsverhalten der Anlage G in einer durchschnittlichen Winterwoche	84
Abbildung 35:	Betriebsverhalten der Anlage G in einer durchschnittliche Sommerwoche	85
Abbildung 36:	Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche.....	86
Abbildung 37:	Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage G	88
Abbildung 38:	Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage G	89
Abbildung 39:	Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage G	90
Abbildung 40:	Wärmeproduktion Solaranlage vs. Wärmeverbrauch Gesamt und Warmwasserverbrauch der Anlage G	91
Abbildung 41:	Betriebsverhalten der Anlage I in der kältesten Winterwoche.....	96
Abbildung 42:	Betriebsverhalten der Anlage I in einer durchschnittlichen Winterwoche.....	97
Abbildung 43:	Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche.....	99
Abbildung 44:	Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start	99
Abbildung 45:	Wärmeverbrauch der Anlage I.....	101
Abbildung 46:	Referenzmodell.....	107
Abbildung 47:	Rohrleitungen Anlage B	112
Abbildung 48:	Vergleich des Kesselbetriebsverhaltens in Abhängigkeit der Kesselleistung	123
Abbildung 49:	Vergleich der spezifischen Wärmegestehungskosten, aufgeschlüsselt nach kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundenen- und sonstigen Kosten	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Position der Messgeräte	15
Tabelle 2:	Übersicht über die gemessenen Daten	16
Tabelle 3:	Parameterliste für die Sensibilitätsanalyse.....	40
Tabelle 4:	Berücksichtigte Kosten für die Vollkostenrechnung laut VDI 2067	44
Tabelle 5:	Anlagencharakteristik.....	45
Tabelle 6:	Einstufungen von Korrelationskoeffizienten	53
Tabelle 7:	Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufung von den Korrelationen der Anlage A.....	54
Tabelle 8:	Monatsenergiebilanz der Anlage A	56
Tabelle 9:	Jahresauswertung der Anlage A.....	60
Tabelle 10:	Gegenüberstellung 15 Minuten- und Stundenauswertung.....	63
Tabelle 11:	Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufungen von den Korrelationen der Anlage B.....	70
Tabelle 12:	Monatsauswertung der Anlage B.....	72
Tabelle 13:	Jahresauswertung der Anlage B.....	77
Tabelle 14:	Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Erwartungen von den Korrelationen der Anlage G	86
Tabelle 15:	Monatsauswertung der Anlage G.....	87
Tabelle 16:	Jahresauswertung der Anlage G.....	92
Tabelle 17:	Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufungen von den Korrelationen der Anlage I.....	98
Tabelle 18:	Monatsauswertung der Anlage I.....	100
Tabelle 19:	Jahresauswertung der Anlage I.....	102
Tabelle 20:	Anlagenvergleich auf Basis Messdaten	106
Tabelle 21:	Solaranlageneinstellungen	108
Tabelle 22:	Kesseleinstellungen	109
Tabelle 23:	Pufferspeichereinstellungen.....	110
Tabelle 24:	gewählte Einstellparameter für das Simulationsmodell Rohr in TRNSYS	112
Tabelle 25:	Jahresenergiebilanz für Anlage B laut Simulation und Messdaten	113
Tabelle 26:	Kesselwirkungsgrad.....	114
Tabelle 27:	Sensibilitätsanalyse Ergebnisse	115
Tabelle 28:	Ranking der untersuchten Optimierungsmaßnahmen anhand der Pelleteinsparung.....	124

Tabelle 29:	Optimierte Varianten- Basis Anlage B	126
Tabelle 30:	Optimierte Varianten- Basis Anlage A	132
Tabelle 31:	Optimierte Varianten- Basis Anlage G	135
Tabelle 32:	Optimierte Varianten- Basis Anlage I.....	137
Tabelle 33:	TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse für die Basis- und optimierten Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher.....	139
Tabelle 34:	TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse für die Basis- und optimierten Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage.....	140
Tabelle 35:	Allgemeine Rahmenbedingungen und Basisdaten für die Vollkostenrechnung verschiedener Heizungssysteme	141
Tabelle 36:	Investitionskosten der Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher.....	142
Tabelle 37:	Investitionskosten der Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage.....	143
Tabelle 38:	Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das optimierte Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²).....	144
Tabelle 39:	Spezifischer Kostenvergleich der Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher	145
Tabelle 40:	Spezifischer Kostenvergleich der Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage	145

Abkürzungen, Formelzeichen, chemische Formelzeichen, Einheiten, Präfixe und Indizes

Abkürzungen

BKF	Biomassekleinfeuerungen
WMZ	Wärmemengenzähler
ZHS	Zentralheizungssystem
Int.	integriert

Formelzeichen

c_p	Isobare spezifische Wärmemenge
DG	Deckungsgrad
ΔT	Temperaturdifferenz
η	Wirkungsgrad, Nutzungsgrad
L_{Kessel}	relative Kessellast
ρ	Dichte
m	Masse
H_u	Heizwert
P	Leistung
Q	thermische Energie
q	spezifische thermische Energie
t	Zeit
T	Temperatur
UA	Wärmedurchgangskoeffizient mal Fläche
\dot{V}	Volumenstrom
W	elektrische Energie
w	spezifische elektrische Energie

Chemische Formelzeichen

CO	Kohlenstoffmonoxid
O ₂	Sauerstoff
TOC	gesamter organisch gebundener Kohlenstoff

Einheiten

a	annum (Jahr)
°C	Grad Celsius
h	Stunde

K	Kelvin
Wh	Wattstunden (3.600J)
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
p.a	per annum (pro Jahr)
Vol%	Volumprozent

Präfixe

k	Kilo (10 ³)
M	Mega (10 ⁶)

Indizes

ab	abgegeben
amb	Umgebung
avg	durchschnittlich, average
B	Kessel (Boiler)
burn	Brenner (Burner)
el	elektrisch
H	hoch (high)
ges	Gesamt
GHV	Brennwert
Input	Eingang
L	niedrig (low)
lower	untere
max	maximal
min	minimal
Nenn	Nennleistung
OFF	Brenner außer Betrieb, Standby
ON	Brenner im Betrieb
Output	Austritt
Set	Soll
start	Startphase
Solar	Solaranlage
tm	thermische Masse
upper	obere
zu	zugeführt

Zusammenfassung

Moderne Biomassekleinfeuerungsanlagen (<100kW) weisen Wirkungsgrade in Nenn-/Teillast von meist über 90% auf. Im Vergleich dazu erreichen Biomassekleinfeuerungsanlagen im Jahresbetrieb im Feld nur Kessel-Jahresnutzungsgrade zwischen 70 bis 80%.

Ziel dieser Arbeit war es, die Ursachen für die geringen Kessel-Jahresnutzungsgrade zu identifizieren und mögliche Optimierungsmaßnahmen zu definieren. Für diese Zielsetzung wurden zuerst Messdaten von unterschiedlichen Heizungssystemen (Pelletkessel mit separater Warmwasserbereitung, Pelletkessel mit Pufferspeicher, Pelletkessel mit Pufferspeicher und Solaranlage) ausgewertet und bewertet, um relevante Einflussgrößen im Zusammenhang mit dem Kessel-Jahresnutzungsgrad zu ermitteln.

Zusätzlich zur Messdatenauswertung wurde der Jahresbetrieb der Anlagen mittels TRNSYS, einem Klimaengineeringprogramm, nachsimuliert. Im Rahmen einer Sensibilitätsanalyse konnten dabei wesentliche Schwachstellen und Kriterien für die Beeinflussung des Jahresnutzungsgrades identifiziert und Optimierungsmaßnahmen definiert werden. Anschließend wurden verschiedene Varianten für bestehende und zukünftige Anlagen untersucht. Zum Abschluss wurde für die Basisvarianten sowie die optimierten Anlagenvarianten eine Vollkostenrechnung nach Richtlinie VDI 2067 durchgeführt.

Aus der Datenauswertung war zu sehen, dass die Kessel-Jahresnutzungsgrade im Bereich von 73 bis 84,5% und somit deutlich unterhalb des Wirkungsgrades laut Datenblatt (ca. 92%) liegen. Der Gesamtnutzungsgrad der unterschiedlichen Anlagen liegt unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs lediglich im Bereich von 58 bis 72%.

Im Rahmen der Anlagensimulation mit TRNSYS wurde zunächst das erstellte Simulationsmodell anhand der verfügbaren Messdaten verifiziert. Im Rahmen der nachfolgenden Sensibilitätsanalyse konnten die einzelnen Einflussfaktoren auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad sowie den Gesamtnutzungsgrad der Anlagen identifiziert werden. Die wesentlichen Einflussfaktoren lassen sich in regelungstechnische Faktoren (Kessel- und Anlagenregelung), kesselspezifische Faktoren (Rauchgasaustrittstemperatur, O₂-Gehalt, Verluste an die Umgebung) sowie auslegungsrelevante Faktoren (Dimensionierung von Kessel, Pufferspeicher und Solaranlage, Isolierung) unterteilen.

Durch eine Optimierung der Regelung sowie eine entsprechende Isolierung aller Anlagenteile, die auch bei bestehenden Anlagen durchgeführt werden könnten, könnte, je nach Anlagenverschaltung, der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage um 5,9 (Kessel ohne Pufferspeicher & Solaranlage) bis 8,8% Punkte (Kessel mit Pufferspeicher & Solaranlage) angehoben werden. Unter Ausschöpfung aller möglichen Optimierungsmaßnahmen (optimales Kesseldesign, optimale Dimensionierung & Ausführung aller Komponenten, optimale Regelung von Kessel & Gesamtanlage bei Neuanlagen) könnte der Jahresnutzungsgrad sogar um 13,7 (Kessel ohne Pufferspeicher & Solaranlage) bis 16,6% Punkte (Kessel mit Pufferspeicher & Solaranlage) gesteigert werden.

Zur wirtschaftlichen Evaluierung der Optimierungsmaßnahmen wurde eine Vollkostenrechnung für verschiedene optimierte Varianten durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei Gebäuden mit relativ niedrigem Wärmebedarf (ca. 50kWh/m²*a) die spezifischen Wärmegestehungskosten hauptsächlich von den kapitalgebundenen Kosten abhängen, die

zwischen 63 und 78% der Gesamtkosten ausmachen können. Dementsprechend gering ist das Kosteneinsparungspotential durch die Reduktion des Brennstoffverbrauchs. Aus diesem Grund sind in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit jene Optimierungsmaßnahmen am effektivsten, die ohne Mehrkosten realisiert werden können (z.B. optimierte Regelungseinstellung). Optimierungsmaßnahmen, die mit Zusatzkosten verbunden sind (z.B. verstärkte Isolierung) können die Wirtschaftlichkeit hingegen kaum verbessern.

Insgesamt zeigte sich daher, dass Anlagen ohne Pufferspeicher & Solaranlage trotz des vergleichsweise geringeren Jahresnutzungsgrades und höheren Pelletverbrauchs wirtschaftlicher betrieben werden können als Anlagen mit Pufferspeicher & Solaranlage.

Wenn in Zukunft die Attraktivität von den ressourcenschonenderen Anlagen mit Pufferspeicher und Solaranlage gesteigert werden soll, sind spezielle Fördermaßnahmen für Solaranlage und Pelletkessel mit hohem Jahresnutzungsgrad erforderlich.

Abstract

Modern small-scale biomass combustion plants (<100kW) usually show efficiencies in nominal-/partial load above 90%. In comparison, the annual utilization rates of these plants only reach between 70 to 80%.

The aim of this work was to identify the reasons for the low annual utilization rates of small-scale biomass boilers and to define possible optimization measures. For this objective, monitoring data from different small-scale heating systems (pellet boiler with separate hot water preparation, pellet boiler with buffer storage, pellet boiler with buffer storage and solar plant) were analyzed and evaluated to determine relevant impact factors on the utilization rate.

In addition to the evaluation of the monitoring data the annual operation of the plants was simulated with TRNSYS, a climate engineering program. In the context of a sensitivity analysis essential weak points and criteria influencing the annual utilization rate could be identified and optimization measures were defined. Afterwards different optimized scenarios were examined for existing and future plants. At the end a full cost calculation according the guideline VDI 2067 was carried out for the base scenarios as well as the optimized plant scenarios.

The results of the data analysis showed that the annual boiler utilization rates are in the range between 73 to 84.5% which is significantly lower compared to the boiler efficiency according to the manufacturer (approx. 92%). The complete system efficiency of the different plants is, under consideration of the electricity consumption, only in the range from 58 to 72%.

The first step of the plant simulation with TRNSYS was the verification of the simulation model developed using the monitoring data available. In the following step, the individual impact factors on the annual boiler utilization rate as well as on the annual utilization rate of the overall plant were identified within a sensitivity analysis. The relevant impact factors can be divided in control related factors (boiler- and plant control), boiler specific factors (flue gas outlet temperature, O₂-content in the flue gas, heat losses to the environment) as well as design relevant factors (dimensions of boiler, buffer storage and solar plant, insulation).

By an optimization of the control system as well as a proper insulation of all plant parts, which could be carried out also for existing plants, the annual utilization rate of the overall system could be raised by 5.9 (boiler without buffer storage & solar plant) to 8.8% points (boiler with buffer storage & solar plant) depending on the type of heating system. Under consideration of all possible optimization measures (optimal boiler design, optimal dimensions and design of all components, optimal control of boiler and heating system for new plants) the annual utilization rate of the overall system could be increased even by 13.7 (boiler without buffer storage & solar plant) to 16.6% points (boiler with buffer storage & solar plant).

For an economic evaluation of the optimization measures a full cost calculation was carried out for different scenarios. It showed that for buildings with relatively low heat demand (about 50kWh/m²*a) the specific heat generation costs mainly depend on the capital bound costs, which can make up between 63 and 78% of the total costs. Accordingly, the cost saving potential by increasing the annual utilization rate and thus reducing the fuel consumption is rather low. Therefore, those optimization measures which can be realized without additional

costs (e.g. optimized control settings) are the most effective in terms of the economic efficiency. Optimization measures which cause additional costs (e.g. reinforced isolation) can hardly improve the economic efficiency.

As a consequence, plants without buffer storage & solar plant (low investment costs) can be operated more economically, despite the comparatively lower annual efficiency and higher pellet consumption, than plants with buffer storage & solar plant which feature a lower fuel demand and lower emissions.

Concluding in order to promote heating systems with buffer storage and solar plant, which feature low fuel consumption and low emissions, special funding schemes for solar plants and pellet boilers with high annual utilization rate are necessary.

1 Einleitung

In heute üblichen Biomassekleinfeuerungsanlagen (<100kW) liegen die Wirkungsgrade, je nach Wassergehalt im Brennstoff, zwischen 87 und 92%. Der Jahresnutzungsgrad dieser Anlagen liegt im Praxisbetrieb allerdings nur im Bereich von 70 bis 80%. Deshalb ist es wichtig, die Ursachen für den Unterschied zwischen Wirkungsgrad und Jahresnutzungsgrad des Biomassekessels zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu definieren.

Bei Pellet- Heizungssystemen kann davon ausgegangen werden, dass durch einen optimierten Betrieb des Kessels ein noch großes Potential hinsichtlich der besseren Ausnützung des Brennstoffes ausgeschöpft werden kann. Aufgrund des trägeren und energieintensiveren Anfahrprozesses im vgl. zu Öl und Gas dürfte bei Pelletkesseln die richtige Einbindung und der Betrieb eine noch größere Rolle spielen. [1]

Durch die Anhebung des Jahresnutzungsgrades kann der Brennstoffbedarf reduziert und die Betriebskosten für Biomassekleinfeuerungsanlagen verringert werden. Durch den geringeren Brennstoffverbrauch sinken auch die umweltrelevanten Emissionen (CO, Staub, TOC). Durch den günstigen und emissionsärmeren Betrieb steigt auch die Attraktivität von Biomassekleinfeuerungsanlagen gegenüber fossil befeuerter Heizungsanlagen, wodurch mit einer Steigerung des Marktanteils von Biomassekleinfeuerungsanlagen gerechnet wird.

2 Aufgabenstellung

Das Ziel der Diplomarbeit war die Erarbeitung der wesentlichen Schwachstellen und Kriterien für die Beeinflussung des Jahresnutzungsgrades von Zentralheizungssystemen mit Biomassekleinfeuerungen im kleinen Leistungsbereich (<100kW).

Die Arbeit sollte einerseits aufzeigen, mit welchen Maßnahmen der Jahresnutzungsgrad beziehungsweise der Pelletverbrauch optimiert werden kann. Andererseits sollen die Ergebnisse dieser Arbeit dazu dienen, die technisch und wirtschaftlich sinnvollsten Optimierungsmaßnahmen für Heizungssysteme mit Biomassekleinfeuerungsanlagen zu definieren. Diese Zielsetzung erfordert folgenden Aufbau der Arbeit.

1. Zuerst wurden Feldmessdaten ausgewertet und anschließend die untersuchten Heizungsanlagen bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung sollen bereits Schwachstellen aufzeigen und auf mögliche Verbesserungsmaßnahmen hinweisen.
2. Der zentrale Abschnitt dieser Arbeit ist aber die Simulation von Biomassekleinfeuerungsanlagen mit dem Klimaengineeringprogramm TRNSYS (Version 17). Mithilfe eines Referenzmodells wurden im Rahmen einer umfassenden Sensibilitätsanalyse die wesentlichen Einflussgrößen auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad und den Pelletverbrauch ermittelt. Die aus den Ergebnissen der Sensibilitätsanalyse identifizierten Optimierungsmaßnahmen wurden bewertet und nach Wirksamkeit gereiht.
3. Anschließend wurden die effektivsten Optimierungsmaßnahmen in verschiedenen Szenarien (Optimierungen von bestehenden Anlagen, optimierte Auslegung von Neuanlagen) kombiniert, um das mögliche Verbesserungspotential für den Jahresnutzungsgrad und den Pelletverbrauch abschätzen zu können.
4. Die verschiedenen optimierten Varianten wurden anschließend im Rahmen einer Vollkostenrechnung auch wirtschaftlich bewertet, um die technisch und wirtschaftlich sinnvollsten Varianten definieren zu können.
5. Zum Abschluss wurden in Hinblick auf die Optimierung des Kessel-Jahresnutzungsgrades Empfehlungen für zukünftige verbesserte Anlagen- und Regelungskonzepte abgegeben.

Die Optimierung der Solaranlage (Kollektor) war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Der Solaranlagenenertrag wurde anhand von Feldmessdaten zwar ausgewertet, aber es erfolgte im Rahmen dieser Arbeit keine Untersuchung bezüglich Effizienzsteigerung von Solarkollektoren. Darüber hinaus erfolgte im Rahmen dieser Arbeit keine quantitative Bewertung der Optimierungsmaßnahmen in Hinblick auf deren Emissionsreduktionspotential, da keine Feldmessdaten über die Rauchgasemissionen der Pelletkessel vorlagen.

3 Theorie

3.1 Heizungssysteme

Bei Biomasse- Heizungsanlagen für Ein- und Mehrfamilienhaushalte werden hauptsächlich drei verschiedene Heizungssystemarten verwendet, die nachfolgend kurz beschrieben werden:

- Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung im Stand-alone-Betrieb
- Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung und Pufferspeicher
- Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung mit Pufferspeicher und Solaranlage

3.1.1 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung im Stand-alone-Betrieb

Das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung im Stand-alone-Betrieb besteht aus einem Biomassekessel (siehe Kapitel 3.2) und üblicherweise mehreren Heizkreisen sowie einem separaten Elektrowärmespeicher (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1 zeigt den hydraulischen Aufbau des Zentralheizungssystems mit Biomassekleinfuehrung im Stand-alone-Betrieb.

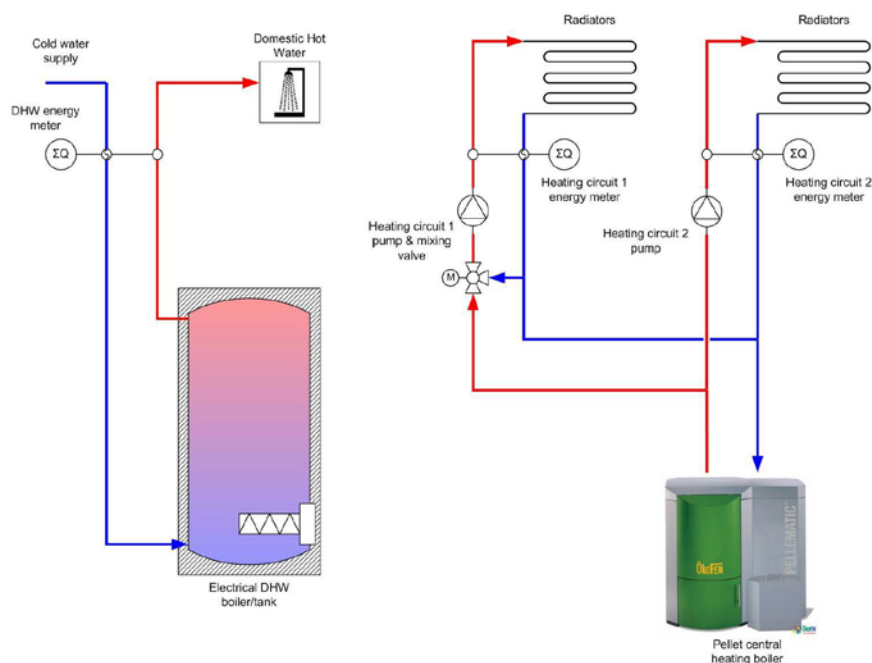


Abbildung 1: Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung im Stand-alone-Betrieb

Erläuterungen: Biomassekessel; Heizkreise mit und ohne Beimischventil; separaten Elektrowärmespeicher für Warmwasserbereitung; Datenquelle [2]

Die zwei Verbraucherkreise werden direkt vom Biomassekessel versorgt. Die Warmwasserbereitung erfolgt über einen separaten Elektrowärmespeicher.

3.1.2 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung und Pufferspeicher

Das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung und Pufferspeicher besteht aus einem Biomassekessel (siehe Kapitel 3.2), einem Pufferspeicher mit inkludierter Warmwasserbereitung (siehe Kapitel 3.3.1) und ueblicherweise mehreren Heizkreisen (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2 zeigt den hydraulischen Aufbau des Zentralheizungssystems mit Biomassekleinfuehrung und Pufferspeicher.

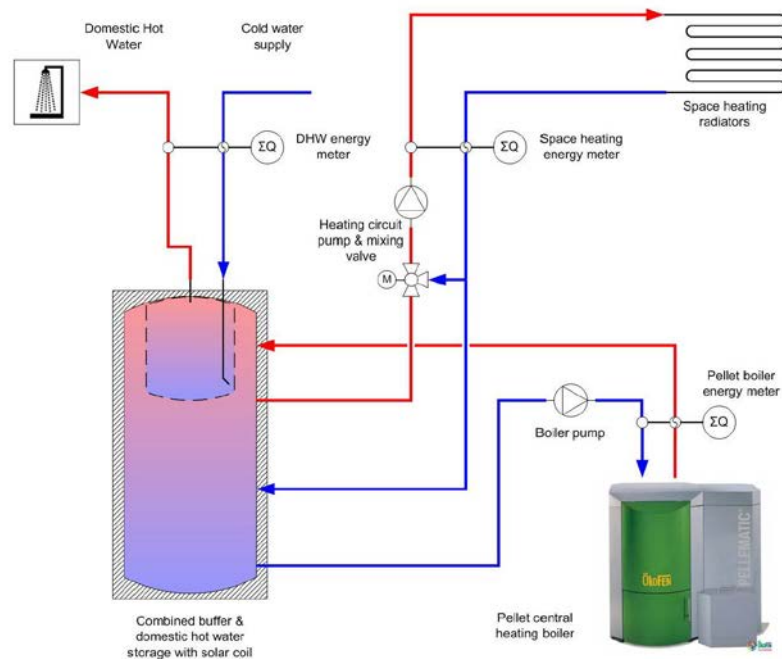


Abbildung 2: Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung und Pufferspeicher

Erläuterungen: Biomassekessel; Pufferspeicher mit inkludierter Warmwasserbereitung; Heizkreis; Datenquelle [2]

Bei dieser Anlagenkonstellation ist der Pufferspeicher (Kombinationsspeicher) ohne innenliegendem Solarwärmetauscher ausgestattet. Die Warmwasserbereitung wird durch einen innenliegendem Wärmetauscher (Warmwasserbehälter) vorbereitet. Bei diesem Heizungssystem stellt ausschließlich der Biomassekessel die benötigte Wärmemenge zur Verfügung. Die Verbraucherkreise des Gebäudes sind direkt mit dem Pufferspeicher verbunden.

3.1.3 Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung mit Pufferspeicher und Solaranlage

Das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfuehrung mit Pufferspeicher und Solaranlage besteht aus einem Biomassekessel (siehe Kapitel 3.2), einem Pufferspeicher mit inkludierter Warmwasserbereitung (siehe Kapitel 3.3.2) sowie einer Solaranlage (siehe Kapitel 3.4) und ueblicherweise mehreren Heizkreisen (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3 zeigt den hydraulischen Aufbau des Zentralheizungssystems mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage.

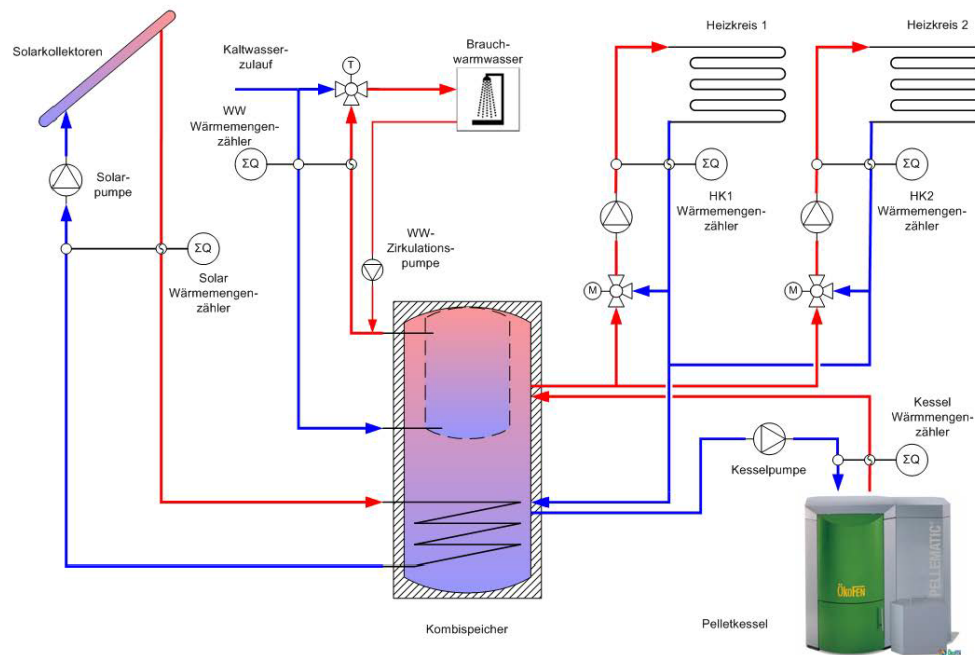


Abbildung 3: Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage

Erläuterungen: Biomassekessel; Solaranlage; Pufferspeicher mit inkludierter Warmwasserbereitung; Warmwasserversorgung mit Zirkulationspumpe; Heizkreise; Datenquelle [2]

Bei dieser Anlagenkonstellation ist der Pufferspeicher (Kombinationsspeicher) mit innenliegendem Solarwärmetauscher ausgestattet. Die Warmwasserbereitung wird durch einen innenliegendem Wärmetauscher (Warmwasserbehälter) vorbereitet. Bei diesem Heizungssystem stellen der Biomassekessel und die Solaranlage die benötigte Wärmemenge zur Verfügung. Die Verbraucherkreise des Gebäudes sind direkt mit dem Pufferspeicher verbunden.

3.2 Biomassekleinfeuerungsanlagen auf Basis Pelletkessel

3.2.1 Fördertechnik

Bei der Fördertechnik vom Pelletlager zum Pelletkessel kommen Vakuumsaug- und Schneckenfördersysteme zum Einsatz. Der Unterschied zwischen diesen beiden Systemen ist die Häufigkeit der Brennstoffförderung. Das Schneckenfördersystem fördert je nach Brennstoffbedarf (just- in- time). Im Gegensatz zum Schneckenfördersystem befüllt das Vakuumsaugsystem normalerweise einmal pro Tag einen Vorlagebehälter im Kessel, der in etwa einen Tagesbedarf an Pellets aufnehmen kann. Von diesem Vorlagebehälter erfolgt über eine Förderschnecke die Brennstoffzufuhr zum Brenner. [vgl.3]

3.2.2 Feuerungstechnik

Pelletkessel werden bei Zentralheizungsanlagen für Ein- und Mehrfamilienhäuser eingesetzt. Bei modernen Pelletkesseln liegt die minimale Kesselleistung bei etwa 30% der Nennleistung. Liegt die Wärmeabnahmeleistung zwischen 30-100% der Nennleistung, dann kann der Pelletkessel modulierend in kontinuierlichen Betrieb fahren. Bei kleineren Wärmeabnahmeleistungen <30% fährt der Pelletkessel in Stop-and-Go-Betrieb.

Die üblicherweise verwendeten Feuerungstechnologien für Pelletkessel sind Unterschubfeuerung (Retortenfeuerung), seitlich beschickte Feuerung sowie oben beschickte Feuerung. Die Unterschubfeuerung wird näher erklärt, weil die untersuchten Heizungsanlagen diese Feuerungstechnologie verwendeten.

Unterschubfeuerung

In Abbildung 4 ist die Unterschubfeuerung (Retortenfeuerung) beispielhaft dargestellt.

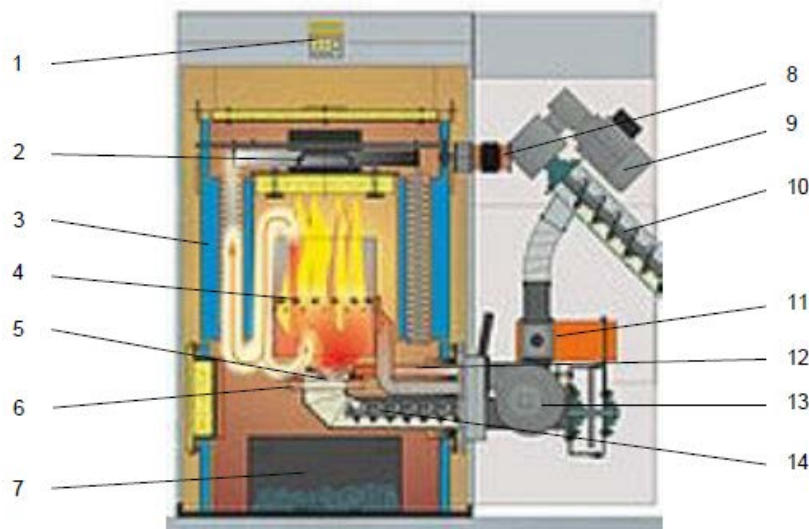


Abbildung 4: Unterschubfeuerung (Retortenfeuerung)

Erläuterungen: 1 ... Display und mikroprozessorgesteuerte Regelung; 2 ... Rauchgasführung; 3 ... Wärmetauscher mit Reinigungsfedern; 4 ... Sekundärluftzufuhr; 5 ... Brennteller (Retorte); 6 ... Primärluftzufuhr; 7 ... Aschelade; 8 ... Reinigungsmotor; 9 ... Hauptantrieb für Brennstoffförderung; 10 ... Austragschnecke; 11 ... Rückbrandkugelschieber; 12 ... elektrische Heizpatrone; 13 ... Verbrennungsluftgebläse; 14 ... Stokerschnecke; Datenquelle [4]

Der Brennstoff gelangt mittels der Austragschnecke über die Fallstufe mit integriertem Rückbrandkugelschieber zur Stokerschnecke. Die von einem Getriebemotor angetriebene Stokerschnecke fördert den Brennstoff von unten auf den aus hitzebeständigem Stahl gefertigten Brennteller. Mit einer elektrischen Heizpatrone wird der Brennstoff entzündet. Die Regelung der Feuerung erfolgt über eine Steuerung, die in Kombination mit einem Verbrennungsluftgebläse, dem Kesseltemperatur-, dem Feuerraumtemperaturfühler und einem Brennraumdrucksensor die Wärmeleistungserzeugung steuert. Ein Radialgebläse führt die Verbrennungsluft als Primärluft durch den Brennstoff und als Sekundärluft über einen Nachverbrennungsring im Flammrohr dem Brenngas zu. [5]

Die Rauchgasführung verläuft, wie in Abbildung 4 gezeigt, über die Sekundärverbrennungszone nach oben. Das Rauchgas wird dann umgelenkt und strömt wieder nach unten und nach nochmaliger Umlenkung durch die Rauchrohre nach oben, um über den Saugzugventilator weiter in den Kamin zu strömen. [3]

Die Reinigung des Wärmetauschers erfolgt automatisch mit Reinigungsfedern im Wärmetauscher, welche von einem Motor betätigt werden. Unterhalb des Brenntellers befindet sich zur Aufnahme der Asche aus dem Wärmetauscher und dem Brenner eine Aschenlade. Der Brennraum und der Wärmetauscher sind nach außen wärmegeklämt ausgeführt. [5]

3.3 Pufferspeicher

Pufferspeicher sind Wärmespeicher, in denen Wärmeenergie von Heizkesseln und Solarkollektoren zwischengespeichert und je nach Bedarf an das Heizungssystem (Radiatoren, Fußboden-/Wandheizung, Warmwasserbereitung) abgegeben werden kann. Somit können Differenzen zwischen der erzeugten und der verbrauchten Wärmemenge ausgeglichen und Leistungsschwankungen geglättet werden. Auf diese Weise kann die Wärmeerzeugung zu einem gewissen Grad unabhängig vom Verbrauch betrieben werden, wodurch sich für die Energieerzeugung ein besseres Betriebsverhalten und ein höherer Nutzungsgrad ergibt.

Pufferspeicher werden in Kombination mit Biomassekleinfeuerungen sowie Solaranlage in verschiedenen Varianten eingesetzt. Die in den untersuchten Anlagen installierten Pufferspeicher sind als Kombinationsspeicher (Tank- in- Tank) beziehungsweise Kombinationsspeicher mit integriertem Solarwärmetauscher ausgeführt und werden nachfolgend kurz erklärt.

3.3.1 Kombinationsspeicher mit Warmwasserbereitung

In Abbildung 5 ist ein Kombinationsspeicher mit integrierter Warmwasserbereitung dargestellt. Bei dieser Ausführung ist ein innenliegender Wärmetauscher (Warmwasserbehälter) für die Warmwasserbereitung integriert. Das Kaltwasser gelangt in den innenliegenden Tank und wird durch Wärmeübertragung vom umgebenden Heizungswasser aufgeheizt. Das Warmwassersystem ist somit vom Raumheizungssystem getrennt. Der Pelletkessel und die Heizkreise des Gebäudes sind direkt mit dem Pufferspeicher (Wärmespeicher) verbunden, d.h. Pelletkessel, Pufferspeicher und Raumheizung sind über einen gemeinsamen Wasserkreislauf verbunden.

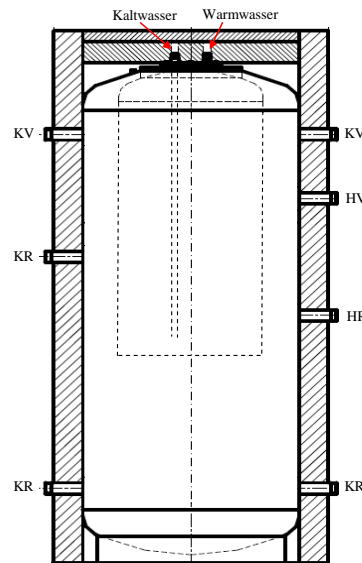


Abbildung 5: Pufferspeicher mit Warmwasserbereitung

Erläuterungen: KV ... Kesselvorlauf; KR ... Kesselrücklauf; HV ... Heizkreisvorlauf; HR ... Heizkreisrücklauf; zwei mögliche Anschlüsse für den Kesselrücklauf; Datenquelle [vgl.6]

3.3.2 Kombinationsspeicher mit Warmwasserbereitung plus integrierten Solarwärmetauscher

In Abbildung 6 ist ein Kombinationsspeicher mit integrierter Warmwasserbereitung plus Solarwärmetauscher dargestellt.

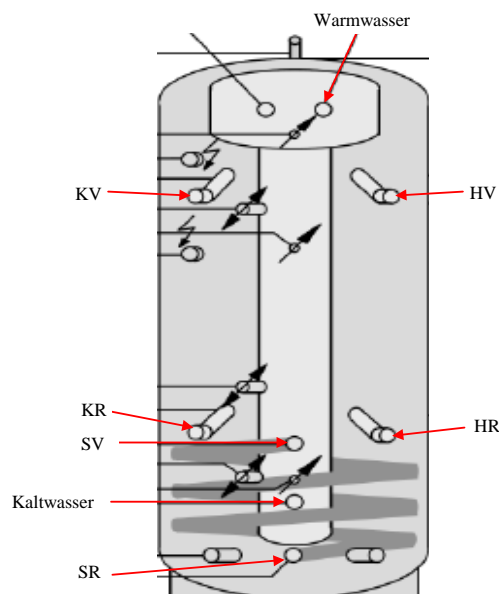


Abbildung 6: Pufferspeicher mit Warmwasserbereitung und integrierten Solarwärmetauscher

Erläuterungen: KV ... Kesselvorlauf; KR ... Kesselrücklauf; SV ... Solaranlagenvorlauf; SR ... Solaranlagenrücklauf; HV ... Heizkreisvorlauf; HR ... Heizkreisrücklauf; Datenquelle [vgl.7]

Bei dieser Ausführung sind ein innenliegender Wärmetauscher (Warmwasserbehälter) für die Warmwasserbereitung und ein Solaranlagenwärmetauscher integriert. Der Warmwasserbehälter hat dieselbe Funktion wie unter Kapitel 3.3.1 beschrieben und der Solarwärmetauscher wird für das Laden des Pufferspeichers eingesetzt. Der Grund für eine Systemtrennung zwischen Solaranlage und Pufferspeicher/Heizungssystem liegt darin, dass das Arbeitsmedium im Solarkreis meist eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel ist. Auch hier sind der Pelletkessel und die Heizkreise des Gebäudes direkt mit dem Pufferspeicher über einem gemeinsamen Wasserkreislauf verbunden.

3.4 Flachkollektor

Als Flachkollektoren werden Kollektoren bezeichnet, bei denen der Solarabsorber in einem Kollektorkasten eingebaut ist, der nach vorne durch eine Glasscheibe abgedeckt und zur Seite und nach hinten wärmegeklämt ist. Der Kollektorkasten besteht üblicherweise aus Aluminiumprofilen, teilweise auch aus Kunststoff oder Holz. [8]

Flachkollektoren sind die am häufigsten eingesetzten Kollektoren und sind auch bei den untersuchten Anlagen installiert.

Abbildung 7 zeigt den Aufbau eines Flachkollektors.

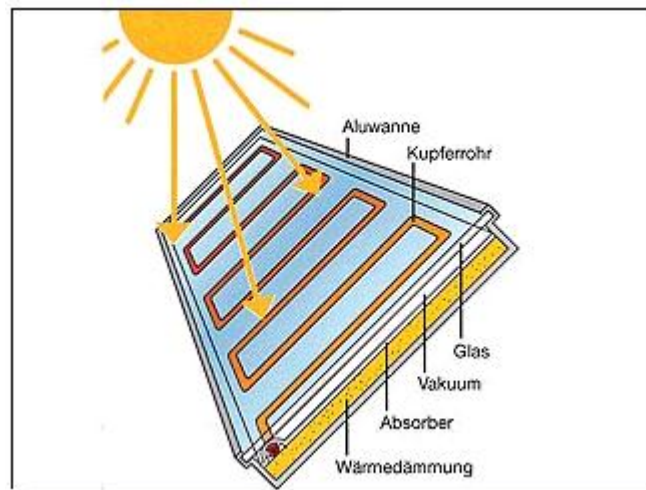


Abbildung 7: Aufbau Flachkollektor

Erläuterungen: Datenquelle [9]

3.5 Wirkungsgrad und Jahresnutzungsgrad

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener Leistung und zugeführter Leistung durch den Brennstoff bei stationären Betriebsbedingungen (Gleichung 1).

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene _ Wärmeleistung}}{\text{zugeführte _ Leistung _ durch _ Brennstoff}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 1}$$

Erläuterungen: Wirkungsgrad in %, abgegebene Wärmeleistung und zugeführte Leistung durch den Brennstoff in kW

Der Jahresnutzungsgrad ist das Verhältnis von produzierter Wärmemenge pro Jahr und zugeführte Brennstoffenergie pro Jahr bei instationären Betriebsbedingungen (Gleichung 2).

$$\text{Jahresnutzungsgrad} = \frac{\text{produzierte _ Wärmemenge _ pro _ Jahr}}{\text{zugeführte _ Brennstoffenergie _ pro _ Jahr}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 2}$$

Erläuterungen: Jahresnutzungsgrad in %, produzierte Wärmemenge und zugeführte Brennstoffenergie in kWh

4 Methodik

4.1 Erhebung der allgemeinen Anlagendaten

Vom European Institute for Energy Research EDF-KIT (EIFER) wurden Datensätze von 2-jährigen Feldmessungen von vier Heizungssystemen mit Biomassekleinfeuerungsanlagen zur Verfügung gestellt. Neben den Messdaten wurden von EIFER (Herr Schraube) Informationen bezüglich der Art und Ausführung der Heizungsanlagen sowie allgemeine Informationen zum Anlagenstandort (Gebäudefläche, Anzahl der Bewohner etc.) für jedes der vier Heizungssysteme übermittelt.

4.2 Messdatenerhebung

Für die Datenaufzeichnung entwickelte EIFER ein spezielles Datenaufzeichnungs-, Speicher- und Umwandlungssystem. Bevor es bei den Heizungsanlagen montiert wurde, ist es vorher am EIFER-Teststand getestet und kalibriert worden. [vgl.10]

4.2.1 Messgeräte

Folgende Messgeräte wurden gemäß EIFER für die Datenauswertung verwendet: [vgl.10]

- Wärmemengenzähler (Auflösung: 1kWh)
- Stromzähler (Auflösung: 1kWh)
- Brennstoffwaage (Auflösung: 2kg)
- Außentemperaturfühler (Auflösung: 0,1°C)

Tabelle 1 zeigt die Positionen der Messgeräte.

Tabelle 1: Übersicht über die Position der Messgeräte

Erläuterungen: *) kumuliert; **) Messwert zum Messzeitpunkt; Datenquelle [vgl.10]

Messgerät	Daten
Wärmemengenzähler	Thermische Energie *)
	Thermische Leistung **)
	Vorlauftemperatur **)
	Rücklauftemperatur **)
	Volumenstrom *)
Waage	Brennstoffgewicht **)
Temperaturfühler	Außentemperatur **)
Stromzähler	Stromverbrauch *)

Die Wärmemengenzähler wurden in allen Verbraucherkreisen, dem Kesselkreis und bei Bedarf im Solarkreis eingebaut, um die verbrauchte beziehungsweise produzierte Wärmemenge zu ermitteln. Die Wärmemenge wurde aus dem Volumenstrom des Mediums und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf in einen Wärmemengenzähler ermittelt. Die Brennstoffwaage, welche unter dem Gewebetank (Pelletlager) montiert war,

diente zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs. Ein Außentemperaturfühler diente zur Messung der Außentemperatur. Schließlich wurde mittels Stromzähler der Stromverbrauch der Gesamtanlage (Pelletkessel inkl. aller Pumpen und Brennstofffördersystem) aufgezeichnet. Zusätzlich wurde bei jeder Anlage eine Brennstoffanalyse gemacht, um den Heizwert der Pellets bestimmen zu können.

4.2.2 Messdaten

Das Messdatenaufzeichnungsintervall war generell eine Stunde. Bei zwei Anlagen (Anlage B und G) wurde in der zweiten Heizperiode das Aufzeichnungsintervall auf 15 Minuten verkürzt, um eine genauere Auswertung über das Betriebsverhalten (Anzahl der Starts und Betriebsstunden) des Pelletkessels zu ermöglichen.

Tabelle 2 zeigt, welche Daten gemessen wurden.

Tabelle 2: Übersicht über die gemessenen Daten

Erläuterungen: Datenquelle [10]

Messgerät	Position
Wärmemengenzähler	Kesselkreis
	Solaranlagenkreis
	Heizkreis
	Warmwasserkreis
Waage	an den Füßen des Pelletjahresbehälters (Gewebetank)
Temperaturfühler	an der Außenseite des Gebäudes
Stromzähler	Pelletkessel inkl. aller Pumpen sowie Brennstofffördersystem

Die Datenaufzeichnung für den Strom- und Wärmemengenzähler erfolgte in kumulierender Form und die Temperaturen (Vor- und Rücklauftemperatur, Außentemperatur) wurden als Momentanwerte aufgezeichnet. Der Gesamtstromverbrauch setzt sich aus dem Stromverbrauch des Pelletkessels, des Brennstofffördersystems und allen installierten Pumpen zusammen.

Hinweis: In künftigen Projekten von Untersuchungen an Heizungsanlagen sollte beachtet werden, dass das Aufzeichnungsintervall maximal 15 Minuten oder noch kleiner sein sollte, um eine genauere Auswertung machen zu können. Weiteres sollte das Datenaufzeichnungssystem mit einem Betriebs- und Startzähler des Kessels ausgestattet werden.

4.3 Datenauswertung

In diesem Abschnitt wird die Auswertung der Messwerte erläutert, die zu den späteren Ergebnissen führen. Die Datenauswertung wurde für Stunden, Wochen, Monate und über eine Heizperiode durchgeführt. Bei den Datensätzen mit 15 Minuten Datenaufzeichnungsintervall wurde statt der Stundenauswertung eine 15 Minutenauswertung gemacht. Zuerst wurden die Messdaten auf Plausibilität kontrolliert. Waren Übertragungs- oder Messfehler bei den Messdaten vorhanden, wurden Sie wenn möglich korrigiert, oder sonst von der Betrachtung ausgenommen.

4.3.1 Stundenauswertung

4.3.1.1 Solaranlage

Die produzierte Wärmemenge und der Volumenstrom berechneten sich aus der Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stundenwerten. Die Wärmemenge von der Solaranlage, wurde mit einem Faktor [2] multipliziert. Der Faktor berechnete sich mit Gleichung 3 und wurde berücksichtigt, weil der Wärmemengenzähler die Wärmemenge auf Basis der Stoffdaten von Wasser und nicht auf Basis der Stoffdaten des vorhandenen Frostschutzmittelgemisches (Solarliquid) berechnete. Die Vor- und Rücklauftemperaturen wurden nur für jene Zeiträume berücksichtigt in denen die Solaranlage in Betrieb war, da bei Stillstand der Solaranlage die Rohrleitungen auskühlen und somit die gemessenen Werte nicht den Werten bei Betrieb entsprechen.

$$Faktor = \frac{\rho_{Wasser} \cdot c_{Wasser}}{\rho_{Solarliquid} \cdot c_{Solarliquid}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Erläuterungen: ρ_{Wasser} und $\rho_{Solarliquid}$ in kg/m³; c_{Wasser} und $c_{Solarliquid}$ in kJ/kgK

4.3.1.2 Pelletkessel

Die Auswertung von Wärmemenge, Volumenstrom sowie Vor- und Rücklauftemperatur erfolgte wie bei der Solaranlage. Bei der Anlage I konnten die Vor- und Rücklauftemperaturen nicht direkt bestimmt werden, weil kein Wärmemengenzähler beim Pelletkessel installiert war. Für die Abschätzung der Kesselvorlauftemperatur wurde die Vorlauftemperatur vom Heizkreis 2 verwendet, weil beim Heizkreis 2 keine Beimischschaltung installiert war. Als Kesselrücklauftemperatur wurden die Heizkreisrücklauftemperaturen verwendet. Die verwendeten Werte stellen allerdings nur eine gute Näherung dar, da die Rohrleitungsverluste zwischen Kessel und Wärmemengenzähler nicht berücksichtigt wurden.

Kesselbetriebszeit und Kesselstarts

Die Betriebszeit und die Starts des Pelletkessels konnten nicht direkt aus den verfügbaren Messdaten entnommen werden, da bei den Anlagen keine Betriebsstunden- und Startzähler installiert wurden. Daher mussten die Betriebszeit und die Starts indirekt berechnet werden. Die Berechnung der Betriebszeit und Starts wurde mit drei verschiedenen Berechnungsmethoden durchgeführt.

Bei allen drei Methoden wurde eine Betriebszeit gezählt, wenn eine Wärmemenge produziert wurde. Ein Start wurde gerechnet, wenn vor der Stunde mit Wärmeproduktion keine Wärmemenge vom Pelletkessel produziert wurde.

Methode 1:

Produzierte der Pelletkessel in der momentanen Stunde eine Wärmemenge, dann wurde eine Betriebsstunde gezählt.

Ein Start wurde gezählt, wenn der Pelletkessel eine Wärmemenge produzierte und in der vorigen Stunde nicht im Betrieb war.

Methode 2:

Die Betriebszeit der Anfangs- und Endperiode pro Heizzyklus wurde auf Basis des Volumenstroms berechnet und dazwischen wurde eine ganze Stunde angenommen. In einem Gespräch [11] teilte Herr Schraube mit, dass in den Anlagen starre Kesselpumpen installiert waren. Bei starren Pumpen ist der Volumenstrom prinzipiell konstant. Also wurde bei jeder Anlage der maximale Volumenstrom ermittelt, in dem die Volumenströme bei der maximal produzierten Wärmemenge pro Stunde gemittelt wurden. Die Betriebszeit wurde über das Verhältnis von maximalem Volumenstrom zu aktuellem Volumenstrom pro Stunde berechnet (Gleichung 4). Um un plausible Werte zu vermeiden wurde überprüft, ob die relative Kessellast $\leq 100\%$ war.

War die relative Kessellast $\leq 100\%$, dann berechnete sich die Anfangs- und Endbetriebszeit des Heizzyklus mit der Gleichung 4.

$$t_{\text{Betrieb}} = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{\text{max}}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Erläuterungen: \dot{V} und \dot{V}_{max} in m^3/h , t_{Betrieb} in h

War die relative Kessellast $\geq 100\%$, dann wurde eine ganze Stunde angenommen, weil die Betriebszeit nicht größer als das Intervall sein kann.

Die Vorgangsweise zur Bestimmung der Anzahl der Starts war wie bei Methode 1, aber mit einer zusätzlichen Bedingung. Bei den Messdaten gab es Anzeichen, dass der Pelletkessel zwischen zwei Aufzeichnungsintervallen ein- und ausgeschaltet hat. Aus diesem Grund wurde die Kesselvorlauftemperatur auch zur Ermittlung der Starts herangezogen. War die Kesselvorlauftemperatur kleiner als die angenommene Mindesttemperatur (50°C) und eine Stunde davor und danach produzierte der Pelletkessel eine Wärmemenge, dann wurde ein Start gezählt.

Methode 3:

Diese Methode war ähnlich wie Methode 1, außer dass für die Berücksichtigung der Anfangs- und Endbetriebszeit nach jedem Heizzyklus eine Stunde abgezogen wurde, außer der Pelletkessel war nur eine Stunde in Betrieb.

Ein Start wurde gezählt, wenn der Pelletkessel eine Wärmemenge produzierte und in der Stunde davor nicht im Betrieb war.

Volllaststunden

Die Volllaststunden (Gleichung 5) berechneten sich aus dem Verhältnis jährlich produzierter Kesselwärmemenge (Q_{ab}) und Kesselnennleistung (P_{Nenn}).

$$t_{\text{Volllast}} = \frac{Q_{ab}}{P_{Nenn}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Erläuterungen: t_{Volllast} in h/a, Q_{ab} in kWh/a und P_{Nenn} in kW

Relative Kessellast

Die relative Kessellast (Gleichung 6) berechnet sich aus dem Verhältnis Kesselleistung (P_{ab}) und Kesselnennleistung (P_{Nenn}).

$$L_{Kessel} = \frac{P_{ab}}{P_{Nenn}} \quad \text{Gleichung 6}$$

Erläuterungen: P_{ab} in kW, P_{Nenn} in kW, L_{Kessel} in –

Kesselnutzungsgrad

Ursprünglich war geplant, auf Basis der Stundenwerte den Kesselnutzungsgrad für jede Stunde zu berechnen. Die Gründe warum schließlich der Kesselnutzungsgrad bei der Stundenauswertung nicht berechnet wurde, sind:

- zu geringe Waagenauflösung (min. 2kg, das entspricht einem Heizwert von ca. 10kWh)
- ungenaue Wiegung (Drift der Messwerte in Phasen ohne Pelletverbrauch)

Bei den Anlagen mit einem Vakuumsaugsystem war eine stundenweise Auswertung auch deshalb nicht möglich, weil das Vakuumsaugsystem nur etwa einmal pro Tag Pellets in einen Vorratbehälter fördert, von wo die Pellets in den Pelletkessel gelangen.

4.3.1.3 Verbraucher

Die Auswertung der verbrauchten Wärmemenge, des Volumenstroms und der Vor- und Rücklauftemperatur erfolgte wie bei der Solaranlage.

4.3.1.4 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch setzte sich aus den Pelletkessel, Brennstofffördersystem und allen installierten Pumpen (Solaranlage, Kessel, Heizkreis und Warmwasser) zusammen. Der Stromverbrauch pro Stunde wurde aus der Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden kumulierten Stundenwerten ermittelt.

4.3.1.5 Brennstofffördermenge

Die Brennstofffördermenge pro Stunde wurde aus der Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stundenwerten berechnet. In den Fällen, in denen aufgrund eines Messwertdrifts negative Werte ermittelt wurden, wurde dieser Wert Null gesetzt.

4.3.1.6 Außentemperatur

Die aufgezeichnete Außentemperatur stellt den Momentanwert zum jeweiligen Aufzeichnungszeitpunkt dar und konnte direkt für die Auswertung übernommen werden.

4.3.1.7 Pufferspeicher

Es waren keine Messdaten (Temperaturen) über den Pufferspeicher vorhanden. Für eine grobe Temperaturabschätzung im Pufferspeicher wurden die Temperaturen der Verbraucher (Heiz- und Warmwasserkreis) und Erzeuger (Pelletkessel, Solaranlage) herangezogen, siehe Abbildung 8.

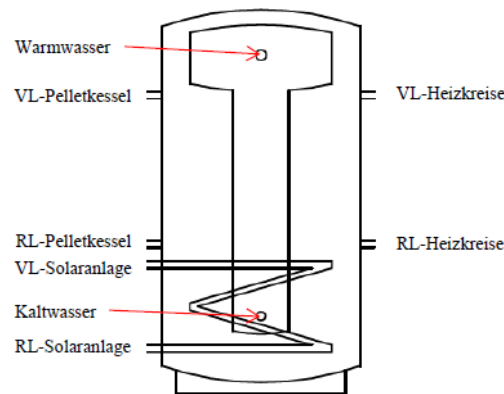


Abbildung 8: Pufferspeicheranschlüsse

Erläuterungen: Pufferspeicher mit inkludierter Warmwasserbereitung und Solaranlagenwärmetauscher; VL ... Vorlauf; RL ... Rücklauf

Bei den Heizungsanlagen mit Pufferspeicher und Solaranlage wurden auf sechs beziehungsweise ohne Solaranlage auf vier Positionen die Temperaturen abgeschätzt. Die Pufferspeichertemperatur auf der Höhe des Warmwasseraustritts wurde mit der Warmwassertemperatur und die Pufferspeichertemperatur auf der Höhe des Kaltwassereintritts mit der Kaltwassertemperatur abgeschätzt. Die Temperatur auf der Höhe des Kessel- und Heizkreisvorlaufs wurde nur mit der Kesselvorlauftemperatur abgeschätzt, weil bei den Heizkreisvorlauftemperaturen die Temperaturmessung erst nach dem Beimischventil stattgefunden hat und deshalb wurden die Heizkreisvorlauftemperaturen nicht berücksichtigt. Die weiteren Temperaturen im Pufferspeicher wurden mit der Kesselrücklauftemperatur und den Heizkreisrücklauftemperaturen ermittelt. War eine Solaranlage installiert, dann wurden auch die Solaranlagenvorlauf- und rücklauftemperatur für die Pufferspeichertemperaturabschätzung herangezogen.

Um einen Anhaltswert über den Verlust des Pufferspeichers zu haben, genau genommen über den Verlust der Rohrleitungen zwischen Wärmemengenzähler und Pufferspeicher sowie den Verlust des Pufferspeichers, wurde dieser über die Energiebilanz (Gleichung 7) vom Pufferspeicher berechnet. Der durchschnittliche Pufferspeicherverlust pro Stunde wurde als Differenz vom Energieinput und -output des Pufferspeichers über ein Jahr, dividiert durch 8.760 Stunden, berechnet (Gleichung 8). Tatsächlich ist der Pufferspeicherverlust pro Stunde im Sommer niedriger und im Winter höher als der berechnete durchschnittliche Pufferspeicherverlust. Die momentane Pufferspeicherlast berechnete sich ebenfalls aus der Energiebilanz (Gleichung 7) vom Pufferspeicher.

$$Q_{\text{Puffer}} = Q_{\text{Input}} - Q_{\text{Output}}$$

Gleichung 7

Erläuterungen: Q_{Puffer} , Q_{Input} und Q_{Output} in kWh

$$Q_{\text{Pufferverlust}} = \frac{Q_{\text{Input}} - Q_{\text{Output}}}{8.760} \quad \text{Gleichung 8}$$

Erläuterungen: $Q_{\text{Pufferverlust}}$ in kWh/h, Q_{Input} und Q_{Output} in kWh

4.3.1.8 Graphische Auswertung

Bei der graphischen Auswertung wurde das Betriebsverhalten der Anlage einer durchschnittlichen Sommer- und Winterwoche sowie von der kältesten Winterwoche dargestellt. Um den durchschnittlichen Verlauf vom Wärmeverbrauch und -produktion sowie der Außentemperaturen darzustellen, wurde aus den Stundenwerten der jeweiligen Parameter über 12 Wochen für jede Stunde jeden Tages der Woche jeweils ein Mittelwert gebildet.

4.3.2 Wochen- und Monatsauswertung

Die Basis für die Wochen- und Monatsauswertung war die Stundenauswertung. Die Wochenauswertung wurde speziell für die Untersuchungen bezüglich Korrelationen zwischen einzelner Parameter und dem Kessel-Jahresnutzungsgrad durchgeführt.

4.3.2.1 Solaranlage

Die Auswertung der produzierten Wärmemenge und des Volumenstromes erfolgte aus der Summe der Stundenwerte pro Woche beziehungsweise Monat. Die Vor- und Rücklauftemperatur der Solaranlage wurde als Durchschnittswert über den Zeitraum angegeben. Dabei wurden, wie bereits erwähnt, nur jene Temperaturwerte herangezogen, die während des Betriebs (=Wärmeproduktion) der Solaranlage aufgezeichnet wurden.

4.3.2.2 Pelletkessel

Die Auswertung der produzierten Wärmemenge, des Volumenstromes und der Vor- und Rücklauftemperatur erfolgte wie bei der Solaranlage.

Die Kesselbetriebszeit und Kesselstarts pro Woche beziehungsweise Monat bildeten sich ebenfalls aus der Summe der Stundenwerte.

Relative Kessellast

Bei der Wochen- und Monatsberechnung der relativen Kessellast wurde statt der Kesselleistung die durchschnittliche Kesselleistung pro Woche beziehungsweise Monat eingesetzt.

Kesselnutzungsgrad

Der Kesselnutzungsgrad (Gleichung 9) berechnete sich aus dem Verhältnis produzierter Wärmemenge (Q_{ab}) und eingebrachter Brennstoffenergie ($m_{\text{Brennstoff}} \cdot H_u$). Die Berechnung der eingebrachten Brennstoffenergie erfolgte mit der verbrauchten Brennstoffmasse und dem Heizwert des Brennstoffs.

$$\eta_{Kessel} = \frac{Q_{ab}}{m_{Brennstoff} \cdot H_u} \cdot 100\%$$

Gleichung 9

Erläuterungen: η_{Kessel} in %, Q_{ab} in kWh, $m_{Brennstoff}$ in kg und H_u in kWh/kg

Bei Wochen und Monaten mit geringeren Pelletverbrauch wurde die Berechnung des Kesselnutzungsgrades nicht durchgeführt, weil die Ergebnisse aufgrund des Messwertdrifts der Waage nicht plausibel waren und Gewichtsschwankungen beim Brennstoff auftraten. Sobald die verbrauchte Pelletmenge pro Woche beziehungsweise Monat so gering wurde, dass der Fehler bei der Brennstoffbestimmung des Pelletverbrauchs durch den Messwertdift mindestens 10% betrug, wurde kein Nutzungsgrad für diesen Zeitraum berechnet.

Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Zuerst wurde der Messwertdrift der Brennstoffwaage über eine längere Stillstandsperiode (Kesselstillstand im Sommer) ermittelt. Der ermittelte Messwertdrift wurde entsprechend der Dauer der Stillstandsperiode auf einen Fehler pro Woche beziehungsweise Monat umgerechnet. Wenn dieser Fehler 10% oder mehr des Pelletverbrauchs innerhalb des betrachteten Zeitraums entsprach, wurde für diesen Zeitraum kein Nutzungsgrad berechnet.

Durchschnittliche Betriebsdauer pro Kesselstart

Die durchschnittliche Betriebsdauer pro Kesselstart wurde durch Division der Summe der Betriebsdauer im Betrachtungszeitraum mit der Anzahl der Kesselstarts im Betrachtungszeitraum ermittelt.

Durchschnittliche Kesselleistung

Die durchschnittliche Kesselleistung während des Betriebes wurde durch Division der Summe der produzierten Wärmemenge im Betrachtungszeitraum mit der Betriebsdauer im Betrachtungszeitraum ermittelt.

Produzierte Wärmemenge pro Kesselstart

Die produzierte Wärmemenge pro Kesselstart wurde durch Division der Summe der produzierten Wärmemenge im Betrachtungszeitraum mit der Anzahl der Kesselstarts im Betrachtungszeitraum ermittelt.

4.3.2.3 Verbraucher

Die Verbraucherauswertung erfolgte wie bei der Solaranlage.

4.3.2.4 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch berechnete sich aus der Summe der Stundenwerte pro Woche beziehungsweise Monat.

4.3.2.5 Brennstoffmenge

Die Brennstoffmenge berechnete sich aus der Summe der Stundenwerte pro Woche beziehungsweise Monat.

4.3.2.6 Außentemperatur

Die Außentemperatur berechnete sich aus den Durchschnittstemperaturen pro Woche beziehungsweise Monat.

4.3.2.7 Wärmeverlust des Heizungssystem

Bei dieser Auswertung konnte nur der Verlust jener Systemkomponenten berücksichtigt werden, die zwischen den Einbaustellen der einzelnen Wärmemengenzähler liegen (Rohrleitungen inklusive aller Einbauten zwischen Wärmemengenzähler und Pufferspeicher sowie der Pufferspeicher selbst). Wärmeverluste zwischen Erzeuger (Pelletkessel oder Solaranlage) und Wärmemengenzähler beziehungsweise zwischen Wärmemengenzähler und Verbraucher (Fußbodenheizung, Radiatoren, Warmwasserverbraucher) konnten nicht erfasst werden. Da die Wärmemengenzähler aber möglichst nahe bei den Erzeugern beziehungsweise Verbrauchern installiert wurden, können diese Verluste vernachlässigt werden. Der Wochen- und Monatsverlust setzte sich aus der Summe der Pufferspeicherverluste von der Stundenauswertung zusammen.

4.3.2.8 Korrelationen

Mit den Kenngrößen aus der Wochenauswertung wurden Korrelationen untersucht, wie Sie in der Literatur [10] zu finden waren. Diese untersuchten Korrelationen auf Basis des Nutzungsgrades waren:

- Nutzungsgrad vs. relative Kessellast
- Nutzungsgrad vs. Kesselstarts
- Nutzungsgrad vs. Kesselbetriebszeit
- Nutzungsgrad vs. produzierte Wärmemenge pro Start

Darüber hinaus wurden weitere Korrelationen auf Basis des Stromverbrauchs untersucht und diese waren:

- Stromverbrauch vs. Kesselstarts
- Stromverbrauch vs. produzierte Wärmemenge pro Start
- Stromverbrauch vs. Kesselbetriebszeit

4.3.2.9 Graphische Auswertung

Bei der graphischen Monatsauswertung wurden folgende Auswertungen durchgeführt:

- Wärmeproduktion (aufgeteilt in Pelletkessel und Solaranlage) und Wärmeverbrauch (aufgeteilt in Heizung und Warmwasser)
- Gesamtwärmeproduktion, Gesamtwärmeverbrauch und Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum
- Gesamtwärmeverbrauch und relativer Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizungsraum
- Wärmeproduktion von der Solaranlage, Gesamtwärmeverbrauch und Warmwasserverbrauch

Der relative Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum berechnet sich aus dem Verhältnis produzierter Gesamtwärmemenge und Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum (Systemverlust).

4.3.3 Heizperiodenauswertung

Auf Basis der Monatsauswertung berechnete sich die Heizperiodenauswertung. Für die Bewertung der Anlage wurden noch weitere Kenngrößen berechnet.

4.3.3.1 Anlagennutzungsgrad

Der Anlagennutzungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis verbrauchter Wärmemenge (Q_{ab}) und Energieeinsatz ($m_{\text{Brennstoff}} \cdot H_u + W_{el} + Q_{\text{Solar}}$). Der Energieeinsatz war der Primärenergieeinsatz von Pellets, Stromverbrauch und wenn eine Solaranlage installiert war auch der Solaranlagenenertrag. Der Anlagenwirkungsgrad wurde auf zwei verschiedenen Arten berechnet. Einmal wurde der Stromverbrauch beim Energieeinsatz mitberücksichtigt (Gleichung 10) und einmal nicht (Gleichung 11).

$$\eta_{\text{Anlage_mit_Strom}} = \frac{Q_{ab}}{m_{\text{Brennstoff}} \cdot H_u + W_{el} + Q_{\text{Solar}}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 10}$$

Erläuterungen: η_{Anlage} in %, Q_{ab} und Q_{Solar} in kWh, $m_{\text{Brennstoff}}$ in kg, H_u in kWh/kg und W_{el} in kWh

$$\eta_{\text{Anlage_ohne_Strom}} = \frac{Q_{ab}}{m_{\text{Brennstoff}} \cdot H_u + Q_{\text{Solar}}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 11}$$

Erläuterungen: η_{Anlage} in %, Q_{ab} und Q_{Solar} in kWh, $m_{\text{Brennstoff}}$ in kg, H_u in kWh/kg

4.3.3.2 Nutzungsgrad von Wärmeverteilung und -speicherung (Heizungssystemnutzungsgrad)

Der Heizungssystemnutzungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis verbrauchte Wärmemenge (Q_{ab}) und produzierte Wärmemenge (Q_{zu}) (Gleichung 12).

$$\eta_{\text{Heizsystem}} = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 12}$$

Erläuterungen: $\eta_{\text{Heizsystem}}$ in %, Q_{ab} und Q_{zu} in kWh

4.3.3.3 Solarer Deckungsgrad

Der solare Deckungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis Solaranlagenenertrag (Q_{Solar}) und insgesamt produzierter Wärmemenge ($Q_{zu,ges}$) (Gleichung 13).

$$DG_{\text{Solar}} = \frac{Q_{\text{Solar}}}{Q_{zu,ges}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 13}$$

Erläuterungen: DG_{Solar} in %, Q_{Solar} und $Q_{zu,ges}$ in kWh

4.3.3.4 Spezifischer Stromverbrauch

Der spezifische Stromverbrauch berechnet sich aus dem Verhältnis Stromverbrauch (W_{el}) und insgesamt produzierter Wärmemenge ($Q_{zu,ges}$) (Gleichung 14).

$$w_{el} = \frac{W_{el}}{Q_{zu,ges}} \quad \text{Gleichung 14}$$

Erläuterungen: w_{el} in kWh el./MWh th., W_{el} in kWh el. und $Q_{zu,ges}$ in kWh th.

4.3.3.5 Spezifischer Wärmeverbrauch

Der spezifische Wärmeverbrauch pro Jahr berechnet sich aus dem Verhältnis Gesamtwärmebedarf (Q_{ab}) und beheizter Fläche (A_{HF}) (Gleichung 15). Für die Berechnung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs (Gleichung 16) und spezifischen Warmwasserverbrauchs (Gleichung 17) musste anstatt des Gesamtwärmeverbrauchs nur der Wärmeverbrauch für die Heizwärme oder Warmwasserbereitung verwendet werden.

$$q_{\text{Wärme}_{ab}} = \frac{Q_{\text{Wärme}_{ab}}}{A_{HF}} \quad \text{Gleichung 15}$$

Erläuterungen: $q_{\text{Wärme}_{ab}}$ in kWh/m²a, $Q_{\text{Wärme}_{ab}}$ in kWh/a und A_{HF} in m²

$$q_{\text{Heizwärme}_{ab}} = \frac{Q_{\text{Heizwärme}_{ab}}}{A_{HF}} \quad \text{Gleichung 16}$$

Erläuterungen: $q_{\text{Heizwärme}_{ab}}$ in kWh/m²a, $Q_{\text{Heizwärme}_{ab}}$ in kWh/a und A_{HF} in m²

$$q_{\text{Warmwassser}_{ab}} = \frac{Q_{\text{Warmwasser}_{ab}}}{A_{HF}} \quad \text{Gleichung 17}$$

Erläuterungen: $q_{\text{Warmwasser}_{ab}}$ in kWh/m²a, $Q_{\text{Warmwasser}_{ab}}$ in kWh/a und A_{HF} in m²

4.4 Simulationsprogramm TRNSYS

4.4.1 Allgemeines

TRNSYS wurde 1973 an der Universität von Wisconsin in Madison für die Simulation solarthermischer Anlagen entwickelt. Zur Programmierung wurde Fortran eingesetzt. [vgl.12]

Das dynamische Simulationsprogramm TRNSYS dient zur Analyse von Energiesystemen, unter anderem für Gebäude- und Energieversorgung (z.B. Heizkessel, Wärmeverteilsystem, Pufferspeicher, Solarkollektorsystem usw.). Das Programm ist modular aufgebaut und kann durch eigenständige TRNSYS-Module (TYPES) zu einem technischen System zusammengestellt werden. Die TRNSYS-Module haben definierte Ein- und Ausgänge, die mit den anderen TRNSYS-Modulen verbunden werden. Die TRNSYS-Module sind programmiertechnisch gesehen Unterprogramme die über Verbindungen Parameter an die mit ihnen verbundenen Module weitergeben. [vgl.13]

Als erstes ist ein Simulationszeitraum zu wählen. Dieser Zeitraum wird beim Start der Simulation schrittweise, in diesem Fall sind es 15 Minuten Schritte, abgearbeitet. Die notwendigen Klimadaten für die Solaranlage und die Wärmeverbraucherdaten werden für jeden Zeitpunkt (Stundenintervall) in das System eingespeist. Die Parameter zwischen den miteinander verbundenen TRNSYS-Modulen variieren solange, bis die Ein- und Ausgabewerte gleich sind, also bis ein stabiles Endergebnis für den Zeitschritt vorliegt. Dies wird für jeden Zeitschritt durchgeführt. Die Ausgabedaten der Simulation können mit einem Online Plotter während der Simulation dargestellt und mit einem Printer über einen bestimmten Zeitraum (Stunden-, Monatswerte) ausgegeben werden. [vgl.13]

Das Programm verfügt über eine Standard Bibliothek der TRNSYS-Module. Werden eigene Anlagenkomponenten beziehungsweise andere Berechnungsmodelle benötigt, dann können mithilfe der Programmiersprache Fortran eigene TYPES programmiert werden. [vgl.13]

Bei entsprechendem Aufbau des Simulationsmodells (siehe Kapitel 4.5) können ein vollständiges Heizungssystem mit allen relevanten Komponenten (Kessel, Solaranlage, Pufferspeicher, Rohrleitungen, Pumpen, Misch- und Regelventile) simuliert werden. Durch die Simulation des gesamten Heizungssystems ist es möglich, alle relevanten Einflussfaktoren auf den Jahresnutzungsgrad sowohl der Feuerungsanlage als auch des gesamten Heizungssystems in ihrer Gesamtheit zu berücksichtigen und entsprechend zu bewerten. Die Bewertung des Einflusses einzelner Parameter kann im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfolgen, indem einfach jeweils nur ein Parameter für eine Jahressimulation geändert wird und

somit die Auswirkungen dieses Parameters auf den Jahresnutzungsgrad ermittelt werden können.

Die Einstellungen der Kleinfeuerung sowie aller weiteren relevanten Komponenten wurden anhand der aufgezeichneten Betriebsdaten sowie auf Basis von Spezifikationen und Herstellerangaben parametrisiert.

4.4.2 Komponenten

Das Kesselmodell (Type 869), der Wärmespeicher (Type 340), der Kesselregler (Type 890) und der Rücklaufanhebungsregler (Type 889) wurden vom Institut Wärmetechnik an der Technischen Universität zur Verfügung gestellt, da keine geeigneten Modelle in der TRNSYS Standard Bibliothek vorhanden waren. In „TRNSYS a TRaNsient SYstem Simulation program- Volume 4 Mathematical Reference“ [14] werden die Standard Bibliothek Types ausführlich erklärt. Nachfolgend werden die verwendeten Types kurz beschrieben.

Kessel (Type 869)

Durch die Entwicklung eines entsprechenden Kesselsimulationsmoduls (Type 869) für Kleinfeuerungen (Brennstoff wahlweise Gas, Heizöl oder Pellets/Hackgut) an der Universität für Angewandte Wissenschaften in Rapperswil (Schweiz) und der Technischen Universität Graz [15] ist es möglich, das Betriebsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen über den Ganzjahresbetrieb zu simulieren. Bei entsprechender Parametrierung des Kesselmoduls kann so der Jahresnutzungsgrad der Feuerungsanlage und des gesamten Heizungssystems in Abhängigkeit vom Lastverhalten und der Systemkonfiguration (Feuerungsanlage im Stand-alone-Betrieb, Feuerungsanlage in Kombination mit Pufferspeicher, Feuerungsanlage in Kombination mit Solaranlage und Pufferspeicher) ermittelt werden. Das Kesselmodell (Type 869) wird bezüglich seiner Möglichkeiten, Grenzen und seiner Regelung näher erklärt, da bei der Arbeit das Kesselverhalten genauer untersucht wurde.

Modell-Möglichkeiten: [15]

- Vordefinierte Brennstoffe (Erdgas, Öl, Holz/Pellet)
- Eigenen Brennstoff definierbar, der über den Brennwert und der elementaren Zusammensetzung definiert wird
- Wassergehalt von Biomasse-Brennstoffen einstellbar
- Lambda-Wert(Luftüberschuss) für das Verbrennen ist ein Inputparameter, oder kann abhängig von der Modulationsleistung berechnet werden
- Vollständige Berechnung der Abgaszusammensetzung und Temperatur (adiabate Verbrennungstemperatur)
- Berechnung des Wärmeaustauschs von Rauchgas auf Wasser wahlweise durch NTU-Methode (Number of Transfer Units) für Gegenstrom-, Kreuzstrom mit Mischwasserseite usw. oder auf Basis von empirischen Gleichungen möglich
- Abhängigkeit des Rauchgas/Wasser-Wärmeübergangskoeffizienten auf Basis der Rauchgas- und Wassermassenströme

- Wärmerückgewinnung durch Kondensation durch maximale relative Feuchte des Rauchgases am Kesselaustritt einstellbar
- Optional aufgeteilte Berechnung von trockenen und nassen Teil des Wärmetauschers für Brennwertkessel, wenn Kondensation auftritt, Feuchtkugeltemperatur als treibende Kraft im Kondensationsteil (vereinfachte Merkel-Theorie)
- Verbrennungsluftwärmetauscher für Luftvorwärmung implementierbar
- Bilanzierung der thermischen Masse des Kessels mit den Wärmeverlusten an die Umgebung während des Betriebs und Standby
- Modulierende Leistung oder On/Off- Brenner simulierbar
- Brenner kann mehrere Male während eines Zeitschritts eingeschaltet werden und die Anzahl wie oft er einschaltet wird gemeldet, in diesem Fall ist die Vorlaufwassertemperatur der Mittelwert über die Ein/Aus- Zyklen
- Separate Temperaturen für T_{ON} (Brenner schaltet ein) T_{SET} (Sollwert für die Modulation) und T_{OFF} (Brenner schaltet ab)
- Minimale Ruhezeit zwischen Aus- und Einschalten einstellbar
- Mindesteinschaltdauer einstellbar (wenn die Sicherheitstemperatur T_{MAX} in diesem Zeitraum überschritten wird, erfolgt trotzdem ein Stopp)
- Feste Anlaufzeit mit separater Leistungs- Option (z.B. Anlaufleistung ist P_{MAX} für modulierende Brenner)
- Modulationsabhängige Verluste wegen CO im Rauchgas und separate Werte für CO können einfach außerhalb des Modells auf Basis der Modell-Outputs erfolgen

Modell-Grenzen: [15]

- Thermische Masse ist nicht auf mehrere Knoten aufgeteilt (ein Knoten Ansatz, nicht geeignet für Heizkessel mit einem hohen Grad an Schichtung wie z.B. in Solarspeichern integrierte Brenner)
- thermische Masse vom Wasser und Wärmetauscher werden als eine thermische Masse behandelt, Kessel mit zwei Leistungsstufen werden nicht simuliert (verwenden Sie stattdessen modulierend)
- Verluste durch Schornsteinzug während den Stillstandzeiten sind derzeit noch nicht simulierbar (diese Verluste müssen stattdessen in die allgemeinen Verluste an die Umgebung miteinbezogen werden)

Im folgenden Absatz wird die Art und Weise, wie der Kessel in der Simulation regelt, näher beschrieben.

Dem Kesselmodell kann eine maximale und minimale Leistung des Brenners (Parameter) sowie Temperaturen vorgegeben werden, bei denen der Brenner den Brennvorgang starten oder stoppen beziehungsweise welchen Temperatursollwert das Wasser im Kessel mit Leistungsregelung erreichen soll. Der Brenner zündet, sobald die Kesseltemperatur unter die

festgelegte T_{ON} Temperatur sinkt. Die Startphase des Brenners kann mit dt_{START} und der durchschnittlichen Leistung während der Startphase mit P_{START}^{GHV} vorgegeben werden. Nach dieser Zeit beginnt der normale Brennerbetrieb und dauert mindestens $dt_{BURN,min}$ (ebenfalls frei einstellbar), außer es wird während dieser Zeit die maximal zulässige Temperatur (T_{MAX}) im Kessel überschritten. Darüber hinaus kann die minimale Zeitspanne zwischen Kesselstopp und neuerlichem Betrieb ($dt_{OFF,min}$) eingestellt werden. [vgl.15]

Während des Betriebs kann die Leistung zwischen maximaler (P_{max}^{GHV}) und minimaler (P_{min}^{GHV}) Leistung variiert werden, um die Settemperatur (T_{SET}) zu erreichen beziehungsweise aufrecht zu erhalten. Wenn die Kesselaustrittstemperatur T_{SET} übertrifft, wird die Leistung solange gedrosselt, bis T_{SET} erreicht ist. Überschreitet die Kesselaustrittstemperatur auch bei minimaler Leistung T_{OFF} , dann wird der Brenner ausgeschaltet. Während dt_{START} und $dt_{BURN,min}$ wird der Brenner nicht ausschaltet, auch wenn er T_{OFF} überschreitet. In diesen Phasen erfolgt nur dann eine Abschaltung, wenn T_{MAX} überschritten wird. [vgl.15]

Wärmespeicher (Type 340)

Das Pufferspeichermodell (Type 340) ist ein geschichteter Wärmespeicher, mit vier Wärmetauschern, einer internen elektrischen Zusatzheizung und maximal zehn Doppelanschlüsse für die direkte Aufladung und Entladung. Ein Doppelanschluss bedeutet zwei Rohrstücke für den gleichen Kreis, z.B. Kesselvorlauf und -rücklauf.

Im nächsten Abschnitt werden die Möglichkeiten aufgezählt, welche mit dem Pufferspeichermodell (Type 340) simuliert werden können.

Modell-Möglichkeiten:

- Geschichteter Speicher
- Wärmeverlust an die Umgebung (Boden, Deckel und vier Mantelzonen)
- Auf- und Entladen mit Doppelanschlüssen (max. 10)
- Auf- und Entladen mit Wärmetauschern (max. 4)
- Interne elektrische Zusatzheizung
- Temperatursensoren (max. 5)

Mehr Details unter „MULTIPOINT Store- Model for TNSYS“ [16].

Solarkollektor (Type 1a)

Der Solarkollektor wurde mit dem Type 1a abgebildet. Dieser Type ist ein einfaches Modell für den Flachplatten- Solarkollektor. Der wichtigste Einstellparameter ist die Kollektorfläche.

Klimadaten (Type 15-2)

Der Type 15-2 liest die Klimadaten wie die Oberflächeneinstrahlung und Außentemperatur ein. Diese Daten sind notwendig für die Funktion des Solarkollektors. Der verwendete Klimadatensatz wurde mit dem Wetterdatengenerator erzeugt. Mit dem Wettergenerator können aus monatlichen Mittelwerten aus beliebigen Datensätzen Stundenwerte erzeugt werden.

Pumpe (Type 114)

Der Type 114 ist ein starres Pumpenmodell. Die wesentlichen Inputparameter sind der Massenstrom und das Freigabesignal. Der Druckverlust wird bei diesem Modell nicht berücksichtigt.

Differential Controller (Type 2b)

Type 2b ist ein Einschalter und das Steuersignal des Reglers hat entweder den Wert 0 (Ausschalten) oder 1 (Einschalten). Die Regelung erfolgt nur auf einer Position mit einer Ein- und Ausschaltbedingung.

Kesselpumpenregler (Type 890)

Type 890 besitzt zwei Regelgrößen, eine obere- und untere Regelgröße. Das Steuersignal hat den Wert 1 (Einschalten), wenn die obere Regelgröße unterschritten und den Wert 0 (Ausschalten), wenn die untere Regelgröße überschritten wird. Genauere Details zum Type 890 finden Sie unter „The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32“ [17].

Rücklaufanhebungsregler (Type 889)

Type 889 simuliert eine Steuerung, die einen Parameter (z.B. Temperatur, Pumpendrehzahl) in Abhängigkeit von einer Sollgröße und der entsprechenden Prozessgröße berechnet. Eine ausführliche Beschreibung findet sich unter [15].

Weichen (Type 11b und 11f)

Type 11b und Type 11f sind beide T-Stücke, die den Massenstrom aufteilen. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Types ist, dass bei Type 11b die Solltemperatur größer als die Regeltemperatur (z.B. Kesselrücklaufanhebung) und bei Type 11f die Solltemperatur kleiner als die Regeltemperatur ist (z.B. Beimischung zur Vorlauf temperaturregelung beim Verbraucherkreis).

Sammler (Type 11h)

Type 11h ist ein T-Stück, welches zwei Massenströme mit unterschiedlichen Temperaturen zu einem Massenstrom zusammenfasst.

Rohr (Type 31)

Type 31 ist ein Rohrmodell, welches die Wärmeverluste simuliert. Die wichtigsten Einstellparameter von Type 31 sind der Rohrinne Durchmesser, Rohrlänge und der Wärmeübergangskoeffizient.

Data Reader (Type 9c)

Type 9c dient zum Einlesen von Daten in regelmäßigen Zeitabständen aus einer Datei. Diese Daten sind Zwangsfunktionen für die anderen Komponenten in TRNSYS. Die eingelesenen Daten müssen von Zeile zu Zeile ein konstantes Zeitintervall haben.

Equation

Mithilfe der Equation können Berechnungen im TRNSYS durchgeführt werden, wie z.B. Einheiten umrechnen, oder subtrahieren von Werten usw.

Integrator (Type 24)

Der Type 24 integriert die Eingänge über den Simulationszeitraum auf.

Printer (Type 25)

Mit Type 25 können ausgewählte Simulationsergebnisse (Systemvariablen) in bestimmten Zeitintervallen ausgegeben werden.

Online Plotter (Type 65d)

Der Type 65d zeigt das Verhalten der ausgewählten Systemvariablen während einer Simulation, jedoch erzeugt dieser Plotter keine Ausgabedaten. Der Online Plotter kann für den Benutzer eine sehr wichtige Komponente sein, da der Benutzer das Verhalten der ausgewählten Parameter während der Simulation online auf einen Bildschirm sehen kann.

4.4.2.1 Anlagenregelung

Nachfolgend ist die Regelung der einzelnen Erzeuger- (Kessel/Solaranlage) und Verbraucherkreise, wie sie in TRNSYS realisiert wurden, kurz erklärt.

Solarkreisumpfenregelung

Abbildung 9 zeigt den Aufbau der Solarkreisumpfenregelung.

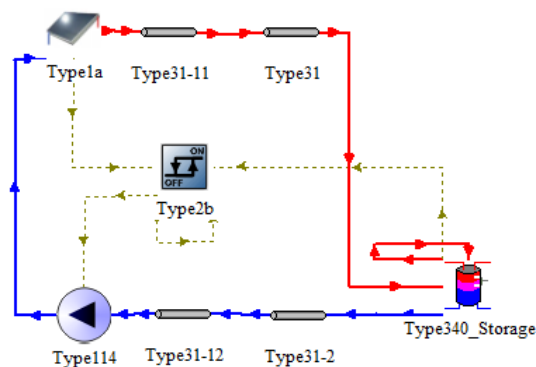


Abbildung 9: Solarkreisumpfenregelung

Erläuterungen: Type1a ... Solaranlage; Type114 ... Solarkreispumpe; Type340_Storage ... Pufferspeicher; Type3b ... Solaranlagenregler; Simulationsprogramm TRNSYS

Die Regelung der Solaranlage beschränkt sich auf das Ein- und Ausschalten der Solarkreispumpe, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt beziehungsweise nicht mehr erfüllt sind. Das Steuersignal des Reglers ist eine Funktion der Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_H - T_L$). ΔT_H ist die Einschaltgrenze und ΔT_L die Ausschaltgrenze. Bei dieser Regelung sind die Kollektorausstrittstemperatur (T_H) und die untere Speichertemperatur (T_L) die

Regeleingangsparameter. Die Solarkreispumpe schaltet ein beziehungsweise bleibt eingeschaltet, wenn die Kollektoraustrittstemperatur (T_H) größer ist als die untere Speichertemperatur (T_L) + ΔT_H . Ist die Kollektoraustrittstemperatur (T_H) kleiner als die untere Speichertemperatur (T_L) + ΔT_L , dann schaltet sich die Solarkreispumpe aus beziehungsweise bleibt ausgeschaltet. Als Sicherheitstemperatur für den Regler wurde ein Maximalwert für die Kollektoraustrittstemperatur (T_H) gewählt. Überschreitet die Kollektoraustrittstemperatur (T_H) die Sicherheitstemperatur im Pufferspeicher, dann schaltet die Solaranlagenpumpe ebenfalls aus.

Kesselkreispumpenregelung

Anlagen mit Pufferspeicher:

Abbildung 10 zeigt den Aufbau der Kesselkreispumpenregelung.

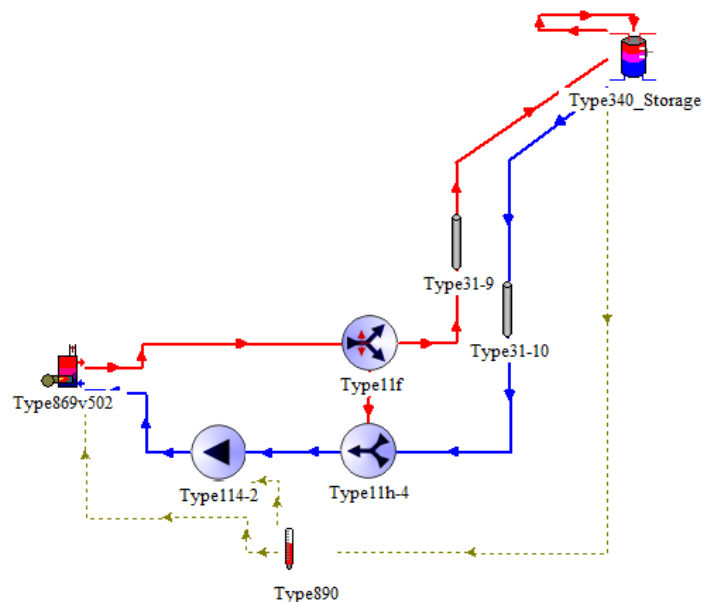


Abbildung 10: Kesselkreispumpenregelung

Erläuterungen: Type869v502 ... Pelletkessel; Type11h-4 ... Kesselkreispumpe; Type240:Storage ... Pufferspeicher; Type890 ... Kesselpumpenregler; Simulationsprogramm TRNSYS

Die Kesselpumpenregelung erfolgt mit den Type 890. Der Regler besitzt zwei Regeleingangsparameter. Der obere Regelparameter ($T_{\text{upper set}}$) ist die Einschalttemperatur und der untere Regelparameter ($T_{\text{lower set}}$) die Ausschalttemperatur, welche auf unterschiedlichen Pufferspeicherhöhen angebracht werden können. Wird die Einschalttemperatur unterschritten, dann schaltet der Regler ein und bei Überschreiten der Ausschalttemperatur schaltet der Regler aus. T_{upper} ist die Speichertemperatur für die Einschaltbedingung und T_{lower} die Speichertemperatur für die Ausschaltbedingung. Die Einschalttemperatur ($T_{\text{upper set}}$) und Ausschalttemperatur ($T_{\text{lower set}}$) werden im Type 890 gesetzt und sind frei wählbar, wobei darauf geachtet werden muss, dass die Einschalttemperatur immer größer als die minimal notwendige Vorlauftemperatur für den Verbraucherkreis zu wählen ist. Die Kesselpumpe schaltet ein, wenn die obere Speichertemperatur (T_{upper}) kleiner als die Einschalttemperatur ($T_{\text{upper set}}$) ist und bleibt solange eingeschaltet, bis die untere Speichertemperatur (T_{lower}) die Ausschalttemperatur ($T_{\text{lower set}}$) überschreitet.

Anlage ohne Pufferspeicher:

Bei diesem Anlagenaufbau war im Simulationsprogramm TRNSYS keine Kesselkreispumpe für den Simulationsablauf notwendig. Der benötigte Massenstrom (Wärmemenge) für die einzelnen Verbraucherkreise wurde über die jeweiligen Verbraucherkreisregelungen gesteuert, Details siehe Anschnitt Verbraucherkreisregelung.

Rücklaufanhebungsregelung

Abbildung 11 zeigt den Aufbau der Rücklaufanhebungsregelung.

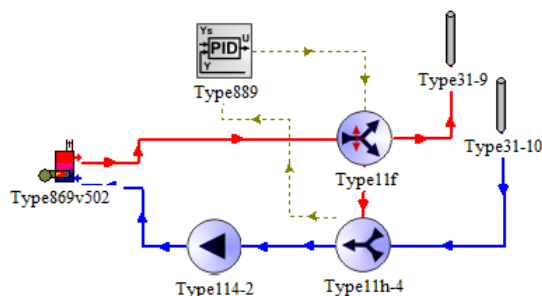


Abbildung 11: Rücklaufanhebungsregelung

Erläuterungen: Type11f ... Weiche; Type11h-4 ... Sammler; Type889 ... Rücklaufanhebungsregler; Simulationsprogramm TRNSYS

Aufgabe der Rücklaufanhebung ist es, insbesondere in der Anfahrphase die Wassertemperatur möglichst schnell auf den vom Kesselhersteller vorgegebenen Wert für die minimale Temperatur einzustellen. Ist der Wärmetauscher nämlich zu kalt, kondensieren die Verbrennungsabgase an seiner Oberfläche. Für den Simulationsablauf wäre eine Rücklaufanhebung nicht notwendig, da Type 869 keine Simulation bezüglich der Rücklaufumtemperatur vorsieht, sie wurde eingebaut, damit eine bessere Kesselleistungsregelung simuliert werden kann.

Für die Simulation der Rücklaufanhebung kommt ein temperaturgesteuertes Mischventil (Type 11f) zum Einsatz, so dass ein gewisser Massenstromanteil des heißen Vorlaufwassers zum kalten Rücklaufwasser beigemischt werden kann, um die erwünschte Solltemperatur zu erreichen. Der Rücklaufanhebungsregler (Type 889) regelt die Massenstromaufteilung in der Weiche (Type 11f). Der Regeleingangsparameter für den Type 889 ist die Rücklaufumtemperatur. Speziell in der Anfahrphase ist die Rücklaufanhebung in Betrieb. Ist die vom Pufferspeicher beziehungsweise Sammler kommende Rücklaufumtemperatur größer als der Sollwert, dann wird vom Rücklaufanhebungsregler kein heißes Vorlaufwasser zum Rücklauf beigemischt. Die Solltemperatur wird in TRNSYS im Type 889 definiert.

Verbraucherkreisregelung

Abbildung 12 zeigt den Aufbau der Verbraucherkreisregelung.

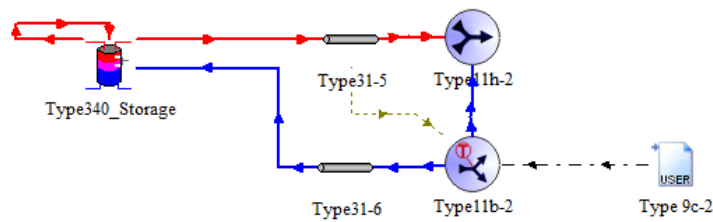


Abbildung 12: Verbraucherkreisregelung

Erläuterungen: Type340_Storage ... Pufferspeicher; Type11b-2 ... Weiche; Type11h-2 ... Sammler; Type31 ... Rohr; Simulationsprogramm TRNSYS

Im Verbraucherkreis ist eine Weiche (Type 11b) installiert, mit der die benötigte Wärmemenge geregelt wird. Die Weiche (Type 11b) unterteilt die Schaltung in einen Primär- (Pufferspeicher/Sammler bis zur Weiche) und Sekundärkreis (Weiche bis zum Verbraucher). Der Massenstrom im Sekundärkreis wird vom Lastfile (Type 9c) vorgegeben. Die Regelung der Vorlauftemperatur der einzelnen Verbraucher erfolgt mit einem temperaturgesteuerten Mischventil (Type 11b). Der Regeleingangsparameter des Mischventils (Type 11b) ist die Vorlauftemperatur vor dem Sammler (Type 11h). Das Mischventil (Type 11b) mischt dem Sammler (Type 11h) so viel Rücklaufmassenstrom bei, bis sich die gewünschte Vorlauftemperatur einstellt. Die Vor- und Rücklauftemperatur des Sekundärkreises wird in TRNSYS im Type 11b definiert. Die Vorlauftemperatur im Primärkreis variiert, da unterschiedliche Temperaturen im Pufferspeicher/Sammler herrschen.

4.4.2 Datenaufbereitung für TRNSYS

Allgemein

Die Feldmessdaten bezüglich Verbraucherverhalten wurden mittels Lastfiles (Type 9c) in das Simulationsprogramm TRNSYS importiert. Um das reale Verbraucherverhalten simulieren zu können, mussten einige Vereinfachungen getroffen werden, die nachfolgend erklärt werden.

Raumwärme

Das Verbraucherverhalten bezüglich Raumwärmebedarf wurde über einen vorgegebenen Massenstrom sowie Vor- und Rücklauftemperaturen definiert.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen des jeweiligen Verbrauchers wurden aus den Mittelwerten der Feldmessdaten über ein Jahr ermittelt. Daraus wurde die mittlere Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ermittelt (Gleichung 18).

$$\Delta T = \bar{T}_{\text{Vorlauf}} - \bar{T}_{\text{Rücklauf}} \quad \text{Gleichung 18}$$

Erläuterungen: ΔT , \bar{T}_{Vorlauf} und $\bar{T}_{\text{Rücklauf}}$ in K

Mithilfe der Wärmemenge pro Aufzeichnungsintervall (aus den Feldmessdaten) und der konstanten Temperaturspreizung der einzelnen Verbraucherkreise wurde der Massenstrom mit Gleichung 19 berechnet.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T} \quad \text{Gleichung 19}$$

Erläuterungen: \dot{m} in kg/h, \dot{Q} in kW, c_{Wasser} in kWh/kgK und ΔT in K

Die so errechneten Massenströme pro Zeiteinheit (1h) wurden mittels Lastfile an das Simulationsprogramm TRNSYS übergeben. Die konstanten Vor- und Rücklauftemperaturen wurden in TRNSYS direkt als Eingangsparameter eingegeben. Beschreibung der Regelung siehe Kapitel 4.4.2.1.

Warmwasser

Bei den Feldmessungen war der Wärmemengenzähler vor dem Beimischventil eingebaut und aus diesem Grund gab es keine Messdaten über den verbrauchten Massenstrom. Abbildung 13 zeigt die hydraulische Verschaltung vom Warmwasserkreis inklusive der Einbauposition des Wärmemengenzählers.

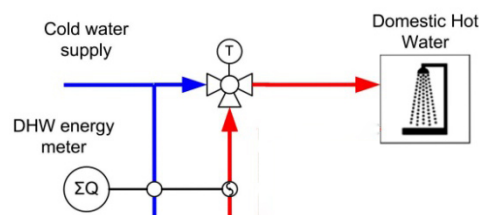


Abbildung 13: Hydraulische Verschaltung des Warmwasserkreises

Erläuterungen: Wärmemengenzähler, Beimischventil (temperatrgesteuert), Datenquelle [2]

Folgende Annahmen wurden getroffen, um den Massenstrom berechnen zu können:

- konstante Rücklauf- bzw. Beimischtemperatur
- konstante Warmwassertemperatur

Die Wärmemenge pro Zeitintervall war aus den Feldmessdaten bekannt. Mit der Annahme von einer konstanten Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf und der bekannten Wärmemenge wurde mit Gleichung 19 der Vorlaufmassenstrom berechnet. Der fehlende Beimischmassenstrom berechnete sich mit Gleichung 20, da die Warmwassertemperatur angenommen wurde und die Vor- und Rücklauftemperatur bekannt war.

$$\dot{m}_{\text{Vorlauf}} \cdot T_{\text{Vorlauf}} + \dot{m}_{\text{Beimisch}} \cdot T_{\text{Beimisch}} = (\dot{m}_{\text{Vorlauf}} + \dot{m}_{\text{Beimisch}}) \cdot T_{\text{Warmwasser}} \quad \text{Gleichung 20}$$

Erläuterungen: \dot{m}_{Vorlauf} , $\dot{m}_{\text{Beimisch}}$ und $\dot{m}_{\text{Warmwasser}}$ in kg/h, T_{Vorlauf} , T_{Beimisch} und $T_{\text{warmwasser}}$ in K

4.5 Aufbau Simulationsmodell

4.5.1 Referenzmodell

Als Referenzmodell wurde das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) der Anlage B mit allen wesentlichen Komponenten (Kessel, Solaranlage, Pufferspeicher, Pumpen, Misch- und Regelventile) sowie Regelkreise entsprechend der hydraulischen Verschaltung nachgebaut. Das Referenzmodell beinhaltet folgende TRNSYS Komponenten:

- Pelletkessel (Type 869)
- Solarkollektor (Type 1a)
- Wärmespeicher (Type 340)
- Pumpen (Type 114)
- Rohr (Type 31)
- Solaranlagenregler (Type 2b)
- Kesselpumpenregler (Type 890)
- Rücklaufanhebungsregler (Type 889)
- Weichen (Type 11b und 11f)
- Sammler (Type 11h)
- Integrator (Type 24)
- Printer (Type 25)
- Online Plotter (Type 65d)
- Data Reader (Type 9c)
- Equation

Eine detaillierte Darstellung des Referenzmodells findet sich im Kapitel 5.5.1.1.

4.5.2 Verifikation

4.5.2.1 Vorgehensweise zur Anlagenanpassung

Die Einstellungen des Pelletkessels sowie aller weiteren relevanten Komponenten des hydraulischen Systems im Heizraum wurden anhand von aufgezeichneten Betriebsdaten sowie auf Basis von Spezifikationen und Herstellerangaben parametrisiert. Mittels einer Parameteranpassung wurde das Referenzmodell so eingestellt, bis das Betriebsverhalten und der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels von der Simulation mit der Anlage B gut übereinstimmte. Die einzelnen Anpassungen vom Referenzmodell werden nun näher beschreiben.

Beim Pelletkessel wurden die Einstellparameter wie Nennleistung/Teillast, Kesselgewicht, Wasserinhalt, CO bei Nennleistung/Teillast, O₂-Gehalt und die Rauchgasaustrittstemperatur bei Nennleistung/Teillast von den Technischen Daten [18] des Kesselherstellers übernommen. Die Simulation des Kesselwärmeverlusts an die Umgebung ($\dot{Q}_{m,amb}$) erfolgte mit zwei verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten (UA-Werten) und der Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Umgebung, siehe Gleichung 21.

$$\dot{Q}_{m,amb} = (T_{B,avg} - T_{amb}) \cdot UA \quad \text{Gleichung 21}$$

Erläuterungen: $\dot{Q}_{m,amb}$ in W, $T_{B,avg}$ und T_{amb} in K und UA in W/K

Der Wärmeübergangskoeffizient (UA_{ON}) repräsentiert den Wärmeverlust vom Pelletkessel in Betrieb und der Wärmeübergangskoeffizient (UA_{OFF}) im Stillstand. Als Anhaltspunkt für den Wärmeübergangskoeffizient (UA_{ON}) in Betrieb wurde der Wert aus [15] entnommen, weil der Pelletkessel eine ähnliche Nennleistung hatte. Der Wärmeübergangskoeffizient (UA_{OFF}) im Stillstand wurde doppelt so groß gewählt. Die Gründe dieser Annahme waren:

- Wärmeverlust über den Kaminzug (in [15] wurde dieser nicht berücksichtigt) und damit
- größere Oberfläche, über die die Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann

Der Pufferspeicher wurde mit den Herstellerangaben parametrisiert. Die Ein- und Auslasshöhe des Warmwasser- und Solarwärmetauschers wurde aus den Datenblatt [7] des Pufferherstellers herausgemessen, da diese Abmessungen im Datenblatt nicht angegeben waren. Die Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmedurchgangskoeffizienten die für die Parametrierung nötig waren, stammen aus einer Broschüre [19] des Pufferspeicherherstellers.

Bei der Solaranlage wurde nur die Solarkollektorfläche eingestellt. Weitere Einstellungen mussten bei der Solaranlage nicht gemacht werden.

Die Regelung der Kesselpumpe und der Solaranlagenpumpe wurde so eingestellt, dass das Betriebsverhalten ähnlich wie bei der Anlage B war. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum wurde mit den Rohrleitungsverlusten abgeglichen, da der Pufferspeichertyp bekannt war. Zum Schluss wurde der Kessel-Jahresnutzungsgrad über Variation der UA_{ON} - und UA_{OFF} -Werte an die Anlage B angepasst.

4.5.3 Anpassung des Referenzmodells an die weiteren untersuchten Anlagen

Nach der Verifikation des Referenzmodells erfolgte die Anpassung des Modells an die weiteren untersuchten Anlagen.

4.5.3.1 Anlage A

Bei der Anlage A wurde im Modell der Solaranlagenkreis (Solarkollektor, Rohre, Pumpe und Solaranlagenregelung sowie die Wetterdateneinlesung) entfernt. Zusätzlich wurde das Pufferspeichervolumen entsprechend verkleinert.

4.5.3.2 Anlage G

Bei der Anlage G hat sich am Aufbau des Referenzmodells nichts geändert. Es wurden nur die Solarkollektorfläche und das Pufferspeichervolumen entsprechend vergrößert.

4.5.3.3 Anlage I

Bei der Anlage I wurde der Solaranlagen- und Warmwasserkreis entfernt. Der Pufferspeicher war für den Simulationsablauf notwendig, weil TRNSYS über keinen eigenen Type verfügt der als Sammler/Verteiler eingesetzt werden kann. Deshalb wurde der Pufferspeicher so weit verkleinert, dass er praktisch wie ein Sammler/Verteiler funktionierte.

4.5.4 Teststand für die Kesselwirkungsgradbestimmung

Für die Kessel- Wirkungsgradüberprüfung (Nennleistung und Teillast) wurde ein Kesselmesstand in TRNSYS nachgebildet. Abbildung 14 zeigt den Aufbau des Teststands in TRNSYS.

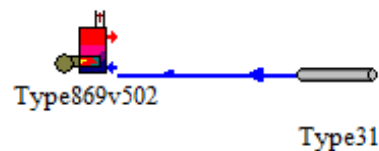


Abbildung 14: Kesselmesstands Aufbau in TRNSYS

Erläuterungen: Type869v502 ... Pelletkessel; Type31 ... Rohr; Simulationsprogramm TRNSYS

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades wurde beim Type 31 der Massenstrom für Nennleistung beziehungsweise Teillast sowie die Rücklauftemperatur vorgegeben, um die Kesselleistung einzustellen. Der Kessel wurde für einen Zeitraum mit konstanter Leistung betrieben. Mit der resultierenden Kesselleistung und dem Brennstoffverbrauch wurde der Kesselwirkungsgrad berechnet. Es wurde festgelegt, dass der Nennlastwirkungsgrad bei allen drei verwendeten Kesselgrößen gleich sein musste. Die Wirkungsgradanpassung der anderen beiden Kesselgrößen erfolgte mit dem Wärmeübergangskoeffizienten (UA_{ON}) in Betrieb.

4.6 Sensitivitätsanalyse

4.6.1 Allgemein

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren zur Abschätzung des Risikos durch Variation einzelner oder mehrerer ungewisser Eingangsgrößen. Es lässt sich ermitteln, wie sich der Zielfunktionswert mit den variierenden Eingangsgrößen ändert und welche Werte diese Größen annehmen dürfen/müssen, um bestimmte Zielfunktionswerte zu erreichen. [20]

In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einzelner Parameter auf das Modellergebnis untersucht. Diese Untersuchung kann bei analytischen Modellen mathematisch durch Analyse der Modellgleichungen geschehen. Eine weitere Möglichkeit ist die Variation der einzelnen Modellparameter in definierten Intervallen. Diese Ergebnisse werden dann mit dem Resultat der Standardparameter verglichen. Bei gleichzeitiger Variation mehrerer Eingangsgrößen sind die Ergebnisse zur Abschätzung der Unsicherheiten nicht mehr brauchbar. [20]

4.6.2 Durchführung

Die Sensitivitätsanalyse teilte sich in folgende Gebiete auf:

- Kessel-Änderungen (Rauchgasaustrittstemperatur, O₂-Gehalt sowie Wärmeverlust)
- Software-Änderungen (Kessel- und Solaranlagenregelung sowie Puffermanagement)
- Hardware-Änderungen (Rohr- und Pufferisolierung sowie Komponentengröße)

Die Kessel-Änderungen und der Punkt Kessel bei der Software-Änderungen sollte zeigen, welche Auswirkungen diese Maßnahmen auf den Kessel-Wirkungsgrad und schlussendlich auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad und Pelletverbrauch haben.

Bei den Software-Änderungen speziell im Puffermanagement sollten die Auswirkungen der Regeleinstellungen für den Kessel und der Solaranlage auf das Anlagenbetriebsverhalten, den solaren Deckungsgrad, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik und auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad sowie den Pelletverbrauch gezeigt werden.

In Punkt Hardware-Änderungen sollten die Auswirkungen auf den Kessel-Wirkungsgrad, den Kessel-Jahresnutzungsgrad, den Solaren Deckungsgrad, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik, den Pelletverbrauch, die Kessel-Volllaststunden und das Anlagenbetriebsverhalten geprüft werden.

In Tabelle 3 sind die im Rahmen der Sensibilitätsanalyse untersuchten Parameter und deren erwarteter Einfluss aufgelistet.

Tabelle 3: Parameterliste für die Sensibilitätsanalyse

KESSEL-ÄNDERUNGEN	Erwarteter Einfluss auf
Rauchgasaustrittstemperatur (Vollast/Teillast) Absenkung der RG-Austrittstemperatur von 160/100 auf 120/60 in zwei Schritten	Wirkungsgrad/Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch
O ₂ -Gehalt im Rauchgas (Vollast/Teillast) Absenkung O ₂ -Gehalt von 9,0/12,4 auf 9,0/9,0 und dann weiter auf 7,8/7,8 in zwei Schritten	Wirkungsgrad/Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch
Wärmeübergangsfaktor von thermischer Masse an Umgebung (bei Stillstand) Variation zwischen Angabe laut Diss. Haller und doppeltem Wert	Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch
Reduzierung der thermischen Masse Variation zwischen Ausgangswert und halben Wert	Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch
SOFTWARE-ÄNDERUNG	
Kessel	
Einstellungen für Startphase (Dauer und Startleistung am Ende der Startphase)	Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch
Kesselvorlauftemperatur 60, 65, 70°C	Puffertemperaturen, Wärmeverluste Wasserhydraulik
Puffermanagement in Kombination mit Solaranlage	
Regelparameter für Solaranlagenfreigabe (Temperatur) <i>Optionen:</i> Temperaturfühler 2 Variation der Temperaturen in 5°C Schritten Temperaturbereiche, innerhalb derer die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, werden entsprechend der Verläufe der Puffertemperaturen der Basisvariante festgelegt	Deckungsgrad Solaranlage, Wärmeverluste Wasserhydraulik, Betriebsverhalten Pelletkessel, Pelletverbrauch
Regelparameter für Solaranlagenabschaltung (Temperatur) <i>Optionen:</i> Temperaturfühler 2 Variation der Temperaturen in 5°C Schritten Temperaturbereiche, innerhalb derer die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, werden entsprechend der Verläufe der Puffertemperaturen der Basisvariante festgelegt	Deckungsgrad Solaranlage, Wärmeverluste Wasserhydraulik, Betriebsverhalten Pelletkessel, Pelletverbrauch
Puffermanagement in Kombination mit Kessel	
Regelparameter für Kesselfreigabe (Position des Temperaturfühlers im Pufferspeicher, Temperatur) <i>Optionen:</i> Temperaturfühler 4 Variation der Temperaturen in 5°C Schritten Temperaturbereiche, innerhalb derer die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, werden entsprechend der Verläufe der Puffertemperaturen der Basisvariante festgelegt	Kesselbetriebsverhalten, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch, Wärmeverluste Wasserhydraulik
Regelparameter für Kesselabschaltung (Position des Temperaturfühlers im Pufferspeicher, Temperatur) <i>Optionen:</i> Temperaturfühler 4, 3 und 2 Variation der Temperaturen in 5°C Schritten Temperaturbereiche, innerhalb derer die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, werden entsprechend der Verläufe der Puffertemperaturen der Basisvariante festgelegt	Kesselbetriebsverhalten, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch, Wärmeverluste Wasserhydraulik
HARDWARE-ÄNDERUNGEN	
Isolierung	
Isolierung Rohrleitungen (Variation der Isolierstärke) Standardstärken berücksichtigen	Wärmeverluste Wasserhydraulik, Pelletverbrauch, Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresvolllaststunden Kessel
Isolierung Puffer (Variation Isolierstärke) 130, 100, 50mm	Wärmeverluste Wasserhydraulik, Pelletverbrauch, Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresvolllaststunden Kessel
Dimensionierung	
Variation der Solaranlagengröße (z.B. in 5m ² -Schritten verkleinern oder vergrößern)	Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch, Jahresvolllaststunden Kessel, Investitionskosten Solaranlage, Deckungsgrad Solaranlage, Wärmeverluste Wasserhydraulik
Variation der Pufferspeichergroße (970l/Standard, 740l, 1580l, 2260l und 3750l)	Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch, Jahresvolllaststunden Kessel, Investitionskosten Pufferspeicher, Deckungsgrad Solaranlage, Wärmeverluste Wasserhydraulik
Variation der Kesselnennleistung (15 kW/Standard, 8 und 12kW)	Betriebsverhalten Pelletkessel, Jahresnutzungsgrad Kessel, Pelletverbrauch, Investitionskosten Pelletkessel, Jahresvolllaststunden Kessel

4.6.3 Ranking

Beim Ranking wurden die untersuchten Parameter nach einem Bewertungskriterium gereiht, um die Auswirkung der einzelnen Parameter zu sehen. Als Bewertungskriterium wurde der Pelletverbrauch herangezogen, da dieser ein Indikator für die Effektivität der gesamten Heizungsanlage ist. Auf Basis des Rankings wurden jene Optimierungsmaßnahmen ausgewählt, die in die Optimierung der gesamten Heizungsanlage einfließen sollten (siehe Kapitel 4.6.4).

4.6.4 Optimierungen

Mithilfe des Rankingergebnisses wurden effektive Optimierungsmaßnahmen für bestehende und zukünftige Heizungsanlagen festgelegt. Diese Optimierungsmaßnahmen wurden mit zwei Kesselgrößen durchgeführt.

4.6.4.1 *Optimierungen an bestehenden Heizungsanlagen*

Diese Optimierungen umfassen Maßnahmen, die an bestehenden Heizungsanlagen durchgeführt werden können. Die ersten Optimierungsmaßnahmen bezogen sich nur auf die Software-Änderungen (Startleistung, Regelung der Solaranlage und Pelletkesselfreigabe) und auf die Rohrleitungsisolierung. Eine weitere Maßnahme war, die Kesselabschaltung an die Jahreszeit anzupassen. Dabei wurden verschiedenen Kesselabschaltbedingungen (Temperaturen) für Sommer-, Übergangs- und Winterzeit gewählt. Für die Erhöhung der Kesselbetriebszeit wurde die Kesseltemperaturspreizung bei Nennleistung reduziert (Rücklaufanhebungstemperatur erhöhen), damit der Pelletkessel länger im modulierenden Leistungsbereich fahren kann. Diese Maßnahme wurde gemacht, weil die Kesselrücklauftemperaturen meistens größer als die minimale Rücklauftemperatur waren und deshalb die Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf kleiner war als die für Nennlast benötigte Temperaturspreizung. Mit einer gleitenden Steigerung der Kesselvorlauftemperatur wurde versucht, den Pelletkessel länger mit Nennleistung/Teillast betreiben zu können. Ab dem Unterschreiten der Mindestleistung stieg die Kesselsolltemperatur so weit an, damit der Pelletkessel zumindest mit 50% Leistung betrieben wurde. Die Kesselsolltemperatur konnte maximal bis zur Abschalttemperatur ansteigen und danach schaltete sich der Pelletkessel ab.

4.6.4.2 *Optimierungen an neugeplanten Heizungsanlagen*

Diese Optimierungen umfassen Maßnahmen, die bei neu zu errichtenden Heizungsanlagen durchgeführt werden können. Neben den bereits zuvor beschriebenen Maßnahmen, umfassten diese Maßnahmen auch Änderungen bei der Dimensionierung einzelner Systemkomponenten sowie eine Weiterentwicklung des Pelletkessels bezüglich Rauchgasverluste und Wärmeverluste an die Umgebung. Eine Optimierungsmaßnahme war, den Pufferspeicher und die Solarkollektorfläche größer und die Kesselnennleistung kleiner zu machen. Die weiteren Optimierungsmaßnahmen betrafen nur den Pelletkessel. Beim Pelletkessel wurden die Rauchgasaustrittstemperatur, der O₂-Gehalt im Rauchgas und der Kesselverlust an die Umgebung bei Stillstand (U_{AOFF}-Wert) minimiert.

Eine weitere zukünftige Heizungssystemvariante war ein Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung integriert in einem Pufferspeicher. Für diese Simulation wurden realistische Annahmen für den Wärmeverlust vom Kessel an die Umgebung in der Simulation getroffen. Statt der Umgebungstemperatur wurde für die Kesselverlustberechnung an die Umgebung (Gleichung 21) die mittlere Pufferspeichertemperatur verwendet (Durchschnittstemperatur der fünf Temperatursensoren im Pufferspeicher). Die Rohrleitungen vom Pelletkessel zum Pufferspeicher wurden entfernt, da es zwischen den beiden Komponenten keinen Wärmeverlust geben kann. Die Variante wurde parallel zu den anderen beschriebenen Optimierungsmaßnahmen simuliert.

4.6.4.3 Maßnahmen zur besseren Kessel/Solaranlagenausnutzung

Weitere Untersuchungen wurden bezüglich besserer Kessel-/Solaranlagenausnutzung durchgeführt, um die Kesselstarts zu minimieren. Die Kesselausnutzung bezog sich auf die Wintermonate (November bis März) und die Solaranlagenausnutzung auf die Sommermonate (April bis Oktober). Die verbesserte Ausnutzung wurde zuerst für jeden Wärmeerzeuger (Pelletkessel und Solaranlage) einzeln und danach für beide zusammen durchgeführt. In den Wintermonaten wurde der Pufferspeicherbereich, welcher vom Pelletkessel beladen wird, vergrößert, indem der Kesselrücklauf auf die Höhe des Solaranlagenvorlaufs gelegt wurde. In den Sommermonaten wurde der Kesselrücklauf wieder auf die ursprüngliche Ausgangslage zurückgesetzt. Die Solaranlagenanschlüsse wurden bei dieser Simulation nicht verändert. Die gleiche Untersuchung wurde mit der Solaranlage durchgeführt. In den Sommermonaten wurde der Pufferspeicherbereich, welcher von der Solaranlage beladen wird, vergrößert, indem der Solaranlagenvorlauf auf die Höhe des Kesselrücklaufs gelegt wurde. Zusätzlich wurde der Solaranlagenwärmetauscher doppelt so groß ausgeführt, um mehr Wärme abgeben zu können. In den Wintermonaten wurde der Solaranlagenvorlauf und Solaranlagenwärmetauscher wieder auf die ursprüngliche Ausgangslage zurückgesetzt. Die Kesselanschlüsse wurden bei dieser Simulation nicht verändert. Bei der Kombination der beiden zuvor erklärten Untersuchungen wurden der Solaranlagenvorlauf und der Kesselrücklauf im Winter und Sommer gleichzeitig verschoben.

4.7 Heizungssystemvergleich/Vollkostenrechnung

Beim Heizungssystemvergleich wurden folgende Heizungssysteme verwendet:

- Zentralheizungssystem (ZHS) mit Biomassekleinfeuerung (BKF) (15kW) mit separate Warmwasserbereitung (Basis)
- ZHS mit BKF (15kW) mit separate Warmwasserbereitung (optimiert)
- ZHS mit BKF (15kW) ohne separater Warmwasserbereitung
- ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis)
- ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert)
- ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert)
- ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis)

- ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert)
- ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) (optimiert)
- ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert)

Die Basis-Heizungssysteme wurden mit den Komponentengrößen der Feldanlagen und den Einstellungen des Referenzmodells nachsimuliert. Alle optimierten Heizungssysteme wurden entsprechend Kapitel 4.6.4 optimiert und dann nachsimuliert. Der Wärmeverbrauch war bei allen Anlagen derselbe. Beim ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung wurde die Wärmemenge (aus den Betriebsdaten) für die Warmwasserbereitung mit Strom (Elektrowärmespeicher) erzeugt. Beim Aufbau der Systeme in TRNSYS diente das ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) als Referenzmodell. Die Anpassung des Referenzmodells an das ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) wird in Kapitel 4.5.3.1 erklärt. Der Aufbau des ZHS mit BKF (15kW) ohne separater Warmwasserbereitung war im Simulationsprogramm TRNSYS prinzipiell gleich wie das ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l), da der Pufferspeicher als Verteiler/Sammler benötigt wurde (TRNSYS verfügt über keinen eigenen Type, der als Verteiler/Sammler eingesetzt werden kann). Der Pufferspeicher wurde daher so klein ausgeführt, dass er in der Simulation einen Verteiler beziehungsweise Sammler darstellt. Der Modellaufbau für die beiden ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) mit und ohne Solaranlage wird in Kapitel 4.6.4.2 beschrieben. Beim ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) wurden die Komponenten Solaranlage und Pufferspeicher zum Referenzmodell vergrößert. Beim ZHS mit BKF (8kW) und mit separater Warmwasserbereitung wurde der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung vom Strom bereitgestellt. Der Pelletkessel belieferte nur die beiden Verbraucherkreise, siehe Simulationsaufbau Kapitel 4.5.3.3.

Mit einer Vollkostenrechnung laut VDI 2067 [21] wurde ein Vergleich der verschiedenen Heizungssysteme durchgeführt. Berücksichtigt wurden dabei die Investitionskosten, Instandsetzungskosten, sowie verbrauchs-, betriebsgebundene- und sonstige Kosten. Die Investitionskosten wurden auf Basis der Kapitalkosten berücksichtigt und diese berechneten sich aus den Investitionskosten multipliziert mit einem Kapitalwiedergewinnungsfaktor. Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor wurde laut „Herstellung und energetische Nutzung von Pellets“ [3] übernommen. Tabelle 4 zeigt die berücksichtigten Kosten, welche aufgeteilt wurden in kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundene- und sonstige Kosten.

Tabelle 4: Berücksichtigte Kosten für die Vollkostenrechnung laut VDI 2067

	Kosten
kapitalgebundene Kosten	Kessel Raumaustragung Pufferspeicher plus Hydraulik Solaranlage Kamin Baukosten Heizraum Baukosten Lagerraum
verbrauchsgebundene Kosten	Brennstoff Strom Ziensendienst für Brennstofflagerung
betriebsgebundene Kosten	Wartungs- und Organisationsaufwand (Eigenleistung) Rachfangkehrer
sonstige Kosten	Versicherung

5 Diskussion und Ergebnisse

5.1 Anlagencharakteristik

Tabelle 5 zeigt die wichtigsten Daten der vier untersuchten Heizungsanlagen. Bei der Auswahl der Heizungsanlagen wurde darauf geachtet, dass bei allen Anlagen der gleiche Pelletkessel (Nennleistung) installiert war.

Tabelle 5: Anlagencharakteristik

Erläuterungen: *) Umrechnungsfaktor von den Stoffdaten Wasser auf Frostschutzmittelgemisch;
**) separate Warmwasserbereitung ohne Verbindung zum Raumwärmeheizungssystem;
Datenquelle [2]

	Anlage A	Anlage B	Anlage G	Anlage I
Baujahr	1909/1967 (Aufstockung)	1958	2003/2004	ca. 1950
Energetische Sanierung	-	2004	-	-
spezielle Gebäudeaspekte	-	-	Holzhaus	-
Beheizte Fläche	170m ²	240m ²	170m ²	ca. 125m ²
Personenanzahl im Haushalt	3	4	4	4
Kesseltyp	Pellematic PES15	Pellematic PES15	Pellematic PE15	Pellematic PE15
Kessel- Nennleistung	15kW	15kW	15kW	15kW
Wärmespeicher	Jura 750l davon 200l Brauchwarmwasservolumen	Jenni 970l davon 130l Brauchwarmwasservolumen	Jenni 2260l davon 130l Brauchwarmwasservolumen	De Dietrich Elektro- Warmwasser-Speicher 300l **)
Solarkollektorfläche	-	10m ²	20 m ³	-
Anzahl der Heizkreise	1	2	2	2
Typ vom Heizkreis	Radiatoren	Radiatoren, Fußbodenheizung	Fußboden-, Wandheizung	Radiatoren
Pellet- Heizwert	4,8kWh/kg	4,78kWh/kg	4,82kWh/kg	4,81kWh/kg
Solaranlagenfaktor *)	-	0,92	0,92	-

5.2 Feldmessdaten

Die Datenaufzeichnung der Anlage A begann am 14.03.2008 und endete am 31.07.2010. Die Datenaufzeichnung war eine Stunde. Bei den Anlagen B und G war die Datenaufzeichnung in der ersten Heizperiode eine Stunde, in der zweiten Heizperiode wurde jedoch ein kleineres Aufzeichnungsintervall (15 Minuten) gewählt. Der Grund für diese Umstellung war, dass mit dem größeren Aufzeichnungsintervall keine genauen Aussagen über das Betriebsverhalten des Pelletkessels gemacht werden konnten. Mit den 15 Minutenwerten war dies schon eher möglich. Bei Anlage B wurde am 21.01.2008 mit den Feldmessungen begonnen, die bis zum 31.07.2010 dauerte. Die Datenaufzeichnung der Anlage G startete am 23.01.2008. Die Stromverbrauchsmessung erfolgte bis zum 16.07.2008 nur für den Pelletkessel inklusive Brennstofffördersystem. Erst danach erfolgte auch eine Aufzeichnung des Stromverbrauchs der Heizkreispumpen (Kessel-, Solar- und Verbraucherpumpen). Die Auswertung der Anlage G erfolgte daher erst ab den 16.07.2008 und endete am 31.07.2010. Bei Anlage I wurde am 23.02.2009 mit der Datenaufzeichnung begonnen. Die Datenaufzeichnung endete am 31.07.2011. Bei dieser Anlage waren zwei Stromzähler installiert. Einer für die Heizungsanlage und einer für den externen Elektrowarmwasserspeicher.

5.3 Anlagenauswertung

5.3.1 Anlage A

Bei der Anlage A wurde nur die Heizperiode 08/09 betrachtet. Die Heizperiode 09/10 wurde nicht für das Ergebnis herangezogen, da über einem Bereich von eineinhalb Monaten der Wärmeverbrauch größer als die Wärmeproduktion war. Der Grund wurde bei Herrn Schraube [11] hinterfragt, aber die Ursache dafür konnte nicht geklärt werden.

5.3.1.1 Stundenauswertung

Für die Auswertung der Vor- und Rücklauftemperaturen wurden nur die Temperaturaufzeichnungen von jener Stunde herangezogen, in denen auch Wärme produziert/verbraucht wurde.

Pelletkessel

Die mittlere Vorlauftemperatur war $63,2^{\circ}\text{C}$, die maximale Vorlauftemperatur $80,1^{\circ}\text{C}$ und die minimale $27,7^{\circ}\text{C}$, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war $44,5^{\circ}\text{C}$, die maximale $61,1^{\circ}\text{C}$ und die minimale $24,5^{\circ}\text{C}$ (vermutlich ein Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperaturen ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von $18,7^{\circ}\text{C}$.

Die Kesselbetriebszeit sowie Kesselstarts wurden mit drei verschiedenen Methoden berechnet. Für die Auswertung der Kesselbetriebszeit sowie der Kesselstarts wurde die Methode 2 angewandt. Der Grund für die Auswahl der Methode 2 wird bei der Auswertung der Anlagen B und G (Kapitel 5.3.2.1 und 5.3.3.1) näher erklärt. Die Gesamtbetriebszeit des Pelletkessels war 1.937h und die Anzahl der Kesselstarts 1.249.

Die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung im Winter betrug 15kW und im Sommer maximal 7kW.

Die Kesselnutzungsgradberechnung wurde bei der Stundenauswertung nicht durchgeführt. Die Ursache dafür liegt bei der Art der Brennstoffförderung vom Pelletlager zum Kessel, die als Vakuumsaugsystem ausgeführt ist. Beim Vakuumsaugsystem wird nur etwa einmal pro Tag Brennstoff in einen Vorratbehälter direkt beim Pelletkessel gefördert, von wo dann der Pelletkessel versorgt wird.

Der Pelletkessel wies im Betrachtungszeitraum 1.472h Volllaststunden und eine relative Kessellast von 0,76 auf.

Radiatoren

Die mittlere Vorlauftemperatur war $50,1^{\circ}\text{C}$, die maximale Vorlauftemperatur $69,2^{\circ}\text{C}$ und die minimale $19,9^{\circ}\text{C}$, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Radiatorenbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war $36,3^{\circ}\text{C}$, die maximale $52,8^{\circ}\text{C}$ und die minimale $20,3^{\circ}\text{C}$ (vermutlich eine Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperaturen ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von $13,8^{\circ}\text{C}$.

Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf im Winter betrug 9kW und im Sommer (Mai/ September) maximal 2kW.

Warmwasser

Die verbrauchte Wärme für die Warmwasserbereitung betrug 8,9% des Gesamtwärmeverbrauchs. Die mittlere Warmwassertemperatur war 51,3°C, die maximale 68,1°C und die minimale 32,4°C, wobei die Minimaltemperatur vermutlich bei stehendem Betrieb gemessen wurde (Abkühlphase). Die mittlere Kaltwassertemperatur war 31°C, die maximale 61,3°C und die minimale 6,1°C. Mögliche Ursachen für die hohen Kaltwassertemperaturen:

- Wärmeleitung zwischen Warm- und Kaltwasser, wenn die Rohre nebeneinander verlegt waren
- Rückstauung aus dem Pufferspeicher

Auf Basis der mittleren Warm- und Kaltwassertemperaturen ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 20,3°C. Es ist aber anzunehmen, dass die tatsächliche Temperaturspreizung bezogen auf die tatsächliche Kaltwassertemperatur sicherlich höher war.

Der maximale durchschnittliche Warmwasserleistungsbedarf im Winter betrug 5kW und im Sommer maximal 2kW.

Stromverbrauch

Der minimale durchschnittliche Stromverbrauch war 10Wh und maximal 300Wh.

Brennstofffördermenge des Vakuumsaugsystems

Bei dieser Anlage fördert ein Vakuumsaugsystem den Brennstoff zum Pelletkessel. Die minimale Brennstofffördermenge war aufgrund der geringen Brennstoffwaagenauflösung 2kg und maximal 32kg. Das Vakuumsaugsystem befüllt normalerweise einmal pro Tag einen Vorratbehälter im Kessel. Von diesem Vorratbehälter erfolgt über eine Förderschnecke die Brennstoffzufuhr zum Brenner. Der Grund warum die maximale Brennstofffördermenge so groß ist, liegt wahrscheinlich daran, dass der Vorratbehälter so viele Pellets aufnehmen kann.

Außentemperatur

Die minimale Temperatur im Winter war laut Aufzeichnungen -5°C und die maximale Temperatur im Sommer 33°C. Die Durchschnittstemperatur lag bei 14,9°C. Im Winter schwankten die Temperaturen im Bereich von -5 bis 10°C. In den Übergangszeiten zwischen 10 und 20°C und im Sommer von 20°C bis 33°C.

Wärmespeicher und Verteilung

Die Pufferspeichertemperaturen beziehungsweise die Schichtung wurden aufgrund fehlender Daten nur aus den Temperaturmessdaten von Wärmeerzeuger und Verbrauchern abgeschätzt (siehe Abbildung 15). Die Temperaturen in Abbildung 15 entsprechend der Durchschnittstemperaturen über ein Jahr. Die durchschnittliche Vorlauftemperatur Richtung Radiatoren konnte nicht abgeschätzt werden, weil der Wärmemengenzähler des

Radiatorheizkreises erst nach dem Beimischventil montiert war. Die maximale Temperatur auf Basis der Kesselvorlauftemperatur war $80,1^{\circ}\text{C}$ und die minimale Temperatur auf Basis der Kaltwassertemperatur vom Brauchwasser war $6,1^{\circ}\text{C}$.

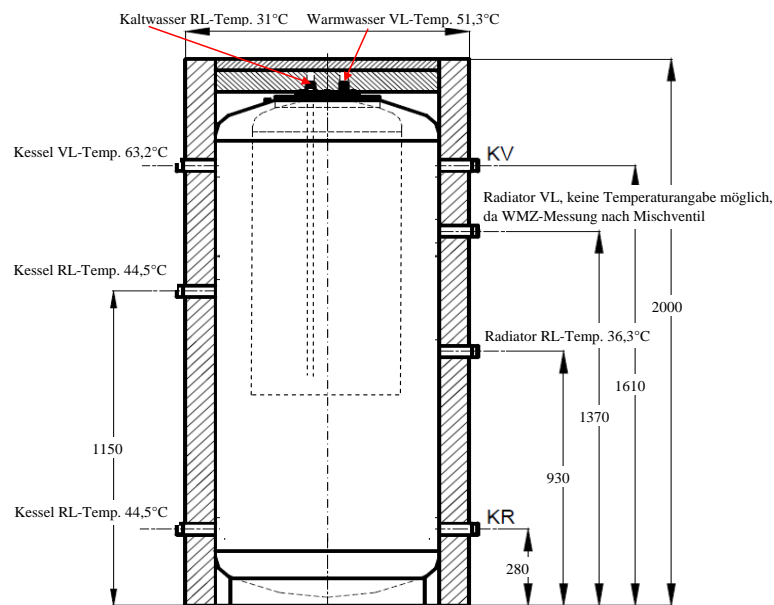


Abbildung 15: Pufferspeichertemperaturen der Anlage A

Erläuterungen: zwei mögliche Anschlüsse für den Kesselrücklauf (1150 und 280mm); Datenquelle [vgl.6]

Der Pufferspeicherboden ist der Bezugspunkt für die Höhenangaben. Bei diesem Pufferspeicher ist es möglich, den Kesselrücklauf auf zwei Höhen einzuspeisen. Die Kesselvorlaufspeisung lag bei 1610mm und die Kesselrücklaufspeisung bei 1150 oder 280 mm. Es war nicht bekannt, ob in Abhängigkeit des Wärmebedarfs beziehungsweise der Jahreszeit, eine Umschaltung zwischen den beiden Rücklaufspeisungen erfolgte. In den Sommermonaten sollte die Einbindung des Kesselrücklaufs auf 1150mm und in den Wintermonaten auf 280mm stattfinden. Dadurch kann der Kessel im Winter den Pufferspeicher durchladen und im Sommer nur die Wärme bereitstellen, welche für die Warmwasserbereitung benötigt wird. Die Umschaltung des Kesselrücklaufs würde weniger Verluste im Sommer bedeuten. Anhand der Betriebsdaten war aber nicht klar, ob diese Option genutzt wurde. Aufgrund des Stop-and-Go-Betriebs des Pelletkessels im Winter und weil die mittlere Kesselrücklaufstemperatur ($44,5^{\circ}\text{C}$) größer als die mittlere Radiatorenrücklaufstemperatur ($36,3^{\circ}\text{C}$) war, lag die Vermutung nahe, dass der Kesselrücklauf auch im Winter auf der Höhe 1150mm eingebunden wurde.

Der Pufferspeicher ist ein Kombinationsspeicher von der Firma Jura THERM GmbH. Die Tank in Tank Ausführung des Pufferspeichers ist nicht optimal, da durch den inneren Tank der Schichtaufbau gestört werden kann (z.B. bei rascher Entleerung des Warmwassertanks bei einer Badewannenfüllung). Bei einer Badewannenfüllung wird eine große Menge kaltes Wasser nachgefüllt und im oberen Bereich des Pufferspeichers erwärmt. Dem heißen oberen Bereich des Pufferspeichers wird somit sehr viel Wärme entzogen, wodurch oben im Pufferspeicher kalte Zonen entstehen und eine interne Zirkulation verursacht werden kann. Außerdem war bei diesem Pufferspeicher das Volumenverhältnis von Heizung und

Warmwasser im Pufferspeicher auch größer als das Verbraucherverhältnis von Heizung und Warmwasser.

Anlagenbetriebsverhalten

Das Betriebsverhalten der Anlage A ist in Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18 zu sehen. Im Sommer war der Pelletkessel ein- bis zweimal pro Tag für maximal ein bis zwei Stunden in Betrieb. In der Übergangszeit nahmen die Kesselbetriebszeiten mit abnehmender Außentemperatur zu und im Winter war der Pelletkessel in Betrieb, wenn er benötigt wurde (entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Verbraucherprofils). Allerdings erfolgte keine Leistungsregelung entsprechend des Lastprofils, sondern ein Stop-and-Go-Betrieb. Die Ursachen für das schlechte Regelungsverhalten könnten sein:

- schlechte modulierende Regelung des Pelletkessels
- schlecht gewählte Setpoints für die Regelung im Pufferspeicher
- schlechte Abstimmung des Gesamtsystems, da der Pufferspeicher für einen kontinuierlichen Betrieb des Pelletkessels nicht genutzt wurde

Bei einer besseren Regelung des Pelletkessels beziehungsweise des Gesamtsystems könnte der Pelletkessel in Kombination mit dem Pufferspeicher deutlich gleichmäßiger betrieben werden. Bei Betrachtung des Lastprofils innerhalb der kältesten Woche (Abbildung 16), zeigt sich auch, dass der Pelletkessel deutlich kleiner dimensioniert werden könnte (ca. 8kW). Bei einer geringeren Nennleistung wäre auch die Regelung im Schwachlastbereich einfacher.

Das bestehende System müsste dahingehend optimiert werden, dass der Pelletkessel zumindest in der kalten Jahreszeit tagsüber durchgehend betrieben wird und neben der Abdeckung des Wärmebedarfs den Pufferspeicher soweit auflädt, dass die Verbraucherspitzen durch den Pufferspeicher abgedeckt werden können. Der Pelletkessel sollte dabei möglichst mit gleichmäßiger Leistung innerhalb des modulierend regelbaren Lastbereichs betrieben werden. Um den Kesselbetrieb zu vergleichmäßigen, müssten die Setpoints für die Kesselregelung (Kesselvorlauftemperatur und/oder Temperaturen im Pufferspeicher) entsprechend angepasst werden (siehe dazu auch Kapitel 4.6.4.1).

Bei der Darstellung des Betriebsverhaltens in den nachfolgenden Abbildungen ist zu beachten, dass diese auf Basis der Wärmemenge pro Stunde, die vom Wärmemengenzähler aufgezeichnet wurde erstellt wurde. Die Werte stellen somit die durchschnittliche Leistung (kWh/h) in der jeweiligen Stunde dar und geben somit nur Anhaltspunkte auf die tatsächliche Spitzenlast.

Abbildung 16 zeigt das Betriebsverhalten der Anlage A in der kältesten Winterwoche.

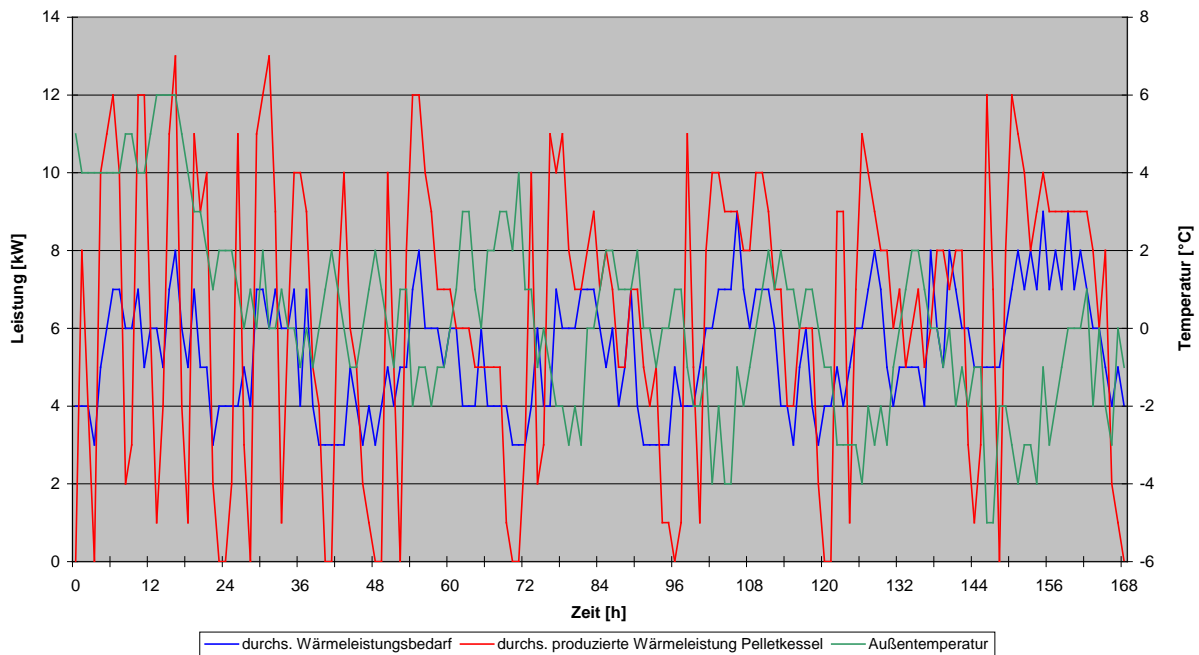


Abbildung 16: Betriebsverhalten der Anlage A in der kältesten Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergroße: 750l, davon 200l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

Die maximale durchschnittliche Kesselleistung in der kältesten Woche war 13kW. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höher liegen (bis zur nominalen Nennlast). Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch in der kältesten Winterwoche lag bei etwa 9kW und der mittlere zwischen 6 und 8kW. Die minimale Außentemperatur lag bei -5°C und die maximale bei 6°C.

Das Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Winterwoche wird in Abbildung 17 dargestellt.

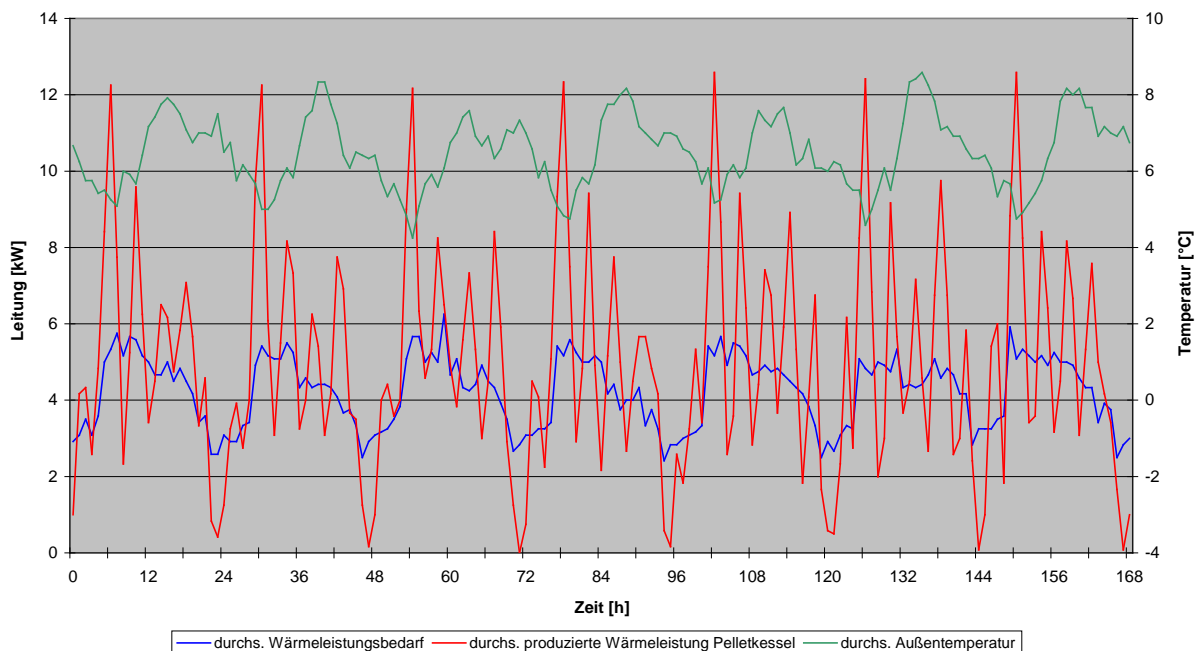


Abbildung 17: Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 750l, davon 200l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

Die maximale durchschnittliche Kesselleistung war 12,6kW. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höher liegen (bis zur nominalen Nennlast). Insgesamt erreichte der Kessel im Jahr ca. 16-Mal die Nennleistung. Im Durchschnitt wurde der Kessel bei einer Leistung von 4 bis 8kW betrieben. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 6,25kW und der mittlere lag zwischen 5 bis 5,5kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei 4°C und die maximale bei 8,5°C.

Abbildung 18 zeigt das Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Sommerwoche.

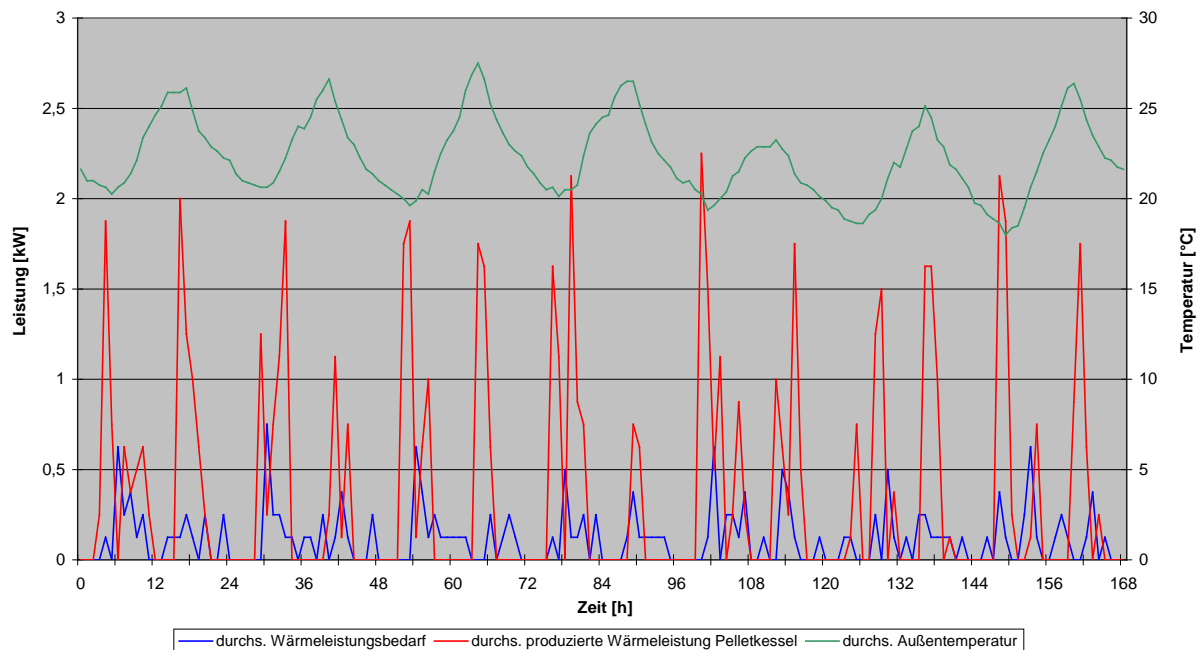


Abbildung 18: Betriebsverhalten der Anlage A in einer durchschnittlichen Sommerwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 750l, davon 200l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

In den Morgenspitzen ist die maximale durchschnittliche Kesselleistung ca. 2,25kW. Tatsächlich dürfte der Kessel nur jeweils für einige Minuten mit deutlich höherer Leistung betrieben worden sein. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 0,75kW und der mittlere lag zwischen 0,15 und 0,35kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei 18°C und die maximale bei 27,5°C.

5.3.1.2 Wochenauswertung

Die Wochenauswertung wurde speziell für die Untersuchungen von Korrelationen durchgeführt. Die Korrelationen wurden zwischen Kesselnutzungsgrad/Stromverbrauch pro Woche und einzelner Einflussgrößen (relative Kessellast pro Woche, Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start) gemacht. Dafür wurde für jede Woche der Kesselnutzungsgrad beziehungsweise der Stromverbrauch der Gesamtanlage ermittelt. Weiters wurden die in Tabelle 7 angeführten Parameter für jede Woche berechnet. Dann wurde geprüft, ob zwischen dem Kesselnutzungsgrad pro Woche und möglichen Einflussgrößen (relative Kessellast pro Woche, Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start) sowie zwischen dem Stromverbrauch pro Woche und möglichen Einflussgrößen (Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start) ein statistischer Zusammenhang besteht. Dies erfolgte einerseits durch die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 (Berechnung mit entsprechender Excel-Funktion) sowie des Korrelationskoeffizienten r (Berechnung mit entsprechender Excel-Funktion(Korrel)). Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt die Güte des Modells (linear, logarithmisch) an. Ein hohes Bestimmtheitsmaß bedeutet, dass ein hoher Anteil der Streuung, ein niedriges Bestimmtheitsmaß ein geringer Anteil der Streuung durch die Gleichung erklärt wird. Der Korrelationskoeffizient gibt die Stärke des statistischen Zusammenhangs an, siehe Tabelle 6, aber es ist nicht berechtigt zu sagen, dass ein statistischer Zusammenhang besteht. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Bei einem Wert von +1 (bzw. -1) besteht ein vollständig positiver (bzw. negativer) linearer Zusammenhang zwischen den Parametern. Geht der Wert Richtung 0, dann wird der Zusammenhang immer schlechter (bei 0 besteht kein Zusammenhang mehr zwischen den beiden Parametern).

Tabelle 6: Einstufungen von Korrelationskoeffizienten

Erläuterungen: Datenquelle [22]

Korrelationskoeffizient r	Einstufung
$r \leq 0,2$	sehr geringe Korrelation
$0,2 < r \leq 0,5$	geringe Korrelation
$0,5 < r \leq 0,7$	mittlere Korrelation
$0,7 < r \leq 0,9$	hohe Korrelation
$0,9 < r \leq 1$	sehr hohe Korrelation

In Tabelle 7 sind die Bestimmtheitsmaße, die Korrelationskoeffizienten und die Einstufung zu den Korrelationen der Anlage A zu sehen. Wie aus Tabelle 7 ersichtlich, waren die Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades gering beziehungsweise mittel.

Tabelle 7: Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufung von den Korrelationen der Anlage A

Erläuterungen: *) linearer Zusammenhang; **) logarithmischer Zusammenhang; Heizperiode 08/09; Kesselnutzungsgrad, Stromverbrauch, relative Kesselast, Kesselbetriebszeit, Kesselstarts und produzierte Wärmemenge pro Start sind jeweils pro Woche; Kor ... Korrelation

	Bestimmtheitsmaß R ² 08/09	Korrelationskoeffizient r 08/09	Einstufung 08/09
Kesselnutzungsgrad vs. relative Kesselast *)	0,1029	-0,3208	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselbetriebszeit *)	0,2022	0,4497	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselstarts *)	0,2561	0,5061	mittlere Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. produzierte Wärmemenge pro Start *)	0,1554	0,3942	geringe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselbetriebszeit **)	0,9695	0,9846	sehr hohe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselstarts **)	0,8928	0,9449	sehr hohe Kor.
Stromverbrauch vs. produzierte Wärmemenge pro Start **)	0,8959	0,9465	sehr hohe Kor.

In Abbildung 19 ist beispielhaft die Korrelation zwischen Kesselnutzungsgrad pro Woche und relative Kesselast pro Woche dargestellt. Laut Auswertung besteht ein geringer statistisch linearer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern.

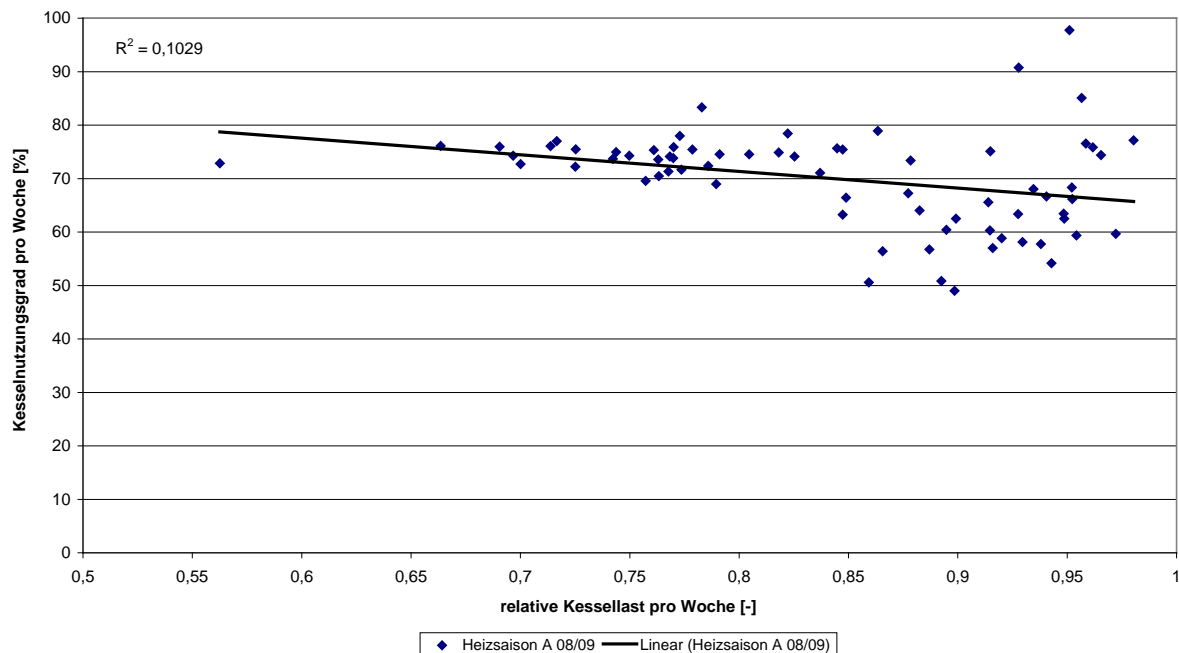


Abbildung 19: Korrelation zwischen Kesselnutzungsgrad pro Woche und relative Kesselast pro Woche

Erläuterungen: Linearer Zusammenhang; Basis Feldmessdaten

Die Auswertung für den Stromverbrauch pro Woche zeigt logarithmische Korrelationen mit der Kesselbetriebszeit pro Woche und den Kesselstarts pro Woche sowie der produzierten Wärmemenge pro Start. Zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche besteht demnach ein sehr hoher logarithmischer Zusammenhang, d.h. der Stromverbrauch pro Woche steigt bis etwa einer Betriebszeit von 20h pro Woche recht stark an und bei mehr als 20h pro Woche ist der Anstieg nur mehr gering. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass das Zündgebläse einen wesentlichen Anteil am Stromverbrauch hat, nur dann eingeschaltet wird, wenn die Zeit zwischen dem ersten Stopp und dem erneuten Start länger als eine Stunde ist [11]. Mit zunehmender Betriebszeit pro Woche steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Abstand zwischen Kesselstopp und erneuten Start immer kürzer wird, wodurch das Zündgebläse nicht mehr bei jedem Start in Betrieb ist und der zunehmende

Stromverbrauch nur mehr vom Stromverbrauch durch Pumpen, Regelventilen und Kesselbetrieb bestimmt wird. Im Normalfall sollte zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselstart pro Woche ein linearer Zusammenhang bestehen, aber in diesem Fall besteht zwischen den beiden Parametern ein sehr hoher logarithmischer Zusammenhang. Dieser logarithmische Zusammenhang lässt sich nur damit erklären, dass mit zunehmender Anzahl der Kesselstarts die Zeit zwischen Start und Stopp kleiner als eine Stunde ist und aus diesem Grund ist das Zündgebläse (größten Stromverbrauch der Anlage) nicht in Betrieb. Zwischen Stromverbrauch pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start besteht eine sehr hohe logarithmische Korrelation. Prinzipiell ist zu erwarten, dass der Stromverbrauch mit der produzierten Wärmemenge pro Start linear ansteigt, was auch aus der Gegenüberstellung des Stromverbrauchs pro Woche mit der durchschnittlichen produzierten Wärmemenge pro Woche grob hervorgeht. Die logarithmische Korrelation wird vermutlich dadurch entstehen, dass das Zündgebläse nicht bei jedem Start in Betrieb war.

Eine Ursache für die geringe Korrelation zwischen Kesselnutzungsgrad/Stromverbrauch pro Woche und einzelner Einflussgrößen pro Woche liegt vermutlich darin, dass aufgrund des großen Zeitintervalls zwischen den Aufzeichnungen, die Einflussgrößen (Kesselbetriebszeit pro Woche sowie die damit verbundenen Kenngrößen wie relative Kessellast pro Woche und Anzahl der Starts pro Woche) nicht ausreichend exakt ermittelt werden konnten. Weitere Einschränkungen bezüglich Genauigkeit ergaben sich aus der limitierten Auflösung der Wärmemengenzähler und der Brennstoffwaage. Somit sind sowohl die Werte für den Kesselnutzungsgrad als auch ein Großteil der Parameter, die untersucht wurden, mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, was die Korrelation negativ beeinflusst.

Darüber hinaus zeigte sich, dass es anhand der aufgezeichneten Daten sehr schwer ist, den Einfluss einzelner Parameter auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad zu bewerten, da die Auswirkungen der einzelnen Einflussgrößen von den lokalen Rahmenbedingungen (Wärmebedarf, Lastverlauf/Benutzerverhalten, notwendige Vorlauftemperaturen bei den Verbrauchern) und auch den gewählten Systemkonfigurationen abhängen und sich auch gegenseitig beeinflussen können. Darüber hinaus können teilweise wesentliche Einflussfaktoren auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad, wie z.B. Stillstandsverluste, mit den installierten Messgeräten (Wärmemengenzähler und Temperaturfühler) nicht erfasst werden.

Aus diesem Grund wurden die untersuchten Heizungssysteme mittels TRNSYS nachsimuliert, um gezielt die Relevanz einzelner Einflussgrößen auf den Jahresnutzungsgrad mittels Sensitivitätsanalyse zu ermitteln (siehe Kapitel 5.6.1 für nähere Details).

5.3.1.3 Monatsauswertung

Außentemperatur

Die minimale durchschnittliche Außentemperatur war 4,7°C im Jänner und die maximale 22,9°C im Juli.

Energiebilanz

Tabelle 8 zeigt die Monatsenergiebilanz der Anlage A.

Tabelle 8: Monatsenergiebilanz der Anlage A

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten

Zeitraum	Stromzähler		Wärmemengenzähler				Wärmebilanz (hydr.)				Verluste & Nutzungsgrade				Deckungsbeitrag	
	Strom	Pelletverbrauch	Pelletkessel	Radiatoren	Heizenergie	Warmwasser	Produzierte Wärme	Verbrauchte Wärme	Systemverluste	Kesselnutzungsgrad	Gesamtnutzungsgrad mit Stromverbrauch	Gesamtnutzungsgrad ohne Stromverbrauch	Systemnutzungsgrad	Systemverluste	Solaranlage	Pelletkessel
	kWh	kg	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	%	%	%	% v. Eintrag	%	%
August 08	11,3	75	227	0	0	76	227	76	151	63,1	31,9	33,5	33,5	66,5	0,0	100,0
September 08	28,8	235	790	499	499	89	790	588	202	70,0	71,8	74,4	74,4	25,6	0,0	100,0
Oktober 08	52,4	510	1.835	1.389	1.389	121	1.835	1.510	325	75,0	80,0	82,3	82,3	17,7	0,0	100,0
November 08	65,7	752	2.728	2.177	2.177	134	2.728	2.311	417	75,6	82,7	84,7	84,7	15,3	0,0	100,0
Dezember 08	77,9	1.026	3.732	3.013	3.013	177	3.732	3.190	542	75,8	83,7	85,5	85,5	14,5	0,0	100,0
Januar 09	79,5	1.091	3.895	3.126	3.126	168	3.895	3.294	601	74,4	82,9	84,6	84,6	15,4	0,0	100,0
Februar 09	66,2	862	3.067	2.410	2.410	162	3.067	2.572	495	74,1	82,1	83,9	83,9	16,1	0,0	100,0
März 09	66,2	845	2.949	2.293	2.293	180	2.949	2.473	476	72,7	82,0	83,9	83,9	16,1	0,0	100,0
April 09	38,4	389	1.322	844	844	142	1.322	986	336	70,8	72,5	74,6	74,6	25,4	0,0	100,0
Mai 09	24,4	212	698	302	302	113	698	415	283	68,6	57,4	59,5	59,5	40,5	0,0	100,0
Juni 09	12,9	130	364	0	0	111	364	111	253	58,3	29,5	30,5	30,5	69,5	0,0	100,0
Juli 09	12,5	127	327	0	0	91	327	91	236	53,6	26,8	27,8	27,8	72,2	0,0	100,0

Der maximale Stromverbrauch war 79,5kWh im Jänner, da dort die Heizungsanlage vermutlich am längsten in Betrieb war. Im Sommer, wo Wärme praktisch nur für die Warmwasserbereitung benötigt wurde, wurde der minimale Stromverbrauch von 11,3kWh im Jänner benötigt. Der Pelletverbrauch verhielt sich ähnlich. Hier wurden maximal 1.091kg im Jänner und minimal 75kg (August) Pellets verbraucht. Der Kesselnutzungsgrad war im Winter (Dezember) am höchsten, bis zu 75,8% und am geringsten im Sommer (Juli) mit 53,6%. Die große Differenz bei den Kesselnutzungsgraden liegt an der Kesselauslastung. Die Erzeuger- und Verbraucherdaten beziehungsweise die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum (Systemverlust) werden in den nachfolgenden Abbildungen behandelt.

In Abbildung 20 ist die Wärmeproduktion und der Wärmeverbrauch pro Monat der Anlage A zu sehen.

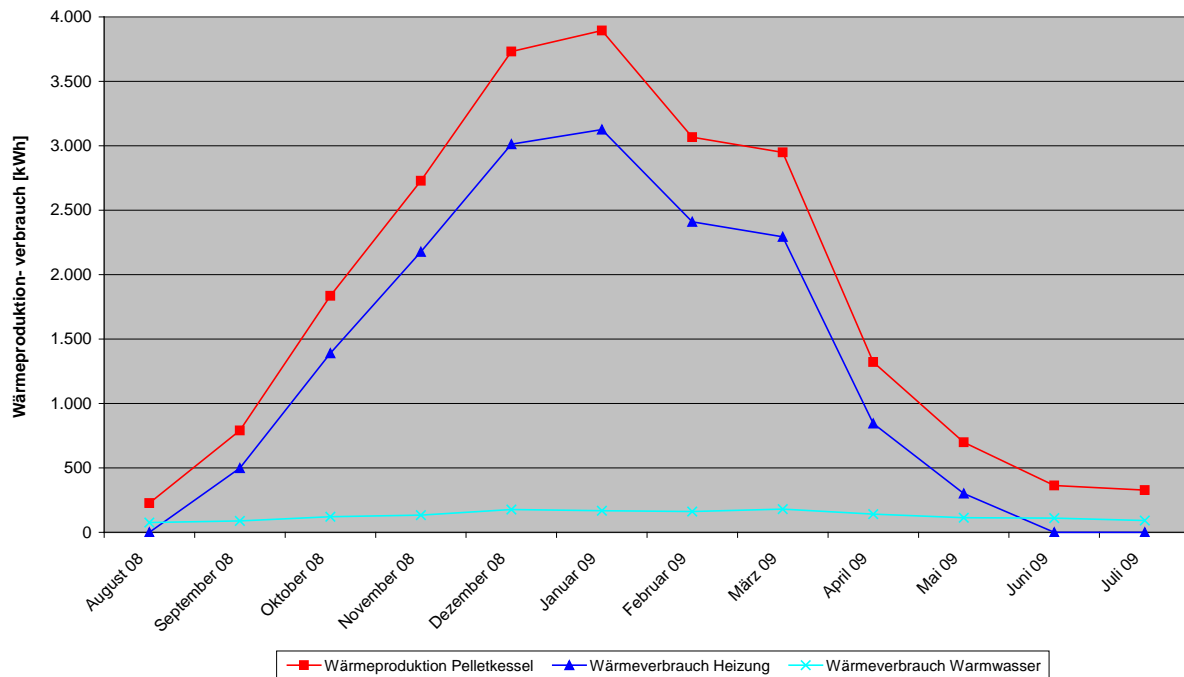


Abbildung 20: Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage A

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 750l, davon 200l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

Der Wärmeverbrauch für Raumheizung und Warmwasser wurde aufgeteilt. In den Monaten von Juni bis August war die Raumheizung außer Betrieb. In diesen Monaten produzierte der Pelletkessel nur die Wärmemenge für die Warmwasserbereitung. Der Pelletkessel produzierte maximal 3.895kWh im Jänner und minimal 227kWh im August. Die maximal verbrauchte Heizwärmemenge war 3.126kWh im Jänner und in den Monaten Juni bis August war die Raumheizung außer Betrieb. Die verbrauchte Warmwasserwärmemenge lag zwischen 177kWh im Dezember und 76kWh im August.

Abbildung 21 zeigt die Wärmeproduktion, den Wärmeverbrauch und den Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage A.

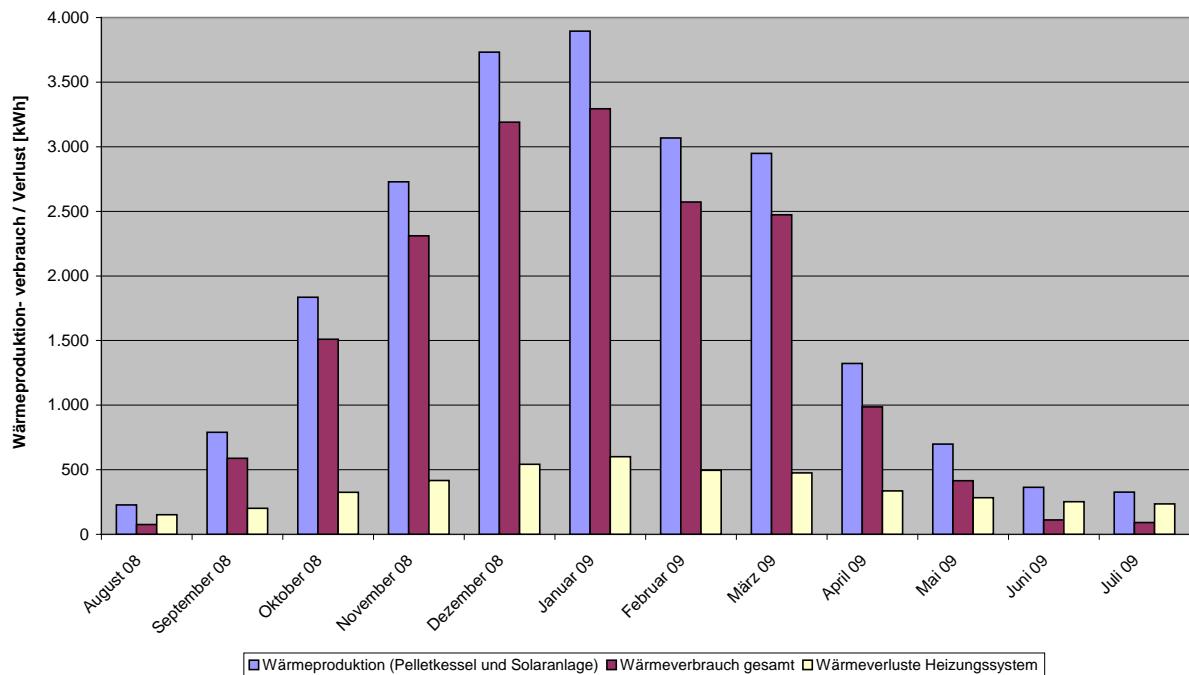


Abbildung 21: Wärmeproduktion, Wärmeverbrauch und Systemverluste der Anlage A

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 750l, davon 200l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

Der absolute Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum stieg mit sinkender Außentemperatur. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war zwischen minimal 151kWh im Juli und maximal 601kWh im Jänner. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum in den Sommermonaten war größer als der Gesamtwärmeverbrauch durch Heizung und Warmwasserbereitung. Dies wird auch in Abbildung 22 veranschaulicht. Der Grund dafür liegt im geringen Wärmebedarf, da praktisch nur Warmwasser aber keine Heizung benötigt wurde. Offensichtlich erfolgte keine Anpassung des Puffermanagements an den Wärmebedarf und der Pufferspeicher wurde auch bei geringerem Wärmebedarf vollgeladen. Dadurch entstehen große Wärmeverluste im Verhältnis zum Wärmebedarf.

Der relative Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage A war im Sommer am höchsten, mit bis zu 72,2% im Juli (siehe Abbildung 22)

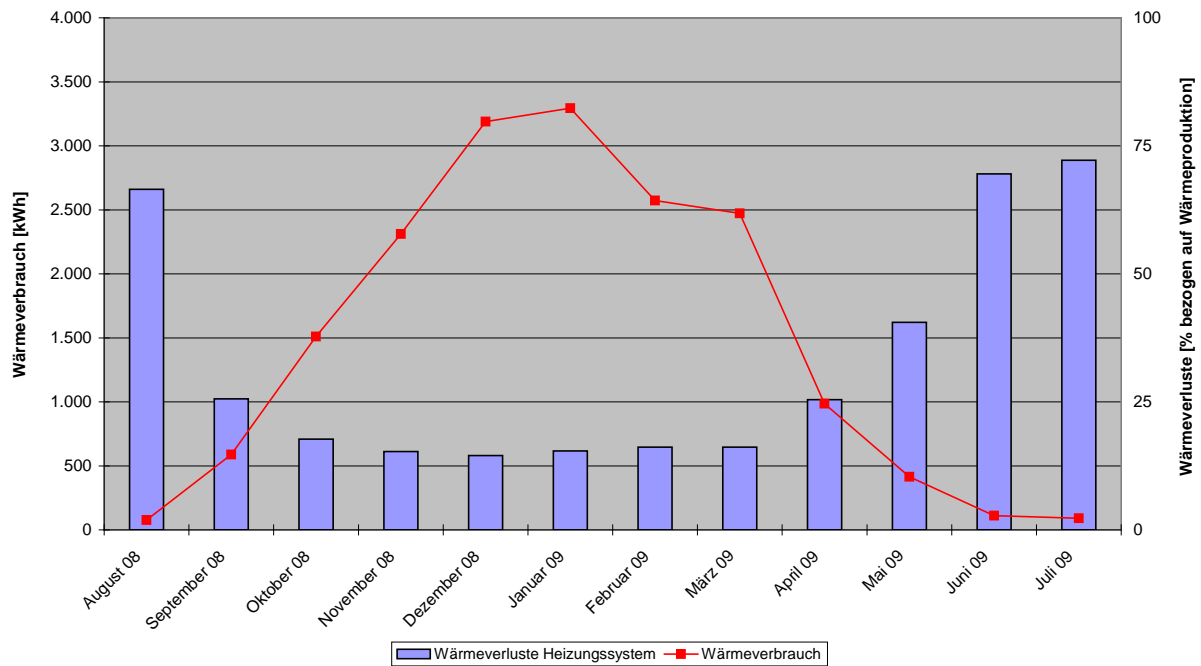


Abbildung 22: Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage A

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; Wärmeverluste [% bezogen auf die Wärmeproduktion]

Die möglichen Ursachen für die hohen relativen Verluste in den Sommermonaten sind:

- keine Änderung der Kesselvorlauftemperatur bzw. Pufferspeichertemperaturen im Sommer (55-72°C) im Vergleich zum Winterbetrieb (55-72°C)
- deutlich niedrigerer Wärmebedarf

5.3.1.4 Jahresauswertung

Tabelle 9 zeigt die Jahresauswertung der Anlage A.

Tabelle 9: Jahresauswertung der Anlage A

Erläuterungen: *) Stromverbrauch (Pelletkessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierte Wärmemenge (Pelletkessel); **) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch); ***) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets)

	Einheit	Aug. 08- Jul. 09
Primärenergieeinsatz		
Stromverbrauch	kWh	536
Pelletverbrauch	kg	6.254
Primärenergieeinsatz Pellets	kWh	30.019
spezif. Stromverbrauch *)	kWh el./MWh th.	24,4
Gemessene Wärmemengen		
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh	21.934
Deckungsgrad Pelletkessel	%	100,0
Wärmeverbrauch Radiatoren	kWh	16.053
Wärmeverbrauch Radiatoren	%	91,1
Gesamtheizwärmeverbrauch	kWh	16.053
Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh	1.564
Warmwasser Wärmeverbrauch	%	8,9
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	94,4
spezif. Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	9,2
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	103,6
Wärmebilanz Pufferspeicher/Heizsystem		
Produzierte Gesamtwärme	kWh	21.934
Verbrauchte Wärme	kWh	17.617
Wärmeverlust Heizungssystem	kWh	4.317
Verluste und Nutzungsgrade		
Kesselnutzungsgrad	%	73,1
Nutzungsgrad Pufferspeicher/Heizsystem	%	80,3
Verluste Pufferspeicher/Heizsystem	%	19,7
Gesamtanlagennutzungsgrad mit Strom **)	%	57,7
Gesamtanlagennutzungsgrad ohne Strom ***)	%	58,7

Der Stromverbrauch der Anlage A in der Heizperiode 08/09 betrug 536kWh. Der Pelletkessel produzierte eine Wärmemenge von 21.934kWh und benötigte dafür 6.254kg Pellets. Der Gesamtwärmeverbrauch betrug 17.617kWh, davon wurden 8,9% für die Warmwasserbereitung benötigt. Der Kessel-Jahresnutzungsgrad von 73,1% war deutlich geringer als der Kesselwirkungsgrad von 92,6% bei Nennleistung (mit einer Rauchgastemperatur von 160°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8%) und 91,1% bei Teillast (30% Leistung, mit einer Rauchgastemperatur von 100°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 12,4%) laut Herstellerdaten.

Mögliche Ursachen für den schlechten Kessel-Jahresnutzungsgrad:

- erhöhte Rauchgasaustrittstemperaturen
- erhöhte O₂-Gehalte im Rauchgas
- Verluste durch häufiges An- und Abfahren

Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum betrug über den gesamten Betrachtungszeitraum 19,7%. Der Wärmeverlust setzt sich aus den Pufferspeicher- und Rohrleitungsverlusten zusammen. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit Berücksichtigung des Stromverbrauchs betrug 57,7% und ohne Stromverbrauch 58,7%.

Die Ursachen für den relativ hohen Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum können sein:

- zu dünne bzw. keine Isolierung der Rohrleitungen
- Pufferspeicherverluste (insbesondere im Sommer durch schlechtes Puffermanagement)

5.3.2 Anlage B

5.3.2.1 Stundenauswertung

Für die Auswertung der Vor- und Rücklauftemperaturen wurden nur die Temperaturaufzeichnungen von jener Stunde herangezogen, in denen auch Wärme produziert/verbraucht wurde.

Solaranlage

Die mittlere Vorlauftemperatur betrug 51,8°C (08/09) bzw. 54,7°C (09/10), die maximale Vorlauftemperatur 88°C und die minimale 25°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Solaranlagenbetriebszeit hindeutet (Abkühlphase). Die mittlere Rücklauftemperatur war 45,8°C (08/09) bzw. 48,7°C (09/10), die maximale 82°C und die minimale 19°C. Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 6°C (08/09) und 6°C (09/10). Die mittlere Vor- und Rücklauftemperatur stieg in der zweiten Heizperiode leicht an, aber es kommt zu keiner Erhöhung der Temperaturspreizung. Die Temperaturspreizung von 6°C war sehr niedrig. Mit einer Erhöhung der Temperaturspreizung könnten die Pumpkosten verringert werden.

Die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung im Sommer lag bei 4,58kW (08/09) bzw. 5,49kW (09/10) und im Winter maximal 0,92kW in beiden Heizperioden. Die Werte ergaben sich aus der Multiplikation des Messwerts mit dem Korrekturfaktor.

Pelletkessel

Bei der Heizperiode 09/10 wurden bei dieser Anlage für die Pelletkesselauswertung die Ergebnisse der 15 Minutenauswertung (Methode 2) verwendet. Die mittlere Vorlauftemperatur war 57,1°C (08/09) bzw. 59,2°C (09/10), die maximale Vorlauftemperatur 79,1°C und die minimale 26,2°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 37,7°C (08/09) bzw. 37,4°C (09/10), die maximale 59,9°C und die minimale 21,8°C (vermutlich ein Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 19,4°C (08/09) und 21,8°C (09/10). Die mittlere Vorlauftemperatur stieg in der zweiten Heizperiode leicht an und dadurch erhöhte sich die Temperaturspreizung.

Bei dieser Anlage wurden die Kesselbetriebszeit sowie die Kesselstarts auch mit den 15 Minuten ausgewertet. Die 15 Minuten- und Stundenauswertungen der Methoden 1 und 2 wurde gegenübergestellt (siehe Tabelle 10). Bei den 15 Minutenauswertungen wurde die Methoden 3 nicht ausgeführt (ähnlich wie Methode 1), deshalb wurde die Methode 3 nicht gegenübergestellt. Die Methode 2 wurde für die Auswertung herangezogen, da es bei der Methode 2 die kleinste Diskrepanz zwischen der 15 Minuten- und Stundenwertenauswertung gab. Jedoch gab es bei der Methode 2 immer noch Abweichungen bei der Kesselbetriebszeit zwischen der 15 Minuten- und Stundenauswertung in der Sommer- und Übergangszeit. Mit einem Korrekturfaktor wurde versucht, die Kesselbetriebsstunden der Stundenwerte an die 15 Minutenwerte anzupassen. Die Anpassung der Kesselbetriebszeit funktionierte aber nicht, da Werte aus der Stundenauswertung sowohl niedriger als auch höher als die auf Basis der 15

Minutenauswertungen berechneten Werte lagen. So konnte der Fehler zwar für gewisse Werte minimiert werden, gleichzeitig wurde der Fehler bei anderen Werten aber vergrößert.

Tabelle 10: Gegenüberstellung 15 Minuten- und Stundenauswertung

Erläuterungen: *) Differenz vom Stundenwert zum 15 Minutenwert; **) 15 Minutenwert / Differenz h zu 15min

		Methode 1				Methode 2				
		Stundenwerte	15 Minutenwerte	Differenz h zu 15min *)	rel. Fehler **)	Stundenwerte	15 Minutenwerte	Differenz h zu 15min *)	rel. Fehler **)	
Sommer	Ø Betriebszeit Mittelw.	h	7,25	2,78	4,47	160,7%	1,75	2,78	-1,04	-37,2%
	Ø Starts Mittelw.	-	5,75	5,75	0,00	0,0%	5,75	5,75	0,00	0,0%
	Ø rel. Kessellast Mittelw.	-	0,21	0,44	-0,24	-53,5%	0,70	0,44	0,26	57,7%
Frühling / Herbst	Ø Betriebszeit Mittelw.	h	26,42	16,38	10,04	61,3%	13,49	16,32	-2,82	-17,3%
	Ø Starts Mittelw.	-	12,50	13,00	-0,50	-3,8%	12,67	13,00	-0,33	-2,6%
	Ø rel. Kessellast Mittelw.	-	0,40	0,66	-0,26	-39,7%	0,81	0,66	0,14	21,6%
Winter	Ø Betriebszeit Mittelw.	h	64,36	45,16	19,20	42,5%	40,94	44,95	-4,00	-8,9%
	Ø Starts Mittelw.	-	24,64	25,50	-0,86	-3,4%	25,00	25,50	-0,50	-2,0%
	Ø rel. Kessellast Mittelw.	-	0,50	0,73	-0,22	-30,8%	0,82	0,73	0,09	12,0%

Die Gesamtbetriebszeit des Pelletkessels war 1.133h (08/09) bzw. 1208 (09/10) und die Anzahl der Kesselstarts 780 (08/09) bzw. 766 (09/10).

Die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung im Winter betrug 14kW (08/09) bzw. 15kW (09/10) und im Sommer maximal 12kW (08/09) bzw. 11kWh (09/10).

Die Kesselnutzungsgradberechnung wurde auch bei dieser Anlage nicht durchgeführt, da das Brennstofffördersystem wie bei der Anlage A ein Vakuumsaugsystem war.

Der Pelletkessel hatte 830h (08/09) bzw. 866 (09/10) Volllaststunden und eine relative Kessellast von 0,76 (08/09) bzw. 0,72 (09/10).

Radiatoren

Die mittlere Vorlauftemperatur war 42°C, die maximale Vorlauftemperatur 65,8°C und die minimale 22,4°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Radiatorenbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 34,5°C, die maximale 51,4°C und die minimale 19,5°C (vermutlich ein Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 7,5°C. Durch absenken der Rücklauftemperatur könnte die Temperaturspreizung erhöht und dadurch Pumpkosten eingespart werden.

Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf im Winter betrug 11kW und im Sommer maximal 1kW in beiden Heizperioden.

Fußbodenheizung

Die mittlere Vorlauftemperatur war 50°C, die maximale Vorlauftemperatur 68,6°C und die minimale 22,6°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Fußbodenheizungsbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 33°C, die maximale 46,8°C und die minimale 19,7°C (vermutlich ein Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 17°C. Es ist merkwürdig, dass die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung größer ist als jener der Radiatoren. Vielleicht wurden die Daten vertauscht, sonst sollte die Vorlauftemperatur abgesenkt werden.

Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf im Winter betrug 11kW (08/09) bzw. 3kW (09/10) und im Sommer maximal 6kW (08/09) bzw. 2kW (09/10).

Warmwasser

Die verbrauchte Wärme für die Warmwasserbereitung betrug 9,9% (08/09) bzw. 9,3% (09/10) des Gesamtwärmeverbrauchs. Die mittlere Warmwassertemperatur war 53°C, die maximale 74°C und die minimale 34°C, wobei die Minimaltemperatur vermutlich bei stehendem Betrieb gemessen wurde. Die mittlere Kaltwassertemperatur war 18°C, die maximale 72°C und die minimale 7°C. Mögliche Ursachen für die hohen Kaltwassertemperaturen:

- Wärmeleitung zwischen Warm- und Kaltwasser, wenn die Rohre nebeneinander verlegt waren
- Rückstauung aus dem Pufferspeicher

Auf Basis der mittleren Warm- und Kaltwassertemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 35°C.

In beiden Heizperioden war im Winter der maximale durchschnittliche Warmwasserleistungsbedarf 11kW und im Sommer maximal 2kW.

Stromverbrauch

Der minimale durchschnittliche Stromverbrauch war 10Wh in beiden Heizperioden und maximal 320Wh (08/09) beziehungsweise 330Wh (09/10).

Brennstofffördermenge des Vakuumsaugsystems

Bei dieser Anlage fördert ein Vakuumsaugsystem den Brennstoff zum Pelletkessel. Die minimale Brennstoffmenge war aufgrund der geringen Brennstoffwaagenauflösung 2kg in beiden Heizperioden und maximal 37kg (08/09) beziehungsweise 30kg (09/10). Das Vakuumsaugsystem befüllt normalerweise einmal pro Tag einen Vorratbehälter im Kessel. Von diesem Vorratbehälter erfolgt über eine Förderschnecke die Brennstoffzufuhr zum Brenner. Der Vorratbehälter wird wahrscheinlich etwas mehr als 37kg Pellets aufnehmen können.

Außentemperatur

Die minimale Temperatur im Winter war laut Aufzeichnungen -6°C und maximale Temperatur im Sommer 47°C. Die Durchschnittstemperatur über ein Jahr lag bei 12,8°C. Im Winter schwankten die Temperaturen im Bereich von -6 bis 10°C. In den Übergangszeiten zwischen 10 und 25°C und im Sommer von 20°C bis 47°C. Normal stiegen die Temperaturen im Sommer bis 30°C an, aber vereinzelt wurden mehr erreicht. Die 47°C Außentemperatur erscheinen unrealistisch. Es könnte sein, dass der Außentemperaturfühler auf der Südseite des Hauses montiert war und dieser direkt von der Sonne bestrahlt wurde.

Wärmespeicher und Verteilung

Die Pufferspeichertemperaturen beziehungsweise die Schichtung wurden aufgrund fehlender Daten nur aus den Temperaturmessdaten von Wärmeerzeuger und Verbrauchern abgeschätzt (siehe Abbildung 23). Die Temperaturen in Abbildung 23 entsprechen den Durchschnittstemperaturen über ein Jahr. Die durchschnittlichen Vorlauftemperaturen Richtung Radiator/Fußbodenheizkreis konnten nicht abgeschätzt werden, weil der

Wärmemengenzähler des Radiator/Fußbodenheizkreises erst nach dem Beimischventil montiert waren. Die maximale Temperatur auf Basis der Kesselvorlauftemperatur war 88°C und die minimale Temperatur auf Basis der Kaltwassertemperatur vom Brauchwasser war 7°C .

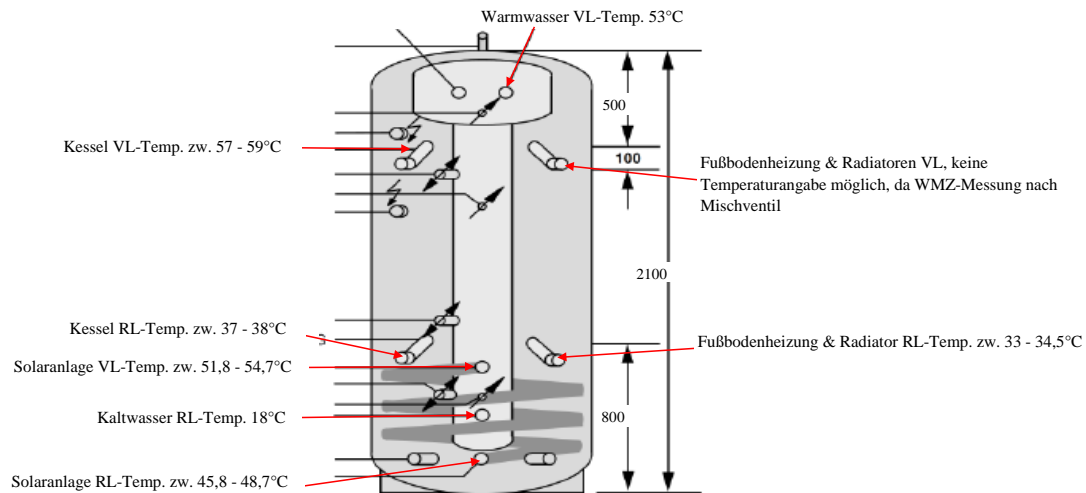


Abbildung 23: Pufferspeichertemperaturen der Anlage B

Erläuterungen: Datenquelle [vgl.7]

Der Pufferspeicherboden ist der Bezugspunkt für die Höhenangaben. Der Rücklauf von den Radiatoren, der Fußbodenheizung und des Pelletkessels liegt auf 800mm und deren Vorlauf auf 1600mm. Der Solaranlagenvorlauf liegt bei etwa 700mm und der Solaranlagenrücklauf bei etwa 150mm. Auf Basis der Temperaturmessdaten der Solaranlage, des Pelletkessels und der Heizung (Fußboden und Radiatoren) war anzunehmen, dass es Schichtungsprobleme im unteren Bereich des Pufferspeichers (von 0 bis ca. 500mm) gab. Die mittlere Solaranlagenvorlauftemperatur im Pufferspeicher lag zwischen 52 und 55°C (Temperaturmessdaten, die Grädigkeit ist noch nicht berücksichtigt) und die Solaranlagenrücklauftemperatur aus dem Pufferspeicher zwischen 46 und 49°C . Die Solaranlagenvorlauf- und rücklauftemperatur stieg am Ende eines sonnigen Tages auf über 80°C an, während die mittlere Rücklauftemperatur von Radiatoren und Fußbodenheizung im Pufferspeicher bei etwa 34°C und die Rücklauftemperatur vom Pufferspeicher zum Pelletkessel bei etwa 38°C lag. Dies deutet darauf hin, dass sich der Pufferspeicher im Bereich des Solarwärmetauschers recht schnell aufwärmte und erst über Nacht ein Wärmeaustausch durch interne Zirkulation stattfand, wodurch die Schichtung gestört wurde.

Es ist anzunehmen, dass das Pufferspeichervolumen nicht optimal ausgenutzt wurde, da der Pelletkessel auch im Winter nicht gleichmäßig betrieben wurde. Dafür müsste die Kesselregelung in Bezug auf die Änderung des Setpoints (Puffersolltemperatur) angepasst werden.

Der Pufferspeicher verfügt wie jener von Anlage A über einen integrierten Tank für die Warmwasserbereitung. Darüber hinaus verfügt der Pufferspeicher über einen integrierten Solaranlagenwärmetauscher. Der Hersteller des Pufferspeichers ist die Firma Jenni.

Anlagenbetriebsverhalten

Beim Anlagenbetriebsverhalten wurde die Heizperiode 09/10 behandelt, da Wartungsarbeiten beim Pelletkessel durchgeführt wurden und dadurch die Anlage effizienter betrieben wurde (höherer Nutzungsgrad). Das Betriebsverhalten der Anlage B ist in Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26, zu sehen. Der Pelletkessel ist praktisch ausschließlich tagsüber in Betrieb mit einer geringen Nachtabsenkung. Im Sommer war der Pelletkessel meist außer Betrieb beziehungsweise nur ein- bis zwei Stunden pro Tag in Betrieb, wenn der Solaranlagenenertrag nicht ausreichte. In der Übergangszeit nahmen die Kesselbetriebszeiten mit abnehmender Außentemperatur zu und im Winter war der Pelletkessel in Betrieb, wenn er benötigt wurde (entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Verbraucherprofils). Allerdings erfolgte keine Leistungsregelung entsprechend des Lastprofils, sondern ein Stop-and-Go-Betrieb. Die Ursachen für das schlechte Regelungsverhalten könnten sein:

- schlechte modulierende Regelung des Pelletkessels
- zu geringe Bandlast (nur ca. 4kW), die unter der Regelbandbreite lag
- schlecht gewählte Setpoints für die Regelung im Pufferspeicher
- schlechte Abstimmung des Gesamtsystems, da der Pufferspeicher für einen kontinuierlichen Betrieb des Pelletkessels nicht genutzt wurde

Bei einer besseren Regelung des Pelletkessels beziehungsweise des Gesamtsystems könnte der Pelletkessel in Kombination mit dem Pufferspeicher deutlich gleichmäßiger betrieben werden. Bei Betrachtung des Lastprofils innerhalb der kältesten Woche (Abbildung 24) zeigt sich auch, dass der Pelletkessel deutlich kleiner dimensioniert werden könnte (ca. 6kW). Bei einer geringeren Nennleistung wäre auch die Regelung im Schwachlastbereich einfacher.

Das bestehende System müsste dahingehend optimiert werden, dass der Kessel zumindest in der kalten Jahreszeit tagsüber durchgehend betrieben wird und neben der Abdeckung des Wärmebedarfs den Pufferspeicher soweit auflädt, dass die Verbraucherspitzen durch Pufferspeicher abgedeckt werden können. Der Pelletkessel sollte dabei möglichst mit gleichmäßiger Leistung innerhalb des modulierend regelbaren Lastbereichs betrieben werden. Um den Kesselbetrieb zu vergleichmäßigen, müssten die Setpoints für die Kesselregelung (Kesselvorlauftemperatur und/oder Temperaturen im Pufferspeicher) entsprechend angepasst werden (siehe dazu auch Kapitel 5.6.3.1).

Bei der Darstellung des Betriebsverhaltens in den nachfolgenden Abbildungen ist zu beachten, dass diese auf Basis der Wärmemenge pro Stunde, die vom Wärmemengenzähler aufgezeichnet wurde erstellt wurde. Die Werte stellen somit die durchschnittliche Leistung (kWh/h) in der jeweiligen Stunde dar und geben somit nur Anhaltspunkte auf die tatsächliche Spitzenlast.

Abbildung 24 zeigt das Betriebsverhalten der Anlage B in der kältesten Winterwoche.

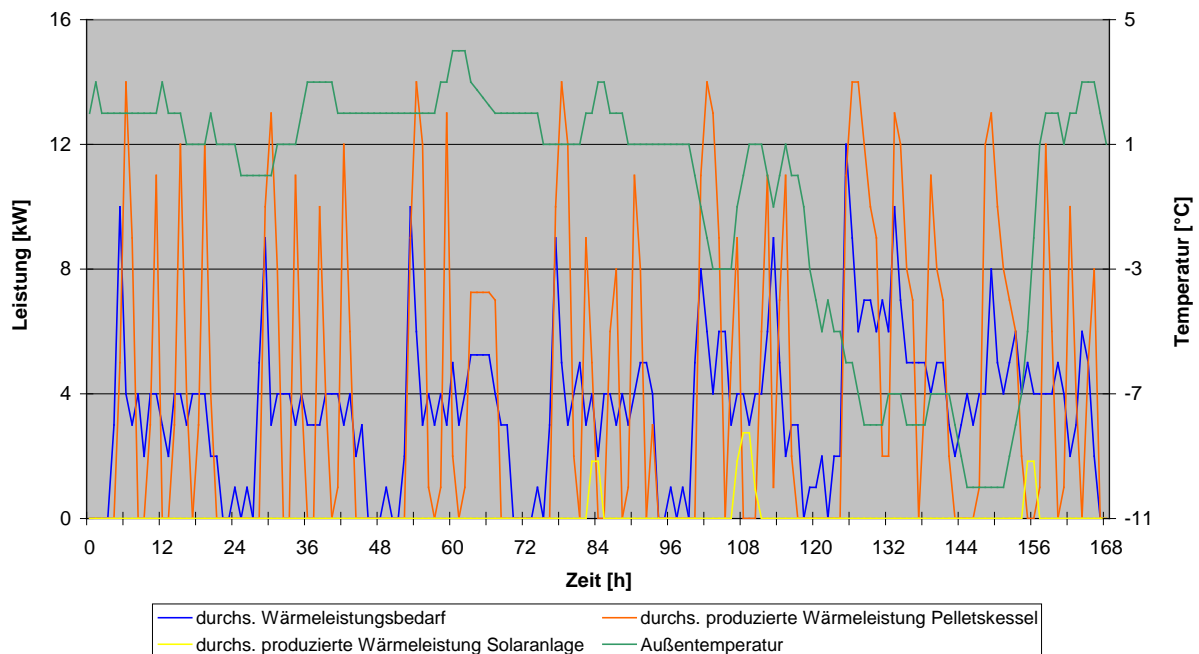


Abbildung 24: Betriebsverhalten der Anlage B in der kälteste Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die maximale durchschnittliche Kesselleistung in der kältesten Woche war 14,8kW. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höher liegen (bis zur nominalen Nennlast). Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch in der kältesten Winterwoche lag bei etwa 12kW und der mittlere zwischen 3 und 7kW. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit war maximal 3kW. Die minimale Außentemperatur lag bei -10°C und die maximale bei 4°C.

Das Betriebsverhalten der Anlage B in einer durchschnittlichen Winterwoche wird in Abbildung 25 dargestellt.

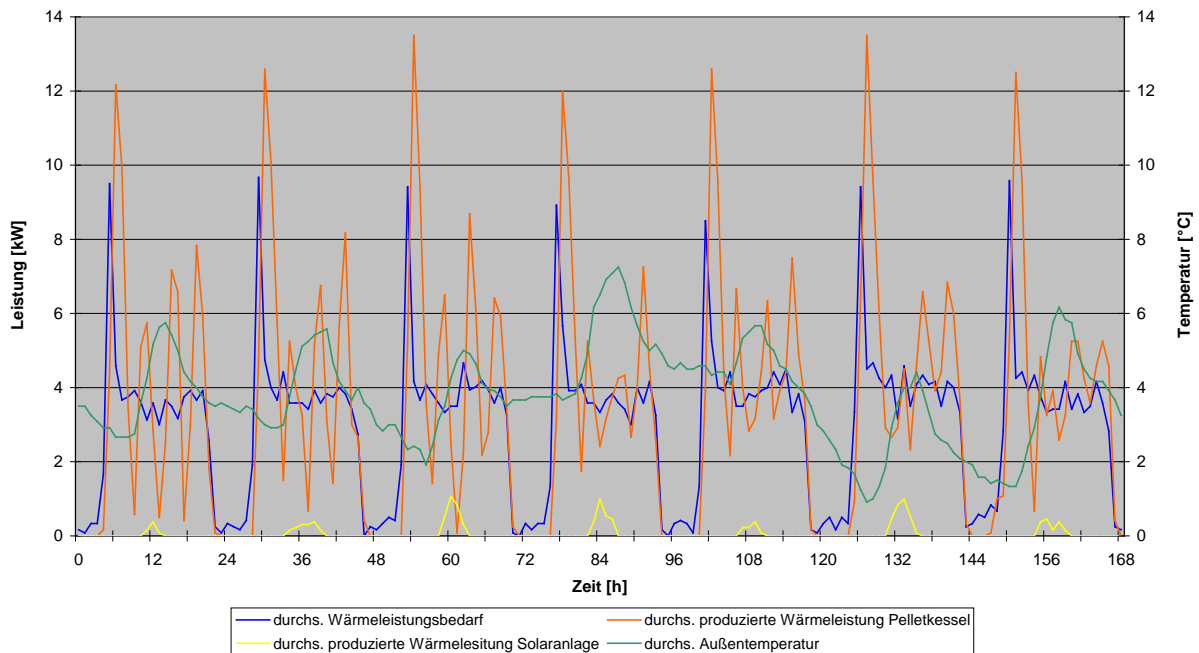


Abbildung 25: Betriebsverhalten der Anlage B in einer durchschnittlichen Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergroße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die maximale durchschnittliche Kesselleistung war 13,5kW. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höherliegen (bis zur nominalen Nennlast). Im Durchschnitt wurde der Kessel bei einer Leistung von 3 bis 8kW betrieben. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 9,5kW und der mittlere lag bei 4kW. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit lag zwischen 0,5 und 1kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei 1°C und die maximale bei 7,5°C.

Abbildung 26 zeigt das durchschnittliche Betriebsverhalten der Anlage B in einer Sommerwoche

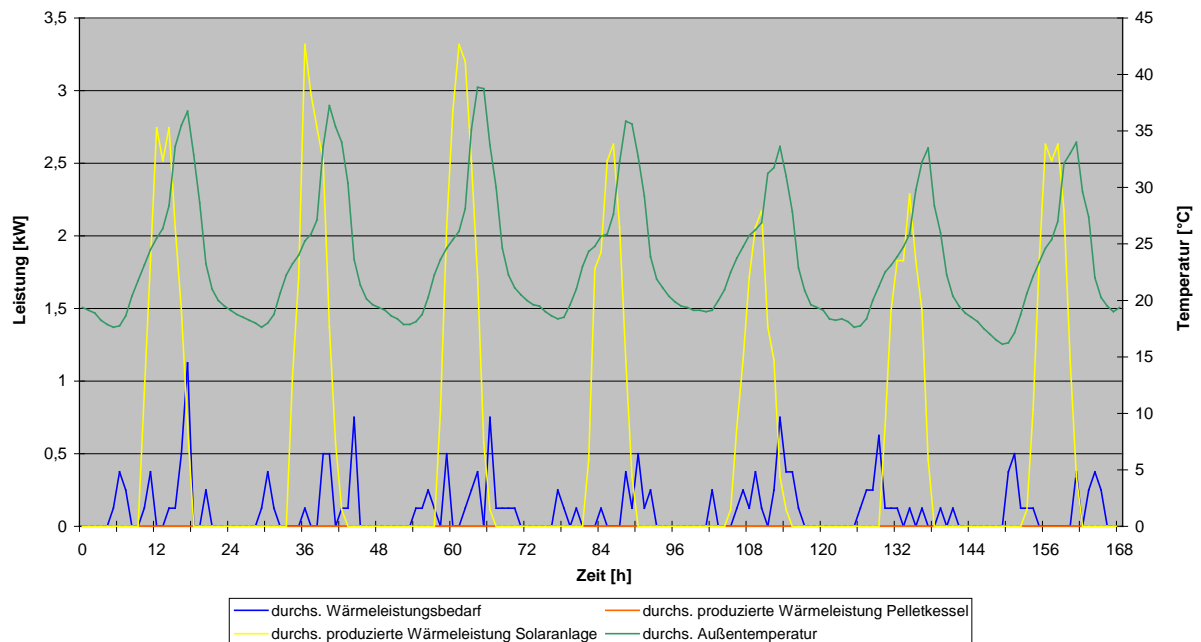


Abbildung 26: Betriebsverhalten der Anlage B in einer durchschnittliche Sommerwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der Morgen- und Abendverbrauch wurde vermutlich durch den Pufferspeicher abgedeckt, da der Kessel laut Betriebsdaten nicht in Betrieb war. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit war 3,3kW. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 0,75kW und der mittlere lag zwischen 0,15 und 0,5kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei 16°C und die maximale bei 39°C.

5.3.2.2 **Wochenauswertung**

In Tabelle 11 sind die Bestimmtheitsmaße, die Korrelationskoeffizienten und die Einstufung zu den Korrelationen der Anlage B zu sehen. Bei dieser Anlage ist ein ähnlich schlechtes Korrelationsverhalten auf Basis des Kesselnutzungsgrades wie bei Anlage A zu sehen. Der Korrelationskoeffizient der einzelnen Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades ist auch zwischen den beiden Heizperioden sehr unterschiedlich. Die möglichen Ursachen beziehungsweise Erklärungen warum keine Zusammenhänge zwischen Kesselnutzungsgrad und den Einflussgrößen (relative Kesselast pro Woche, Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche, produzierte Wärmemenge pro Start) zu sehen sind, wurden in Kapitel 5.3.1.2 erläutert.

Die Korrelationen auf Basis des Stromverbrauchs pro Woche mit den Einflussgrößen Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start zeigen hingegen einen höheren Korrelationskoeffizienten als die Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades und die Unterschiede zwischen den Heizperioden sind geringer.

Zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche besteht ein hoher logarithmischer Zusammenhang (Erklärung siehe Kapitel 5.3.1.2). Ein hoher (Heizperiode 08/09) beziehungsweise mittlerer linearer Zusammenhang (Heizperiode 09/10) besteht zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselstart pro Woche (siehe Abbildung 27 für Heizperiode 08/09). Dies erscheint plausibel, da bei fast jedem Kesselstart das Zündgebläse in Betrieb ist (außer die Zeit zwischen Kesselstart und –stopp ist kleiner als eine Stunde) und somit mit zunehmender Anzahl an Starts auch der Stromverbrauch steigt. Zwischen Stromverbrauch pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start besteht ein mittlerer linearer Zusammenhang. Prinzipiell ist zu erwarten, dass der Stromverbrauch mit der produzierten Wärmemenge pro Start ansteigt, was auch aus der Gegenüberstellung des Stromverbrauchs pro Woche mit der durchschnittlichen produzierten Wärmemenge pro Woche grob hervorgeht. Eine deutliche höhere Korrelation wird vermutlich dadurch verhindert, dass das Zündgebläse nicht bei jedem Start in Betrieb war. Es ist aber verwunderlich beziehungsweise nicht zu erklären, warum die Anlage A im Vergleich zur Anlage B eine logarithmische Korrelation aufweist.

Tabelle 11: Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufungen von den Korrelationen der Anlage B

Erläuterungen: *) linearer Zusammenhang; **) logarithmischer Zusammenhang; Heizperiode 08/09 und 09/10; Kesselnutzungsgrad, Stromverbrauch, relative Kesselast, Kesselbetriebszeit, Kesselstarts und produzierte Wärmemenge pro Start sind jeweils pro Woche; Kor ... Korrelation

	Bestimmtheitsmaß R ²		Korrelationskoeffizient r		Einstufung	
	08/09	09/10	08/09	09/10	08/09	09/10
Kesselnutzungsgrad vs. relative Kesselast *)	0,0299	-0,1729	sehr geringe Kor.	0,1062	-0,3259	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselbetriebszeit *)	0,0695	0,2636	geringe Kor.	0,2009	0,4482	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselstarts *)	0,1424	0,3774	geringe Kor.	0,3105	0,5572	mittlere Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. produzierte Wärmemenge pro Start *)	0,0132	0,1149	sehr geringe Kor.	0,0457	0,2138	geringe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselbetriebszeit **)	0,8418	0,9175	sehr hohe Kor.	0,8691	0,9323	sehr hohe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselstarts *)	0,8226	0,9070	sehr hohe Kor.	0,7366	0,8583	hohe Kor.
Stromverbrauch vs. produzierte Wärmemenge pro Start *)	0,5912	0,7689	hohe Kor.	0,6734	0,8206	hohe Kor.

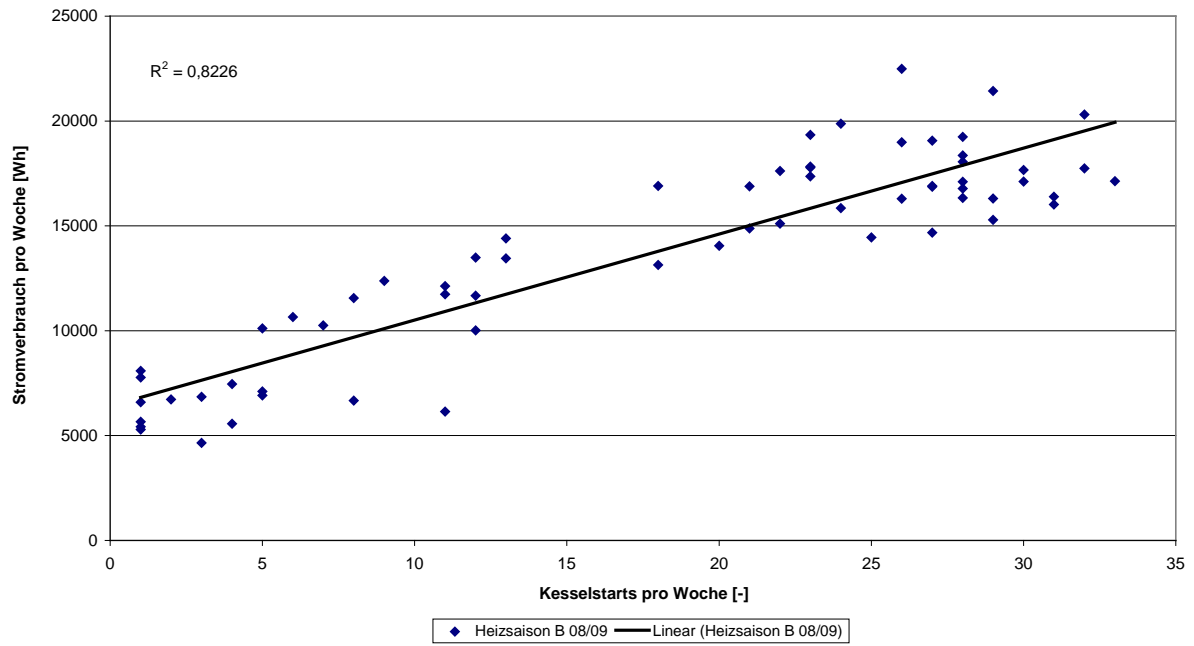


Abbildung 27: Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselstarts pro Woche

Erläuterungen: Linearer Zusammenhang; Basis Feldmessdaten

5.3.2.3 Monatsauswertung

Außentemperatur

Die minimale durchschnittliche Außentemperatur war 2°C im Jänner 2009 und die maximale 23,2°C im Juli 2009.

Energiebilanz

Tabelle 12 zeigt die Monatsenergiebilanz der Anlage B.

Tabelle 12: Monatsauswertung der Anlage B

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; Bei den lila markierten Kästen entsprach der Fehler 10% oder mehr des Pelletverbrauchs innerhalb des betrachteten Zeitraums und deshalb wurde der Kesselnutzungsgrad nicht berechnet. Die genauere Beschreibung siehe Kapitel 4.3.1.2 Abschnitt Methode 2

Zeitraum	Stromzähler		Waage		Wärmemengenzähler						Wärmebilanz (hydr.)			Verluste & Nutzungsgrade					Deckungsbeitrag	
	Strom	Pelletverbrauch	Solaranlage	Pelletkessel	Radientoren	Fußbodenheizung	Heizenergie	Warmwasser	Produzierte Wärme	Verbrauchte Wärme	Systemverluste	Kesselnutzungsgrad	Gesamtnutzungsgrad mit Stromverbrauch	Gesamtnutzungsgrad ohne Stromverbrauch	Systemnutzungsgrad	Systemverluste	Solaranlage	Pelletkessel		
	kWh	kg	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	%	%	%	% v. Eintrag	%	%		
August 08	20,9	0	345	0	0	0	0	47	345	47	298		12,8	13,6	13,6	86,4	100,0	0,0		
September 08	43,4	78	249	310	88	162	250	96	559	346	213		52,0	55,7	61,9	38,1	44,5	55,5		
Oktober 08	59,7	269	199	907	220	536	756	99	1.106	855	251	70,5	55,4	57,6	77,3	22,7	18,0	82,0		
November 08	67,1	461	120	1.639	766	583	1.349	115	1.759	1.464	295	74,4	61,2	63,0	83,2	16,8	6,8	93,2		
Dezember 08	73,5	665	81	2.336	1.442	496	1.938	121	2.417	2.059	358	73,5	61,8	63,2	85,2	14,8	3,3	96,7		
Januar 09	78,7	740	158	2.620	1.741	484	2.225	123	2.778	2.348	430	74,1	62,2	63,5	84,5	15,5	5,7	94,3		
Februar 09	66,8	568	107	1.975	1.120	501	1.621	121	2.082	1.742	340	72,7	60,3	61,7	83,7	16,3	5,1	94,9		
März 09	75,5	508	203	1.769	892	631	1.523	113	1.972	1.636	336	72,9	60,4	62,2	83,0	17,0	10,3	89,7		
April 09	49,2	188	390	594	227	394	621	93	984	714	270		53,4	55,4	72,6	27,4	39,6	60,4		
Mai 09	34,6	54	446	156	50	216	266	68	602	334	268		45,2	47,5	55,5	44,5	74,1	25,9		
Juni 09	28,0	20	406	61	21	130	151	86	467	237	230		44,7	47,2	50,7	49,3	86,9	13,1		
Juli 09	22,7	0	372	2	4	48	52	102	374	154	220		39,0	41,4	41,1	58,9	99,5	0,5		
August 09	19,2	0	460	0	4	13	17	63	460	80	380		16,7	17,4	17,4	82,6	100,0	0,0		
September 09	32,5	27	358	106	41	127	168	72	464	240	224		46,2	49,3	51,7	48,3	77,1	22,9		
Oktober 09	56,5	164	186	587	460	0	460	78	773	538	235		52,4	55,5	69,6	30,4	24,0	76,0		
November 09	60,0	388	116	1.508	667	559	1.226	101	1.624	1.327	297	81,3	65,3	67,3	81,7	18,3	7,2	92,8		
Dezember 09	65,9	611	63	2.306	1.419	472	1.891	119	2.369	2.010	359	79,0	65,9	67,4	84,8	15,2	2,7	97,3		
Januar 10	73,1	776	41	2.954	2.060	397	2.457	124	2.995	2.581	414	79,6	67,5	68,8	86,2	13,8	1,4	98,6		
Februar 10	61,4	596	94	2.200	1.470	363	1.833	89	2.294	1.922	372	77,2	64,0	65,3	83,8	16,2	4,1	95,9		
März 10	63,7	457	299	1.613	962	461	1.423	119	1.912	1.542	370	73,8	60,5	62,1	80,6	19,4	15,6	84,4		
April 10	52,0	224	464	744	364	448	812	95	1.208	907	301	69,5	57,2	59,1	75,1	24,9	38,4	61,6		
Mai 10	50,7	237	216	814	241	412	653	80	1.030	733	297	71,9	52,4	54,3	71,2	28,8	21,0	79,0		
Juni 10	24,6	2	382	61	6	33	39	113	443	152	291		36,6	38,9	34,3	65,7	86,2	13,8		
Juli 10	17,9	0	376	6	0	0	0	78	382	78	304		19,8	20,7	20,4	79,6	98,4	1,6		

Der maximale Stromverbrauch war 78,7kWh im Jänner 2009, da dort die Heizungsanlage sowie auch die Solaranlage vermutlich am längsten in Betrieb waren. Im Juli 2010, wo Wärme praktisch nur für die Warmwasserbereitung benötigt wurde, wurde der minimale Stromverbrauch von 17,9kWh benötigt. Der Pelletverbrauch verhielt sich ähnlich. Hier wurden maximal 776kg im Jänner 2010 und minimal 2kg (Juni 2010) Pellets verbraucht. Die 2kg Pellets sind wahrscheinlich auf den Pelletdift zurückzuführen. Der Kesselnutzungsgrad war im Winter (November) am höchsten, bis zu 81,3% und im Sommer wurde der Kesselnutzungsgrad nicht berücksichtigt, aufgrund der Ungenauigkeit (Brennstoffwaagenauflösung und ungenaue Messung). Die Differenz zwischen den Winter- und Sommerzeit Kesselnutzungsgrad liegt an der Kesselauslastung. Die Erzeuger- und Verbraucherdaten beziehungsweise die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum (Systemverluste) werden in den nachfolgenden Abbildungen behandelt.

In Abbildung 28 ist die Wärmeproduktion und der Wärmeverbrauch pro Monat der Anlage B zu sehen.

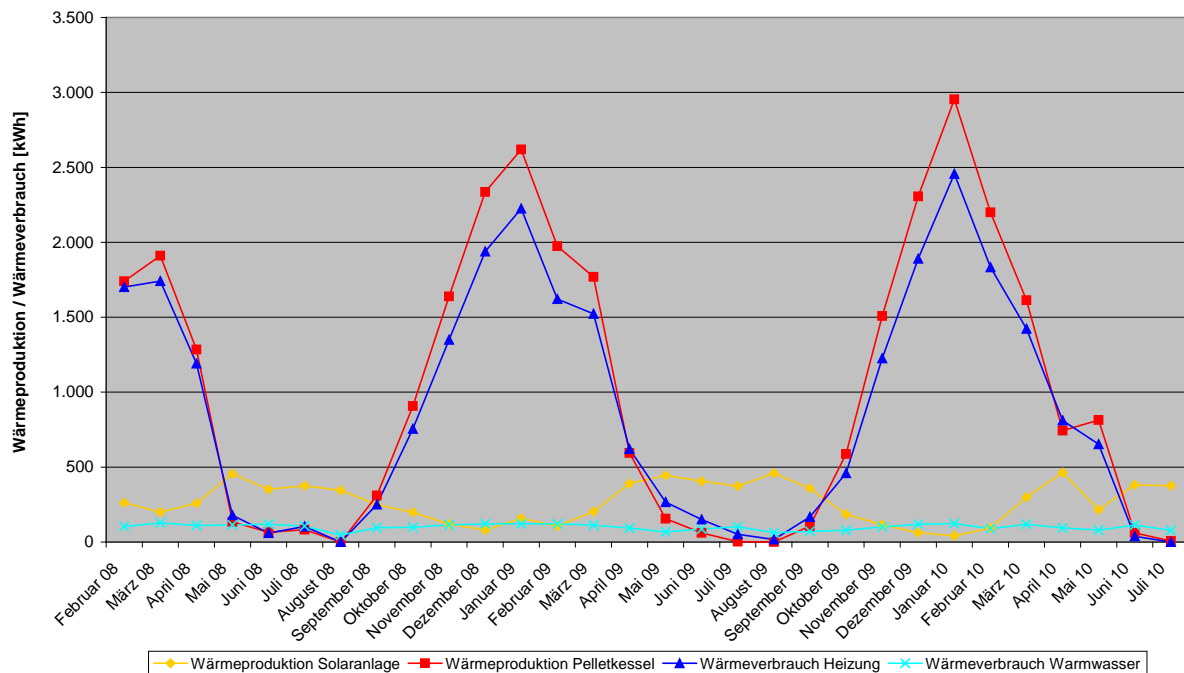


Abbildung 28: Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage B

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der Wärmeverbrauch (Raumheizung, Warmwasser) und die Wärmeproduktion (Pelletkessel, Solaranlage) wurden aufgeteilt. In den beiden Augustmonaten war der Pelletkessel außer Betrieb. In diesen Monaten produzierte die Solaranlage die benötigte Wärmemenge. Der Pelletkessel produzierte maximal 2.954kWh im Jänner 2010 und minimal 2kWh im Juli 2009. Die maximal verbrauchte Heizwärmemenge war 2.457kWh im Jänner 2010 und die minimale 7kWh im August 2009. Die verbrauchte Warmwasserwärmemenge lag zwischen 124kWh im Winter (Jänner 2010) und 47kWh im Sommer (August 2008).

Abbildung 29 zeigt die Wärmeproduktion, den Wärmeverbrauch und den Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage B.

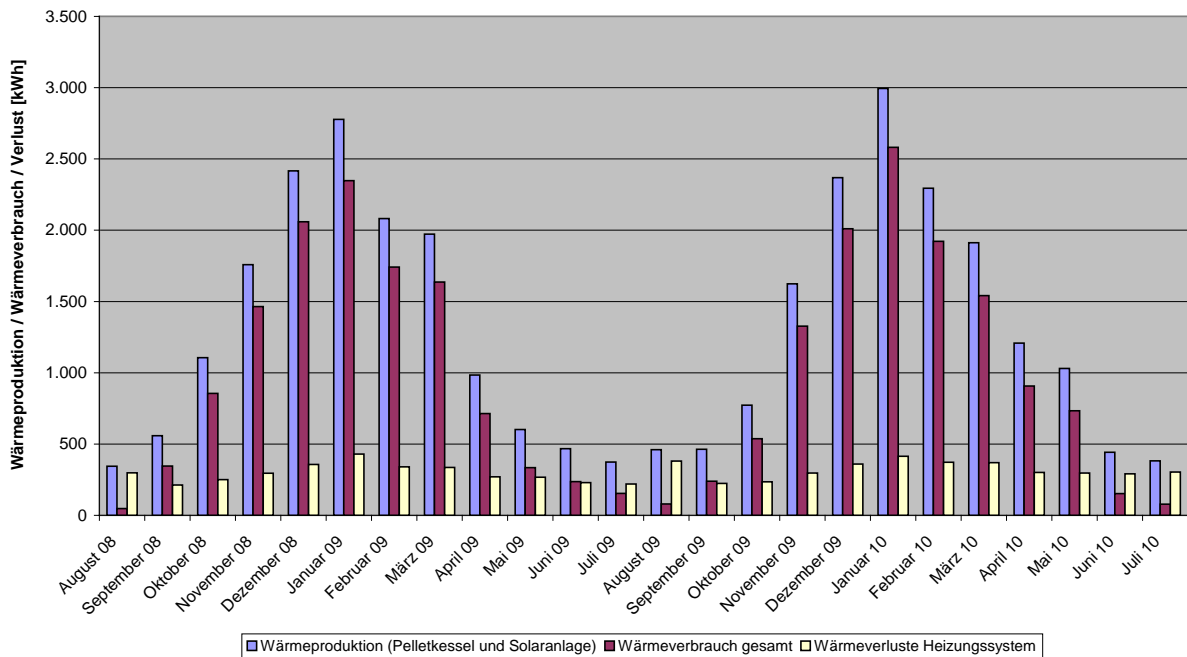


Abbildung 29: Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage B

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der absolute Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum stieg mit sinkender Außentemperatur. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war in den Übergangszeiten am kleinsten und in den Sommermonaten stieg er wieder gering an. Außer in den Urlaubsmonaten (August) erreichte der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum die Größenordnung vom Winter. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war zwischen minimal 213kWh im September 2008 und maximal 430kWh im Jänner 2009. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum in den Sommermonaten war größer als der Gesamtwärmeverbrauch durch Heizung und Warmwasserbereitung. Dies wird auch in Abbildung 30 veranschaulicht. Der Grund dafür liegt im geringen Wärmebedarf, da praktisch nur Warmwasser aber keine Heizung benötigt wurde. Der Pufferspeicher wird speziell in den Sommermonaten durch die Solaranlage geladen und dadurch entstehen große Wärmeverluste im Verhältnis zum Wärmebedarf.

Der relative Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage B war im Sommer am größten, mit bis zu 86,4% im August 2008 (siehe Abbildung 30).

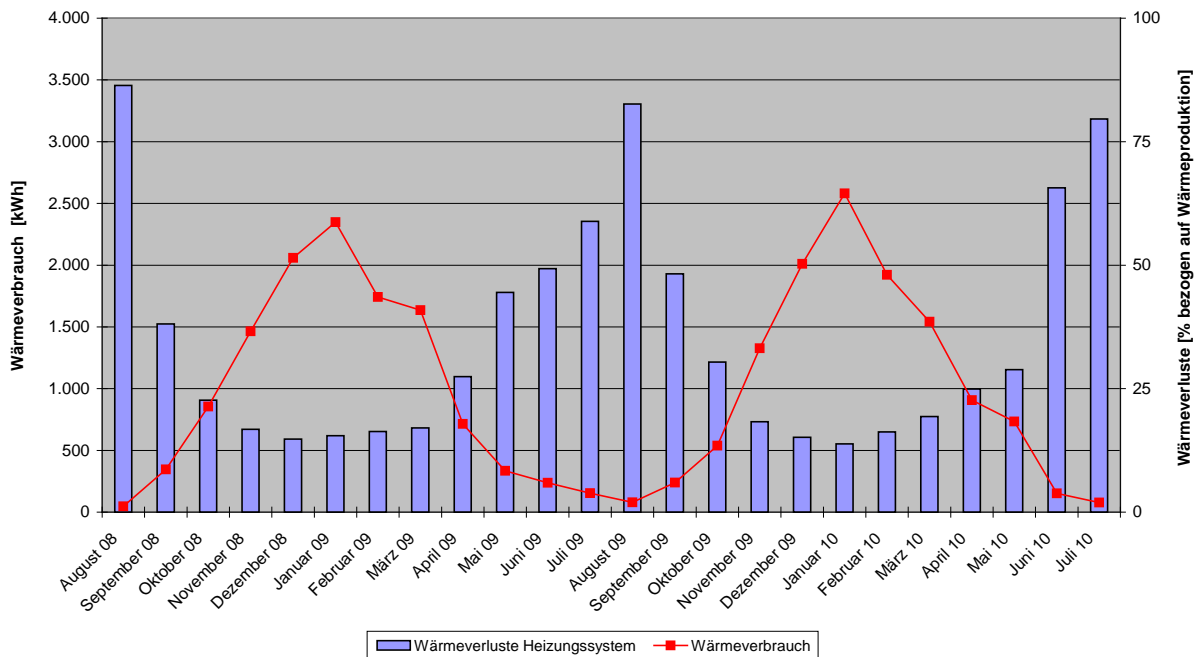


Abbildung 30: Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage B

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten; Wärmeverluste [% bezogen auf die Wärmeproduktion]

Die möglichen Ursachen für die hohen relativen Verluste in den Sommermonaten sind:

- keine Änderung der Kesselvortlauf-temperatur bzw. Pufferspeichertemperaturen im Sommer-/Übergangszeit (56-64°C) im Vergleich zum Winterbetrieb (56-64°C)
- geringer Wärmebedarf im Sommer bei höchster Wärmeproduktion der Solaranlage
- Kühlung des Pufferspeichers über die Solaranlage in der Nacht

Bei der Abbildung 31 werden der Solaranlagenenertrag und der Wärmeverbrauch der Anlage B dargestellt.

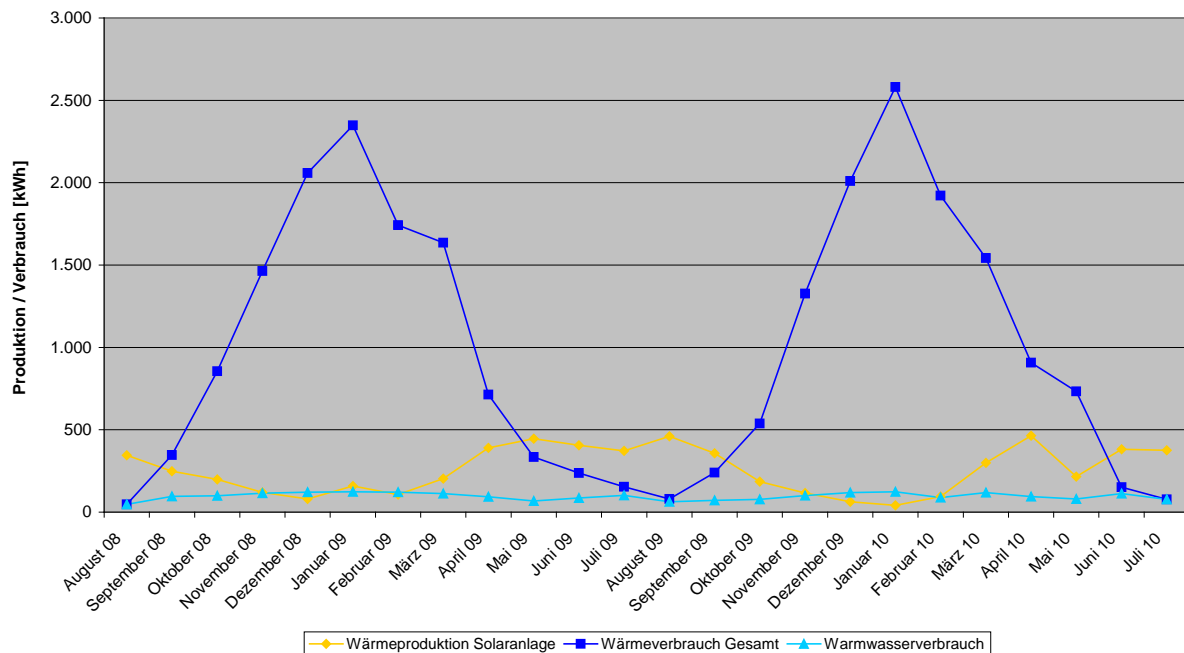


Abbildung 31: Wärmeproduktion Solaranlage vs. Wärmeverbrauch Gesamt und Warmwasserverbrauch der Anlage B

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 970l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten

Die Solaranlagengröße reichte für die Warmwasserbereitung aus, außer für vier bis fünf Monate. Von Mai bis September 2009 beziehungsweise August 2008 und Juni bis Juli 2010 würde auch der Solaranlagenenertrag für die Raumheizung ausreichen, aber laut Abbildung 28 ist im Mai, Juni und September 2009 und Juni bis Juli 2010 der Pelletkessel in Betrieb. Vielleicht war in diesen Monaten der Pelletkessel nicht ausgeschaltet. Der Solaranlagenenertrag liegt in den Sommermonaten deutlich über dem Wärmeverbrauch und da die überschüssige Wärmemenge nicht verwendet wurde, erscheint die Solaranlage in dieser Anlagenkonstellation als überdimensioniert.

5.3.2.4 Jahresauswertung

Tabelle 13 zeigt die Jahresauswertung der Anlage B.

Tabelle 13: Jahresauswertung der Anlage B

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; *) Stromverbrauch (Kessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierte Wärmemenge (Pelletkessel und Solarertrag vorhanden); **) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch und Solaranlagenenertrag); ***) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets und Solaranlagenenertrag)

	Einheit	Aug 08.- Jul. 09	Aug. 09- Jul. 10	Aug.08- Jul. 10
Primärenergieeinsatz				
Stromverbrauch	kWh	620	578	1.198
Pelletverbrauch	kg	3.541	3.462	7.003
Primärenergieeinsatz Pellets	kWh	16.926	16.548	33.474
spezif. Stromverbrauch *)	kWh el./MWh th.	40,2	36,2	38,1
Gemessene Wärmemengen				
Solaranlagenenertrag	kWh	3.075	3.055	6.131
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh	12.369	12.899	25.268
Deckungsgrad Solaranlage	%	19,9	19,2	19,5
Deckungsgrad Pelletkessel	%	80,1	80,8	80,5
Wärmeverbrauch Radiatoren	kWh	6.571	7.694	14.265
Wärmeverbrauch Radiatoren	%	55,1	63,5	59,3
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	kWh	4.181	3.285	7.466
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	%	35,0	27,1	31,0
Gesamtheizwärmeverbrauch	kWh	10.752	10.979	21.731
Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh	1.184	1.131	2.315
Warmwasser Wärmeverbrauch	%	9,9	9,3	9,6
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	44,8	45,7	45,3
spezif. Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	4,9	4,7	4,8
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	49,7	50,5	50,1
Wärmebilanz Pufferspeicher/Heizsystem				
Produzierte Gesamtwärme	kWh	15.444	15.954	31.399
Verbrauchte Wärme	kWh	11.936	12.110	24.046
Wärmeverlust Heizungssystem	kWh	3.508	3.844	7.353
Verluste und Nutzungsgrade				
Kesselnutzungsgrad	%	73,1	77,9	75,5
Nutzungsgrad Pufferspeicher/Heizsystem	%	77,3	75,9	76,6
Verluste Pufferspeicher/Heizsystem	%	22,7	24,1	23,4
Gesamtanlagennutzungsgrad mit Strom **)	%	57,9	60,0	58,9
Gesamtanlagennutzungsgrad ohne Strom ***)	%	59,7	61,8	60,7

Der Stromverbrauch der Anlage B betrug 620kWh (08/09) bzw. 578kWh (09/10). Der Pelletkessel produzierte eine Wärmemenge von 15.444kWh (08/09) bzw. 15.954kWh (09/10) und benötigte dafür 3.541kg (08/09) bzw. 3.462 (09/10) Pellets. Der Gesamtwärmeverbrauch betrug 11.936kWh (08/09) bzw. 12.110kWh (09/10), davon wurden 9,9% (08/09) bzw. 9,3% (09/10) für die Warmwasserbereitung benötigt. Der Kessel-Jahresnutzungsgrad von 73,1% (08/09) bzw. 77,9% (09/10) war deutlich geringer als der Kesselwirkungsgrad von 92,6% bei Nennleistung (mit einer Rauchgastemperatur von 160°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8%) und 91,1% bei Teillast (30% Leistung, mit einer Rauchgastemperatur von 100°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 12,4%) laut Herstellerdaten.

Mögliche Ursachen für den schlechten Kessel-Jahresnutzungsgrad:

- erhöhte Rauchgasaustrittstemperaturen
- erhöhte O₂-Gehalte im Rauchgas
- Verluste durch häufiges An- und Abfahren

Die Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades von 73% auf 78% ist wahrscheinlich auf die Reinigung und Reparatur am Ende der Heizsaison 08/09 zurückzuführen. Der Rauchgasventilator hat in der ersten Heizperiode nicht funktioniert und dadurch war der Pelletkessel stark verrußt.

Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum betrug 22,7% (08/09) bzw. 24,1% (09/10). Der Wärmeverlust setzt sich aus Pufferspeicher- und Rohrleitungsverlusten zusammen. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit Berücksichtigung des Stromverbrauchs betrug 57,9% (08/09) bzw. 60% (08/09) und ohne Stromverbrauch 59,7% (08/09) bzw. 61,8% (09/10).

Die Ursachen für den relativ hohen Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum können sein:

- zu dünne bzw. keine Isolierung der Rohrleitungen
- Pufferspeicherverluste (insbesondere im Sommer durch die Solaranlage)

5.3.3 Anlage G

5.3.3.1 Stundenauswertung

Für die Auswertung der Vor- und Rücklauftemperaturen wurden nur die Temperaturaufzeichnungen von jener Stunde herangezogen, in denen auch Wärme produziert/verbraucht wurde.

Solaranlage

Die mittlere Vorlauftemperatur war 64°C (08/09) bzw. 66,1°C (09/10), die maximale Vorlauftemperatur 119,4°C und die minimale 22,9°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Solaranlagenbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 48,5°C (08/09) bzw. 50,5°C (09/10), die maximale 90,7°C und die minimale 22,3°C (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 15,5°C (08/09) und 15,6°C (09/10). Die mittlere Vor- und Rücklauftemperatur stieg in der zweiten Heizperiode leicht an, aber es kommt zu keiner Erhöhung der Temperaturspreizung.

Die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung im Sommer lag bei 10,1kW (08/09) bzw. 9,2kW (09/10) und im Winter maximal 7,3kW in beiden Heizperioden. Die Werte ergaben sich aus der Multiplikation des Messwerts mit dem Korrekturfaktor.

Pelletkessel

Bei der Heizperiode 09/10 wurden bei dieser Anlage für die Pelletkesselauswertung die Ergebnisse der 15 Minutenauswertung (Methode 2) verwendet. Die mittlere Vorlauftemperatur war 57,6°C (08/09) bzw. 60°C (09/10), die maximale Vorlauftemperatur 72,7°C und die minimale 30,4°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 38,2°C (08/09) bzw. 42,1°C (09/10), die maximale 63,1°C und die minimale 24,9°C (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 19,4°C (08/09) und 18,1°C (09/10). Die mittlere Vorlauftemperatur fällt in der zweiten Heizperiode leicht ab und dadurch verringerte sich die Temperaturspreizung.

Genau wie bei der Anlage B wurden bei dieser Anlage die Kesselbetriebszeit sowie die Kesselstarts zusätzlich mit den 15 Minutenwerten ausgewertet. Es stellten sich die gleichen Diskrepanzen bei der Kesselbetriebszeit wie bei Anlage B heraus. Zusätzlich wurden bei dieser Anlage bei der 15 Minutenauswertung einzelne Heizperioden (Tage) im Winter genauer untersucht, weil diese Anlage mit einem Schneckenfördersystem (Brennstofffördersystem) ausgestattet war. Jedoch ergab diese Periodenuntersuchung auch keine plausiblen Ergebnisse, aufgrund der zu niedrigen Brennstoffwaagenauflösung. Die Gesamtbetriebszeit des Pelletkessels war 957h (08/09) bzw. 960 (09/10) und die Anzahl der Kesselstarts 246 (08/09) bzw. 422 (09/10).

In beiden Heizperioden war die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung im Winter 15kW und im Sommer war der Pelletkessel außer Betrieb.

Die Kesselnutzungsgradberechnung wurde auch bei dieser Anlage nicht durchgeführt, da das Brennstoffwaagenauflösung und Messung zu ungenau war.

Der Pelletkessel hatte 757h (08/09) bzw. 752h (09/10) Volllaststunden und eine relative Kessellast von 0,8 (08/09) bzw. 0,78 (09/10).

Fußbodenheizung

Die mittlere Vorlauftemperatur war 36,1°C, die maximale Vorlauftemperatur 58,3°C und die minimale 24,6°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Fußbodenbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 31,3°C, die maximale 40,5°C und die minimale 20°C (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Daraus ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 4,8°C. Durch absenken der Rücklauftemperatur könnte die Temperaturspreizung erhöht und dadurch Pumpkosten eingespart werden.

Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf im Winter betrug 10kW (08/09) bzw. 12kW (09/10) und im Sommer maximal 1kW (08/09) bzw. 3kWh (09/10).

Wandheizung

Die mittlere Vorlauftemperatur war 41,3°C, die maximale Vorlauftemperatur 59,5°C und die minimale 27,2°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Fußbodenbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 37,7°C, die maximale 48°C und die minimale 25,5°C (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Daraus ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 3,6°C. Durch absenken der Rücklauftemperatur könnte die Temperaturspreizung erhöht und dadurch Pumpkosten eingespart werden.

In beiden Heizperioden war im Winter der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf 3kW und im Sommer war die Wandheizung außer Betrieb.

Warmwasser

Die verbrauchte Wärme für die Warmwasserbereitung betrug 14,5% (08/09) bzw. 15,1% (09/10) des Gesamtwärmeverbrauchs. Die verbrauchte Warmwassermenge liegt etwas über den üblichen Wert von ca. 10%. Die mittlere Warmwassertemperatur war 59,2°C, die maximale 90,1°C und die minimale 30,9°C, wobei die Minimaltemperatur vermutlich bei stehendem Betrieb gemessen wurde (Abkühlphase). Die maximale Warmwassertemperatur wurde in den Sommermonaten erreicht, wo die Solaranlage in Betrieb war. Die mittlere Kaltwassertemperatur war 19°C, die maximale 65,1°C und die minimale 7,5°C. Mögliche Ursachen für die hohen Kaltwassertemperaturen:

- Wärmeleitung zwischen Warm- und Kaltwasser, wenn die Rohre nebeneinander verlegt waren
- Rückstauung aus dem Pufferspeicher

Auf Basis der mittleren Warm- und Kaltwassertemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 40,2°C.

Der maximale durchschnittliche Warmwasserleistungsbedarf im Winter betrug 7kW (08/09) bzw. 6kW und im Sommer maximal 3kW (08/09) bzw. 2kW (09/10).

Stromverbrauch

Der minimale durchschnittliche Stromverbrauch war 10Wh in beiden Heizperioden und maximal 380Wh (08/09) bzw. 430Wh (09/10).

Brennstofffördermenge des Schneckenfördersystems

Bei dieser Anlage fördert ein Schneckenfördersystem den Brennstoff zum Pelletkessel. Die minimale Brennstoffmenge war aufgrund der geringen Brennstoffwaagenauflösung 2kg und maximal 8kg in beiden Heizperioden. Das Schneckenfördersystem fördert je nach Bedarf (just- in- time) den Brennstoff zum Brenner.

Außentemperatur

Die minimale Temperatur im Winter war laut Aufzeichnungen -12°C und maximale Temperatur im Sommer 37°C . Die Durchschnittstemperatur über ein Jahr lag bei $10,4^{\circ}\text{C}$. Im Winter schwankten die Temperaturen im Bereich von -12 bis 10°C . In den Übergangszeiten zwischen 10 und 25°C und im Sommer von 20°C bis 37°C . Normal stiegen die Temperaturen im Sommer bis 30°C an, aber vereinzelt wurden 37°C erreicht.

Wärmespeicher und Verteilung

Die Pufferspeichertemperaturen beziehungsweise die Schichtung wurde aufgrund fehlender Daten nur aus den Temperaturmessdaten von Wärmeerzeuger und Verbrauchern abgeschätzt (siehe Abbildung 32). Die Temperaturen in Abbildung 32 entsprechen den Durchschnittstemperaturen über ein Jahr. Die durchschnittlichen Vorlauftemperaturen Richtung Fußboden/Wandheizkreis konnten nicht abgeschätzt werden, weil der Wärmemengenzähler der Fußboden-/Wandheizkreises erst nach dem Beimischventil montiert war. Die maximale Temperatur auf Basis der Solaranlagevorlauftemperatur war $119,4^{\circ}\text{C}$ und die minimale Temperatur auf Basis der Kaltwassertemperatur vom Brauchwasser war $7,5^{\circ}\text{C}$.

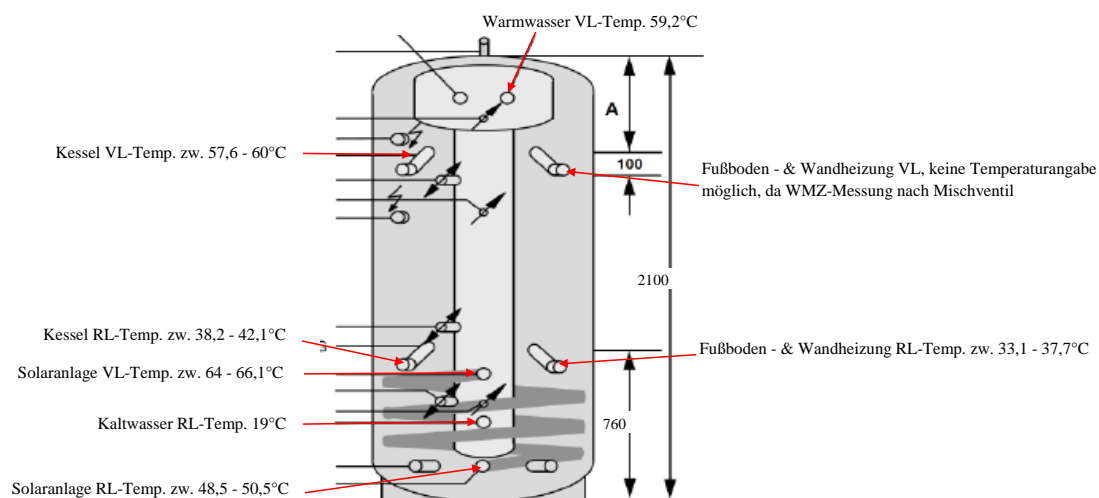


Abbildung 32: Pufferspeichertemperaturen der Anlage G

Erläuterungen: Datenquelle [vgl.7]

Der Pufferspeicherboden ist der Bezugspunkt für die Höhenangaben. Der Rücklauf von der Fußboden-, der Wandheizung und des Pelletkessels liegt auf 760mm und deren Vorlauf auf 1560mm. Der Solaranlagenvorlauf liegt bei etwa 660mm und der Solaranlagenrücklauf bei etwa 150mm. Aus den Betriebsdaten war kein genaues Kriterium zu erkennen, wie der Pufferspeicher geregelt wurde. Es scheint, dass zumindest die Vorlauftemperatur des Fußboden/Wandheizkreises konstant auf einer Temperatur gehalten wurde, aber es gab auch Fälle, wo der Pufferspeicher im Kesselbereich (760-1650mm) vollgeladen wurde (Kessel fährt, bis Rücklauftemperatur knapp unter 60°C war).

Das Pufferspeichervolumen wurde teilweise gut ausgenutzt, da der Pelletkessel gleichmäßiger betrieben wurde. Allerdings erfolgt nur teilweise eine Ladung des Pufferspeichers (bis die Kesselrücklauftemperatur von knapp unter 60°C erreicht wird), da der Pelletkessel in mehreren Fällen nur auf Basis des Wärmeverbrauchs betrieben wurde und keine Pufferladung stattfand.

Der Pufferspeicher war der gleiche Pufferspeichertyp (Kombinationsspeicher mit integrierter Warmwasserbereitung sowie Solarwärmetauscher von der Firma Jenni) wie bei der Anlage B, nur größer ausgeführt.

Anlagenbetriebsverhalten

Beim Anlagenbetriebsverhalten wurde die Heizperiode 09/10 behandelt, da Wartungsarbeiten beim Pelletkessel durchgeführt wurden und dadurch die Anlage effizienter betrieben wurde (höherer Nutzungsgrad). Das Betriebsverhalten der Anlage G ist in Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 zu sehen. Der Pelletkessel war praktisch je nach Bedarf in Betrieb, ohne Nachtabsenkung. In den Sommermonaten Mai bis September war der Pelletkessel außer Betrieb. In der Übergangszeit nahmen die Kesselbetriebszeiten mit abnehmender Außentemperatur zu und im Winter war der Pelletkessel ein- bis zweimal pro Tag in Betrieb und fuhr mit möglichst gleichmäßiger Leistung (12 bis 14kW) innerhalb des modulierend regelbaren Leistungsbereichs. Manchmal war zwischen Ein- und Ausschalten des Pelletkessels eine ganz kurze Zeit dazwischen.

Der Pelletkessel könnte durchfahren, wenn der Pelletkessel mit einer geringeren Leistung betrieben wird. Für das gewünschte Betriebsverhalten müssten Änderungen an der Pelletkesselregelung (Setpointanpassung) durchgeführt werden.

Bei der Darstellung des Betriebsverhaltens in den nachfolgenden Abbildungen ist zu beachten, dass diese auf Basis der Wärmemenge pro Stunde, die vom Wärmemengenzähler aufgezeichnet wurde erstellt wurde. Die Werte stellen somit die durchschnittliche Leistung (kWh/h) in der jeweiligen Stunde dar und geben somit nur Anhaltspunkte auf die tatsächliche Spitzenlast.

Abbildung 33 zeigt das Betriebsverhalten der Anlage G in der kältesten Winterwoche.

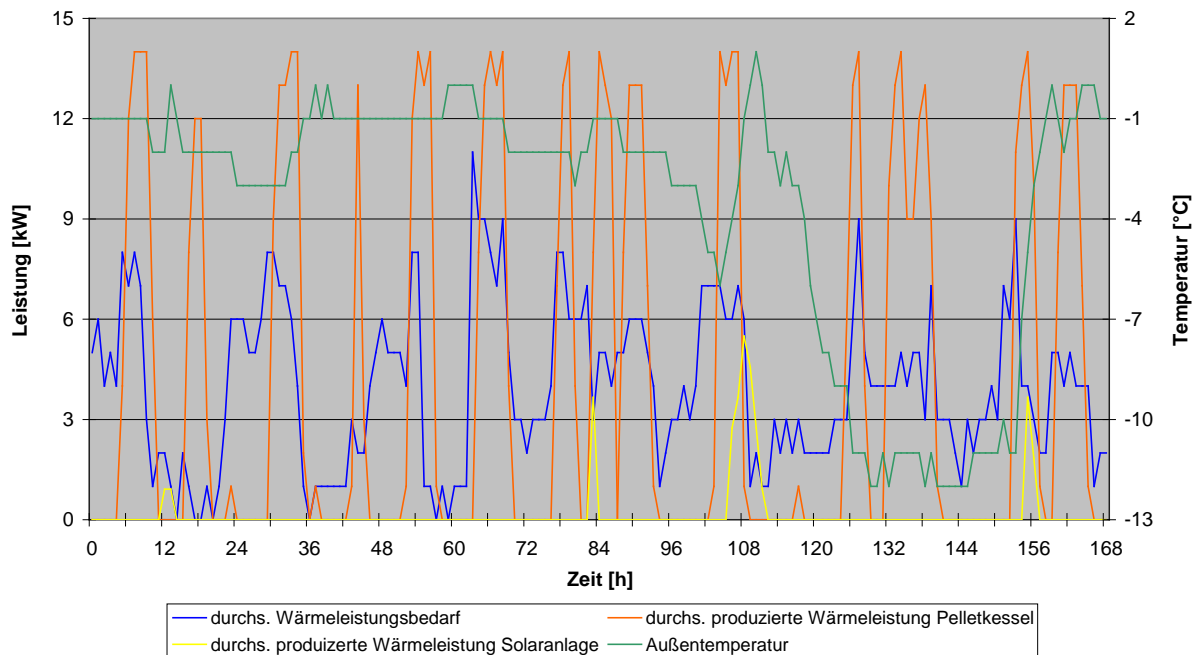


Abbildung 33: Betriebsverhalten der Anlage G in der kältesten Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der Kessel wurde in der kältesten Woche mit einer durchschnittlichen Leistung von 12 und 14kW betrieben. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höher liegen (bis zur nominalen Nennlast). Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch in der kältesten Winterwoche lag bei etwa 11kW und der mittlere zwischen 3 und 7kW. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit war maximal 5,5kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei -12°C und die maximale bei 1°C.

Das Betriebsverhalten der Anlage G in einer durchschnittlichen Winterwoche wird in Abbildung 34 dargestellt.

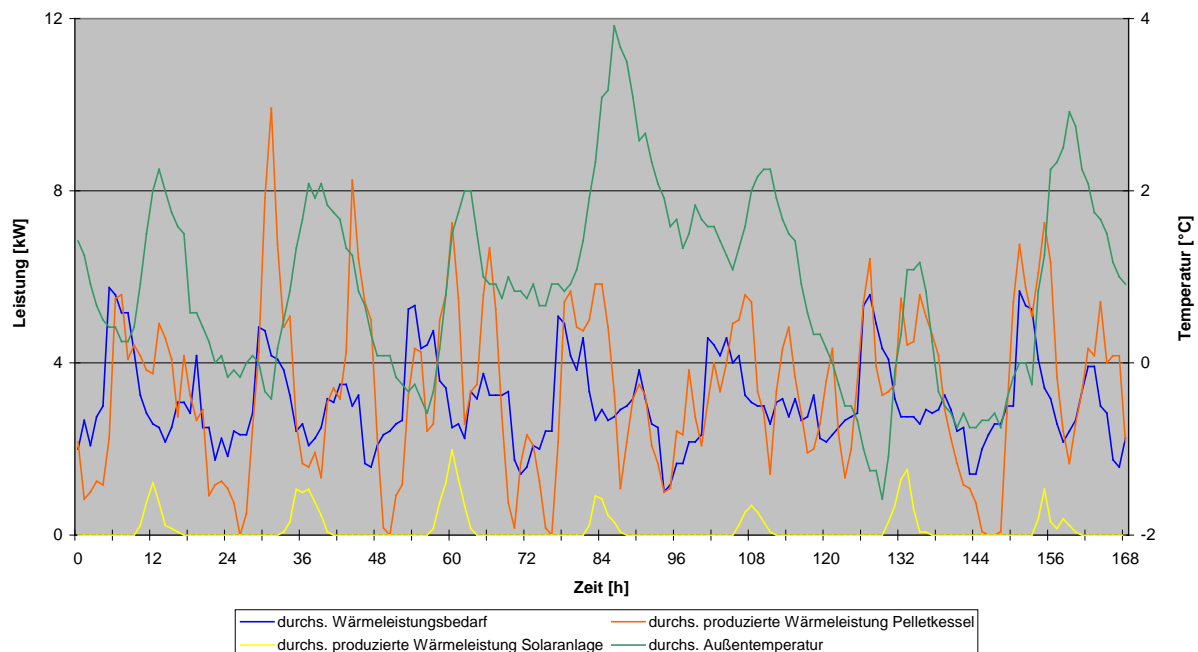


Abbildung 34: Betriebsverhalten der Anlage G in einer durchschnittlichen Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die maximale durchschnittliche Kesselleistung war 10kW. Kurzfristig kann die Kesselleistung auch noch höher liegen (bis zur nominalen Nennlast). Im Durchschnitt wurde der Kessel bei einer Leistung von 2 bis 6kW betrieben. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 5,75kW und der mittlere Wärmeverbrauch lag zwischen 3 und 4kW. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit war maximal 3kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei -1.5°C und die maximale bei 4°C.

Abbildung 35 zeigt das durchschnittliche Betriebsverhalten der Anlage G in einer Sommerwoche.

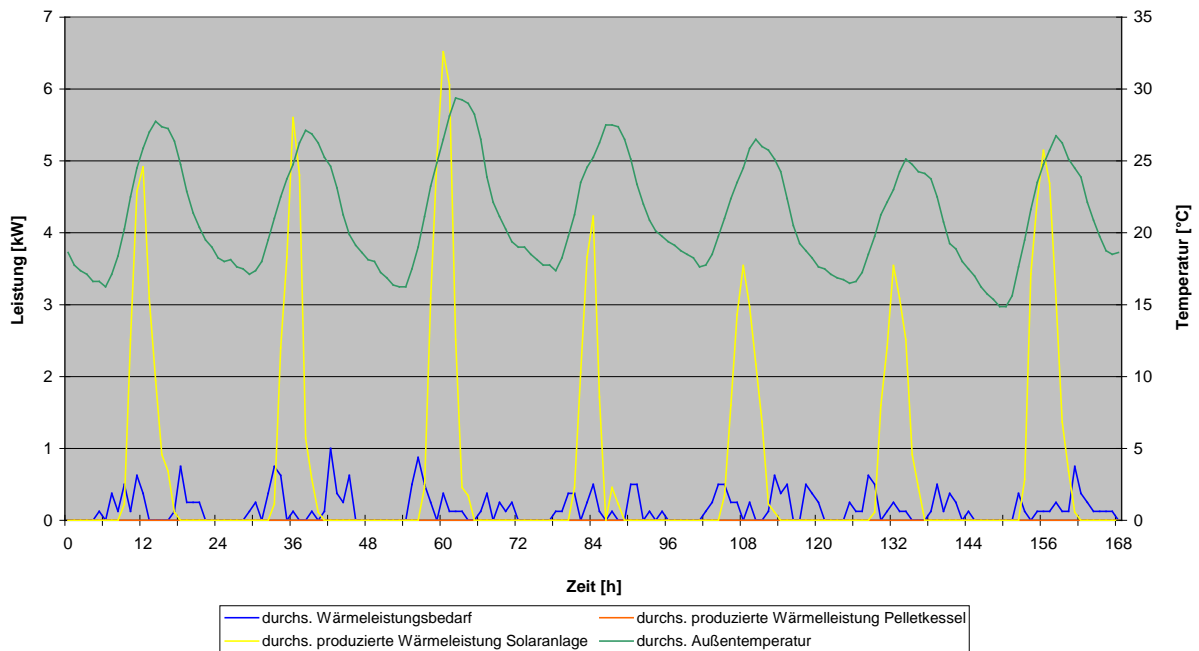


Abbildung 35: Betriebsverhalten der Anlage G in einer durchschnittliche Sommerwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der Morgen- und Abendverbrauch wurde vermutlich durch den Pufferspeicher abgedeckt, da der Kessel laut Betriebsdaten nicht in Betrieb war. Die maximale durchschnittliche Solaranlagenleistung um die Mittagszeit war maximal 6,5kW. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 1kW und der mittlere lag zwischen 0,15 und 0,6kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei 15°C und die maximale bei 29,5°C.

5.3.3.2 Wochenauswertung

In Tabelle 14 sind die Bestimmtheitsmaße, die Korrelationskoeffizienten und die Einstufungen zu den Korrelationen der Anlage G zu sehen. Wie bei den beiden Anlagen zuvor sind ähnlich schlechte Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades zu erkennen. Die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades sind auch zwischen den beiden Heizperioden sehr unterschiedlich. Die möglichen Ursachen beziehungsweise Erklärungen warum keine Zusammenhänge zwischen Kesselnutzungsgrad und den Einflussgrößen (relative Kessellast pro Woche, Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche, produzierte Wärmemenge pro Start) zu sehen sind, wurde in Kapitel 5.3.1.2 erläutert.

Die Korrelationen auf Basis des Stromverbrauchs pro Woche mit den Einflussgrößen Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start zeigen einen höheren Korrelationskoeffizienten als die Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades und die Unterschiede zwischen den Heizperioden sind geringer.

Die Korrelationen auf Basis des Stromverbrauchs sind hinsichtlich der Art des Zusammenhangs (linear oder logarithmisch) ähnlich jener der Anlage B. Siehe dazu auch Kapitel 5.3.2.2. Die deutlich niedrigeren Korrelationskoeffizienten in Vergleich zu Anlage B können allerdings nicht plausibel erklärt werden. Abbildung 36 zeigt beispielhaft den logarithmischen Zusammenhang zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche in der Heizperiode 09/10.

Tabelle 14: Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Erwartungen von den Korrelationen der Anlage G

Erläuterungen: *) linearer Zusammenhang; **) logarithmischer Zusammenhang; Heizperiode 08/09 und 09/10; Kesselnutzungsgrad, Stromverbrauch, relative Kessellast, Kesselbetriebszeit, Kesselstarts und produzierte Wärmemenge pro Start sind jeweils pro Woche; Kor ...Korrelation

	Bestimmtheitsmaß R ² 08/09	Korrelationskoeffizient r 08/09	Einstufung 08/09	Bestimmtheitsmaß R ² 09/10	Korrelationskoeffizient r 09/10	Einstufung 09/10
Kesselnutzungsgrad vs. relative Kessellast *)	0,1431	0,3783	geringe Kor.	0,2144	0,4630	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselbetriebszeit *)	0,0456	-0,2135	geringe Kor.	0,1594	0,3992	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselstarts *)	0,0314	-0,1772	sehr geringe Kor.	0,0821	0,2865	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. produzierte Wärmemenge pro Start *)	0,0070	-0,0837	sehr geringe Kor.	0,2008	0,4481	geringe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselbetriebszeit **)	0,5733	0,7572	hohe Kor.	0,7122	0,8439	hohe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselstarts *)	0,5052	0,7108	hohe Kor.	0,6044	0,7774	hohe Kor.
Stromverbrauch vs. produzierte Wärmemenge pro Start *)	0,2138	0,4624	geringe Kor.	0,2535	0,5035	mittlere Kor.

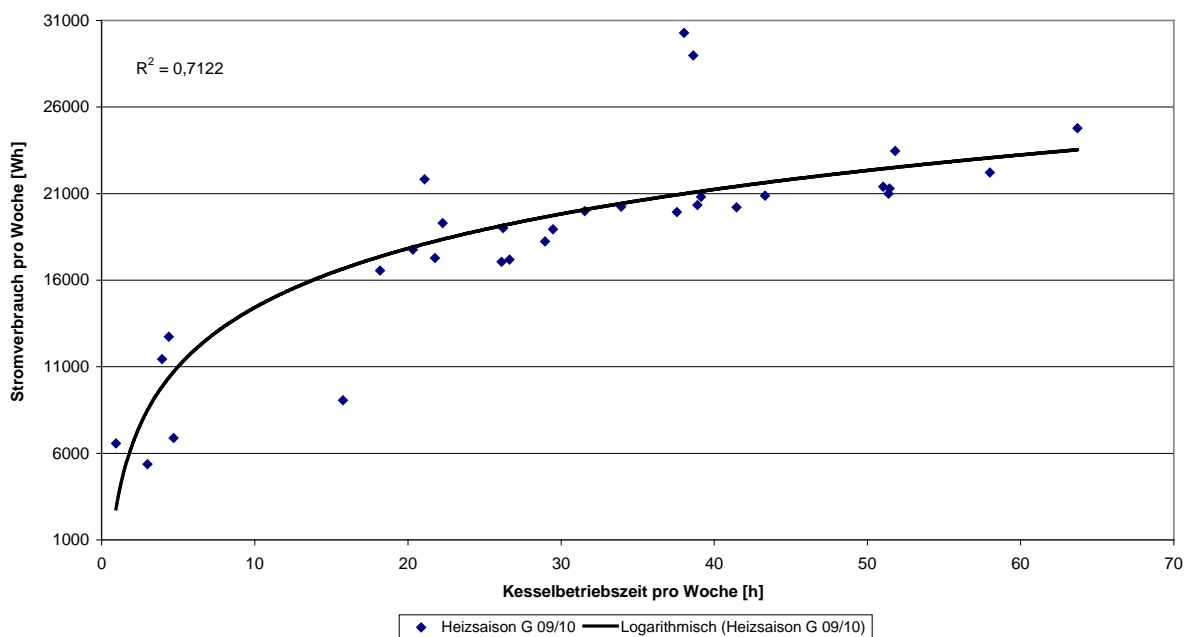


Abbildung 36: Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche

Erläuterungen: Logarithmischer Zusammenhang; Basis Feldmessdaten

5.3.3.3 Monatsauswertung

Außentemperatur

Die minimale durchschnittliche Außentemperatur war -1°C im Jänner 2009 und die maximale 21°C im Juli 2010.

Energiebilanz

Tabelle 15 zeigt die Monatsenergiebilanz der Anlage G.

Tabelle 15: Monatsauswertung der Anlage G

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; Bei den lila markierten Kästen entsprach der Fehler 10% oder mehr des Pelletverbrauchs innerhalb des betrachteten Zeitraums und deshalb wurde der Kesselnutzungsgrad nicht berechnet. Die genauere Beschreibung siehe Kapitel 4.3.1.2 Abschnitt Methode 2

Zeitraum	Stromzähler	Waage	Wärmemengenzähler						Wärmebilanz (hydr.)			Verluste & Nutzungsgrade					Deckungsbeitrag	
	Strom kWh	Pellets- verbrauch kg	Solar- anlage kWh	Pellet- kessel kWh	Fuß- boden- heizung kWh	Wand- heizung kWh	Heiz- energie kWh	Warm- wasser kWh	Produ- zierte Wärme kWh	Ver- brauchte Wärme kWh	System- verluste kWh	Kessel- wirkungs- grad %	Gesamt- nutzungs- grad mit Strom %	Gesamt- nutzungs- grad ohne Strom %	System- wirkungs- grad %	System- verluste % v. Eintrag	Solar- anlage %	Pellet- kessel %
August 08	26,8	0	642	0	0	38	38	139	642	177	465		26,5	27,6	27,6	72,4	100,0	0,0
September 08	44,4	3	529	0	22	110	132	108	529	240	289		40,8	44,2	45,4	54,6	100,0	0,0
Oktober 08	79,3	163	440	627	337	351	688	144	1.067	832	235	79,8	63,7	67,9	78,0	22,0	41,2	58,8
November 08	105,8	391	283	1.514	1.095	261	1.356	145	1.797	1.501	296	80,3	66,0	69,3	83,5	16,5	15,7	84,3
Dezember 08	93,4	657	145	2.531	2.174	0	2.174	184	2.676	2.358	318	79,9	69,2	71,2	88,1	11,9	5,4	94,6
Januar 09	120,5	677	368	2.599	2.276	184	2.460	151	2.967	2.611	356	79,6	69,6	71,9	88,0	12,0	12,4	87,6
Februar 09	94,5	551	257	2.163	1.952	47	1.999	181	2.420	2.180	240	81,4	72,5	74,8	90,1	9,9	10,6	89,4
März 09	89,7	442	425	1.732	1.696	0	1.696	167	2.157	1.863	294	81,3	70,4	72,9	86,4	13,6	19,7	80,3
April 09	36,7	42	670	181	243	25	268	171	851	439	412	89,4	48,3	50,3	51,6	48,4	78,7	21,3
Mai 09	19,4	0	682	0	18	2	20	139	682	159	523		22,7	23,3	23,3	76,7	100,0	0,0
Juni 09	15,2	0	580	0	0	0	0	149	580	149	431		25,0	25,7	25,7	74,3	100,0	0,0
Juli 09	15,2	0	540	0	0	0	0	153	540	153	387		27,6	28,3	28,3	71,7	100,0	0,0
August 09	14,4	0	507	0	0	0	0	108	507	108	399		20,7	21,3	21,3	78,7	100,0	0,0
September 09	13,9	0	480	0	0	0	0	117	480	117	363		23,7	24,4	24,4	75,6	100,0	0,0
Oktober 09	49,4	186	330	744	557	28	585	120	1.074	705	369	83,0	55,2	57,5	65,6	34,4	30,7	69,3
November 09	105,2	385	237	1.568	1.259	139	1.398	142	1.805	1.540	265	84,5	70,1	73,6	85,3	14,7	13,1	86,9
Dezember 09	91,5	555	145	2.250	1.946	3	1.949	151	2.395	2.100	295	84,1	72,1	74,5	87,7	12,3	6,0	94,0
Januar 10	100,3	720	50	2.989	2.456	13	2.469	176	3.039	2.645	394	86,1	73,0	75,1	87,0	13,0	1,7	98,3
Februar 10	79,2	432	232	1.772	1.504	0	1.504	169	2.004	1.673	331	85,1	69,9	72,3	83,5	16,5	11,6	88,4
März 10	64,6	242	564	942	937	0	937	201	1.506	1.138	368	80,8	63,4	65,8	75,6	24,4	37,4	62,6
April 10	48,1	88	751	351	487	0	487	178	1.102	665	437	82,8	54,4	56,6	60,3	39,7	68,2	31,8
Mai 10	62,6	154	513	614	745	0	745	132	1.127	877	250	82,7	66,5	69,8	77,8	22,2	45,5	54,5
Juni 10	26,8	12	710	51	94	0	94	136	761	230	531		28,9	30,0	30,2	69,8	93,3	6,7
Juli 10	15,9	0	612	0	0	0	0	174	612	174	438		27,7	28,4	28,4	71,6	100,0	0,0

Der maximale Stromverbrauch lag bei 120,5kWh im Jänner, da dort die Heizungsanlage sowie auch die Solaranlage vermutlich am längsten in Betrieb waren. Im September 2009, wo Wärme praktisch nur für die Warmwasserbereitung benötigt wurde, wurde vermutlich der minimale Stromverbrauch von 13,9kWh benötigt. Der Pelletverbrauch verhielt sich ähnlich. Hier wurden maximal 720kg im Jänner 2010 und minimal 3kg (September 2009) Pellets verbraucht, wobei die 3kg Pellets wahrscheinlich auf den Pelletdrift zurückzuführen sind. Der Kesselnutzungsgrad war im Winter (Jänner 2010) am höchsten, bis zu 86,1% und in der Übergangszeit nahm der Kesselnutzungsgrad leicht ab. Die Differenz zwischen den Winter- und Übergangszeit-Kesselnutzungsgrad liegt an der Kesselauslastung. Die Erzeuger- und Verbraucherdaten beziehungsweise die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum werden in den nachfolgenden Abbildungen behandelt.

In Abbildung 37 ist die Wärmeproduktion und der Wärmeverbrauch pro Monat der Anlage G zu sehen.

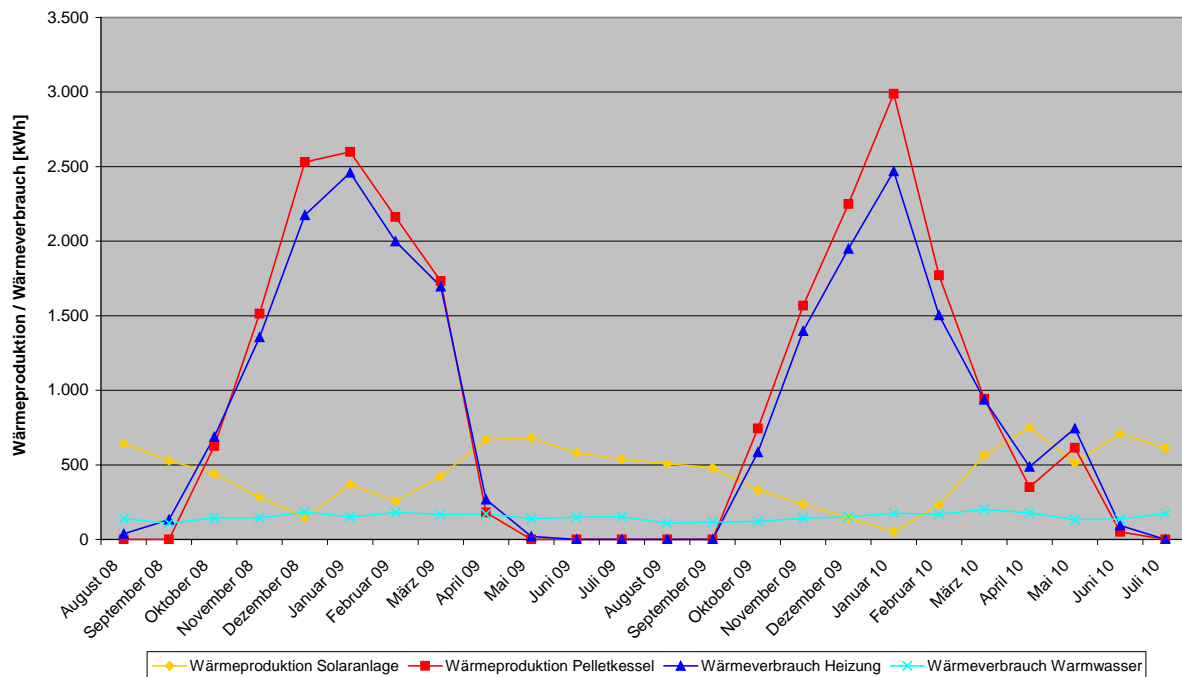


Abbildung 37: Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage G

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der Wärmeverbrauch (Raumheizung, Warmwasser) und die Wärmeproduktion (Pelletkessel, Solaranlage) wurden aufgeteilt. Im August sowie September 2008 war laut Auswertung die Raumheizung in Betrieb. Von August bis September 2008 und Mai bis September 2009 sowie Juni 2010 war der Pelletkessel außer Betrieb. In diesen Monaten produzierte die Solaranlage die erforderliche Wärmemenge. Laut Auswertung war es im Mai 2010 nochmals kalt, da der Pelletkessel im Vergleich zu den Vorjahren noch in Betrieb war. Der Pelletkessel produzierte maximal 2.989kWh im Jänner 2009 und minimal 51kWh im Juni 2010. Die maximal verbrauchte Heizwärmemenge war 2.469kWh im Jänner 2010 und die minimale 20kWh im Mai 2009. Die verbrauchte Warmwasserwärmemenge lag zwischen 201kWh im März und 108kWh im September 2008 sowie August 2009 (Urlaubsmonat).

Abbildung 38 zeigt die Wärmeproduktion, den Wärmeverbrauch und den Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage G.

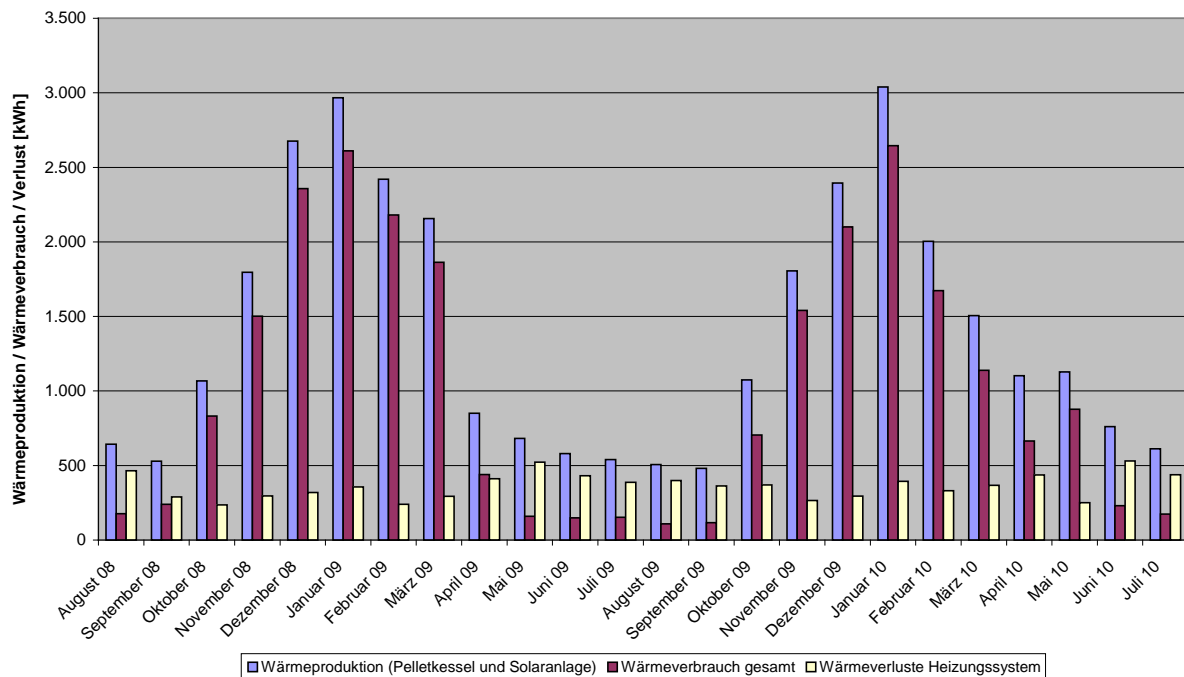


Abbildung 38: Wärmeproduktion und Wärmeverbrauch der Anlage G

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergröße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Der absolute Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war bei dieser Anlage in den Sommermonaten am größten und in den Übergangszeiten am geringsten. Mit sinkender Außentemperatur stieg der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum wieder an, aber der absolute Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum erreichte nicht die Größenordnung von den Sommermonaten. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war zwischen minimal 235kWh im Oktober 2008 und maximal 531,1kWh im Juni 2010. Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum war in den Sommermonaten größer als der Gesamtwärmeverbrauch durch Heizung und Warmwasserbereitung. Dies wird auch in der Abbildung 39 veranschaulicht. Der Grund dafür liegt im geringen Wärmebedarf, da praktisch nur Warmwasser aber keine Heizung benötigt wurde. Der Pufferspeicher wird speziell in den Sommermonaten durch die Solaranlage geladen und dadurch entstehen große Wärmeverluste im Verhältnis zum Wärmebedarf.

Der relative Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum der Anlage G war im Sommer am größten, mit bis zu 78,7% im August 2009 (siehe Abbildung 39).

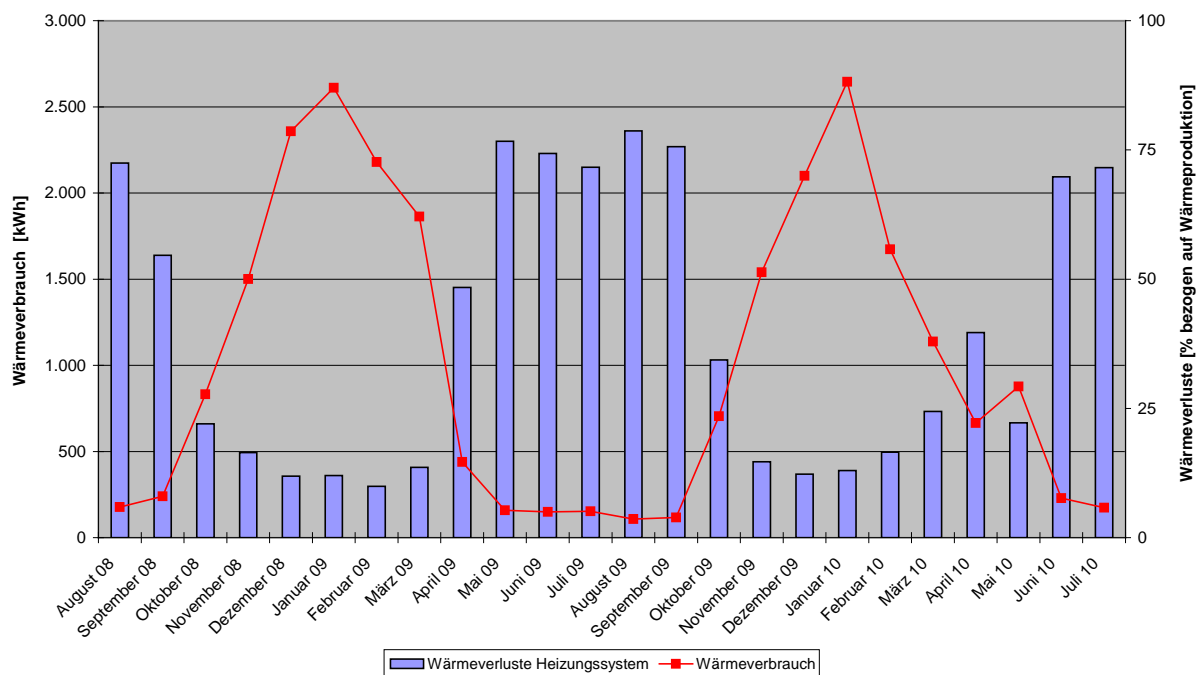


Abbildung 39: Wärmeproduktion vs. prozentuelle Systemverluste der Anlage G

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten; Wärmeverluste [% bezogen auf die Wärmeproduktion]

Die möglichen Ursachen für die hohen relativen Verluste in den Sommermonaten sind:

- keine Änderung der Kesselvorlauftemperatur bzw. Pufferspeichertemperaturen im Sommer-/Übergangszeit (55-71°C) im Vergleich zum Winterbetrieb (55-71°C)
- geringer Wärmebedarf im Sommer bei höchster Wärmeproduktion der Solaranlage
- Kühlung des Pufferspeichers über die Solaranlage in der Nacht

Bei der Abbildung 40 sind der Solaranlagenenertrag und der Wärmeverbrauch der Anlage G dargestellt.

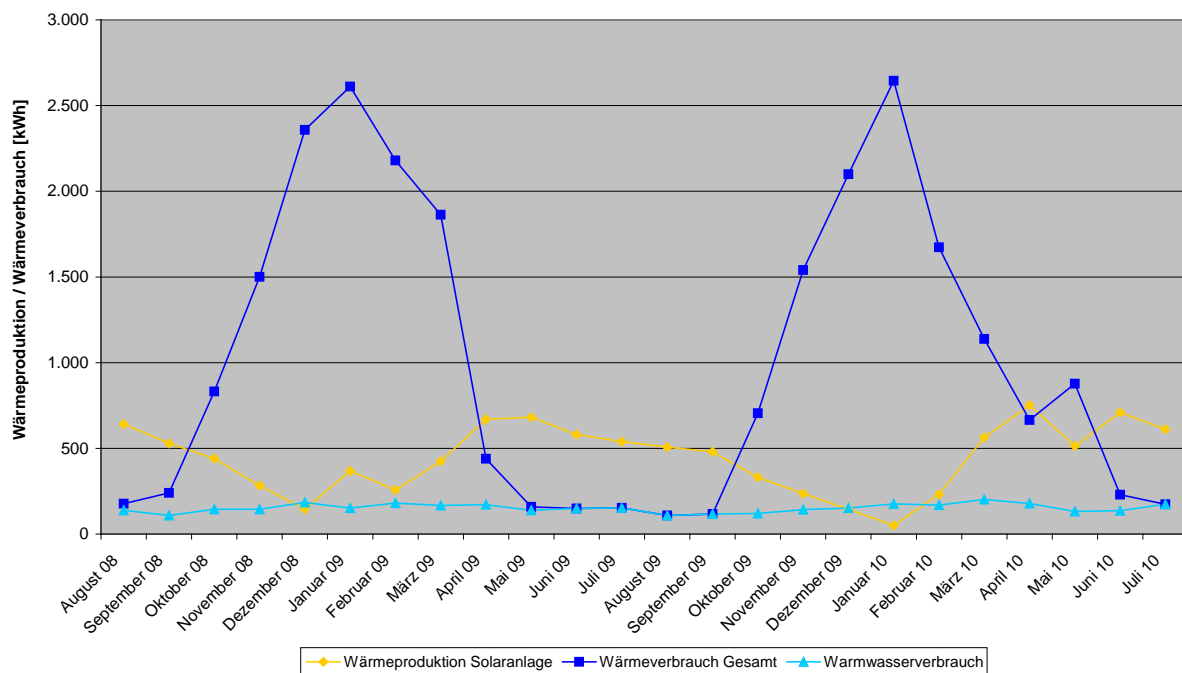


Abbildung 40: Wärmeproduktion Solaranlage vs. Wärmeverbrauch Gesamt und Warmwasserverbrauch der Anlage G

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Pufferspeichergöße: 2.260l, davon 130l im integrierten Warmwasserspeicher; Daten entsprechend der pro Monat produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die Solaranlagengröße reichte für die Warmwasserbereitung leicht aus, außer bis auf drei Monate. Von Mai bis September 2008 beziehungsweise April bis September 2009 reichte sogar der Solaranlagenenertrag für die Raumheizung aus. Der Solaranlagenenertrag lag in den Sommermonaten deutlich über dem Wärmeverbrauch und da die überschüssige Wärmemenge nicht verwendet wurde, erscheint die Solaranlage in dieser Anlagenkonstellation als überdimensioniert.

5.3.3.4 Jahresauswertung

Tabelle 16 zeigt die Jahresauswertung der Anlage G.

Tabelle 16: Jahresauswertung der Anlage G

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; *) Stromverbrauch (Kessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierte Wärmemenge (Pelletkessel und Solarertrag vorhanden); **) verbrauchte Wärmemenge zum Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch und Solaranlagenenertrag); ***) verbrauchte Wärmemenge zum Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets und Solaranlagenenertrag)

	Einheit	Aug. 08- Jul. 09	Aug. 08- Jul. 09	Aug. 08- Jul. 10
Primärenergieeinsatz				
Stromverbrauch	kWh	741	672	1.413
Pelletverbrauch	kg	2.913	2.772	5.685
Primärenergieeinsatz Pellets	kWh	14.041	13.361	27.402
spezif. Stromverbrauch *)	kWh el./MWh th.	43,8	40,9	42,4
Gemessene Wärmemengen				
Solaranlagenenertrag	kWh	5.561	5.132	10.693
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh	11.347	11.281	22.628
Deckungsgrad Solaranlage	%	32,9	31,3	32,1
Deckungsgrad Pelletkessel	%	67,1	68,7	67,9
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	kWh	9.813	9.985	19.798
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	%	77,5	83,4	80,4
Wärmeverbrauch Wandheizung	kWh	1.018	183	1.201
Wärmeverbrauch Wandheizung	%	8,0	1,5	4,9
Gesamtheizwärmeverbrauch	kWh	10.831	10.168	20.999
Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh	1.831	1.804	3.635
Warmwasser Wärmeverbrauch	%	14,5	15,1	14,8
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	63,7	59,8	61,8
spezif. Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	10,8	10,6	10,7
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	74,5	70,4	72,5
Wärmebilanz Pufferspeicher/Heizsystem				
Produzierte Gesamtwärme	kWh	16.908	16.413	33.321
Verbrauchte Wärme	kWh	12.662	11.972	24.634
Wärmeverlust Heizungssystem	kWh	4.246	4.441	8.687
Verluste und Nutzungsgrade				
Kesselnutzungsgrad	%	80,8	84,4	82,6
Nutzungsgrad Pufferspeicher/Heizsystem	%	74,9	72,9	73,9
Verluste Pufferspeicher/Heizsystem	%	25,1	27,1	26,1
Gesamtanlagennutzungsgrad mit Strom **)	%	62,2	62,5	62,4
Gesamtanlagennutzungsgrad ohne Strom ***)	%	64,6	64,7	64,7

Der Stromverbrauch der Anlage G betrug 741kWh (08/09) bzw. 672kWh (09/10). Der Pelletkessel produzierte eine Wärmemenge von 11.347kWh (08/09) bzw. 11.281kWh (09/10) und benötigte dafür 2.913kg (08/09) bzw. 2.772kg (09/10) Pellets. Der Solaranlagenenertrag war 5.561kWh (08/09) bzw. 5.132kWh (09/10), was einen solaren Deckungsgrad von 32,9% (08/09) bzw. 31,3% (09/10) ergab. Der Gesamtwärmeverbrauch betrug 12.662kWh (08/09) bzw. 12.972kWh (09/10), davon wurden 14,5% (08/09) bzw. 15,1% (09/10) für die Warmwasserbereitung benötigt. Der Kessel-Jahresnutzungsgrad von 80,8% (08/09) bzw. 84,4% (09/10) war deutlich geringer als der Kesselwirkungsgrad von 92,6% bei Nennleistung (mit einer Rauchgastemperatur von 160°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8%) und 91,1% bei Teillast (30% Leistung, mit einer Rauchgastemperatur von 100°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 12,4%) laut Herstellerdaten.

Mögliche Ursachen für den schlechten Kessel-Jahresnutzungsgrad:

- erhöhte Rauchgasaustrittstemperaturen
- erhöhte O₂-Gehalte im Rauchgas
- Verluste durch häufiges An- und Abfahren

Die Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades von 80,8% auf 84,4% ist wahrscheinlich auf die Wartung am Ende der Heizsaison 08/09 zurückzuführen. Die Kesselinnendeckel-Anhebung, die irrtümlicherweise eingestellt war, wurde geschlossen. Diese Einstellung leitet einen Teil des Rauchgases direkt in den Kamin und nicht am Wärmetauscher vorbei. Damit wird die Abgastemperatur erhöht, um gegen eine Kaminversottung vorzubeugen. Diese Einstellung war am Aufstellort aber nicht nötig und wurde deswegen rückgängig gemacht.

Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum betrug über 25,1% (08/09) bzw. 27,1% (09/10). Der Wärmeverlust setzte sich aus Pufferspeicher- und Rohrleitungsverlusten zusammen. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit Berücksichtigung des Stromverbrauchs betrug 62,2% (08/09) bzw. 62,5% (09/10) und ohne Stromverbrauch 64,6% (08/09) bzw. 64,7% (09/10).

Die Ursachen für den relativ hohen Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum können sein:

- zu dünne bzw. keine Isolierung der Rohrleitungen
- Pufferspeicherverluste (insbesondere im Sommer durch die Solaranlage)

5.3.4 Anlage I

5.3.4.1 Stundenauswertung

Für die Auswertung der Vor- und Rücklauftemperaturen wurden nur die Temperaturaufzeichnungen von jener Stunde herangezogen, in denen auch Wärme produziert/verbraucht wurde.

Pelletkessel

Bei dieser Anlage war es aufgrund der schlechten Zugänglichkeit zu den Rohrleitungen nicht möglich, einen Wärmemengenzähler beim Pelletkessel zu installieren. Die Vorlauftemperatur wurde auf Basis des Wärmemengenzählers des Radiatorkreises ohne Beimischung und die Rücklauftemperatur auf Basis der beiden Radiatorkreiswärmemengenzähler abgeschätzt. Die mittlere Vorlauftemperatur war $59,6^{\circ}\text{C}$ (10/11) bzw. $59,4^{\circ}\text{C}$ (10/11), die maximale $74,5^{\circ}\text{C}$ und die minimale $24,6^{\circ}\text{C}$, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war $34,5^{\circ}\text{C}$ (09/10) bzw. $31,2^{\circ}\text{C}$ (10/11), die maximale $63,7^{\circ}\text{C}$ und die minimale $17,2^{\circ}\text{C}$ (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von $25,1^{\circ}\text{C}$ (09/10) und $28,2^{\circ}\text{C}$ (10/11). Die mittlere Rücklauftemperatur fällt in der zweiten Heizperiode leicht ab und dadurch erhöhte sich die Temperaturspreizung.

Die Kesselbetriebszeit sowie die Kesselstarts wurden bei der Anlage I mit der Methode 3 berechnet, weil der Volumenstrom für die Berechnung der Kesselbetriebszeit fehlte. Das ist auf den fehlenden Wärmemengenzähler zurückzuführen. Die Gesamtbetriebszeit des Pelletkessels war 3.514h (09/10) bzw. 3.359h (10/11) und die Anzahl der Kesselstarts 423 (09/10) bzw. 376 (10/11).

Die maximale durchschnittliche produzierte Wärmeleistung kann bei dieser Anlage nicht angegeben werden, da keine Messdaten vorhanden waren (fehlender Wärmemengenzähler).

Die Kesselnutzungsgradberechnung wurde auch bei dieser Anlage nicht durchgeführt, da die produzierte Wärme vom Pelletkessel nicht bekannt war.

Der Pelletkessel hatte 1.213h (09/10) bzw. 1.161h (10/11) Volllaststunden und eine relative Kessellast von 0,33 (09/10) bzw. 0,35 (10/11).

Radiatoren Heizkreis 1

Die mittlere Vorlauftemperatur war 43°C , die maximale Vorlauftemperatur $74,8^{\circ}\text{C}$ und die minimale $19,2^{\circ}\text{C}$, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 34°C , die maximale $65,8^{\circ}\text{C}$ und die minimale $17,9^{\circ}\text{C}$ (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 9°C . Durch absenken der Rücklauftemperatur könnte die Temperaturspreizung erhöht und dadurch Pumpkosten eingespart werden.

Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf im Winter betrug 12kW (08/09) bzw. 11kW (09/10) und im Sommer maximal 5kW (09/10) bzw. 3kW (10/11).

Radiatoren Heizkreis 2

Die mittlere Vorlauftemperatur war 59,6°C, die maximale Vorlauftemperatur 74,5°C und die minimale 24,6°C, wobei die Minimaltemperatur auf einen Messzeitpunkt außerhalb der Kesselbetriebszeit (Abkühlphase) hindeutet. Die mittlere Rücklauftemperatur war 33°C, die maximale 63,7°C und die minimale 17,5°C (vermutlich Messwert während der Abkühlphase). Auf Basis der mittleren Vor- und Rücklauftemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 26,6°C.

In beiden Heizperioden war im Winter der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsbedarf 4kW und im Sommer maximal 1kW.

Warmwasser

Bei dieser Anlage erfolgt die Warmwasserbereitung mit einem separaten Elektrowärmespeicher. Die verbrauchte Wärme für die Warmwasserbereitung betrug 13,2% (09/10) bzw. 10,9% (10/11) des Gesamtwärmeverbrauchs. Die mittlere Warmwassertemperatur war 53°C, die maximale 71,4°C und die minimale 22,2°C, wobei die Minimaltemperatur vermutlich bei stehendem Betrieb gemessen wurde (Abkühlphase). Die mittlere Kaltwassertemperatur war 16,5°C, die maximale 24,5°C und die minimale 8,7°C. Auf Basis der mittleren Warm- und Kaltwassertemperatur ergab sich eine mittlere Temperaturspreizung von 36,5°C.

In beiden Heizperioden war im Winter der maximale durchschnittliche Warmwasserleistungsbedarf 9kW und im Sommer maximal 3kW.

Stromverbrauch für Heizung

Der minimale durchschnittliche Stromverbrauch war 10Wh in beiden Heizperioden und maximal 350Wh (08/09) bzw. 180Wh (09/10).

Stromverbrauch für Warmwasser

Der maximale durchschnittliche Stromverbrauch für die Warmwasserbereitung war 730Wh in beiden Heizperioden.

Brennstofffördermenge des Schneckenfördersystem

Bei dieser Anlage fördert ein Schneckenfördersystem den Brennstoff zum Pelletkessel. Die minimale Brennstoffmenge war aufgrund der geringen Brennstoffwaagenauflösung 2kg und maximal 8kg in beiden Heizperioden. Das Schneckenfördersystem fördert je nach Bedarf (just- in- time) den Brennstoff zum Brenner.

Außentemperatur

Die minimale Temperatur im Winter war laut Aufzeichnungen -6°C und maximale Temperatur im Sommer 31,1°C. Die Durchschnittstemperatur über ein Jahr lag bei 12,6°C. Im Winter schwankten die Temperaturen im Bereich von -6 bis 10°C. In den Übergangszeiten zwischen 10 und 20°C und im Sommer von 20°C bis 31,1°C.

Verteilung

Bei diesem Punkt wurden keine Aussagen gemacht, weil nur die Verbraucherdaten vom Wärmemengenzähler vorhanden waren.

Anlagenbetriebsverhalten

Beim Anlagenbetriebsverhalten wurde die Heizperiode 10/11 behandelt, da die Anlage effizienter betrieben wurde (höherer Nutzungsgrad). Das Betriebsverhalten der Anlage I ist in Abbildung 41 und Abbildung 42 zu sehen. Der Pelletkessel war praktisch je nach Bedarf in Betrieb, ohne Nachtabsenkung. In den Sommermonaten war der Pelletkessel außer Betrieb. In der Übergangszeit nehmen die Betriebszeiten mit abnehmender Außentemperatur zu und im Winter war der Pelletkessel fast durchgehend in Betrieb (entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Verbraucherprofils), die Leistungsregelung erfolgt entsprechend des Lastprofils.

Bei der Darstellung des Betriebsverhaltens in den nachfolgenden Abbildungen ist zu beachten, dass diese auf Basis der Wärmemenge pro Stunde, die vom Wärmemengenzähler aufgezeichnet wurde erstellt wurde. Die Werte stellen somit die durchschnittliche Leistung (kWh/h) in der jeweiligen Stunde dar und geben somit nur Anhaltspunkte auf die tatsächliche Spitzenlast.

Abbildung 41 zeigt das Betriebsverhalten der Anlage I in der kältesten Winterwoche.

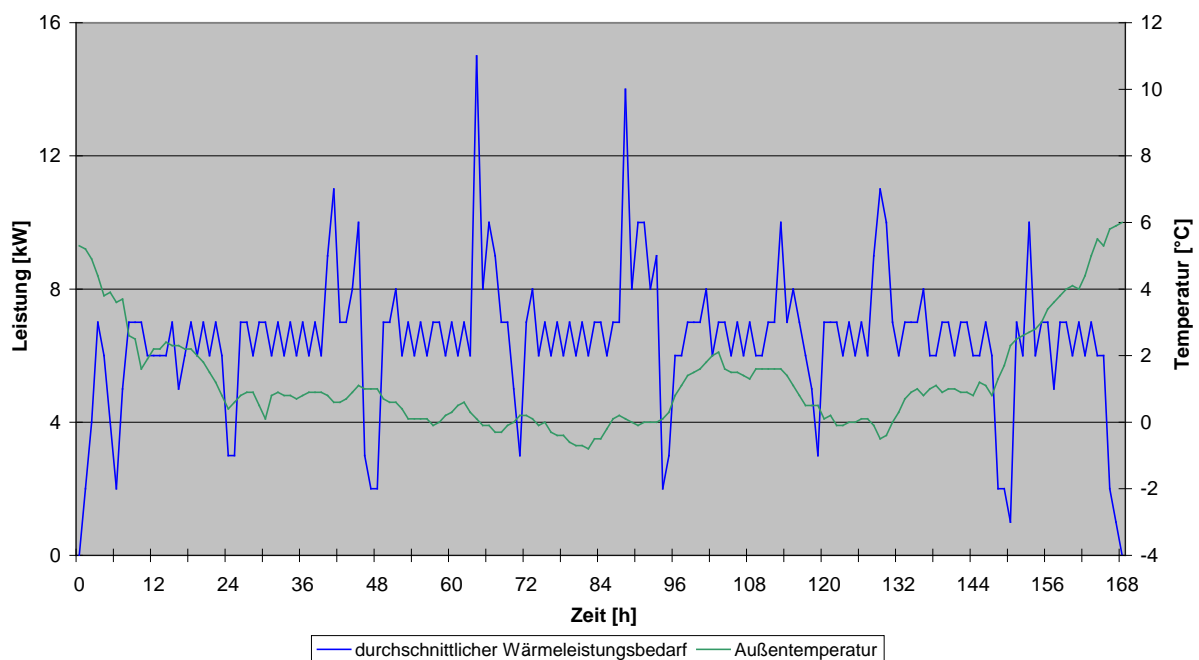


Abbildung 41: Betriebsverhalten der Anlage I in der kältesten Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Elektrospeicher mit 300l; Daten entsprechend der pro Stunde produzierten bzw. verbrauchten Wärmemenge; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die produzierte durchschnittliche Wärmeleistung des Kessels wird nicht dargestellt, weil keine Betriebsdaten vorhanden waren. Der Kessel war in der kältesten Woche durchgehend in Betrieb. Aber vermutlich schaltete sich der Kessel einmal pro Tag kurz (weniger als einen

Stunde) aus, was am durchschnittlichen Wärmeleistungsbedarf zu sehen ist. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch in der kältesten Winterwoche lag bei 15kW und der mittlere zwischen 6 und 7kW. Achtung, der Kessel muss außer dem Wärmeverbrauch auch noch den Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum abdecken und deshalb wurde der Kessel wahrscheinlich zu klein dimensioniert. Die minimale Außentemperatur lag bei $-0,7^{\circ}\text{C}$ und die maximale bei 6°C .

Das Betriebsverhalten der Anlage I in einer durchschnittlichen Winterwoche wird in Abbildung 42 dargestellt.

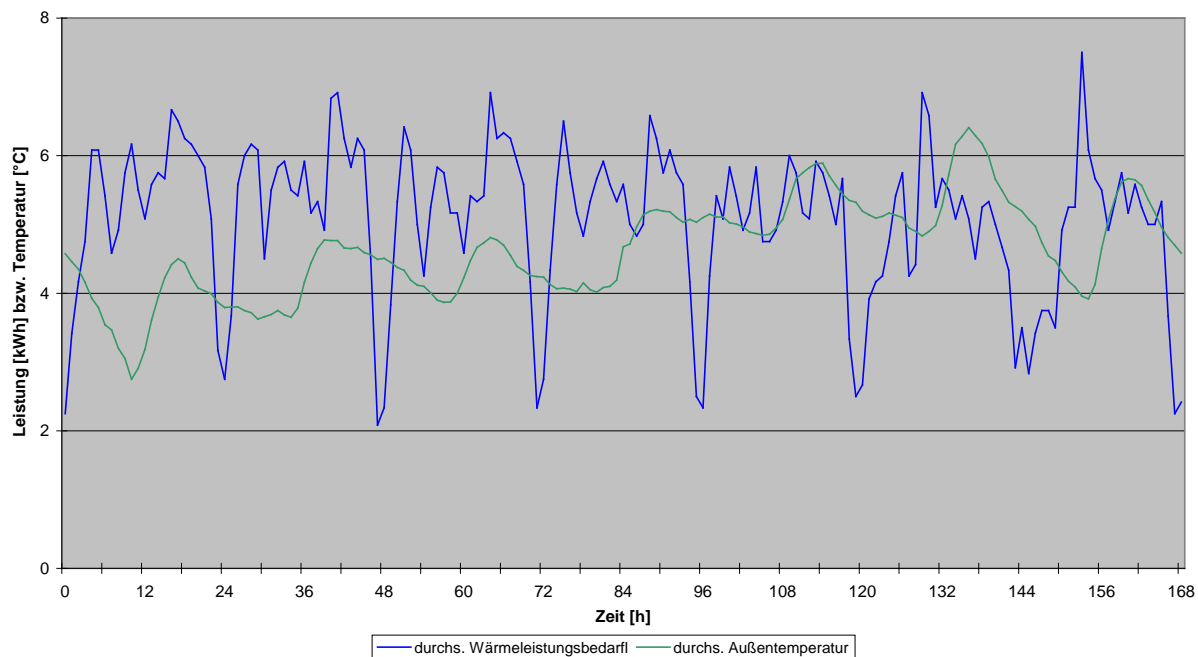


Abbildung 42: Betriebsverhalten der Anlage I in einer durchschnittlichen Winterwoche

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Elektrospeicher mit 300l; Daten entsprechend der pro Stunde verbrauchten Wärmemengen; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

Die produzierte durchschnittliche Wärmeleistung des Kessels wurde aufgrund fehlender Betriebsdaten nicht dargestellt. Der maximale durchschnittliche Wärmeleistungsverbrauch war 7,5kW und der mittlere lag zwischen 5 und 6kW. Die minimale durchschnittliche Außentemperatur lag bei $2,7^{\circ}\text{C}$ und die maximale bei $6,5^{\circ}\text{C}$.

5.3.4.2 Wochenauswertung

In Tabelle 17 sind die Bestimmtheitsmaße, die Korrelationskoeffizienten und die Erwartungen von den Korrelationen der Anlage I zu sehen. Die Korrelationskoeffizienten auf Basis des Kesselnutzungsgrades verhalten sich ähnlich wie bei den anderen drei Anlagen. Der Korrelationskoeffizient der einzelnen Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades ist auch zwischen den beiden Heizperioden unterschiedlich. Die möglichen Ursachen beziehungsweise Erklärungen warum keine Zusammenhänge zwischen Kesselnutzungsgrad und den Einflussgrößen (relative Kessellast pro Woche, Kesselbetriebszeit pro Woche, Kesselstarts pro Woche, produzierte Wärmemenge pro Start) zu sehen sind, wurde in Kapitel 5.3.1.2 erläutert.

Die Korrelationen auf Basis des Stromverbrauchs pro Woche mit den Einflussgrößen Kesselbetriebszeit pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start zeigen einen höheren Korrelationskoeffizienten als die Korrelationen auf Basis des Kesselnutzungsgrades und die Unterschiede zwischen den Heizperioden sind geringer.

Zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche besteht für beide Heizperioden ein sehr hoher linearer Zusammenhang. Im Gegensatz zu den übrigen Anlagen sind die Abstände zwischen Stopp und erneuten Start meist lange genug, sodass stets das Zündgebläse bei Neustart in Betrieb ist. Somit bildet der Stromverbrauch des Zündgebläses den Sockelbetrag und der lineare Anstieg mit zunehmender Kesselbetriebszeit ist mit dem Stromverbrauch der übrigen Verbraucher (Pumpen, Regelventile, Brennstoffförderung, Kesselbetrieb) zu erklären (siehe Abbildung 43 für Heizperiode 09/10). Zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselstarts pro Woche ist hingegen nur ein sehr geringer Zusammenhang zu erkennen. Der Grund liegt vermutlich daran, dass die Anlage I ein Heizungssystem ohne Pufferspeicher ist und die Wärmebereitstellung je nach Bedarf erfolgt. In den Wintermonaten startet der Pelletkessel höchstens einmal pro Tag und ist dann durchgehend in Betrieb (hoher Stromverbrauch durch die Pumpen). In der Übergangszeit startet der Pelletkessel jedoch drei bis viermal pro Tag für kurze Zeit (hoher Stromverbrauch durch Zündgebläse). Somit ist kein Zusammenhang zwischen beiden Parametern zu erwarten. Zwischen Stromverbrauch pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start besteht zwar ein sehr hoher logarithmischer Zusammenhang, allerdings ist das beobachtete Verhalten der beiden Parameter nicht plausibel zu erklären (siehe Abbildung 44 für Heizperiode 09/10).

Tabelle 17: Bestimmtheitsmaße, Korrelationskoeffizienten und Einstufungen von den Korrelationen der Anlage I

Erläuterungen: *) linearer Zusammenhang; **) logarithmischer Zusammenhang; Heizperioden 09/10 und 10/11; Kesselnutzungsgrad, Stromverbrauch, relative Kessellast, Kesselbetriebszeit, Kesselstarts und produzierte Wärmemenge pro Start sind jeweils pro Woche; KorKorrelation

	Bestimmtheitsmaß R ²		Korrelationskoeffizient r		Einstufung	
	09/10	10/11	09/10	10/11	09/10	10/11
Kesselnutzungsgrad vs. relative Kessellast *)	0,5463	0,7391	hohe Kor.	0,1728	0,4157	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselbetriebszeit **)	0,6130	0,7829	hohe Kor.	0,4397	0,6631	mittlere Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. Kesselstarts *)	0,2525	-0,5025	mittlere Kor.	0,1502	-0,3876	geringe Kor.
Kesselnutzungsgrad vs. produzierte Wärmemenge pro Start **)	0,4694	0,6851	mittlere Kor.	0,3012	0,5488	mittlere Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselbetriebszeit *)	0,9770	0,9884	sehr hohe Kor.	0,9604	0,9800	sehr hohe Kor.
Stromverbrauch vs. Kesselstarts *)	0,0010	-0,0316	sehr geringe Kor.	0,0862	-0,2936	geringe Kor.
Stromverbrauch vs. produzierte Wärmemenge pro Start **)	0,8530	0,9236	sehr hohe Kor.	0,7673	0,8760	hohe Kor.

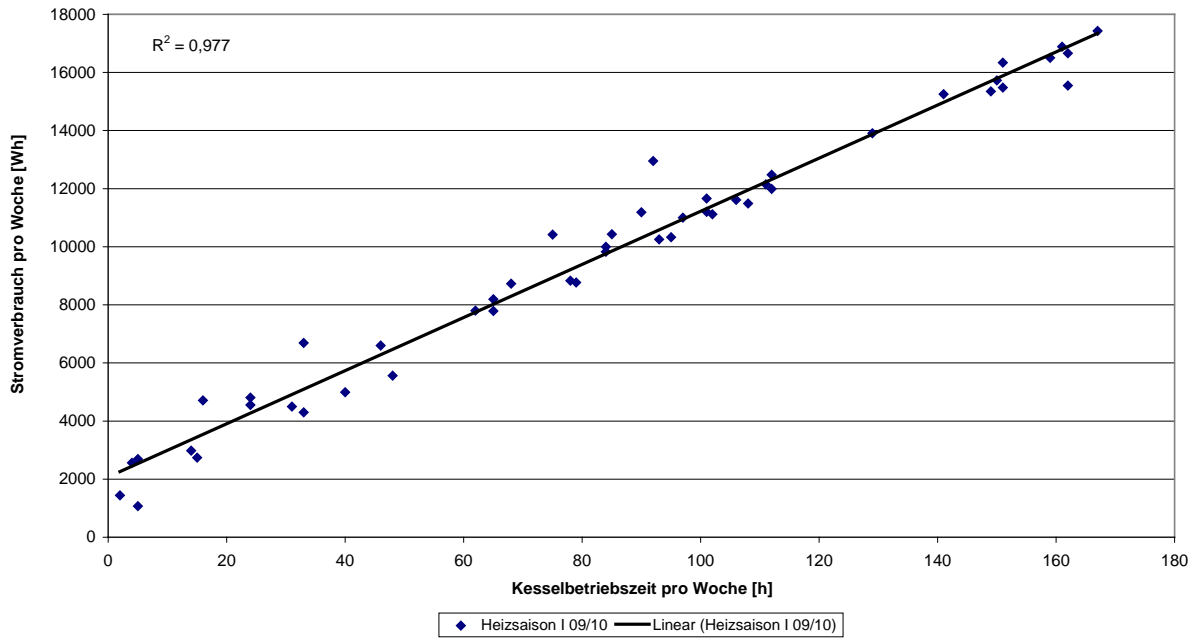


Abbildung 43: Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und Kesselbetriebszeit pro Woche

Erläuterungen: Logarithmischer Zusammenhang; Basis Feldmessdaten

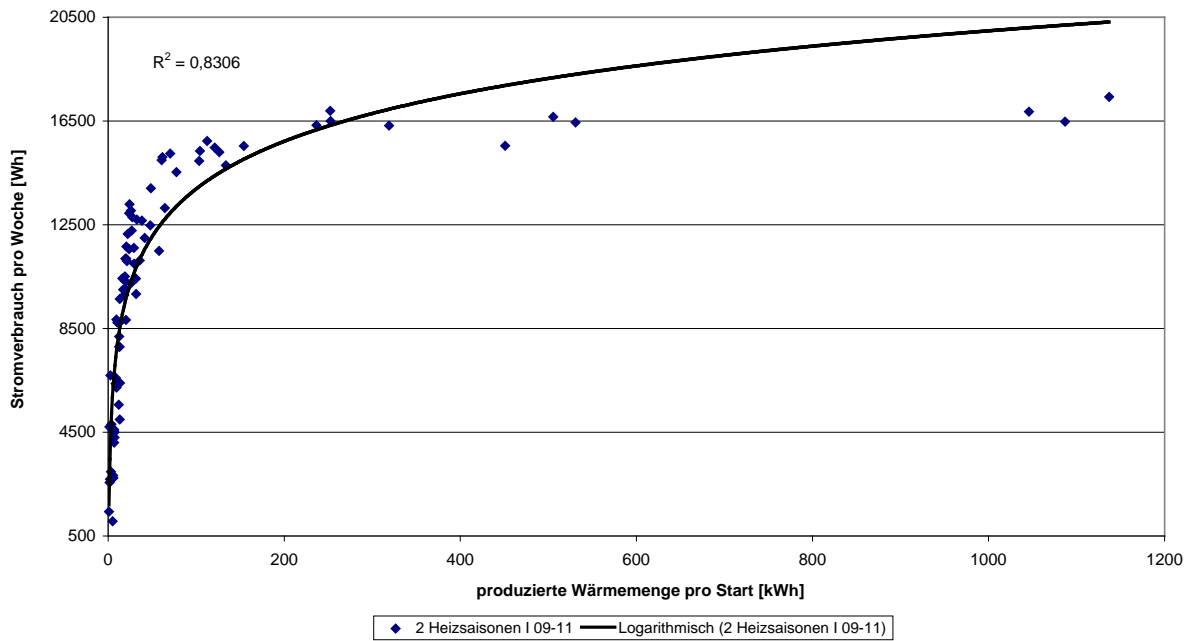


Abbildung 44: Korrelation zwischen Stromverbrauch pro Woche und produzierte Wärmemenge pro Start

Erläuterungen: Logarithmischer Zusammenhang; Basis Feldmessdaten

5.3.4.3 Monatsauswertung

Außentemperatur

Die minimale durchschnittliche Außentemperatur war 1,6°C im Jänner 2010 und die maximale 21°C im Juli 2010.

Energiebilanz

Tabelle 18 zeigt die Monatsenergiebilanz der Anlage I.

Tabelle 18: Monatsauswertung der Anlage I

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; Bei den lila markierten Kästen entsprach der Fehler 10% oder mehr des Pelletverbrauchs innerhalb des betrachteten Zeitraums und deshalb wurde der Kesselnutzungsgrad nicht berechnet. Die genauere Beschreibung unter Kapitel 4.3.1.2; *) Die vom Pelletkessel produzierte Wärmemenge konnte nicht ermittelt werden, da kein Wärmemengenzähler im Heizkreis des Pelletkessels installiert war; **) Der Kesselnutzungsgrad konnte aufgrund der fehlenden Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden

Zeitraum	Stromzähler	Waage		Wärmebilanz (hydr.)							Verluste & Nutzungsgrade				Deckungsbeitrag	
	Strom Kessel inkl. Hydr.	Strom Warmwasser	Pelletverbrauch	Pelletkessel	Radiatoren HK 1	Radiatoren HK 2	Heizenergie	Warmwasser	Produzierte Wärme	Verbrauchte Wärme	Kesselnutzungsgrad	Gesamtnutzungsgrad mit Stromverbrauch	Gesamtnutzungsgrad ohne Stromverbrauch	Warmwasseraufbereitungs-wirkungsgrad	Solaranlage	Pelletkessel
	kWh	kWh	kg	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	%	%	%	%	%
August 09	2,5	184,6	0	*)	0	0	0	105	*)	0	**)			56,9	0,0	100,0
September 09	2,8	269,7	5	*)	0	6	6	208	*)	6	**)	22,3	24,9	77,1	0,0	100,0
Oktober 09	40,7	314,4	361	*)	901	279	1.180	248	*)	1.180	**)	66,4	67,9	78,9	0,0	100,0
November 09	44,7	340,9	518	*)	1.430	357	1.787	286	*)	1.787	**)	70,4	71,7	83,9	0,0	100,0
Dezember 09	64,7	305,3	979	*)	2.794	730	3.524	238	*)	3.524	**)	73,8	74,8	78,0	0,0	100,0
Januar 10	72,7	352,7	1.246	*)	3.596	843	4.439	296	*)	4.439	**)	73,2	74,1	83,9	0,0	100,0
Februar 10	60,9	330,6	896	*)	2.522	648	3.170	264	*)	3.170	**)	72,5	73,5	79,9	0,0	100,0
März 10	52,6	339,9	711	*)	1.986	470	2.456	272	*)	2.456	**)	70,7	71,8	80,0	0,0	100,0
April 10	34,9	334,6	310	*)	778	170	948	274	*)	948	**)	62,1	63,6	81,9	0,0	100,0
Mai 10	24,2	316,6	185	*)	477	89	566	240	*)	566	**)	61,9	63,6	75,8	0,0	100,0
Juni 10	0,8	284,1	0	*)	0	0	0	209	*)	0	**)			73,6	0,0	100,0
Juli 10	6,1	180,3	0	*)	0	0	0	100	*)	0	**)			55,5	0,0	100,0
August 10	1,9	143,6	0	*)	0	0	0	55	*)	0	**)			38,3	0,0	100,0
September 10	17,8	261,0	113	*)	261	52	313	179	*)	313	**)	55,7	57,6	68,6	0,0	100,0
Oktober 10	49,9	241,5	498	*)	1.233	353	1.586	158	*)	1.586	**)	64,8	66,2	65,4	0,0	100,0
November 10	53,8	273,3	637	*)	1.790	442	2.232	198	*)	2.232	**)	71,6	72,8	72,5	0,0	100,0
Dezember 10	71,6	282,4	1.214	*)	3.509	955	4.464	194	*)	4.464	**)	75,5	76,4	68,7	0,0	100,0
Januar 11	65,4	331,3	1.008	*)	2.879	660	3.539	253	*)	3.539	**)	72,0	73,0	76,4	0,0	100,0
Februar 11	56,2	262,3	775	*)	2.377	562	2.939	188	*)	2.939	**)	77,7	78,8	71,7	0,0	100,0
März 11	49,8	282,9	596	*)	1.579	364	1.943	202	*)	1.943	**)	66,6	67,8	71,4	0,0	100,0
April 11	12,5	272,2	88	*)	204	38	242	192	*)	242	**)	55,5	57,2	70,5	0,0	100,0
Mai 11	5,3	282,5	10	*)	43	2	45	200	*)	45	**)	84,2	93,5	70,8	0,0	100,0
Juni 11	5,1	234,5	0	*)	0	0	0	150	*)	0	**)			64,0	0,0	100,0
Juli 11	5,8	224,8	0	*)	0	0	0	137	*)	0	**)			61,0	0,0	100,0

Der maximale Stromverbrauch für die Heizung war 72,7kWh im Jänner, da dort die Heizungsanlage vermutlich am längsten in Betrieb war. Im Juni 2010 wurde für die Heizung ein minimaler Stromverbrauch von 0,5kWh benötigt. Der maximale Stromverbrauch für die Warmwasserbereitung war 352,7kWh im Jänner 2010 und minimal 180,3kWh im Juli 2010. Das Pelletverbrauch verhielt sich ähnlich wie der Stromverbrauch der Heizung. Hier wurden maximal 4.464kg im Dezember 2010 und minimal 5kg (September 2009) Pellets verbraucht. Der Kesselnutzungsgrad konnte aufgrund der fehlenden Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden. Die Erzeugerdaten (produzierte Wärmemenge vom Pelletkessel) und der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum wurden nicht behandelt, weil nur Verbraucherdaten vorhanden waren. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Verbraucherdaten behandelt.

In Abbildung 45 ist der Wärmeverbrauch pro Monat der Anlage I zu sehen.

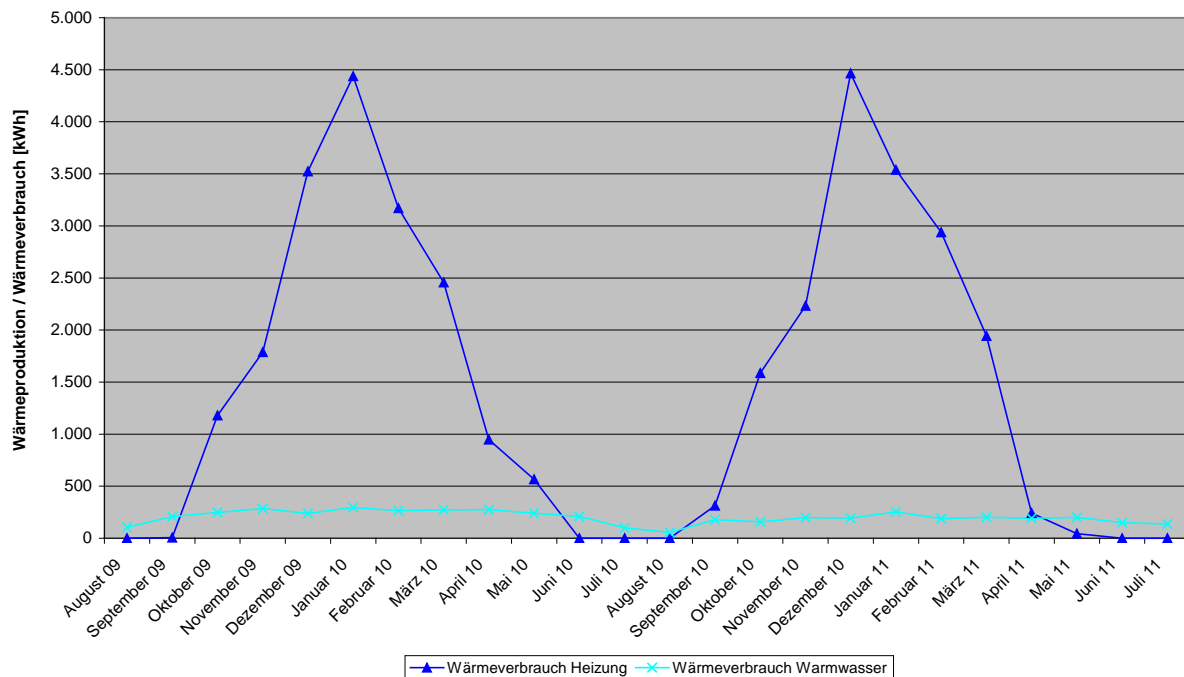


Abbildung 45: Wärmeverbrauch der Anlage I

Erläuterungen: Kesselleistung: 15kW; Elektrospeicher mit 300l; Daten entsprechend der pro Monat verbrauchten Wärmemengen; Basis Feldmessdaten Basis Feldmessdaten

In den drei Sommermonaten (Juni bis August) war der Pelletkessel außer Betrieb. Das Warmwasser wurde mit einem separaten Elektrowärmespeicher aufbereitet. Die maximale verbrauchte Heizwärmemenge war 4.464kWh im Dezember 2010 und die minimale 6kWh im September 2009. Die verbrauchte Warmwasserwärmemenge lag zwischen 296kWh im Jänner 2010 und 55kWh im August 2010 (Urlaubsmonat).

5.3.4.4 Jahresauswertung

Tabelle 19 zeigt die Jahresauswertung der Anlage I.

Tabelle 19: Jahresauswertung der Anlage I

Erläuterungen: Basis Feldmessdaten; *) Stromverbrauch (Kessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierte Wärmemenge (Pelletkessel und Solarertrag vorhanden); **) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch und Solaranlagenenertrag); ***) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets und Solaranlagenenertrag); ****) Die vom Pelletkessel produzierte Wärmemenge konnte nicht ermittelt werden, da kein Wärmemengenzähler im Heizkreis des Pelletkessels installiert war; *****) Der Kesselnutzungsgrad konnte aufgrund der fehlenden Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden; *****) der spezifische Stromverbrauch konnte aufgrund der fehlenden Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden

	Einheit	Aug. 09- Jul. 10	Aug. 10- Jul. 11	Aug. 09- Jul. 11
Primärenergieeinsatz				
Stromverbrauch	kWh	408	395	803
Pelletverbrauch	kg	5.189	4.921	10.110
Primärenergieeinsatz Pellets	kWh	24.964	23.675	48.639
spezif. Stromverbrauch *)	kWh el./MWh th.	*****)	*****)	*****)
Gemessene Wärmemengen				
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh	0	0	0
Deckungsgrad Pelletkessel	%	0,0	0,0	0,0
Wärmeverbrauch Radiator HK 1	kWh	14.484	13.875	28.359
Wärmeverbrauch Radiator HK 1	%	69,6	71,5	70,5
Wärmeverbrauch Radiator HK 2	kWh	3.592	3.428	7.020
Wärmeverbrauch Radiator HK 2	%	17,3	17,7	17,5
Gesamtheizwärmeverbrauch	kWh	18.076	17.303	35.379
Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh	2.740	2.106	4.846
Warmwasser Wärmeverbrauch	%	13,2	10,9	12,0
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	144,6	138,4	141,5
spezif. Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	21,9	16,8	19,4
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	166,5	155,3	160,9
Wärmebilanz Heizsystem				
Produzierte Gesamtwärme	kWh	*****)	*****)	*****)
Verbrauchte Wärme	kWh	18.076	17.303	35.379
Nutzungsgrade				
Kesselnutzungsgrad	%	*****)	*****)	*****)
Gesamtanlagennutzungsgrad mit Strom **)	%	71,2	71,9	71,6
Gesamtanlagennutzungsgrad ohne Strom ***)	%	72,4	73,1	72,7

Der Stromverbrauch der Anlage I für die Heizung betrug 408kWh (09/10) bzw. 395kWh (10/11) und von der Warmwasserbereitung 3.554kWh (09/10) bzw. 3.092kWh (10/11). Die vom Pelletkessel produzierte Wärmemenge konnte nicht ermittelt werden, da kein Wärmemengenzähler im Heizkreis des Pelletkessels installiert war. Für die Produktion der Heizwärmemenge wurden 5.189kg (09/10) bzw. 4.921kg (10/11) Pellets verbraucht. Der Gesamtheizwärmeverbrauch betrug 18.072kWh (09/10) bzw. 17.303kWh (10/11) und 2.740kWh (09/10) bzw. 2.106kWh (10/11) für die Warmwasserbereitung.

Der Kessel-Jahresnutzungsgrad konnte aufgrund der fehlenden Wärmemengendatenaufzeichnung (es war kein Wärmemengenzähler im Heizkreis des Pelletkessels installiert) vom Pelletkessel nicht ermittelt werden. Da der Gesamtnutzungsgrad

der Anlage ohne Stromverbrauch 72,4% (08/09) bzw. 73,1% (09/10) betrug, wird aufgrund der Tatsache, dass die Verluste des Heizungssystems aufgrund fehlender Solaranlage und fehlendem Pufferspeicher deutlich geringer als bei den übrigen Anlagen anzunehmen sind davon ausgegangen, dass der Kessel-Jahresnutzungsgrad höchstens bei 80% liegt. Somit ist der angenommene Kessel-Jahresnutzungsgrad noch immer deutlich geringer als der Kesselwirkungsgrad von 92,6% bei Nennleistung (mit einer Rauchgastemperatur von 160°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8%) und 91,1% bei Teillast (30% Leistung, mit einer Rauchgastemperatur von 100°C und einen O₂-Gehalt im Rauchgas von 12,4%) laut Herstellerdaten.

Mögliche Ursachen für den schlechten Kessel-Jahresnutzungsgrad:

- erhöhte Rauchgasaustrittstemperaturen
- erhöhte O₂-Gehalte im Rauchgas
- Verluste durch häufiges An- und Abfahren

Der Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum wurde nicht angegeben, weil die Betriebsdaten fehlten. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit Berücksichtigung des Stromverbrauchs betrug 71,2% (09/10) bzw. 71,9% (10/11) und ohne Stromverbrauch 72,4% (09/10) bzw. 73,1% (10/11).

5.4 Anlagenvergleich

Die wichtigsten Kenngrößen beziehungsweise Daten der vier Heizungsanlagen sind in Tabelle 20 zu sehen. Es wurde nur jeweils die Heizperiode mit dem höchsten Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels für den Anlagenvergleich herangezogen.

Der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels der Anlage G (84,4%) war am größten, gefolgt von Anlage B (77,9%) und Anlage A (73,1%). Bei Anlage I konnte keine Aussage über den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels gemacht werden, aufgrund fehlender Betriebsdaten (es war kein Wärmemengenzähler im Kreis des Pelletkessel installiert worden). Die Anlagen mit Solaranlage hatten einen höheren Kessel-Jahresnutzungsgrad im Vergleich zu den Anlagen ohne Solaranlage. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich bei den geringeren Kesselstarts (außer Betrieb im Sommer) der Kesselabschaltung in den Sommermonaten. Bei einem Heizungssystem mit Solaranlage können die Kesselverluste an die Umgebung durch die insgesamt kurzen Betriebszeiten im Sommer deutlich verringert und die effektive Energieausnutzung des Pelletkessels gesteigert werden. Bei einer großen Solaranlage sowie bei Anlage G, reicht der Solaranlagenenertrag in den Übergangszeiten auch für die Abdeckung des Gesamtwärmeverbrauchs aus.

Der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage war jedoch bei der Anlage I im Vergleich zu den Anlagen mit Pufferspeicher am größten. Die Gründe sind einerseits die geringeren Verluste vom hydraulischen System im Heizraum. Andererseits sind die Pelletkessel bei den Anlagen mit Pufferspeicher zu groß dimensioniert. Der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage von Anlage A (mit Pufferspeicher) muss normal größer sein im Vergleich zu den Anlagen B und G (mit Pufferspeicher und Solaranlage), aufgrund der geringeren Verluste vom hydraulischen System im Heizraum (Rohrleitungen von Solaranlage entfallen und Pufferspeichertemperatur im Sommer ist geringer). Aber aufgrund der schlechten Auslastung des Pelletkessels (Möglichkeit der Pufferspeicherladung wurde nicht genutzt) hat die Anlage A den geringsten Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage, aufgrund des kleineren Kessel-Jahresnutzungsgrad.

Den niedrigsten spezifischen Gesamtwärmeverbrauch hatte die Anlage B mit $50,5\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$. Das ist ein Zeichen für ein gut isoliertes Gebäude, im Gegensatz zur Anlage I mit $155,3\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$. Der spezifische Heizwärmeverbrauch und spezifische Warmwasserwärmeverbrauch verhält sich ähnlich zum spezifischen Gesamtwärmeverbrauch. Bei den Anlagen mit Solaranlage war der spezifische Stromverbrauch fast doppelt so groß wie bei den Anlagen ohne Solaranlage, aufgrund einer zusätzlichen Pumpe.

Die Anlage B und G zeigten bezüglich Wärmeproduktion (jeweils etwa 16.000kWh/a) und Wärmeverbrauch ein ähnliches Verhalten (jeweils etwa 12.000kWh/a). Der Unterschied bei den beiden Anlagen war, dass der solare Deckungsgrad der Anlage G aufgrund der größeren Solarkollektorfläche mit über 30% deutlich höher war als bei Anlage B mit ca. 20%. Der Pelletkessel der Anlage A produzierte ca. 22.000kWh , der Wärmeverbrauch lag bei ca. 17.600kWh . Der Gesamtwärmeverbrauch von Anlage I lag in einem ähnlichen Größenbereich wie jener von Anlage A (ca. 17.300kWh/a). Bezüglich Wärmeproduktion konnte bei der Anlage I aufgrund fehlender Betriebsdaten keine Aussagen gemacht werden. Bei den Anlagen A, B und I betrug der Anteil der Warmwasserbereitung am Gesamtwärmeverbrauch in der üblichen Größenordnung von 8,9 bis 10,9% im Vergleich zur Anlage G mit 15,1%.

Den größten Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum hatte die Anlage G (27,1%), gefolgt von B (24,1%) und A (19,7%). Bei Anlage I konnten keine Aussagen über

den Wärmeverlust des hydraulischen Systems im Heizraum gemacht werden, aufgrund der fehlenden Betriebsdaten. Die Ursache für den hohen Wärmeverlust von Anlage A konnte nicht genau erklärt werden. Laut einem Gespräch [11] mit Herrn Schraube, war bei dieser Anlage der Pelletkessel in einem separaten Gebäude mit offenem Fernstern untergebracht, was die großen Verluste erklären könnte. Bei den Anlagen mit Solaranlage lassen sich die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum durch die Solaranlage erklären. Die Gründe könnten sein:

- zu dünne bzw. keine Isolierung der Rohrleitungen
- hohe Speichertemperaturen im Sommer
- geringer Wärmebedarf im Sommer bei höchster Wärmeproduktion der Solaranlage
- Kühlung des Pufferspeichers über die Solaranlage in der Nacht

Die durchschnittliche Kesselbetriebszeit pro Start war bei den Anlagen A und B ca. 1,4h. Die relativ kurze Kesselbetriebszeit kann eine Ursache für den schlechteren Kessel-Jahresnutzungsgrad im Vergleich zu Anlage G sein, die ebenfalls mit einem Pufferspeicher ausgestattet war, aber deutlich höhere Kesselbetriebszeiten pro Start (3,6h) aufweist. Die geringe durchschnittliche Kesselbetriebszeit und die häufigen Kesselstarts pro Woche sind auch eine mögliche Erklärung für das schlechte Kesselbetriebsverhalten (Stop-and-Go-Betrieb) und die schlechte Pufferspeicherausnutzung. Bei der Anlage G fährt der Pelletkessel im Winter mit einer konstanten Kesselleistung (12 bis 14kW) und lädt den Pufferspeicher. Allerdings war ein genaues Regelungskriterium nicht erkennbar, da der Pelletkessel teilweise nur den aktuell benötigten Wärmeverbrauch abdeckte und danach abschaltete ohne den Pufferspeicher zu laden. Durch das Pufferspeicherladen ergeben sich längere Kesselbetriebszeiten und weniger Kesselstarts und das zumindest hatte teilweise wiederum positive Auswirkungen auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad. Bei der Anlage I lag die durchschnittliche Kesselbetriebszeit pro Start bei 8,9h und die durchschnittlichen Kesselstarts pro Woche bei 11,8, weil der Pelletkessel in den Wintertagen fast durchgehend in Betrieb war.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass anhand der Auswertung der Betriebsdaten zwar mögliche Ursachen für den niedrigen beziehungsweise hohen Kessel-Jahresnutzungsgrad der untersuchten Anlagen identifiziert werden konnten, aber der quantitative Einfluss der einzelnen Parameter auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad nicht ermittelt werden konnte. Dies ist damit zu begründen, da einerseits das Zeitintervall zwischen den Aufzeichnungen zu groß war und deshalb konnten die Kesselbetriebszeit sowie die damit verbundenen Kenngrößen wie relative Kessellast und Kesselstarts nicht ausreichend exakt ermittelt werden. Weiters ergab sich eine Einschränkung bezüglich Genauigkeit aus der limitierten Auflösung der Wärmemengenzähler und der Brennstoffwaage. Somit ist ein Großteil der Parameter, die untersucht wurden, mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, was die Auswertung negativ beeinflusst.

Aus diesem Grund wurden die untersuchten Heizungssysteme mittels TRNSYS nachsimuliert, um gezielt die Relevanz einzelner Einflussgrößen auf den Jahresnutzungsgrad mittels Sensitivitätsanalyse zu ermitteln (siehe für nähere Details Kapitel 5.6.1).

Tabelle 20: Anlagenvergleich auf Basis Messdaten

Erläuterungen: *) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch und Solaranlagenenertrag); **) verbrauchter Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets und Solaranlagenenertrag); ***) verbrauchter Strom (Kessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierte Wärmemenge (Pelletkessel und Solarertrag, falls vorhanden); ****) die produzierte Wärmemenge vom Pelletkessel konnte nicht ermittelt werden, da kein Pelletkessel-Wärmemengenzähler installiert war; *****) Kesselnutzungsgrad konnte aufgrund der fehlenden produzierten Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden; *****) der spezifische Stromverbrauch konnte aufgrund der fehlenden produzierten Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden; *****) der Wärmeverlust des Heizungssystems konnte aufgrund der fehlenden produzierten Wärmemengendatenaufzeichnung vom Pelletkessel nicht ermittelt werden;

	Einheit	Anlage A	Anlage B	Anlage G	Anlage I
Kenngößen					
Jahresnutzungsgrad Pelletkessel	%	73,1	77,9	84,4	*****)
Jahresnutzungsgrad Gesamtanlage mit Strom*)	%	57,7	60,0	62,5	71,9
Jahresnutzungsgrad Gesamtanlage ohne Strom**)	%	58,7	61,8	64,7	73,1
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	103,6	50,5	70,4	155,3
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	94,4	45,7	59,8	138,4
spezif. Gesamt Warmwasserwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	9,2	4,7	10,6	16,8
spezif. Stromverbrauch ***)	kWh el./MWh th.	24,4	36,2	40,9	*****)
Produzierte Wärmemengen					
Wärmeerzeugung gesamt	kWh/a	21.934	15.954	16.413	*****)
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh/a	21.934	12.899	11.281	*****)
Deckungsbeitrag Pelletkessel bezogen auf Gesamtwärmeerzeugung	%	100,0	80,8	68,7	0,0
Solaranlagenenertrag	kWh/a	0	3.055	5.132	0
Deckungsbeitrag Solaranlage bezogen auf Gesamtwärmeerzeugung	%	0,0	19,2	31,3	0,0
Verbrauchte Wärmemengen					
Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/a	17.617	12.110	11.972	17.303
Wärmeverbrauch Raumheizung	kWh/a	16.053	10.979	10.168	17.303
Wärmeverbrauch Raumheizung	%	91,1	63,5	83,4	71,5
Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung	kWh/a	1.564	1.131	1.804	2.106
Wärmeverbrauch Warmwasserbereitung	%	8,9	9,3	15,1	10,9
Primärenergie Verbrauch					
Stromverbrauch	kWh/a	536	578	672	395
Pelletverbrauch	kg	6.254	3.462	2.772	4.921
Heizwert	kWh/kg	4,80	4,78	4,82	4,81
Pelletverbrauch	kWh/a	30.019	16.548	13.361	23.675
Primärenergie Verbrauch gesamt	kWh/a	30.555	17.126	14.033	24.070
Verluste					
Wärmeverlust Heizungssystem	kWh/a	4.317	3.844	4.441	*****)
Wärmeverlust Heizungssystem	%	19,7	24,1	27,1	*****)
Verluste Warmwasserbereitung elektrisch	kWh/a				986
Verluste Warmwasserbereitung elektrisch	%				68,1
Betriebsverhalten Pelletkessel					
Ø Betriebszeit pro Start	h	1,4	1,5	3,6	8,9
Ø Starts pro Woche	-	22,5	17,8	8,6	11,8
Volllaststunden	h	1.472	865	752	1.154
Ø relative Kessellast	-	0,77	0,72	0,78	0,34
mittlere Bandlast kälteste Winterwoche Verbraucher	kW	6 - 8	3 - 7	3 - 7	6 - 7
Spitzenlast kälteste Winterwoche Verbraucher	kW	9	12	11	15
mittlere Bandlast Winterwoche Verbraucher	kW	5 - 5,5	4	3 - 4	5 - 6
Spitzenlast Winterwoche Verbraucher	kW	6,25	9,5	5,75	7,5
mittlere Bandlast Sommerwoche Verbraucher	kW	0 - 0,35	0 - 0,5	0 - 0,6	0
Spitzenlast Sommerwoche Verbraucher	kW	0,75	0,75	1	0
mittlere Bandlast kälteste Winterwoche Pelletkessel	kW	8 - 12	8 - 12	12 - 14	-
Spitzenlast kälteste Winterwoche Pelletkessel	kW	13	14,9	14	-
mittlere Bandlast Winterwoche Pelletkessel	kW	4 - 8	3 - 8	2 - 6	-
Spitzenlast Winterwoche Pelletkessel	kW	12,6	13,5	10	-
mittlere Bandlast Sommerwoche Pelletkessel	kW	0,5 - 2	0	0	0
Spitzenlast Sommerwoche Pelletkessel	kW	2,25	0	0	0
Ø Starts pro Wintertag	-	2 - 4	4	2	0 - 2
Ø Starts pro Sommertag	-	1 - 2	0	0	0

5.5 TRNSYS Verifikation

5.5.1 Referenzmodell

5.5.1.1 Aufbau

Abbildung 46 zeigt den Aufbau des Referenzmodells. Zuerst wurde das Referenzmodell nach dem Hydraulikschema der Anlage B aufgebaut, inklusive Rohrleitungen.

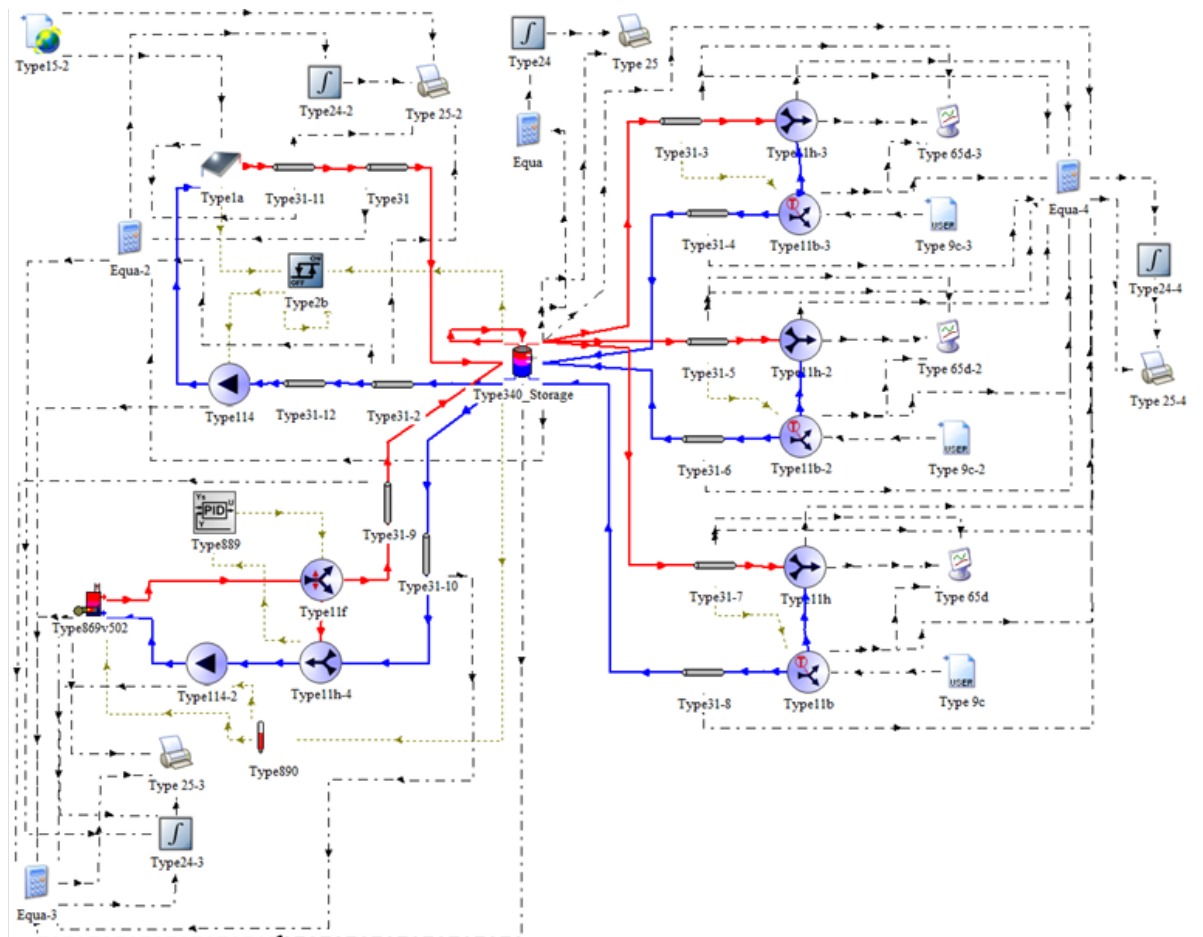


Abbildung 46: Referenzmodell

Erläuterungen: Pelletkessel ... Type869v502; Solaranlage ... Type1a; Pufferspeicher ... Type340_Storage; zwei Verbraucherkreise und einen Warmwasserkreis, Simulationsprogramm TRNSYS

Der Kesselkreis besteht aus einem Kessel (Type 869v502), einer Heizkreispumpe (Type 114) inklusive Heizkreispumpenregelung (Type 890), Rohrleitungen (Type 31) und einer Rücklaufanhebung (besteht aus Type 11f und Type 11h) sowie einem Rücklaufanhebungsregler (Type 889). Der Solaranlagenkreis besteht aus einem Solarkollektor (Type 1a), einer Solarkreispumpe (Type 114) inklusive Solarkreisregelung (Type 2b), Rohrleitungen (Type 31) und einem Wetterdatenfile (Type 15-2). Ebenfalls zu sehen ist der Pufferspeicher (Type 340 Storage). Im Referenzmodell sind zwei Verbraucherkreise und ein Warmwasserkreis verbaut, welche aus Rohrleitungen (Type 31) und einer Beimischschaltung (Type 11h und Type 11b) bestehen. Für die Aufzeichnung der Simulationsdaten sind noch

Equations (Type Equa) für die Umrechnung beziehungsweise Berechnung von Daten und Integratoren (Type 24) sowie Printers (Type 25) verbaut.

5.5.1.2 Einstellungen

In den folgenden Absätzen werden die verwendeten Einstellungen der Komponenten zur Verifikation des Referenzmodells beschrieben.

Solaranlage + Solaranlagenheizkreis

Die Solaranlageneinstellungen des Referenzmodells sind in Tabelle 21 zu sehen.

Tabelle 21: Solaranlageneinstellungen

Erläuterung: *) Datenquelle [23]; eigene Annahmen

Bezeichnung	Wert	Einheit
Solarkollektorfläche	10	m ²
spezifische Wärmekapazität Fluid *)	3,8	kJ/kgK
T _{Regel Ein}	T2+10K	°C
T _{Regel Aus}	T2+ 3K	°C
Sicherheitstemperatur	118	°C

Beim Solarkollektormodell (Type 1a) wurden die Solarkollektorfläche (10m²) und die spezifische Wärmekapazität des Fluides (3,8kJ/kgK) [23] eingestellt. Der laut Betriebsdaten erforderliche Solaranlagenenertrag pro Jahr wurde mit den Ein- und Ausschaltbedingungen der Solaranlagenpumpe, der Sicherheitstemperatur sowie den Klimadaten angepasst. Die Einschaltbedingung bezieht sich auf T_{Regel Ein} und die Ausschaltbedingung auf T_{Regel Aus}. T2 ist die Temperatur vom Temperatursensor (2) im Pufferspeicher (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Bei der Solarkreisumpenregelung wird die Solarkollektorausstrittstemperatur mit der Ein- und Ausschaltbedingung der Solarkreisumpenregelung (T_{Regel Aus/Ein}) verglichen. Ist die Temperatur im Solarkollektor höher als T_{Regel Ein}, dann wird die Solarkreisumpe eingeschaltet. Sinkt die Temperatur im Solarkollektor unter T_{Regel Aus}, dann wird die Solarkreisumpe ausgeschaltet. Die Sicherheitstemperatur (118°C) ist eine Regelgröße, die eine Dampfbildung im Pufferspeicher verhindern soll. Für eine detaillierte Erklärung der Solaranlagenregelung siehe Kapitel 4.4.2.1. Die Klimadaten wurden mit dem Wetterdatengenerator erzeugt. Für die Erzeugung der Klimadaten muss im Wetterdatengenerator das Gebiet, in dem die Solarkollektoren installiert sind, angegeben werden. Die Klimadaten können pro Bereich (aufgeteilt in drei Bereiche pro Jahr) noch angepasst werden. Bei der Klimadatenanpassung kann von der Ausgangseinstellung im Wetterdatengenerator ein besseres beziehungsweise schlechteres Wetter pro Bereich eingestellt werden. In diesem Fall wurde der Klimadatensatz von der Ausgangseinstellung verwendet.

Kessel + Kesselheizkreis

Tabelle 22 beinhaltet die wichtigsten Einstellungen des Pelletkessels.

Tabelle 22: Kesseleinstellungen

Erläuterung: *) Bezug auf 13Vol% O₂ im trockenen Rauchgas; Datenquelle [18]; eigene Annahmen

Bezeichnung	Wert	Einheit
Nennleistung	15	kW
Teillast	5	kW
Wärmekapazität der gesamten thermischen Kesselmasse	148	kJ/K
Wasserinhalt	66	Liter
CO- Gehalt Nennleistung *)	86	mg/m ³
CO- Gehalt Teillast *)	95	mg/m ³
O ₂ - Gehalt Nennleistung	7,8	Vol.%
O ₂ - Gehalt Teillast	12,4	Vol.%
Rachgastemperatur Nennleistung	160	°C
Rachgastemperatur Teillast	100	°C
UA _{ON}	7,075	W/K
UA _{OFF}	14,15	W/K
T _{ON}	50	°C
T _{SET}	60	°C
T _{OFF}	70	°C
T _{MAX}	95	°C
T _{Regel Ein}	57	°C
T _{Regel Aus}	59,6	°C
T _{Rücklaufanhebung}	35	°C

Die technischen Kesseldaten (Nennleistung, Teillast, Wasserinhalt, CO-Gehalt Nennleistung/Teillast und O₂-Gehalt Nennleistung/Teillast sowie Rauchgastemperatur Nennleistung/Teillast) wurden von [18] übernommen. Die Wärmekapazität der thermischen Masse berechnet sich aus dem Kesselgewicht [18] und der spezifischen Wärmekapazität des Kessels. Der Wert für die spezifische Wärmekapazität des Kesselkörpers war 0,6kJ/kgK und dieser wurde aus [15] entnommen. Der endgültige UA_{ON}- und UA_{OFF}-Wert entstand mit der Anlagenanpassung. Die detaillierte Erklärung der beiden Faktoren siehe Kapitel 4.5.2.1. Der UA_{ON}-Wert wurde im Vergleich zum Anhaltswert (6,8W/K) aus [15] auf 7,075W/K angepasst, damit der Kessel-Jahresnutzungsgrad des Referenzmodells jenem der Anlage B entsprach. Der UA_{OFF}-Wert wurde doppelt so groß angenommen und betrug 14,15W/K. Die Erklärung der Annahme siehe Kapitel 4.5.2.1. Die Regelparameter der Kesselpumpe wurden so eingestellt, dass das Betriebsverhalten und die produzierte Wärmemenge des Pelletkessel ähnlich waren wie bei Anlage B. Die unterste Grenze für die Einschalttemperatur der Kesselpumpe war 51°C, weil für die Verbraucher eine Mindesttemperatur von 49,6°C zur Verfügung gestellt werden musste, siehe Kapitel 5.5.1.2 unter Verbraucher. Bei der Kesselpumpenregelung wird die Temperatur vom Temperatursensor (4) im Pufferspeicher mit der Ein- und Ausschaltbedingung der Kesselpumpenregelung (T_{Regel Aus/Ein}) verglichen (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Die Rücklaufanhebung wurde mit 35°C angenommen. Diese Einstellung hatte keinen Einfluss auf den Kessel, da keine Kondensation im Kessel berücksichtigt wurde. Dieser Wert wurde gewählt, weil die durchschnittliche Rücklauftemperatur aus dem Pufferspeicher bei der Anlage B ca. 35°C betrug. Die Kesselsolltemperatur (T_{SET}) wurde auf 60°C gestellt, aufgrund der Messdatenauswertung der Anlage B. Für die Kesseleinschalttemperatur (T_{ON}) von 50°C, die Kesselausschalttemperatur

(T_{OFF}) von 70°C sowie für die maximale zulässige Kesseltemperatur (T_{MAX}) von 95°C wurden realistische Annahmen zur Kesselsolltemperatur gewählt. Aufgrund der Kesselsolltemperatur und Rücklaufanhebungstemperatur stellte sich eine Kesseltemperaturspreizung von 25°C bei Nennleistung ein. Mit dieser Kesseltemperaturspreizung wurde der Nennleistungs-Massenstrom für die starre Pumpe berechnet.

Pufferspeicher

Tabelle 23 beinhaltet die wichtigsten Einstellungen des Pufferspeichers.

Tabelle 23: Pufferspeichereinstellungen

Erläuterung: *) Wärmedurchgangskoeffizient setzt sich aus den Wärmeübergangskoeffizienten von Stahl und Luft, sowie aus der Wärmeleitfähigkeit der Pufferspeicherisolierung zusammen; Datenquelle [7, 19]

Bezeichnung	Wert	Einheit
Volumen	970	l
Höhe	2,1	m
Durchmesser	0,8	m
Volumen Brauchwasserbehälter	130	l
Oberfläche Warmwasserwärmetauscher	2,00	m ²
Wärmedurchgangskoeffizient Warmwasserwärmetauscher	325	W/m ² K
Oberfläche Solarwärmetauscher	2,56	m ²
Wärmedurchgangskoeffizient Solarwärmetauscher	450	W/m ² K
Pelletkessel Vorlaufposition	1,60	m
Pelletkessel Rücklaufposition	0,80	m
Solaranlagen Vorlaufposition	0,70	m
Solaranlagen Rücklaufposition	0,15	m
Heizkreis Vorlaufposition	1,60	m
Heizkreis Rücklaufposition	0,80	m
Warmwasserposition	1,83	m
Kaltwasserposition	0,27	m
Temperatursensorposition 1	0,05	m
Temperatursensorposition 2	0,70	m
Temperatursensorposition 3	1,05	m
Temperatursensorposition 4	1,60	m
Temperatursensorposition 5	2,05	m
Pufferspeicherisoliertärke	0,13	m
Wärmedurchgangskoeffizient Pufferspeicher *)	0,313	W/m ² K

Der Pufferspeicher hat ein Volumen von 970l, davon werden 130l für die Warmwasserbereitung verwendet. Als Bezugsbasis für die Positionen der Anschlüsse sowie der Temperatursensoren wurde der Pufferspeicherboden gewählt. Die Hauptabmessungen (Höhe, Durchmesser) beziehungsweise die Ein- und Auslasshöhen für Verbraucher/Erzeuger und Pufferspeicherisolierung sowie der Solarwärmetauscheroberfläche wurden aus [7] entnommen. Die Ein- und Auslasshöhen für den Solar- und Warmwasserwärmetauscher wurden aus [7] herausgemessen, da keine Angaben vorhanden waren. Die Wärmedurchgangskoeffizienten für den Warmwasser- und Solarwärmetauscher stammen aus [19]. Die Oberfläche des Warmwasserwärmetauschers (Warmwasserbehälter) wurde laut den Abmessungen von [7] berechnet. Der Temperatursensoren(1) wurde 0,05m und der Temperatursensor (5) 2,05m über den Pufferspeicherboden angeordnet. Der Temperatursensor (2) liegt auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs, der Temperatursensor (3) in der Pufferspeichermitte und der Temperatursensor (4) auf der Höhe des Kessel-

/Verbraucherkreisvorlaufs. Der Wärmedurchgangskoeffizient vom Pufferspeicher wurde mit den angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten von Stahl (500W/mK) und Luft (10W/mK) sowie der Wärmeleitfähigkeit der Pufferspeicherisolierung (0,042W/mK) berechnet.

Verbraucher

Die Verbraucherregelung wurde in Kapitel 4.4.2.1 ausführlich erklärt. Hier werden die verwendeten Einstellungen angegeben, damit der benötigte Wärmeverbrauch abgebildet wird.

Heizkreis 1: (Radiatoren)

Einstellungen:

- Sollvorlauftemperatur war 49,6°C
- Rücklauftemperatur war 33,3°C

Heizkreis 2: (Fußbodenheizung)

Einstellungen:

- Sollvorlauftemperatur war 41,3°C
- Rücklauftemperatur war 34,5°C

Brauchwarmwasser:

Einstellungen:

- Sollvorlauftemperatur war 45°C
- Rücklauftemperatur war 17°C

Wärmeverlust Heizungssystem

Die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum setzten sich aus Rohrleitungs- und Pufferspeicherverlusten zusammen. Um die Wärmeverluste genau nachbilden zu können, sind Angaben über die Rohrleitungen (Rohrlänge, Rohrdurchmesser und Isolierungsdicke) und vom Pufferspeicher (Größe und Isolierung) nötig. Für Anlage B waren nur Angaben über die Größe und Isolierung des Pufferspeichers sowie die Isolierung der Rohrleitungen (alle Rohrleitungen waren unisoliert, siehe Abbildung 47) verfügbar. Daher wurden die Rohrleitungslängen anhand von Angaben über die Position der Wärmemengenzähler [11] abgeschätzt. Die Wärmemengenzähler der Verbraucherkreise und des Solarkreises waren möglichst nahe am Pufferspeicher und der Wärmemengenzähler des Kesselkreises direkt nach dem Pelletkessel montiert. Beim Referenzmodell wurden die Rohrleitungen unisoliert ausgeführt. Neben den Rohrleitungslängen haben auch die hydraulischen Einbauten (z.B. Rohrleitungsverbindungen, Pumpen, Temperaturfühler, Ventile, usw.) einen Einfluss auf den Wärmeverlust, da eine zusätzliche Oberfläche entsteht über die Wärme verloren geht. Da die Wärmeverluste dieser Einbauten in TRNSYS nicht über die jeweiligen Types für Pumpen und Ventile abgebildet werden können, wurden die Rohrleitungslängen entsprechend angepasst, um die Wärmeverluste von den hydraulischen Einbauten (z.B. Rohrleitungsverbindungen, Pumpen, Temperaturfühler, Ventile usw.) zu berücksichtigen. Der Wärmeübergangskoeffizient vom Rohrmodell (Type 31) wurde so angepasst, dass der

Wärmeverlust pro Meter des von BIOS verwendeten Hydraulikauslegungstool entspricht (siehe Tabelle 24). Die endgültige Festlegung der Rohrleitungslängen erfolgte schlussendlich in der Weise, dass die Wärmeverluste des Pufferspeichers und der Rohrleitungen in der Simulation mit den gemessenen Wärmeverlusten gemäß Betriebsdaten übereinstimmten. Für den Kesselkreis, Heizkreis 1 und 2 sowie für den Warmwasserkreis wurden in der Simulation Rohre mit DN 25 beziehungsweise für den Solaranlagenkreis Rohre mit DN 20 verwendet.



Abbildung 47: Rohrleitungen Anlage B

Erläuterungen: Datenquelle [2]

Tabelle 24 zeigt die getroffenen Annahmen der Rohrleitungen in Simulationsmodell TRNSYS.

Tabelle 24: gewählte Einstellparameter für das Simulationsmodell Rohr in TRNSYS

Erläuterung: U-Wert ohne Rohrisolierung; U-Wert Iso mit 30mm Rohrisolation

	Länge [m]	Rohr Nennweite	U-Wert [W/m ² K]	U-Wert Iso [W/m ² K]
Kesselvorlauf	5,26	DN 25	11,78	2,75
Kesselrücklauf	5,26	DN 25	11,78	2,75
Solarvorlauf	3,26	DN 20	11,48	2,48
Solarrücklauf	3,26	DN 20	11,48	2,48
Heizkreisvorlauf 1	3,26	DN 25	11,78	2,75
Heizkreisrücklauf 1	3,26	DN 25	11,78	2,75
Heizkreisvorlauf 2	3,26	DN 25	11,78	2,75
Heizkreisrücklauf 2	3,26	DN 25	11,78	2,75
Warmwasser	3,26	DN 25	11,78	2,75
Kaltwasser	3,26	DN 25	11,78	2,75

5.5.1.3 Simulation vs. Anlage B

Tabelle 25 stellt die Jahresenergiebilanz für Anlage B laut Simulation und Messdaten gegenüber.

Tabelle 25: Jahresenergiebilanz für Anlage B laut Simulation und Messdaten

Erläuterungen: TRNSYS 09 ... Simulationsergebnisse vom Jahr 2009; Anlage B 09 ... Betriebsdatenergebnisse vom Jahr 2009; Abweichung ... TRNSYS 09/Anlage B - 100%; *) verbrauchter Strom (Kessel inkl. Hydraulik) bezogen auf die produzierten Wärmemenge (Pelletkessel und Solarertrag) und bei TRNSYS wurde der Stromverbrauch nicht mitsimuliert; **) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets, Stromverbrauch und Solaranlagenenertrag) und bei TRNSYS wurde der Stromverbrauch nicht mitsimuliert; ***) verbrauchte Wärmemenge bezogen auf den Energieeinsatz (Primärenergieeinsatz Pellets und Solaranlagenenertrag)

	Einheit	TRNSYS 09	Anlage B 09	Abweichung [%]
Primärenergieeinsatz				
Stromverbrauch	kWh	-	590	
Pelletverbrauch	kg	3.110	3.136	-0,8
Primärenergieeinsatz Pellets	kWh	14.958	14.990	-0,2
spezif. Stromverbrauch *)	kWh el./MWh th.	-	39,4	
Gemessene Wärmemengen				
Solaranlagenenertrag	kWh	3.260	3.266	-0,2
Wärmeerzeugung Pelletkessel	kWh	11.642	11.684	-0,4
Deckungsgrad Solaranlage	%	21,9	21,8	0,1
Deckungsgrad Pelletkessel	%	78,1	78,2	0,0
Wärmeverbrauch Radiatoren	kWh	6.654	6.646	0,1
Wärmeverbrauch Radiatoren	%	58,6	58,5	0,1
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	kWh	3.570	3.575	-0,1
Wärmeverbrauch Fußbodenheizung	%	31,4	31,5	-0,1
Gesamtheizwärmeverbrauch	kWh	10.224	10.221	0,0
Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh	1.137	1.139	-0,2
Warmwasser Wärmeverbrauch	%	10,0	10,0	-0,2
spezif. Gesamt Heizwärmeverbrauch	kWh/m ² *a	42,6	42,6	0,0
spezif. Warmwasser Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	4,7	4,7	-0,2
spezif. Gesamt Wärmeverbrauch	kWh/m ² *a	47,3	47,3	0,0
Wärmebilanz Pufferspeicher/Heizsystem				
Produzierte Gesamtwärme	kWh	14.902	14.950	-0,3
Verbrauchte Wärme	kWh	11.361	11.360	0,0
Wärmeverlust Heizungssystem	kWh	3.541	3.590	-1,3
Rohrleitungsverluste	kWh	2.849	-	
Pufferspeicherverluste	kWh	692	-	
Verluste und Nutzungsgrade				
Kesselnutzungsgrad	%	77,8	77,9	-0,1
Nutzungsgrad Pufferspeicher/Heizsystem	%	76,2	76,0	0,3
Verluste Pufferspeicher/Heizsystem	%	23,8	24,0	-1,0
Gesamtanlagennutzungsgrad mit Strom **)	%	-	58,6	
Gesamtanlagennutzungsgrad ohne Strom ***)	%	62,4	62,2	0,3

Die Abweichungen von der TRNSYS-Simulation zur den Betriebsdaten der Anlage B bei den Verbrauchern und Erzeugern waren sehr klein. Die Abweichungen lagen zwischen -1,3 und 0,3%. Bei der Simulation war es möglich, die Auswertung der Wärmeverluste vom Heizungssystem in Rohrleitungs- und Pufferspeicherverluste aufzuteilen. Bei der Datenauswertung wurde der Gesamtnutzungsgrad der Anlage mit und ohne Stromverbrauch und bei der Simulation nur ohne Stromverbrauch berechnet.

Die Gründe warum der Stromverbrauch in der Simulation nicht berücksichtigt wurde, waren:

- die Verbraucherkreispumpen wurden im Referenzmodell nicht abgebildet
- der Stromverbrauch vom Brennstofffördersystem konnte nicht dargestellt werden

5.5.2 Teststandergebnisse für Kesselwirkungsgrade

Die Kesselwirkungsgrade sind in Tabelle 26 zu sehen. Neben der Verifikation des Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels sowie des Gesamtsystems erfolgte auch eine Verifikation des Kesselwirkungsgrades. Dazu wurde der Pelletkessel auf den in Kapitel 4.5.4 beschriebenen Teststand in TRNSYS simuliert. Neben dem Basis-Pelletkessel (15kW) wurden auch die Kesselwirkungsgrade für einen 12 und 8kW Pelletkessel simuliert. Da aus der Messdatenauswertung der Anlagen zu sehen war, dass die Pelletkessel teilweise zu groß dimensioniert waren, wurde in Kapitel 5.6.1 die Auswirkung auf das Betriebsverhalten von den Heizungssystemen mit kleineren Pelletkesseln untersucht. Bei den 12 und 8kW Kesselmodellen wurde jeweils der UA_{ON} -Wert so angepasst, dass sie bei Nennleistung den gleichen Wirkungsgrad hatten wie das 15kW Kesselmodell.

Tabelle 26: Kesselwirkungsgrad

Erläuterung: *) Rauchgasaustrittstemperatur 160/120°C (Voll-/Teillast); O₂-Gehalt 7,8/12,4Vol% (Voll-/Teillast); Datenquelle [18]; **) Rauchgasaustrittstemperatur 160/120°C (Voll-/Teillast); O₂-Gehalt 7,8/12,4Vol% (Voll-/Teillast); ***) Rauchgasaustrittstemperatur 120/60°C (Voll-/Teillast); O₂-Gehalt 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast)

		Herstellerangabe *) [%]	Basis Einstellung **) [%]	Optimierte Einstellung ***) [%]
Nennleistung	15 kW	92,6	89,2	91,6
Teillast	5 kW	91,1	86,8	91,1
Nennleistung	12 kW	92,5	89,1	91,5
Teillast	3,4 kW	92,1	85,5	89,8
Nennleistung	8 kW	92,2	89,2	91,6
Teillast	2,4 kW	93,4	86,1	90,4

Die Wirkungsgrade laut Herstellerangaben wurden mit der Basis- und optimierten Pelletkessel-Einstellung in der TRNSYS-Simulation nicht erreicht.

Eine mögliche Ursache dafür könnte der Verlust über die thermische Masse des Pelletkessels beim Kesselmodell sein. Der Verlust der thermischen Masse wird beim Kesselmodell über den UA_{ON} -Wert und der Wärmekapazität der thermischen Masse (siehe Tabelle 22) abgebildet. Da der UA_{ON} -Wert (bildet den Wärmeverlust an die Umgebung während des Betriebs ab) im Zuge der Verifikation des Referenzmodells so angepasst wurde, dass in der Simulation derselbe Kessel-Jahresnutzungsgrad wie auf Basis der Betriebsdaten erreicht wurde, ist es möglich, dass durch einen etwas zu hohen UA_{ON} -Wert der Wirkungsgrad des Kessels in der Simulation etwas zu niedrig ist. Nachdem die Ergebnisse der Simulation der Anlage B aber gezeigt haben, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulation gegeben ist, sollte diese Abweichung keinen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

5.6.1.1 Kessel-Änderungen

Rauchgasaustrittstemperatur

Die Rauchgasaustrittstemperatur wurde von 160/100 bis 120/60°C (Voll-/Teillast) variiert. Mit kleinerer Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast) verbessert sich erwartungsgemäß der Kessel-Jahresnutzungsgrad um ca. 2,4% Punkte. Der Grund für die Erhöhung des Kessel-Jahresnutzungsgrades sind die geringeren Rauchgasverluste aufgrund der niedrigeren Rauchgasaustrittstemperaturen. Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 92kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um ca. 1,6% Punkte, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik, die Kesselbetriebszeit, die Kesselstarts und die Betriebszeit pro Start sowie die Kesselverluste an die Umgebung bleiben hingegen annähernd gleich. Aus diesem Grund sollte der Kessel so dimensioniert werden, dass möglichst niedrige Rauchgasaustrittstemperaturen erreicht werden können. Dabei muss aber darauf geachtet werden, dass es im Kessel zu keiner Taupunktunterschreitung kommen kann.

O₂-Gehalt im Rauchgas

Die Einstellungen vom O₂-Gehalt im Rauchgas variierten zwischen 9/12,4 und 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast). Bei einem O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) verbessert sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad erwartungsgemäß um 1 Prozentpunkt zur Basisvariante was auch zugleich positive Auswirkungen auf den Gesamtnutzungsgrad der Anlage hat (weniger Brennstoffverbrauch). Der Grund für die Erhöhung des Kessel-Jahresnutzungsgrades sind die geringeren Rauchgasverluste aufgrund des niedrigeren O₂-Gehalts im Rauchgas. Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 43kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 1 Prozentpunkt, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik, die Kesselbetriebszeit, die Kesselstarts und die Betriebszeit pro Start sowie die Kesselverluste an die Umgebung bleiben annähernd gleich. Die Auslegung des Kessels und die Konzeption der Feuerungsregelung sollte daher dahingehend optimiert werden, dass der O₂-Gehalt im Rauchgas bei Voll-/Teillast gleich und insgesamt so gering wie möglich gehalten wird. Dadurch können Rauchgasverluste minimiert werden.

Wärmeübergangsfaktor der thermischen Masse an die Umgebung (bei Stillstand)

Die Kesselstillstandsverluste sind in der Simulation vom UA_{OFF}-Wert abhängig. Im Rahmen der Sensibilitätsanalyse wurde der UA_{OFF}-Startwert um 25 beziehungsweise 50% reduziert. Die 50% Reduktion entspricht dem UA_{ON}-Wert von 7,075W/K. Die Reduktion des UA_{OFF}-Wertes kann durch die Installation einer Abgasklappe, die den Luftstrom aufgrund des natürlichen Kaminzuges durch den stillstehenden Kessel minimiert, realisiert werden. Bei der 50% Reduktion des UA_{OFF}-Wertes wäre die Abgasklappe geschlossen und der Kaminzug vollständig unterbunden. Die Minimierung der Kesselstillstandsverluste (UA_{OFF}-Wert 7,075W/K) ergibt eine deutliche Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades um etwas mehr als 4% Punkte, aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung bei Kesselstillstand. Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 155kg

Pellets eingespart werden, da weniger Brennstoff für die Aufheizung der thermischen Kesselmasse benötigt werden und der Kessel während den Stillstandszeiten weniger Wärme an die Umgebung verliert. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 2,6%Punkte, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Die Kesselstarts erhöhen sich, aber die Kesselbetriebszeit, die Betriebszeit pro Start sowie die Kesselverluste an die Umgebung (ca. 450kWh) nehmen ab. Da in der thermischen Kesselmasse mehr Wärmemenge gespeichert ist, benötigt der Pelletkessel nicht mehr so lange für die Bereitstellung des Wärmebedarfs für den Pufferspeicher, aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung. Der Grund für die Erhöhung der Kesselstarts liegt an der Pufferspeicher-Regelung. Der Pufferspeicher benötigt eine Solltemperatur, um die Verbrauchervorlauftemperatur zu gewährleisten. Aufgrund der schlecht gewählten Regeleinstellung (Pufferspeicher) startet der Pelletkessel häufiger. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems und der Wärmeverlust der Wasserhydraulik bleiben annähernd gleich. Daher sollte bei einer Neuplanung eines Hauses auf die richtige Kamindimensionierung geachtet beziehungsweise eine regelbare Abgasklappe eingebaut werden, um den Kaminzug bei Stillstand des Pelletkessels zu minimieren.

Reduzierung der thermischen Kesselmasse

Die thermische Kesselmasse wurde ebenfalls um 25 und 50% reduziert. Die thermische Kesselmasse setzt sich aus der Wärmekapazität des Pelletkessels und dem Wasserinhalt zusammen. Deshalb wurden bei der Simulation der thermischen Kesselmasse beide Terme um die gleiche Prozentzahl verringert. Bei Reduktion der thermischen Kesselmasse von 0 auf 50% erhöht sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 3,3%Punkte aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung. Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 129kg Pellets eingespart werden, da weniger Brennstoff für die Aufheizung der thermischen Kesselmasse benötigt wird und der Kessel während den Stillstandszeiten weniger Wärme an die Umgebung verliert. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um ca. 2%Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Die Kesselstarts erhöhen sich, aber die Kesselbetriebszeit, die Betriebszeit pro Start sowie die Kesselverluste an die Umgebung (ca. 350kWh) nehmen ab. Die Gründe sind gleich wie im vorangegangenen Absatz. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik sowie die Kesselbetriebszeit bleiben annähernd gleich. Die Kesselhersteller sollten also versuchen, die thermische Kesselmasse so gering wie möglich auszuführen, da dadurch die Trägheit des Kessels verringert und die Wärmeverluste an die Umgebung reduziert werden können.

5.6.1.2 Software-Änderungen

Kesselstartleistung

Die Kesselstartleistung wurde zwischen 15 und 5kW variiert. Wird die Kesselstartleistung während der Startphase auf die Minimalleistung (5kW) gesetzt, kann eine Kessel-Jahresnutzungsgradsteigerung von 0,5%Punkten erzielt werden. Die Erhöhung des Kessel-Jahresnutzungsgrades ergibt sich aus der Reduktion der Kesselverluste an die Umgebung (weniger An- und Abfahrverluste). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 129kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Dafür benötigt der Pelletkessel mehr Zeit, um die notwendige Wärmemenge zu produzieren, was auch eine Reduktion des Kesselstarts auf sich zieht. Bei längerer Kesselbetriebszeit und

weniger Kesselstarts erhöht sich die Betriebszeit pro Kesselstart. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Gesamtnutzungsgrad der Anlage sowie der Wärmeverlust der Wasserhydraulik bleiben annähernd gleich. Zur Optimierung des Kesselbetriebsverhaltens sollte die Startleistung möglichst klein gehalten werden, wodurch auch die An- und Abfahrverluste reduziert werden können.

Kesselvorlauftemperatur

Die Kesselvorlauftemperatur wurde zwischen 60 und 70°C variiert. Bei dieser Untersuchung musste die Basiseinstellung geändert werden. Der Grund war, dass bei 70°C Kesselvorlauftemperatur die Kesselregelung nicht funktionierte, weil die Differenz zwischen Ein- und Ausschalttemperatur sehr klein war. Mit 70°C Kesselvorlauftemperatur wurde die Ausschaltbedingung zu schnell erreicht und der Pelletkessel arbeitete fast nur mehr im Stop-and-Go-Betrieb. Deshalb wurde für die Kesselabschaltung der Temperatursensor (3) mit 50°C Ausschalttemperatur verwendet (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Mit steigender Kesselvorlauftemperatur verschlechtert sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad im Vergleich zur neuen Basiseinstellung um 1,2%Punkte aufgrund der höheren Kesselverluste an die Umgebung, da wegen der größeren Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Umgebung mehr Wärme bei Stillstand und Betrieb an die Umgebung abgegeben wird. Mit der Verschlechterung des Kessel-Jahresnutzungsgrades werden 70kg Pellets mehr verbraucht, da der Kessel nicht so effizient ausgenutzt wird. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage sinkt um ca. 1,1%Punkte, da mehr Brennstoff verbraucht wird. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik steigt aufgrund der höheren Temperatur im Kesselkreis, im Pufferspeicher sowie auch in den Verbraucherkreisen an. Der Kessel muss wegen seiner Regeleinstellung (Kesselfreigabe) nicht so oft starten, weil die Einschaltbedingung am Temperatursensor (4) im Pufferspeicher nicht so schnell erreicht wird, aufgrund des hohen Temperaturniveaus im Pufferspeicher. Die Kesselbetriebszeit verringert sich auch, aufgrund der Regeleinstellung (Kesselabschaltung), da die Ausschalttemperatur beim Temperatursensor (3) im Pufferspeicher aufgrund der schnelleren Pufferladung (höhere Kesselvorlauftemperatur) erreicht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems bleibt annähernd gleich. Deshalb sollte die Kesselvorlauftemperatur so gering wie möglich gewählt werden, aber auf die Mindesttemperatur der Verbraucher und auf die Verhinderung einer Taupunktsunterschreitung im Pelletkessel muss geachtet werden.

Solaranlagenfreigabe

Die Bedingung für die Solaranlagenfreigabe wurde zwischen Temperatursensor (2)+5K und Temperatursensor (2)+20K variiert (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Die Solaranlagenfreigabe hat fast keine Auswirkungen auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad, den Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, den Gesamtnutzungsgrad der Anlage, den Wärmeverlust der Wasserhydraulik, die Kesselbetriebszeit, die Kesselstarts und die Betriebszeit pro Start sowie die Kesselverluste an die Umgebung. Die Solaranlagenfreigabe (Einschalttemperatur) sollte auf die Temperatursensorposition des Solaranlageneinlasses regeln und sinnvoll (in einem Bereich von 5 bis 10°C über der Pufferspeichertemperatur) festgelegt werden.

Solaranlagenabschaltung

Die Bedingung für die Solaranlagenabschaltung wurde zwischen Temperatursensor (2)+1K und Temperatursensor (2)+8K variiert (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Mit einer kleineren Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher (Temperatursensor (2)+1K) kann im Vergleich zur Solarabschaltbedingung (Temperatursensor (2)+3K) der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 2,6%Punkte verbessert werden, wahrscheinlich aufgrund der effizienteren Ausnutzung (in den Übergangszeiten außer Betrieb). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 64kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um ca. 2,8%Punkte an, da einerseits weniger Brennstoff verbraucht und andererseits mehr Solarertrag produziert wird, aufgrund der niedrigeren Ausschaltbedingung für die Solarkreispumpe. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems wird um 1,6%Punkte verschlechtert, weil der Wärmeverlust der Wasserhydraulik um ca. 300kWh, aufgrund der höheren Rohrleitungsverluste der Solaranlage (länger mit höherer Temperatur in Betrieb) sowie der größeren Pufferspeicherverluste (höhere Pufferspeichertemperatur vor allem im Sommer), höher ist. Die Kesselstarts sowie die Kesselbetriebszeit werden verringert sich, da die Solaranlage den notwendigen Wärmebedarf im Pufferspeicher abdeckt (Einschaltbedingung für Pelletkessel wurde deshalb nicht so oft erreicht). Dadurch verringern sich die Betriebszeit pro Start und die Kesselverluste an die Umgebung (weniger An- und Abfahrverluste). Die Ausschaltbedingung der Solaranlage sollte möglichst gering gewählt werden, damit die Solaranlage auch in den Übergangszeiten optimal arbeiten kann.

Kesselfreigabe

Die Bedingung für die Kesselfreigabe erfolgte mit dem Temperatursensor (4) im Pufferspeicher und wurde zwischen 57 und 52°C variiert (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Die Maßnahme die Kesselfreigabe von 57 auf 52°C zu setzen hat eine Kessel-Jahresnutzungsgradesteigerung um 0,8%Punkte zur Folge, weil der Pelletkessel aufgrund der niedrigeren Kesselfreigabebedingung nicht so oft starten muss (weniger An- und Abfahrverluste). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 85kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Der Grund dafür ist die niedrige Kesselfreigabebedingung. Dadurch wird mehr Zeit benötigt, um den Pufferspeicher wieder zu laden, bei gleicher Kesselvorlauftemperatur. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 0,9%Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems verbessert sich leicht, aufgrund des geringeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik. Der geringere Wärmeverlust der Wasserhydraulik stellt sich einerseits ein, weil der Kesselkreis nicht so häufig einer hohen Temperatur ausgesetzt ist (geringere Kesselbetriebszeit). Andererseits herrscht im Pufferspeicher ein geringeres Temperaturniveau, weshalb wiederum die Verbraucherkreise auch mit niedrigeren Temperaturen versorgt werden (die Beimischung musste nicht so viel Rücklaufmassenstrom zum Vorlaufmassenstrom beimischen um die Solltemperatur zu erreichen). Da die Kesselbetriebszeit sowie die Kesselstarts geringer sind, wird die Betriebszeit pro Kesselstart erhöht und die Kesselverluste an die Umgebung verringern sich (weniger An- und Abfahrverluste). Deshalb sollte die Bedingung für die Kesselfreigabe im Pufferspeicher möglichst niedrig (größer als die Mindesttemperatur der Verbraucher) gewählt werden.

Kesselabschaltung

Bei der Kesselabschaltung sollten ursprünglich drei verschiedene Temperaturfühler (4, 3 und 2) für die Abschaltbedingung herangezogen werden (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Die Ausschalttemperatur wurde zwischen 60 und 40°C variiert. Der Temperatursensor, welcher die Regelgröße für die Regelung liefert, sowie die Ausschalttemperatur wurden anhand des Temperaturniveaus im Pufferspeicher festgelegt. Aufgrund einer genauen Untersuchung der Abschaltbedingung wurde festgestellt, dass eine Regelung auf den Temperatursensor (2) nicht möglich war, weil die Ausschaltbedingung des Pelletkessels nur sporadisch erreicht wurde, wenn die Solaranlage und der Pelletkessel gerade gleichzeitig in Betrieb waren. Ein weiterer Grund warum die Regelung auf den Temperatursensor (2) nicht funktionierte, war, weil sich der Pelletkessel aufgrund der Unterschreitung seiner Minimalleistung (zu hohe Rücklauftemperatur aus dem Pufferspeicher) ausschaltete. Deshalb wurde nur der Temperatursensor (4 und 3) für die Bewertung herangezogen. Die Pufferspeicherdurchladung (im Bereich des Pelletkessels, Abschaltbedingung Temperatursensor (3) mit 60°C) bewirkt eine Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades um 1,4%Punkte, aufgrund der effizienteren Kesselausnutzung und des geringeren Kesselumgebungsverlusts (weniger An- und Abfahrverluste). Die effizientere Kesselauslastung kommt zustande, weil für das Laden des Pufferspeichers mehr Zeit benötigt wird und der Kessel mit höherer Leistung betrieben werden kann. Die Kesselstarts sind weniger, weil aufgrund des vollgeladenen Pufferspeichers die Kesseleinschaltbedingung nicht so häufig erreicht wird (weniger An- und Abfahrverluste). Die Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades führt zu keiner Pelleteinsparung, sondern zu 90kg mehr Pelletverbrauch, aufgrund des Durchladens des Pufferspeichers. Außerdem steigt der Wärmeverlust der Wasserhydraulik an. Einerseits durch den längeren Betrieb des Kesselkreises (mehr Rohrverluste), andererseits wegen des höheren Temperaturniveau im Pufferspeicher (mehr Pufferspeicherverlust). Für die Bedingung der Kesselabschaltung sollte der Temperatursensor des Kesselrücklaufs herangezogen werden und wenn möglich sollte die Abschalttemperatur den Wärmeverbrauch (Sommer, Winter) angepasst werden.

5.6.1.3 Hardware-Änderung

Rohrleitungsisolierung

Die Rohrisolierung wurde zwischen 0 und 30mm variiert. Bei einer Rohrleitungsisolierung mit 30mm verringert sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad, aufgrund der häufigeren Kesselstarts (mehr An- und Abfahrverluste), um ca. 1,5%Punkte. Bei einer Rohrisolierung von 0 auf 30mm können 395kg Pellets eingespart werden, da aufgrund der geringeren Wärmeverluste der Wasserhydraulik (um ca. 1.890kWh) weniger Wärme vom Pelletkessel produziert werden muss. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 8%Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems verbesserte sich um 11%Punkte, aufgrund des geringeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik. Die Rohrverluste werden erwartungsgemäß kleiner, aufgrund des geringeren Wärmeverlusts an die Umgebung sowie der kürzeren Kesselbetriebszeit (Rohrleitungen des Kesselkreises sind nicht so lange erwärmt). Hingegen steigt der Pufferspeicherverlust gering an, aufgrund des höheren Temperaturniveaus. Der Grund dafür ist, dass der Kesselkreis höhere Temperaturen (weniger Wärmeverlust aufgrund der Rohrisolierung) in den Pufferspeicher einspeist. Die Kesselstarts werden mit zunehmender Isolierstärke mehr. Der

Grund dafür wird wahrscheinlich die schlecht gewählte Ausschaltbedingung (Temperatursensor (4) und $59,6^{\circ}\text{C}$) und Einschaltbedingung (Temperatursensor (4) und 57°C) des Pelletkessels sein. Aufgrund der höheren Temperatur aus dem Kesselkreisvorlauf (weniger Wärmeverlust) wird die Ausschaltbedingung schneller erreicht, da der Temperatursensor (4) (liefert das Regelsignal für die Ausschaltbedingung) auf der Pufferspeicherhöhe der Kesselvorlaufeinspeisung liegt. Da aus diesem Grund die Ausschaltbedingung des Pelletkessels schneller erreicht wird (höhere Einspeisungstemperatur in den Pufferspeicher), verringert sich die Kesselbetriebszeit. Die Kesselverluste an die Umgebung bleiben annähernd gleich. Bei der Anlage mit Rohrisolierung machen die An- und Abfahrverluste einen Großteil der Kesselverluste an die Umgebung aus. Bei der Anlage ohne Rohrisolierung überwiegen jedoch die Kesselverluste an die Umgebung, die durch den Betrieb entstehen, weil der Pelletkessel hier eine längere Betriebszeit pro Start aufweist (weniger Kesselstarts und längere Kesselbetriebszeit). Die Ausschaltbedingung für den Pelletkessel wird aufgrund der geringeren Einspeisungstemperaturen (z.B. auch das Wasser was in den Rohrleitungen gestanden ist bei Stillstand) in den Pufferspeicher nicht so schnell erreicht wie mit einer Rohrisolierung. Mit einer Rohrisolierung kann eine Menge Brennstoff eingespart werden, jedoch müssen die Brennstoffeinsparungskosten mit den Investitionskosten der Isolierung verglichen werden.

Pufferspeicherisolierung

Die Pufferspeicherisolierung wurde zwischen 130 und 50mm variiert. Die Verstärkung der Pufferspeicherisolierung von 50 auf 130mm bringt eine Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades um 0,5%Punkte, aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung (kürzere Kesselbetriebszeit). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 215kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 4,3%Punkte an, da sich neben den geringeren Brennstoffverbrauch sowie den geringeren Pufferspeicherverlust (stärkere Pufferspeicherisolierung) auch die geringere Betriebszeit der Solaranlage auswirkt. Die Solaranlage ist nicht so lange in Betrieb, aufgrund der höheren Temperatur im Pufferspeicher (Ausschaltbedingung wird schneller und die Einschaltbedingung wird nicht mehr so oft erreicht). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems steigt um 5%Punkte an, aufgrund des geringeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik (ca. 1.000kWh). Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik verringert sich erheblich, aufgrund der geringeren Pufferspeicherverluste (stärker Isoliert) und den Rohrverlusten im Kesselkreis. Die Rohrverluste im Kesselkreis werden geringer, weil die Rohrleitungen nicht so lange den hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Die Kesselbetriebszeit erhöht sich, weil der Wärmeverlust zusätzlich produziert werden muss. Bei gleichbleibenden Kesselstarts und längerer Kesselbetriebszeit erhöht sich die Betriebszeit pro Start. Im Normalfall reicht eine Isolierstärke von 100mm aus.

Solaranlagengröße

Die Solarkollektorfläche wurde zwischen 0 und 20m^2 variiert. Mit zunehmender Solarkollektorfläche von 10 auf 20m^2 steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um $0,5^{\circ}$ Prozentpunkte an, aufgrund der geringeren Kesselbetriebszeit und Kesselstarts (weniger Kesselverluste an die Umgebung durch An- und Abfahrphase bzw. während des Betriebs). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 305kg Pellets eingespart

werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird (weniger Kesselverluste an die Umgebung). Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage stieg um 1,3%Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird, aufgrund des höheren Solarertrags. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems bleibt bei den Anlagen mit Solaranlage fast gleich, aber bei der Anlage ohne Solaranlage ist der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems um ca. 3%Punkte größerer als bei der Anlage mit 10m² Solarkollektorfläche. Dieser Anstieg ist auf den geringeren Wärmeverlust der Wasserhydraulik (Wegfall der Solaranlagenrohrleitung) zurückzuführen. Bei der Anlage ohne Solaranlage sind die Kesselstarts am geringsten, aufgrund der längeren Kesselbetriebszeit für die Produktion des Wärmebedarfs für den Pufferspeicher. Bei den Anlagen mit Solaranlage nahmen mit zunehmender Solarkollektorgröße die Kesselbetriebszeit sowie die Kesselstarts ab, weil in den Übergangszeiten die Solaranlage die Wärmemenge bereitstellt. Ein Grund warum bei den Anlagen mit Solaranlage mehr Kesselstarts auftreten als bei der Anlage ohne Solaranlage könnte wahrscheinlich die schlechte Regelabstimmung zwischen Kessel- und Solarpumpe sein. Die optimale Dimensionierung der Solaranlage hängt vom Wärmeverbrauch und von den Kosten der Pellets und der Solaranlage ab.

Pufferspeichergroße

Die Pufferspeichergroße wurde zwischen 740 und 3.570l variiert. Bei Vergrößerung des Pufferspeichers von 970 auf 3.570l steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um mehr als 4%Punkte an, weil weniger Kesselstarts waren und deshalb entstanden weniger An- und Abfahrverluste (Kesselverluste an die Umgebung). Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 118kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird (weniger Kesselverluste an die Umgebung). Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 1,3%Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems (76,2%) ist bei einer Pufferspeichergroße von 970l bei dieser Anlagenkonstellation am besten. Mit zunehmender Pufferspeichergroße nimmt der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems wieder ab, aufgrund des größeren Pufferspeicherverlusts. Die Rohrleitungsverluste werden mit zunehmender Pufferspeichergroße kleiner. Die Ursachen sind, die kleiner werdenden Pufferspeichertemperaturen und die Kesselbetriebszeiten. Die Kesselbetriebszeiten werden kleiner, da mit zunehmender Pufferspeichergroße mehr Solaranlagenenertrag gespeichert werden kann. Reicht der Solaranlagenenertrag (zu kleine Solarkollektorfläche) für das Laden eines großen Pufferspeichers nicht mehr aus, dann muss der Pelletkessel die zusätzliche Wärmemenge bereitstellen und dadurch steigt die Kesselbetriebszeit wieder an. Die Verbraucher bekommen ihren Vorlaufmassenstrom vom Pufferspeicher und dieser hat üblicherweise eine Temperatur welche an der Anschlussstelle im Pufferspeicher herrscht. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik im Kesselkreis nimmt mit der Kesselbetriebszeit ab (weniger hohe Temperatur in den Rohrleitungen). Die Kesselbetriebszeit und Kesselstarts sind beim kleinen Pufferspeicher (740l) im Gegensatz zum großen Pufferspeicher (3.570l) am größten, weil dort die Einschaltbedingung für den Kessel schneller erreicht wird, aufgrund der geringeren gespeicherten Wärmemenge. Genau sowie bei der Solaranlagengröße hängt die optimale Pufferspeicherdimensionierung vom Wärmeverbrauch und von den Kosten der Pellets und dem Pufferspeicher ab.

Kesselnennleistung

Die Kesselnennleistung wurde zwischen 15 und 8kW variiert. Bei der Verkleinerung der Kesselleistung von 15 auf 8kW steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um ca. 6% Punkte an, aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung (weniger An- und Abfahrverluste). Der 8kW Pelletkessel wird modulierend betrieben (siehe Abbildung 48), aus diesem Grund ist die Betriebszeit pro Start länger. Mit der Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades können 187kg Pellets eingespart werden, da der Kessel effizienter ausgenutzt wird (weniger Kesselverluste an die Umgebung). Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage steigt um 3% Punkte an, da weniger Brennstoff verbraucht wird. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems verschlechtert sich vom 8kW im Vergleich zum 15kW Pelletkessel, aufgrund des größeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik (Rohrleitungsverluste). Der Grund dafür ist, dass der 8kW Pelletkessel länger für die Wärmemengenproduktion benötigt (längere Kesselbetriebszeit) und somit die Rohrleitungen des Kesselkreises länger erwärmt sind. Die Betriebszeit pro Start verlängert sich, aufgrund der längeren Kesselbetriebszeit und der geringeren Kesselstarts (modulierende Kesselbetriebsweise). Die richtige Dimensionierung des Pelletkessels ist sehr wichtig. Ein zu groß dimensionierter Pelletkessel hat schlechte Auswirkungen auf das Kesselbetriebsverhalten (siehe Abbildung 48). Bei der richtigen Kesseldimensionierung fährt der Pelletkessel modulierend in seinem Leistungsbereich und nicht in Stop-and-Go-Betrieb.

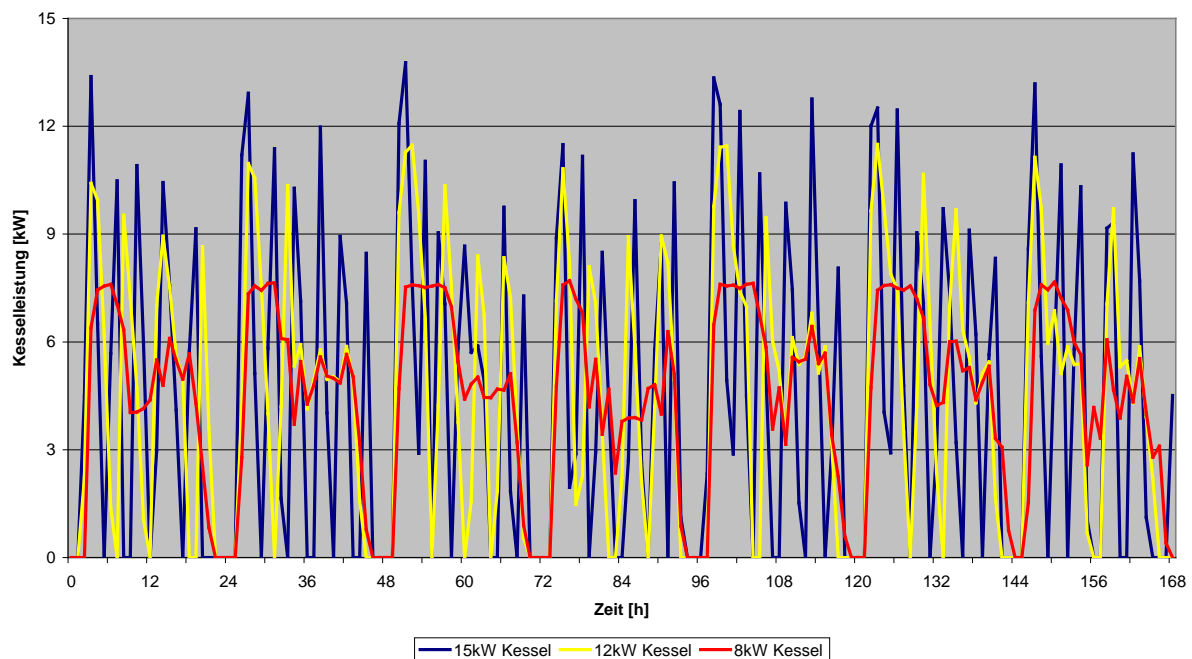


Abbildung 48: Vergleich des Kesselbetriebsverhaltens in Abhängigkeit der Kesselleistung

Erklärungen: Simulationsdaten von Kapitel 5.6.1 unter Abschnitt Kesselnennleistung

5.6.2 Ranking der Optimierungsmaßnahmen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Sensibilitätsanalyse wurden die einzelnen untersuchten Einflussparameter nach ihrer Wirksamkeit gereiht. Als Indikator für die Wirksamkeit der Maßnahme wurde die Einsparung beim Pelletverbrauch herangezogen (siehe Tabelle 28). Die Brennstoffeinsparung wurde deshalb gewählt, weil dieser Punkt ein wesentlicher Indikator für die Effektivität der gesamten Heizungsanlage ist. Die Pelleteinsparung bezieht sich immer auf die Basiseinstellung (Referenzmodell). Als Referenzmodell wurde das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) sowie einer Solaranlage (10m²) (Basis Anlage B) gewählt. Für eine detaillierte Erklärung siehe Kapitel 5.5.1. Tabelle 28 zeigt deutlich die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf die damit erzielbare Pelleteinsparung.

Tabelle 28: Ranking der untersuchten Optimierungsmaßnahmen anhand der Pelleteinsparung

Erläuterungen: Pelleteinsparung ist die Differenz von Basiseinstellung zur besten Maßnahme des Parameters; *) wurde in das Ranking nicht aufgenommen, da die Basiseinstellung der Simulation schon bestmöglich isoliert war (130mm); **) wurde in das Ranking nicht aufgenommen, da die Kesselvorlauftemperatur in der Basiseinstellung schon am untersten Limit (laut Kesselhersteller) eingestellt war (desto höher die Kesselvorlauftemperatur desto mehr Wärmeverluste)

Einflussfaktor	geändert vom Wert auf	Pelleteinsparung [kg]
Isolierung Rohrleitung	von 0 auf 30mm Isolierstärke	395,7
Solaranlagengröße	von 10 auf 20m ² Solarkollektorfläche	304,6
Kesselnennleistung	von 15 auf 8kW Kesselnennleistung	187,4
Kesselstillstandsverluste	von 14,2 auf 7,0525W/K UA _{OFF} - Wert	155,2
Reduzierung der thermischem Masse	von 0 auf 50% Reduzierung der thermischen Masse	129,4
Pufferspeichergöße	von 970 auf 3.3570l Pufferspeichergöße	118,2
Rauchgasaustrittstemperatur	von 160/100 auf 120/60°C (Voll-/Teillast) Rauchgasaustrittstemperatur	92,1
Kesselfreigabe	von 57 auf 52°C Kesselfreigabe	84,9
Solaranlagenabschaltung	von T2+3K auf T2+1K Solaranlagenabschaltung	64,2
O ₂ -Gehalt im Rauchgas	von 7,8/12,4 auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) O ₂ -Gehalt im Rauchgas	43,2
Kesselstartleistung	von 15 auf 5kW Kesselstartleistung	29,9
Kesselabschaltung	von T4 mit 59,6°C auf T3 mit 50°C Kesselabschaltung	8,1
Solaranlagenfreigabe	von T2+10K auf T2+5K Solaranlagenfreigabe	5,7
Isolierung Pufferspeicher		*)
Kesselvorlauftemperatur		**)

Den größten Einfluss auf die Pelleteinsparung hatte die Rohrisolierung. Bei einer Rohrleitungsisolierung, in diesem Fall mit 30mm, werden ca. 400kg Pellets pro Jahr eingespart im Gegensatz zur Anlage ohne Rohrisolierung. Der Grund dafür ist, dass der Pelletkessel ungefähr 1.700kWh weniger Wärmemenge produzieren muss, welche durch die Rohrleitungsverluste in den einzelnen Kreisen verloren geht.

Die Vergrößerung der Solarkollektorfläche hat auch einen großen Einfluss auf den Pelletverbrauch. Prinzipiell sinkt der Pelletverbrauch mit zunehmender Solarkollektorfläche. Bei Vergrößerung der Solarkollektorfläche von 10 (Referenzmodell) auf 20m² können mehr als 300kg Pellets eingespart werden. Die Pelleteinsparung von einer Anlage ohne Solaranlage zur Anlage mit 10m² Solarkollektorfläche (Referenzmodell) sind 720kg und mit 20m² Solarkollektorfläche 1.030kg. Allerdings sind die Brennstoffeinsparungen den Mehrinvestitionskosten durch die Installation von großen Solarkollektorflächen gegenüberzustellen.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine richtige Dimensionierung des Pelletkessels sehr wichtig ist. Ein zu groß dimensionierter Pelletkessel wirkt sich schlecht auf den Pelletverbrauch des Pelletkessels aus. Ein richtig dimensionierter Pelletkessel muss deutlich weniger im Stop-and-Go-Betrieb gefahren werden, wodurch die An- und Abfahrverluste sinken und der Kessel-Jahresnutzungsgrad steigt. So beträgt die Pelleteinsparung beim Betrieb eines 8kW Pelletkessels im Vergleich zu einem 15kW Pelletkessel ca. 190kg (bessere Kesselauslastung).

Maßnahmen zur Reduktion der Kesselstillstandsverluste (Einbau von Rauchgasklappe, Reduktion der thermischen Kesselmasse) sind ebenfalls effizient und bringen Brennstoffeinsparungen zwischen 155kg (Einbau einer Abgasklappe) und 130kg (Reduktion der thermischen Kesselmasse).

Weitere sinnvolle Maßnahmen in Bezug auf die Reduktion des Pelletverbrauchs sind der Einsatz größerer Pufferspeicher, die Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, eine Optimierung der Kesselfreigabe und Solaranlagenabschaltung, eine Reduktion der O₂-Gehalte im Rauchgas sowie die Einstellung einer möglichst geringen Kesselstartleistung. Die Optimierung der Kesselabschaltung sowie Solaranlagenfreigabe bringen hingegen kaum Einsparungen beim Pelletverbrauch.

Die Pufferspeicherisolierung wurde in das Ranking nicht aufgenommen, da das Referenzmodell schon bestmöglich isoliert war (130mm). Die Pufferspeicherisolierung hat ebenfalls einen großen Einfluss auf den Pelletverbrauch. Wird die Pufferspeicherisolierung von 130 auf 50mm reduziert, dann erhöht sich der Pelletverbrauch um ca. 215kg Pellets.

Ebenfalls nicht ins Ranking aufgenommen wurde die Kesselvorlauftemperatur, weil auch das Referenzmodell schon mit der geringstmöglichen Kesselvorlauftemperatur eingestellt wurde. Die Reduzierung der Kesselvorlauftemperatur von 70 auf 60°C bringt eine Pelleteinsparung von ca. 70kg Pellets. Aufgrund der größeren Temperaturdifferenz zwischen thermischer Kesselmasse und Umgebung wird beim Auskühlen oder im Betrieb mehr Wärme an die Umgebung abgegeben, deshalb muss der Pelletkessel die verlorene Wärme zusätzlich produzieren.

5.6.3 Optimierungsmaßnahmen

Es wurden die sinnvollsten Optimierungsmaßnahmen schrittweise kombiniert, um deren Auswirkungen auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad, den Gesamtnutzungsgrad der Anlage sowie auf den Pelletverbrauch zu sehen. Dabei wurden Optimierungspakete für verschiedene Szenarien (bestehende Heizungsanlagen, zukünftige Heizungsanlagen) gemacht. Tabelle 29 zeigt Ergebnisse der optimierten Varianten auf Basis Anlage B.

Tabelle 29: Optimierte Varianten- Basis Anlage B

Erläuterungen: lila hinterlegtes Kästchen ist die Basiseinstellung für die grau hinterlegten Kästchen; Basis Variante B: (Referenzmodell, Details siehe Kapitel 5.5.1.2; Variante 1 B: Startleistung 5kW, Solaranlagenabschaltung T2+1K sowie Kesselfreigabe T4 auf 52°C wurden gegenüber der Basiseinstellung (Referenzmodell) geändert; Variante 2 B: wie Variante 1 B zusätzlich mit 30mm Rohrisolierung; Variante 3 B: wie Variante 2 B zusätzlich wurde die Kesselabschaltung auf T3 mit 3 verschiedenen Ausschalttemperaturen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit) und 45°C Rücklaufanhebung geändert; Variante 4 B: wie Variante 3 B nur wurde versucht Pelletkessel länger modulierend fahren zu lassen, Details siehe Kapitel 5.6.3.1 Abschnitt Variante 4 B; Variante 5 B: wie Variante 3 nur zusätzlich wurde die Rauchgasaustrittstemperatur auf 120/60°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt im Rauchgas auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) und der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K geändert; Variante 6 B: wie Variante 3 B nur mit 8kW Kesselnennleistung, 2,4kW Kesselstartleistung, einem UA_{ON}-Wert von 3,8W/K sowie einem UA_{OFF}-Wert von 7,6W/K; Variante 7 B: wie Variante 5 B nur mit 8kW Kesselnennleistung, 2,4kW Kesselstartleistung, einem UA_{ON}-Wert von 3,8W/K, einem UA_{OFF}-Wert von 4,18W/K; Variante 8 B: ist eine Anlage mit integriertem Kessel im Pufferspeicher, wie Variante 7 B nur wurden Rohrleitungen zwischen Kessel und Pufferspeicher entfernt und die Umgebungstemperatur war die mittlere Pufferspeichertemperatur; Solar-VL-Änderung: wie Variante 7 B nur wurde in den Sommermonaten der Solaranlagenvorlauf auf die Höhe des Kesselrücklaufs gelegt und die Solarwärmetauscherfläche verdoppelt; Einspeisung-Änderung: Kombination von Kessel-RL-Änderung und Solar-VL-Änderung

Optimierungsvarianten	Jahresnutzungsgrad Kessel	Nutzungsgrad Puffer/Heizsystem	Gesamtnutzungsgrad Anlage	Pelletverbrauch	Pelletkesselnutzenergie	Solarenergie	Deckungsgrad Solaranlage	Wärmeverlust Wasserhydraulik	Wärmeverlust Wasserhydraulik Rohre	Wärmeverlust Wasserhydraulik Pufferspeicher	Ø Temperatur Puffer	rel. Last	Betriebszeit Kessel	Kesselstarts	Betriebszeit pro Start	Umgebungsverlust Kessel
	[%]	[%]	[%]	[kg]	[kWh]	[kWh]	[%]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[°C]	[-]	[h]	[-]	[h]	[kWh]
Basis Variante B	77,8	76,2	62,4	3.110	11.642	3.260	21,9	3.541	2.849	692	55,5	0,58	1.341	859	1,6	2.139
Variante 1 B	78,8	76,2	63,3	2.950	11.184	3.583	24,3	3.519	2.787	732	57,8	0,55	1.344	636	2,1	1.886
Variante 2 B	77,4	87,4	71,7	2.603	9.690	3.216	24,9	1.624	884	740	58,3	0,58	1.119	656	1,7	1.843
Variante 3 B	77,5	87,7	72,1	2.558	9.540	3.229	25,3	1.574	841	733	57,9	0,58	1.106	653	1,7	1.831
Variante 4 B	77,5	87,7	72,0	2.561	9.541	3.228	25,3	1.577	843	733	58,0	0,58	1.104	652	1,7	1.841
Variante 5 B	84,1	87,7	76,8	2.388	9.658	3.219	25,0	1.586	851	735	58,1	0,62	1.041	660	1,6	1.331
Variante 6 B	83,8	87,5	76,4	2.372	9.561	3.209	25,1	1.600	866	734	58,3	0,65	1.841	410	4,5	975
Variante 7 B	88,8	87,4	79,9	2.252	9.614	3.213	25,0	1.611	872	738	58,3	0,67	1.805	409	4,4	750
Variante 8 B	93,6	89,1	84,7	2.097	9.437	3.211	25,4	1.383	643	740	58,4	0,68	1.732	423	4,1	221
Variante 7 B	88,8	87,4	79,9	2.252	9.614	3.213	25,0	1.611	872	738	58,3	0,67	1.805	409	4,4	750
Kessel- RL- Änderung	89,1	87,5	79,8	2.366	10.136	2.761	21,4	1.614	868	747	59,1	0,69	1.837	362	5,1	746
Solar- VL- Änderung	88,5	87,8	79,8	2.302	9.802	2.976	23,3	1.562	864	697	56,0	0,66	1.844	430	4,3	792
Einspeisung- Änderung	88,8	87,8	79,8	2.415	10.318	2.526	19,7	1.563	857	705	56,7	0,69	1.874	381	4,9	788

Das lila hinterlegte Kästchen entspricht der Basiseinstellung für die grau hinterlegten Kästchen. Die Basis Variante B (Erklärungen zu den Ergebnissen siehe Kapitel 5.6.1) wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis) verwendet.

5.6.3.1 Bestehende Heizungsanlagen

Auf Basis des Rankings der Optimierungsmaßnahmen anhand der Brennstoffeinsparung, wurden optimierte Varianten mit mehreren Verbesserungen definiert. Die Varianten 1 bis 4 sind Maßnahmen, die an bestehenden Heizungsanlagen durchgeführt werden können. Nachfolgend werden die Verbesserungen der einzelnen Varianten erklärt.

Variante 1 B

Bei Variante 1 B wurden nur Verbesserungen an der Regelung beziehungsweise der Regeleinstellung durchgeführt. Dabei wurde die Startleistung von 15 auf 5kW, die Bedingung für die Solarabschaltung auf den Temperatursensor (2)+1K und die Kesselfreigabe (Temperatursensor (4)) auf 52°C gesetzt (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Das Ergebnis ist, dass sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad und der Gesamtnutzungsgrad der Anlage im Vergleich zur Basis-Anlage B um 1%Punkte sowie der Pelletverbrauch um 159kg verbessern. Der Nutzungsgrad vom Pufferspeicher/Heizsystem bleibt unverändert im Vergleich zur Basis-Anlage B. Die Rohr- und Pufferspeicherverluste verschieben sich leicht, aber insgesamt bleiben die Wärmeverluste der Wasserhydraulik mit der Basis-Anlage B fast gleich. Die Betriebszeit pro Start ist im Vergleich zur Basis-Anlage B länger, aufgrund der geringeren Kesselstarts (Kesselbetriebszeit verändert sich nicht). Die Kesselverluste an die Umgebung verringern sich mit den angewandten Maßnahmen um 253kWh im Vergleich zur Basis-Anlage B.

Variante 2 B

Variante 2 B enthält die gleichen Verbesserungsmaßnahmen wie Variante 1 B sowie zusätzlich eine 30mm Rohrisolierung. Zur Variante 1 B gibt es eine Kessel-Jahresnutzungsgrad-Verschlechterung um 1,4%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante B um 0,4%Punkte), wahrscheinlich aufgrund des häufigeren Stop-and-Go-Betriebs, weil wegen der Rohrisolierung der Wärmebedarf insgesamt verringert wird. Jedoch verbessern sich im Vergleich zur Variante 1 B der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems um 11,3 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 11,2%Punkte) und der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 8,4%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante B um 9,3%Punkte). Somit können 348kg Pellets (im Vergleich zur Basis-Variante B um 507kg) eingespart werden. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik sinkt im Vergleich zur Variante 1 B um 1.918kWh (im Vergleich zur Basis-Variante B um 1.896kWh) aufgrund der geringeren Rohrleitungsverluste (wegen isolierter Rohrleitungen). Die Kesselbetriebszeit im Vergleich zur Variante 1 B wird reduziert, weil der Pelletkessel weniger Wärmemenge im Jahr bereitstellen muss (weniger Wärmeverluste).

Variante 3 B

Bei Variante 3 B wurde zusätzlich zur Variante 2 B die Kesselabschaltung auf den Temperatursensor (3) (Kesselrücklauf) mit unterschiedlichen Ausschalttemperaturen sowie die Rücklaufanhebung auf 45°C eingestellt. Die Ausschalttemperatur war von Dezember bis März 55°C, April, Oktober, November 50°C und von Mai bis September 45°C. Die Rücklaufanhebung um 10°C sollte dazu dienen, den Leistungsregelungsbereich des Pelletkessels zu vergrößern. Je kleiner die Kesseltemperaturspreizung ist, desto später erreicht der Pelletkessel seine Minimalleistung. Die Verbesserungsmaßnahmen führen im Vergleich zur Variante 2 B zu einer geringen Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrads um 0,1 (wegen des bereits bei Variante 2 beschriebenen Effekts der Rohrisolierung) (Verschlechterung im Vergleich zur Basis-Variante B um 0,3%Punkte) und des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems um 0,3 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 11,4%Punkte) sowie des Gesamtnutzungsgrades der Anlage um 0,4%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante B um 9,7%Punkte). Der Pelletverbrauch verringert sich um 45kg im

Vergleich zur Variante 2 B (im Vergleich zur Basis-Variante B um 552kg). Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Variante 2 B dabei um 50kWh reduziert werden (im Vergleich zur Basis-Variante B um 1.967kWh), wahrscheinlich aufgrund der jahreszeitlichen (Winter-, Sommer- und Übergangszeit) angepassten Kesselabschaltung. Die anderen Parameter bleiben annähernd gleich im Vergleich zur Variante 2 B.

Variante 4 B

Bei der Variante 4 B wurde versucht, dass der Pelletkessel länger modulierend in seinem Leistungsbereich fährt. Dafür wurde die Kesselsolltemperatur an den Rücklauf angepasst. War die Rücklauftemperatur größer als 55°C, dann stieg die Kesselsolltemperatur mit einer Differenz von 7,5°C zur Rücklauftemperatur bis maximal zur Kesselabschalttemperatur an. Die 7,5°C Temperaturspreizung entsprechen 50% der Kesselleistung. Diese Maßnahme hat aber keine wesentlichen Auswirkungen auf das Betriebsverhalten (Stop-and-Go-Betrieb) des Pelletkessels sowie auf die anderen Parameter und wurde daher nicht weiter verfolgt.

Schlussfolgerung

Die oben diskutierten Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Isolierung der Rohrleitungen ein großes Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch aufweist. Durch die damit verbundene Reduktion des Wärmebedarfs sinkt allerdings die Auslastung des Pelletkessels, was sich negativ auf den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels auswirkt. Dieser negative Einfluss kann allerdings durch eine Optimierung der Kessel- und Anlagenregelung (geringe Kesselstartleistung, kleine Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs für die Solaranlagenabschaltung, möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) kompensiert werden, sodass insgesamt eine deutliche Reduktion des Pelletverbrauchs sowie eine signifikante Steigerung des Jahresnutzungsgrades der Gesamtanlage auch bei bestehenden Anlagen erzielt werden kann.

5.6.3.2 Zukünftige Heizungsanlagen

Variante 5 B zeigt die Auswirkungen der Kesseleinstellungsänderung (Reduktion des O₂-Gehalts im Rauchgas, der Rauchgasaustrittstemperatur und der Kesselverluste an die Umgebung). Die Variante 6 B ist wie Variante 3 B und Variante 7 B ist wie Variante 5 B, nur wurde der 15kW durch einen 8kW Pelletkessel ersetzt und der UA_{OFF}- und UA_{ON}-Wert entsprechend der Pelletkesselgröße angepasst. Die Variante 8 B ist eine Biomassekleinfeuerung (8kW) integriert im Pufferspeicher mit Solaranlage.

Variante 5 B

Bezüglich Regelungseinstellungen und Rohrisolierung wurde auf Variante 3 B aufgebaut, darüber hinaus erfolgten zusätzlich Änderungen am Pelletkessel. Die Rauchgasaustrittstemperatur wurde auf 120/100°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) und der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K gesetzt. Der UA_{OFF}-Wert ist eine 10%ige Erhöhung des UA_{ON}-wertes. Diese Annahme für den UA_{ON}-Wert wurde getroffen, weil im Stillstand ein geringer Kaminzug gewährleistet sein muss, wodurch die Verluste an die Umgebung etwas höher sind als während des Betriebs. Der Kessel-

Jahresnutzungsgrad steigt aufgrund geringerer Rauchgasverluste und Kesselverluste an die Umgebung im Vergleich zur Variante 3 B um 6,5 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 6,2%Punkte) und der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 4,7%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante B um 14,4%Punkte). Der Pelletverbrauch kann im Vergleich zur Variante 3 B um 172kg Pellets reduziert werden (im Vergleich zur Basis-Variante B um 722kg). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik sowie die Kesselstarts bleiben im Vergleich zur Variante 3 B unverändert. Aufgrund der minimalen Betriebszeitminimierung verringert sich die Betriebszeit pro Start im Vergleich zur Variante 3 B.

Variante 6 B

Variante 6 B ist gleich wie Variante 3 B, nur mit einer Kesselnennleistung von 8kW, einer Startleistung von 2,4kW, einen UA_{ON} -Wert von 3,8W/K, einen UA_{OFF} -Wert von 7,6W/K. Im Vergleich zur Variante 3 B steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 6,3 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 6%Punkte) sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 4,3%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante B um 14%Punkte). Der Pelletverbrauch kann im Vergleich zur Variante 3 B um 186kg minimiert werden (im Vergleich zur Basis-Variante B um 738kg), obwohl der 8kW Pelletkessel um 735h länger für die gleiche Wärmemengenproduktion als der 15kW Pelletkessel benötigt. Die Gründe für die Verbesserungen sind die geringeren Kesselverluste an die Umgebung (weniger thermische Kesselmasse sowie An- und Abfahrverluste) sowie der modulierende Kesselbetrieb (längere Betriebszeit pro Start). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems ist im Vergleich zur Variante 3 B um 0,2%Punkte schlechter (Steigerung im Vergleich zur Basis-Variante B um 11,2%Punkte), aufgrund des größeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik (längere Kesselbetriebszeit, daher befindet sich im Kesselkreis für längere Zeit eine höhere Temperatur).

Variante 7 B

Wie Variante 5 B, nur mit einer Kesselnennleistung von 8kW, einer Startleistung von 2,4kW sowie einen UA_{ON} -Wert von 3,8W/K und UA_{OFF} -Wert von 4,18W/K. Im Vergleich zur Variante 6 B steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 5%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante B um 10,9%Punkte) sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 3,5%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante B um 17,5%Punkte), aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung (weniger Stillstandsverluste) und Rauchgasverluste (geringer Rauchgasaustrittstemperatur und O_2 -Gehalt im Rauchgas). Zusätzlich minimierte sich im Vergleich zur Variante 6 B der Pelletverbrauch um 120kg (im Vergleich zur Basis-Variante B um 858kg). Die anderen Parameter bleiben annähernd gleich im Vergleich zur Variante 6 B.

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) verwendet.

Variante 8 B

Bei der Variante 8 B handelt es sich um eine integrierte Biomassekleinfeuerung (8kW) in einem Pufferspeicher (970l) sowie einer Solaranlage (10m²). Für eine detaillierte Erklärung siehe Kapitel 4.6.4.2. Diese Variante wurde untersucht, weil bei diesem Heizungssystem die

Kesselverluste nicht an die Umgebung sondern an das Pufferspeicherwasser abgegeben werden und somit die Kesselverluste signifikant reduziert werden können. Diese Maßnahme hat positive Auswirkungen auf den Brennstoffverbrauch. Variante 8 B enthält die gleichen Maßnahmen wie Variante 7 B, nur wurden die Rohrleitungen zwischen Pelletkessel und Pufferspeicher entfernt und als Umgebungstemperatur wurde die mittlere Pufferspeichertemperatur verwendet. Es wird im Vergleich zur Variante 7 B eine Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades von 4,8 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 15,7%Punkte), des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems von 1,6 (im Vergleich zur Basis-Variante B um 12,8%Punkte) und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage von 4,8%Punkte erreicht (im Vergleich zur Basis-Variante B um 22,4%Punkte). Dadurch können noch 155kg Pellets im Vergleich zur Variante 7 B eingespart werden (im Vergleich zur Basis-Variante B um 1.013kg). Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Variante 7 B um 227kWh verringert werden (im Vergleich zur Basis-Variante B um 2.158kWh), aufgrund der entfallenen Rohrleitungen zwischen Pufferspeicher und Pelletkessel. Der Pelletkessel ist im Vergleich zur Variante 7 B um 73h weniger in Betrieb. Bei den Kesselstarts hat sich im Vergleich zur Variante 7 B nicht viel geändert. Die Kesselverluste an die Umgebung sind aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Umgebung im Vergleich zur Variante 7 B um 528kWh kleiner (im Vergleich zur Basis-Variante B um 1.019kWh).

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinföderung (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) verwendet.

Schlussfolgerung

Wie schon bei den bestehenden Heizungsanlagen diskutiert, kann ein großes Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch durch die Isolierung der Rohrleitungen erfolgen. Durch die damit verbundene Reduktion des Wärmebedarfs sinkt allerdings die Auslastung des Pelletkessels, was sich negativ auf den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels auswirkt. Dieser negative Einfluss kann allerdings durch eine richtige Dimensionierung des Pelletkessels und Optimierungen am Pelletkessel (Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehalts im Rauchgas sowie der Kesselverluste an die Umgebung bei Stillstand) sowie einer Optimierung der Kessel- und Anlagenregelung (geringe Kesselstartleistung, kleine Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektoraustritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs für die Solaranlagenabschaltung, möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) kompensiert werden, sodass insgesamt eine deutliche Reduktion des Pelletverbrauchs sowie eine signifikante Steigerung des Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels sowie des Jahresnutzungsgrades des Gesamtsystems erzielt werden kann. Mit der Ausführung Pelletkessel integriert im Pufferspeicher kann der Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels, der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage sowie das Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch im Vergleich zu den optimierten herkömmlichen Pelletkesseln noch weiter gesteigert werden. Einen großen Anteil der zusätzlichen Verbesserung tragen die geringeren Kesselverluste an die Umgebung bei (die Temperaturdifferenz zwischen thermischer Kesselmasse und Pufferspeichertemperatur ist deutlich niedriger als bei herkömmlichen Kesseln).

5.6.3.3 Maßnahmen zur besseren Kessel-/Solaranlagenausnutzung

Bei der TRNSYS-Simulation wurde festgestellt, dass die Pufferspeicherladung bei den Anlagen mit Solaranlagen nicht optimal funktionierte. Aus diesem Grund wurde versucht den Pufferspeicher im Winter mit dem Pelletkessel und im Sommer mit der Solaranlage besser laden zu können. Dabei wurden die Einspeisungspositionen im Sommer/Winter für den Pelletkessel sowie Solaranlage verändert. Die Basisvariante für die drei Untersuchungen war Variante 7 B.

Kesselrücklauf-Einspeisungsanpassung

In den Wintermonaten (November bis März) wurde der Kesselrücklauf auf die Höhe des Solaranlagenvorlaufs gelegt, um den Pufferspeicher besser durchladen zu können, weil die Solaranlage im Winter nur selten in Betrieb war. Die Kesselregelung wurde im Winter auf den Temperatursensor (2) angepasst (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Der Kessel-Jahresnutzungsgrad verbessert im Vergleich zur Variante 7 B sich um 0,3%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante B um 11,2%Punkte), wahrscheinlich weil der Pelletkessel eine längere Betriebszeit pro Start aufwies. Bei den anderen Parametern gibt es im Vergleich zur Variante 7 B fast keine Abweichungen. Insgesamt betrachtet ist diese Maßnahme aber nicht sinnvoll, weil der Pelletkessel im Vergleich zur Variante 7 B um 100kg mehr Pellets verbraucht (Einsparung im Vergleich zur Basis-Variante B um 744kg).

Solaranlagenvorlauf-Einspeisungsanpassung

Der Solaranlagenwärmetauscher wurde in den Sommer- und Übergangsmonaten (April bis Oktober) verdoppelt und der Solaranlagenvorlauf gleichzeitig auf die Höhe des Kesselrücklaufs gelegt, damit die Solaranlage besser ausgenutzt werden kann. Die Solaranlagenregelung wurde für diese Bedingung an den Temperatursensor (3) angepasst (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23). Diese Maßnahme führt ebenfalls zu keiner Verbesserung im Vergleich zur Variante 7 B, weil schlussendlich der Solaranlagenenertrag kleiner ist als bei der ursprünglichen Ausführung. Der Grund ist die Ein- und Ausschaltbedingung der Solaranlage, da im Sommer auf dem Temperatursensor (3) ein höheres Temperaturniveau als am Temperatursensor (2) ist.

Kesselrücklauf- und Solaranlagenvorlauf-Einspeisungsanpassung

Bei der Kombination der beiden Anpassungen waren die Einspeisungen immer auf der gleichen Höhe. Die Regelung beziehungsweise Regeleinstellung wurde für den Pelletkessel sowie der Solaranlage für Sommer/Winter angepasst. Es stellte sich heraus, dass diese Variante die schlechteste von den drei Varianten ist, weil im Vergleich zur Variante 7 B der Pelletverbrauch um 113kg ansteigt (Einsparung im Vergleich zur Basis-Variante B um 695kg). Der Grund warum diese beiden Regelungen nicht miteinander funktionieren, lag daran, dass die Regelparameter (Temperatursensoren) der beiden Regelungen auf der gleichen Höhe lagen.

Schlussfolgerung

Die Maßnahmen zur besseren Kessel-/Solaranlagenausnutzung zeigen keine Verbesserungen. Bei der Anpassung der Kesselrücklaufeinspeisung fährt der Pelletkessel in den

Wintermonaten länger (Pufferspeicher wird mehr beladen), aber aufgrund der längeren Betriebszeit steigt der Brennstoffverbrauch an. Die Solaranlagenvorlaufzeinspeisungs-Anpassung zeigt ebenfalls keine Verbesserung, aufgrund des höheren Temperaturniveaus im Pufferspeicher beim Temperatursensor (3) im Vergleich zum Temperaturniveau beim Temperatursensor (2). Das hat Auswirkungen auf die Ein- und Ausschaltbedingung. Die Einschaltbedingung wird nicht so oft erreicht und die Ausschaltbedingung wird zu schnell erreicht. Aus den zuvor erklärten Problemen macht eine Kombination der beiden Einspeisungsanpassung keinen Sinn.

5.6.4 Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen für andere Anlagenverschaltungen

Zum Schluss wurden auf Basis des Wärmebedarfs der Anlage B (um die verschiedenen Anlagen direkt miteinander vergleichen zu können) die anderen Anlagen A, G und I bewertet und auf Basis der Sensibilitätsanalyse mit den sinnvollsten Optimierungsmaßnahmen simuliert.

5.6.4.1 Anlage A

Nachfolgend werden die Verbesserungen der einzelnen Varianten erklärt. Tabelle 30 zeigt die optimierten Varianten auf Basis Anlage A.

Tabelle 30: Optimierte Varianten- Basis Anlage A

Erläuterungen: Basis Anlage A: Einstellungen wie Basis Anlage A (Referenzmodell, Details unter Kapitel 5.5.1.2) nur ohne Solaranlage; Variante 1 A: Startleistung 5kW, die Kesselfreigabe T4 auf 52°C, 30mm Rohrisolierung sowie die Kesselabschaltung auf T1 mit 3 verschiedenen Ausschalttemperaturen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit) und 45°C Rücklaufanhebung wurden gegenüber der Basis Anlage A geändert; Variante 2 A: wie Variante 1 A zusätzlich wurde die Rauchgasaustrittstemperatur auf 120/60°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt im Rauchgas auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) sowie der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K geändert; Variante 3 A: wie Variante 2 A nur mit 8kW Kesselnennleistung, 2,4kW Kesselstartleistung, einem UA_{ON}-Wert von 3,8W/K sowie einem UA_{OFF}-Wert von 4,18W/K; Variante 4 A: ist eine Anlage mit einem integrierten Kessel im Pufferspeicher, wie Variante 3 A nur wurden die Rohrleitungen zwischen Kessel und Pufferspeicher entfernt und als Umgebungstemperatur wurde die mittlere Pufferspeichertemperatur verwendet

Optimierungsvarianten	Jahres-nutzungs-grad Kessel	Nutzungs-grad Puffer /Heizsystem	Gesamt-nutzungs-grad Anlage	Pellet-verbrauch	Pelletkessel-nutzungsenergie	Wärmeverlust Wasserhydraulik	Wärmeverlust Wasserhydraulik Rohre	Wärmeverlust Wasserhydraulik Pufferspeicher	Ø Temperatur Puffer	rel. Last	Betriebszeit Kessel	Kessel-starts	Betriebszeit pro Start	Umgebungs-verlust Kessel
	[%]	[%]	[%]	[kg]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[°C]	[-]	[h]	[-]	[h]	[kWh]
Basis Variante A	76,6	79,0	60,5	3.901	14.383	3.026	2.479	547	52,2	0,57	1.677	857	2,0	2.887
Variante 1 A	76,4	90,1	68,8	3.386	12.437	1.227	727	500	48,8	0,58	1.438	749	1,9	2.629
Variante 2 A	82,7	90,2	74,6	3.139	12.488	1.227	726	501	48,9	0,62	1.348	749	1,8	1.969
Variante 3 A	88,2	89,6	79,1	2.968	12.593	1.308	729	579	48,8	0,70	2.264	382	5,9	1.053
Variante 4 A	93,8	91,5	85,8	2.739	12.357	1.051	470	581	49,0	0,71	2.171	420	5,2	261

Basis-Variante A

Der Wärmebedarf und der Aufbau für die Basis-Variante A war wie vom Referenzmodell (Anlage B), nur der Solaranlagenkreis (Solarkollektor, Pumpe und Rohrleitungen sowie der Solarpumpenregler) wurde entfernt.

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) (Basis) verwendet.

Variante 1 A

Bei Variante 1 A wurden Verbesserungen an der Regelung beziehungsweise der Regeleinstellung durchgeführt sowie die Rohrleitungen isoliert. Dabei wurden die Rohrleitungen mit 30mm Isolierung isoliert, die Startleistung von 15 auf 5kW, die Kesselfreigabe (Temperatursensor (4)) auf 52°C, die Kesselabschaltung auf den Temperatursensor (1) (Kesselrücklauf) mit drei unterschiedlichen Ausschalttemperaturen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit) sowie die Rücklaufanhebung auf 45°C eingestellt (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23, Beschreibung für die Änderung der Rücklaufanhebung siehe Kapitel 5.6.3.1 Abschnitt Variante 3 B). Die Ausschalttemperatur war von Dezember bis März 55°C, April, Oktober, November 50°C und von Mai bis September 45°C. Die Verbesserungsmaßnahmen führen im Vergleich zur Basis-Variante A zu keiner Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrads (wegen des bereits bei Variante 2 B beschriebenen Effekts der Rohrisolierung, siehe Kapitel 5.6.3.1), aber zu einer Steigerung des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems um 11,2 und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage um 8,3%Punkte sowie zu einer Pelleteinsparung von 516kg. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Basis-Variante A um 1.800kWh reduziert werden aufgrund der Rohrisolierung (weniger Rohrleitungsverluste) und der jahreszeitlich (Winter-, Sommer- und Übergangszeit) angepassten Kesselabschaltung.

Variante 2 A

Variante 2 A baut auf Variante 1 A auf, nur wurden zusätzlich Änderungen am Pelletkessel vorgenommen. Die Rauchgasaustrittstemperatur wurde auf 120/100°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) und der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K gesetzt. Der UA_{OFF}-Wert ist eine 10%ige Erhöhung des UA_{ON}-Wertes. Diese Annahme für den UA_{ON}-Wert wurde getroffen, weil im Stillstand ein geringer Kaminzug gewährleistet sein muss, wodurch die Verluste an die Umgebung etwas höher sind als während des Betriebs. Der Kessel-Jahresnutzungsgrad steigt aufgrund geringerer Rauchgasverluste und Kesselverluste an die Umgebung im Vergleich zur Variante 1 A um 6,3 (im Vergleich zur Basis-Variante A um 6,1%Punkte) und der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 5,7%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante B um 8,3%Punkte). Der Pelletverbrauch kann im Vergleich zur Variante 1 A um 246kg Pellets reduziert werden (im Vergleich zur Basis-Variante A um 516kg). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems, der Wärmeverlust der Wasserhydraulik sowie die Kesselstarts bleiben im Vergleich zur Variante 1 A unverändert. Aufgrund der minimalen Betriebszeitminimierung verringert sich die Betriebszeit pro Start im Vergleich zur Variante 1 A.

Variante 3 A

Wie Variante 2 A, nur mit einer Kesselnennleistung von 8kW, einer Startleistung von 2,4kW sowie einen UA_{ON}-Wert von 3,8W/K und UA_{OFF}-Wert von 4,18W/K (UA-Werte angepasst an die kleinere Kesselgröße). Im Vergleich zur Variante 2 A steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 5,5 (im Vergleich zur Basis-Variante A um 11,6%Punkte) sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 4,5%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante A um 18,5%Punkte). Der Pelletverbrauch kann im Vergleich zur Variante 2 A um 171kg minimiert werden (im Vergleich zur Basis-Variante A um 934kg), obwohl der 8kW Pelletkessel um 917h länger für die gleiche Wärmemengenproduktion als der 15kW Pelletkessel benötigt. Die

Gründe für die Verbesserungen sind die geringeren Kesselverluste an die Umgebung (weniger thermische Kesselmasse und An- und Abfahrverluste) sowie der modulierende Kesselbetrieb (längere Betriebszeit pro Start). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems ist im Vergleich zur Variante 2 A um 0,6% Punkte schlechter (Steigerung im Vergleich zur Basis-Variante A um 10,7% Punkte), aufgrund des größeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik (längere Kesselbetriebszeit, daher befindet sich im Kesselkreis für längere Zeit eine höhere Temperatur).

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (970l) (optimiert) verwendet.

Variante 4 A

Bei der Variante 4 A handelt es sich um eine integrierte Biomassekleinfeuerung (8kW) in einem Pufferspeicher (970l). Für eine detaillierte Erklärung siehe Kapitel 4.6.4.2. Diese Variante wurde untersucht, weil bei diesem Heizungssystem die Kesselverluste nicht an die Umgebung sondern an das Pufferspeicherwasser abgegeben werden und somit die Kesselverluste signifikant reduziert werden können. Diese Maßnahme hat positive Auswirkungen auf den Brennstoffverbrauch. Variante 4 A enthält die gleichen Maßnahmen wie Variante 3 A, nur wurden die Rohrleitungen zwischen Pelletkessel und Pufferspeicher entfernt und als Umgebungstemperatur wurde die mittlere Pufferspeichertemperatur verwendet. Im Vergleich zur Variante 3 A wird eine Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades von 5,6 (im Vergleich zur Basis-Variante A um 17,1% Punkte) und des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems von 1,9 (im Vergleich zur Basis-Variante A um 12,5% Punkte) sowie des Gesamtnutzungsgrades der Anlage von 6,8% Punkten erreicht (im Vergleich zur Basis-Variante A um 25,3% Punkte). Dadurch können noch 229kg Pellets im Vergleich zur Variante 3 A eingespart werden (im Vergleich zur Basis-Variante A um 1.162kg). Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Variante 3 A um 257kWh verringert werden (im Vergleich zur Basis-Variante A um 1.976kWh), aufgrund der entfallenen Rohrleitungen zwischen Pufferspeicher und Pelletkessel. Der Pelletkessel ist im Vergleich zur Variante 3 A um 94h weniger in Betrieb (im Vergleich zur Basis-Variante A um 494h). Bei den Kesselstarts hat sich nicht viel geändert im Vergleich zur Variante 3 A. Die Kesselverluste an die Umgebung sind aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Kessel und Umgebung im Vergleich zur Variante 3 A um 792kWh kleiner (im Vergleich zur Basis-Variante A um 2.626kWh).

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert) verwendet.

Schlussfolgerung

Die Optimierungsmaßnahmen (richtige Kesseldimensionierung, Isolierung der Rohrleitungen, Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehalts im Rauchgas sowie der Kesselverluste an die Umgebung bei Stillstand, geringe Kesselstartleistung, möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) haben ein ähnliches Verhalten beziehungsweise gleiche Trends gezeigt, wie bei Anlage B (siehe Kapitel 5.6.3.2). Auch bei der Variante mit Pelletkessel integriert im Pufferspeicher zeigen sich die gleichen positiven Auswirkungen

bezüglich Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels, Jahresnutzungsgrad der Anlage sowie Brennstoffeinsparung, wie bei Anlage B (siehe Kapitel 5.6.3.2).

5.6.4.2 Anlage G

Die Bewertung bezieht sich jeweils auf die Variante davor beziehungsweise sonst wird es erwähnt. Nachfolgend werden die Verbesserungen der einzelnen Varianten erklärt. Tabelle 31 zeigt die optimierten Varianten auf Basis Anlage G.

Tabelle 31: Optimierte Varianten- Basis Anlage G

Erläuterungen: Basis Variante G: Einstellungen wie Basis Anlage B (Referenzmodell, Details siehe Kapitel 5.5.1.2) nur mit einen Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²); Variante 1 G: Startleistung 5kW, die Kesselfreigabe T4 auf 52°C, 30mm Rohrisolierung, die Kesselabschaltung auf T3 mit 3 verschiedenen Ausschalttemperaturen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit) sowie die Solaranlagenabschaltung auf T2+1K und 45°C Rücklaufanhebung wurden gegenüber der Basis Variante G geändert; Variante 2 G: wie Variante 1 G nur mit 8kW Kesselnennleistung, 2,4kW Kesselstartleistung, einem UA_{ON}-Wert von 3,8W/K, einem UA_{OFF}-Wert von 4,18W/K, einer Rauchgasaustrittstemperatur von 120/60°C (Voll-/Teillast) sowie einem O₂-Gehalt im Rauchgas von 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast)

Optimierungsvarianten	Jahresnutzungsgrad Kessel	Nutzungsgrad Puffer/Heizsystem	Gesamtnutzungsgrad Anlage	Pelletverbrauch	Pelletkessel-nutzenergie	Solar-energie	Deckungsgrad Solaranlage	Wärmeverlust Wasserhydraulik	Wärmeverlust Wasserhydraulik Rohre	Wärmeverlust Wasserhydraulik Pufferspeicher	Ø Temperatur Puffer	rel. Last	Betriebszeit Kessel	Kesselstarts	Betriebszeit pro Start	Umgebungs-verlust Kessel
	[%]	[%]	[%]	[kg]	[kWh]	[kWh]	[%]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[°C]	[-]	[h]	[-]	[h]	[kWh]
Basis Variante G	80,6	74,4	64,0	2.643	10.243	5.031	32,9	3.912	2.630	1.282	60,9	0,60	1.130	324	3,5	1.444
Variante 1 G	80,9	84,1	73,1	2.215	8.614	4.894	36,2	2.150	787	1.363	64,6	0,63	905	251	3,6	1.231
Variante 2 G	85,5	83,8	75,6	2.110	8.681	4.868	35,9	2.191	821	1.370	64,9	0,71	1.530	169	9,1	686

Basis-Variante G

Der Wärmebedarf und der Aufbau für Basis-Anlage G war wie der vom Referenzmodell (Anlage B), nur die Solaranlage wurde von 10 auf 20m² erweitert und der Pufferspeicher von 970 auf 2.260l vergrößert.

Variante 1 G

Bei Variante 1 G wurden im Vergleich zur Basis-Variante G Verbesserungen an der Regelung beziehungsweise der Regeleinstellung durchgeführt sowie die Rohrleitungen isoliert. Dabei wurden die Rohrleitungen mit 30mm Isolierung isoliert, die Startleistung von 15 auf 5kW, die Kesselfreigabe (Temperatursensor (4)) auf 52°C, die Kesselabschaltung auf den Temperatursensor (3) (Kesselrücklauf) mit drei unterschiedlichen Ausschalttemperaturen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit) und die Solaranlagenabschaltung auf Temperatursensor (2)+1K sowie die Rücklaufanhebung auf 45°C eingestellt (Temperatursensorposition siehe Tabelle 23, Beschreibung für die Änderung der Rücklaufanhebung siehe Kapitel 5.6.3.1 Abschnitt Variante 3 B). Die Ausschalttemperatur war von Dezember bis März 55°C, April, Oktober, November 50°C und von Mai bis September 45°C. Die Verbesserungsmaßnahmen führen im Vergleich zur Basis-Variante G zu einer geringen Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrads um 0,3% Punkte. Der Grund warum keine größere Steigerung zustande erzielt wird, liegt am Effekt der Rohrisolierung, detaillierte Erklärung siehe Kapitel 5.6.3.1. Im Vergleich zur Basis-Variante G kommt es zur Steigerung des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems um 9,7 und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage um 9% Punkte sowie zu einer Pelleteinsparung von 428kg. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Basis-Variante G um

1.762kWh reduziert werden aufgrund der Rohrisolierung (weniger Rohrleitungsverluste) und der jahreszeitlich (Winter-, Sommer- und Übergangszeit) angepassten Kesselabschaltung.

Variante 2 G

Variante 2 G baut auf Variante 1 G auf, allerdings mit einer Kesselnennleistung von 8kW, einer Startleistung von 2,4kW sowie einem UA_{ON} -Wert von 3,8W/K und UA_{OFF} -Wert von 4,18W/K (UA-Werte angepasst an die kleinere Kesselgröße). Im Vergleich zur Variante 1 G steigt der Kessel-Jahresnutzungsgrad um 4,7 (im Vergleich zur Basis-Variante G um 4,9%Punkte) sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 2,6%Punkte an (im Vergleich zur Basis-Variante G um 11,6%Punkte). Der Pelletverbrauch kann im Vergleich zur Variante 1 G um 105kg minimiert werden (im Vergleich zur Basis-Variante G um 533kg), obwohl der 8kW Pelletkessel im Vergleich zur Variante 1 G um 625h länger für die gleiche Wärmemengenproduktion als der 15kW Pelletkessel benötigt. Die Gründe für die Verbesserungen sind die geringeren Kesselverluste an die Umgebung (weniger thermische Kesselmasse und An- und Abfahrverluste) sowie der modulierende Kesselbetrieb (längere Betriebszeit pro Start). Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems ist im Vergleich zur Variante 1 G um ca. 0,2%Punkte schlechter, aufgrund des größeren Wärmeverlusts der Wasserhydraulik (längere Kesselbetriebszeit, daher befindet sich im Kesselkreis für längere Zeit eine höhere Temperatur).

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) (optimiert) verwendet.

Schlussfolgerung

Die Anlage ist vom Aufbau gleich wie Anlage B, nur ist ein größerer Pufferspeicher (2.260l) und eine größere Solaranlage (20m²) verbaut. Die Anlage G zeigt bei der Umsetzung der einzelnen Optimierungsmaßnahmen (richtige Kesseldimensionierung, Isolierung der Rohrleitungen, Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehalts im Rauchgas sowie der Kesselverluste an die Umgebung bei Stillstand, geringe Kesselstartleistung, kleine Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektoraustritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs für die Solaranlagenabschaltung, möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) ein ähnliches Betriebsverhalten beziehungsweise die gleichen Trends wie Anlage B (siehe Kapitel 5.6.3.2). Allerdings wirken sich bei dieser Anlage die Optimierungsmaßnahmen nicht so signifikant auf den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels sowie des Gesamtnutzungsgrades der Anlage aus wie im Vergleich zur Anlage B. Ein Grund dafür ist der schon relativ hohe Kessel-Jahresnutzungsgrad der Basis-Variante.

5.6.4.3 Anlage I

Nachfolgend werden die Verbesserungen der einzelnen Varianten erklärt. Tabelle 32 zeigt die optimierten Varianten auf Basis Anlage I.

Tabelle 32: Optimierte Varianten- Basis Anlage I

Erläuterungen: Basis Anlage I: Einstellungen wie Basis-Variante B (Referenzmodell, Details siehe Kapitel 5.5.1.2) nur ohne Pufferspeicher und Solaranlage sowie ohne Warmwasserbereitung (Wärmebedarf für Warmwasser wurde nicht simuliert); Variante 1 I: die Rohrleitungen wurden mit 30mm isoliert gegenüber der Basis-Variante I; Variante 2 I: wie Variante 1 I nur zusätzlich wurde die Rauchgasaustrittstemperatur auf 120/60°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt im Rauchgas auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) und der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K geändert, Variante 3 I: wie Variante 2 I nur wurde zusätzlich auch der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung simuliert

	Jahres-nutzungs-grad Kessel	Nutzungs-grad Puffer /Heizsystem	Gesamt-nutzungs-grad Anlage	Pellet-verbrauch	Pelletkessel-nutzenergie	Wärmeverlust Wasserhydraulik	Wärmeverlust Wasserhydraulik Rohre	rel. Last	Betriebszeit Kessel	Kessel-starts	Betriebszeit pro Start	Umgebungs-verlust Kessel
Optimierungsvarianten	[%]	[%]	[%]	[kg]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	[h]	[-]	[h]	[kWh]
Basis Anlage I	72,8	82,3	59,9	3.518	12.318	2.175	2.175	0,43	1.895	2.233	0,8	3.391
Variante 1 I	70,3	93,6	65,8	3.209	10.851	698	698	0,42	1.702	2.124	0,8	3.485
Variante 2 I	80,9	94,1	76,1	2.738	10.656	631	631	0,32	2.205	1.866	1,2	2.077
Variante 3 I	79,7	94,1	75,0	3.084	11.825	694	694	0,32	2.476	2.051	1,2	2.478

Basis-Variante I

Der Wärmebedarf und der Aufbau für Basis-Variante I war wie vom Referenzmodell (Anlage B), außer dass der Solaranlagenkreis (Solarkollektor, Pumpe und Rohrleitungen sowie der Solarpumpenregler) und der Warmwasserkreis entfernt und der Pufferspeicher so klein ausgeführt wurde, dass der Pufferspeicher nur mehr als Sammler/Verteiler diente. Für eine detaillierte Erklärung, siehe Kapitel 4.5.3.3. Da die Rohrleitungen für den Kesselkreis und Verbraucherkreise im Vergleich zum Referenzmodell gleich bleiben, sind die Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum in der Simulation höher als laut Betriebsdaten für Anlage I. Außerdem ist der Wärmebedarf im Vergleich zu den Betriebsdaten für Anlage I viel geringer, was zu einer niedrigeren Kesselauslastung in der Simulation führt und schlussendlich zu einem niedrigeren Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels. Die Warmwasserbereitung erfolgte bei dieser Variante mit einem Elektrowärmespeicher und aus diesem Grund wurde die Warmwasserbereitung in der Simulation nicht berücksichtigt.

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinföderung (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis) verwendet.

Variante 1 I

Bei Variante 1 I wurden die Rohrleitungen mit 30mm Isolierung isoliert im Vergleich zur die Basis Anlage I. Die Verbesserungsmaßnahmen führen zu keiner Steigerung des Kessel-Jahresnutzungsgrades (wegen des bereits bei Variante 2 B beschrieben Effekts der Rohrisolierung, siehe Kapitel 5.6.3.1), aber im Vergleich zur Basis-Variante I zu einer Steigerung des Nutzungsgrades des Pufferspeicher/Heizungssystems um 11,2 und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage um 5,8%Punkte sowie zu einer Pelleteinsparung von 309kg. Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik kann im Vergleich zur Basis-Variante I um 1.476kWh reduziert werden aufgrund der Rohrisolierung (weniger Rohrleitungsverluste) und der geringeren Kesselbetriebszeit (die Rohrleitungen sind nicht so lange erwärmt).

Variante 2 I

Variante 2 I baut auf Variante 1 I auf. Zusätzlich wurden Änderungen am Pelletkessel durchgeführt. Die Rauchgasaustrittstemperatur wurde auf 120/60°C (Voll-/Teillast), der O₂-Gehalt auf 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast) und der UA_{OFF}-Wert auf 7,78W/K gesetzt. Mit dieser Änderung steigert sich im Vergleich zur Variante 1 I der Kessel-Jahresnutzungsgrad aufgrund geringerer Rauchgasverluste und Kesselverluste an die Umgebung (weniger An- und Abfahrverluste) um 10,6 (im Vergleich zur Basis-Variante I um 8,1%Punkte) sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage um 10,4%Punkte (im Vergleich zur Basis-Variante I um 16,2%Punkte). Dazu können noch 472kg Pellets im Vergleich zur Variante 1 I eingespart werden (im Vergleich zur Basis-Variante I um 781kg). Der Pelletkessel muss im Vergleich zur Variante 1 I weniger oft starten und dadurch ist auch die Kesselbetriebszeit geringer. Der Grund dafür ist, dass weniger Kesselverluste an die Umgebung entstehen (Kessel kühlt nicht so schnell aus, aufgrund der geringeren Stillstandsverluste) und mit der noch gespeicherten Wärmemenge in der thermischen Masse kann der Wärmebedarf noch bereitgestellt werden (Wasser kann noch aufgewärmt werden). Der Wärmeverlust der Wasserhydraulik bleibt annähernd unverändert im Vergleich zur Variante 1 I.

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) verwendet.

Variante 3 I

Variante 3 I baut auf Variante 2 I auf. Im Gegensatz zur Variante 2 I wurde die Wärmemenge für die Warmwasserbereitung (über ein Lademodul) vom Pelletkessel produziert. Es wurde also der Warmwasserkreis wieder in den Anlagenaufbau integriert. Das Betriebsverhalten der Variante 3 I verhält sich wie das Betriebsverhalten von Variante 2 I. Es ist jedoch aufgrund der Warmwasserbereitung zu sehen, dass die Kesselstarts und Kesselbetriebszeit mehr werden (mehr Wärme muss produziert werden). Der Kessel-Jahresnutzungsgrad wird im Vergleich zur Variante 2 I um 1,3%Punkte kleiner (Steigerung im Vergleich zur Basis-Variante I um 6,9%Punkte), aufgrund der höheren Kesselverluste an die Umgebung (mehr An- und Abfahrverluste und längere Betriebszeit). Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage wird im Vergleich zur Variante 2 I aufgrund des geringeren Kessel-Jahresnutzungsgrad und des größeren Pelletverbrauch (zusätzliche Wärme produzieren) kleiner. Der Nutzungsgrad des Pufferspeicher/Heizungssystems sinkt im Vergleich zur Variante 2 I aufgrund der geringeren Wärmeverluste der Wasserhydraulik (Rohrleitungen sind nicht so lang erwärmt).

Diese Variante wurde für die Vollkostenrechnung als Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) verwendet.

Schlussfolgerung

Bei dieser Anlagenkonstellation sind nur wenige Optimierungsmaßnahmen möglich. Einerseits kann der Kessel aufgrund des erforderlichen Wärmebedarfs und der Tatsache, dass kein Pufferspeicher vorhanden ist, nicht kleiner dimensioniert werden. Andererseits ist auch praktisch keine Optimierung der Anlagenregelung möglich, da aufgrund des fehlenden Pufferspeichers beziehungsweise der fehlenden Solaranlage die Freigabe des Kessels nur vom Wärmebedarf abhängig ist. Die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen (Isolierung der Rohrleitung, Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehalts im Rauchgas sowie

der Kesselverluste an die Umgebung bei Stillstand) haben die gleichen Auswirkungen, wie bei Anlage B (siehe Kapitel 5.6.3.2). Bei der optimierten Anlage ohne externe Warmwasserbereitung verschlechtert sich im Vergleich zur optimierten Anlage mit externer Warmwasserbereitung der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels sowie der Gesamtnutzungsgrad der Anlage. Die Gründe dafür sind die höheren Wärmeverluste in der Wasserhydraulik (längere Betriebszeit) sowie die häufigeren Starts and Stopps (An- und Abfahrverluste) im Sommer aufgrund der Warmwasserbereitung.

5.7 Heizungssystemvergleich/Vollkostenrechnung

Anschließend an die technische Bewertung der unterschiedlichen Optimierungsvarianten erfolgte eine wirtschaftliche Bewertung. Dazu wurden die jeweils besten (in Bezug auf Pelleteinsparung) Varianten mit der entsprechenden Basisvariante (Betriebsverhalten laut Betriebsdaten der Anlage B) verglichen. Als Basiswärmeverbrauch wurde für alle Anlagen der Wärmeverbrauch der Anlage B verwendet, weil bei dieser Anlage der spezifische Gesamtwärmeverbrauch ($50,5\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$) am geringsten ist. Dies ist eine gute Ausgangsbasis, da in Zukunft (Neubauten) dieser spezifische Gesamtwärmeverbrauch erreicht beziehungsweise unterschritten wird. Die Inputparameter bezüglich Brennstoffverbrauch für die Wirtschaftlichkeitsberechnung stammen für alle Basis- und optimierten Varianten aus den Ergebnissen der TRNSYS-Simulation. Tabelle 33 zeigt die TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse der Basis- und optimierten Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher.

Tabelle 33: TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse für die Basis- und optimierten Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher

Erläuterungen: Einstellparameter und Simulationsergebnisse aus Kapitel 5.6.3; ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfeuerung; T4 ... Temperatursensorposition 4; *) ohne Stromverbrauch; **) auf T4 geregelt; ***) auf T1 geregelt

Einstellparameter	Einheit	ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis)	ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert)	ZHS mit BKF (15kW) ohne separater Warmwasserbereitung (optimiert)	ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis)	ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert)	ZHS mit BKF (8kW) int. im Pufferspeicher (970l) (optimiert)
Wärmeverbrauch	kWh	11.217	11.217	11.217	11.217	11.217	11.217
Kesselennleistung	kW	15	15	15	15	8	8
Solkollektorfläche	m ²	-	-	-	-	-	-
Pufferspeichervolumen	l	-	-	-	-	970	970
Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast)	°C	160/100	120/60	120/60	160/100	120/60	120/60
O ₂ - Gehalt (Voll-/Teillast)	Vol%	7,8/12,4	7,8/7,8	7,8/7,8	7,8/12,4	7,8/7,8	7,8/7,8
Wärmeübergangsfaktor U _{AON}	W/K	7,075	7,075	7,075	7,075	3,8	3,8
Wärmeübergangsfaktor U _{AOFF}	W/K	14,15	7,78	7,78	14,15	4,18	4,18
Startleistung	kW	15	5	5	15	2,4	2,4
Rücklaufanhebungstemperatur	°C	35	45	45	35	45	45
Kesselsolltemperatur	°C	60	60	60	60	60	60
Rohrisolierung	mm	0	30	30	0	30	30
Kesselfreigabe T4	°C	-	-	-	57	52	52
Kesselabschaltung T4/T1	°C	-	-	-	59,6 **)	55/50/45 ***)	55/50/45 ***)
Solaranlagenfreigabe	°C	-	-	-	-	-	-
Solaranlagenabschaltung	°C	-	-	-	-	-	-
Ergebnisse							
Jahresnutzungsgrad	%	72,8	78,4	77,4	76,7	88,2	93,8
Gesamtanlagennutzungsgrad *)	%	59,9	73,6	71,4	60,5	79,1	85,8
Brennstoffbedarf	kg (w.b.) p.a.	3.518	2.738	3.084	3.902	2.968	2.739

Die Basisvarianten wurden mit den Komponentengrößen welche auch in der Feldmessanlage verwendet wurde simuliert mit den Einstellungen laut Kapitel 5.5.1.2. Für die jeweiligen Anlagen wurden nur jene Einstellungen verwendet die auch notwendig waren (z.B. beim Heizungssystem ohne Solaranlage wurden keine Regeleinstellungen für die Solarkreispumpe benötigt). Bei den optimierten Heizungssystemen ohne Pufferspeicher wurden die Kesseloptimierungen (z.B. senken der Rauchgasaustrittstemperatur usw.) gemacht sowie die Rohrleitungen isoliert und bei den optimierten Anlagen mit Pufferspeicher ist neben den zuvor erwähnten Maßnahmen auch zusätzlich das Puffermanagement verbessert worden. Beim ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis und optimiert) wurde der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung (laut Feldmessdaten) mit einem separaten elektrisch beheizten Warmwasserspeicher erzeugt. Beim ZHS mit BKF (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) erfolgte die Warmwasserbereitung mit einem Lademodul. Die drei genannten Anlagen ohne Pufferspeicher wurden mit einem 15kW Pelletkessel simuliert, da sonst die benötigte Wärmemenge nicht bereitgestellt werden konnte. Das ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) (Basis) wurde mit der ursprünglichen Kesselleistung (15kW) simuliert. Die anderen zwei optimierten Anlagen mit Pufferspeicher sind mit einem 8kW Pelletkessel simuliert worden (bessere Kesselauslastung). Die Heizungssysteme wurden bereits in Kapitel 5.6.3 erläutert. Tabelle 34 zeigt die TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse der Basis- und optimierten Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher.

Tabelle 34: TRNSYS-Einstellungen und Ergebnisse für die Basis- und optimierten Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage

Erläuterungen: Einstellparameter und Simulationsergebnisse aus Kapitel 5.6.3; ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfuehrung; T4 ... Temperatursensorposition 4; *) ohne Stromverbrauch; **) auf T4 geregelt; ***) auf T3 geregelt

Einstellparameter	Einheit	ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (Basis)	ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)	ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m ²) (optimiert)	ZHS mit BKF (8kW) int. im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)
Wärmeverbrauch	kWh	11.217	11.217	11.217	11.217
Kesselnennleistung	kW	15	8	8	8
Solarkollektorfläche	m ²	-	10	20	10
Pufferspeichervolumen	l	-	970	2.260	970
Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast)	°C	160/100	120/60	120/60	120/60
O ₂ - Gehalt (Voll-/Teillast)	Vol%	7,8/12,4	7,8/7,8	7,8/7,8	7,8/7,8
Wärmeübergangsfaktor U _{AON}	W/K	7,075	3,8	3,8	3,8
Wärmeübergangsfaktor U _{AOFF}	W/K	14,15	4,18	4,18	4,18
Startleistung	kW	15	2,4	2,4	2,4
Rücklaufanhebungstemperatur	°C	35	45	45	45
Kesselsolltemperatur	°C	60	60	60	60
Rohrisolierung	mm	0	30	30	30
Kesselfreigabe T4	°C	57	52	52	52
Kesselabschaltung T4/T3	°C	59,6 **)	55/50/45 ***)	55/50/45 ***)	55/50/45 ***)
Solaranlagenfreigabe	°C	T2+10K	T2+10K	T2+10K	T2+10K
Solaranlagenabschaltung	°C	T2+3K	T2+1K	T2+1K	T2+1K
Ergebnisse					
Jahresnutzungsgrad	%	77,8	88,8	85,5	93,6
Gesamtanlagennutzungsgrad *)	%	62,4	79,9	75,6	84,7
Brennstoffbedarf	kg (w.b.) p.a.	3.110	2.252	2.110	2.097

Das ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis) wurde mit der ursprünglichen Kesselleistung (15kW) simuliert. Die anderen drei optimierten Anlagen mit Pufferspeicher und Solaranlage sind mit einem 8kW Pelletkessel simuliert

worden (bessere Kesselauslastung). Die Heizungssysteme wurden bereits in Kapitel 5.6.3 verwendet.

Im den nachfolgenden Absätzen wird auf die Angaben der Vollkostenrechnung nach Richtlinie VDI 2067 [21] beziehungsweise auf die Ergebnisse eingegangen. Die dargestellten allgemeinen Rahmenbedingungen und Basisdaten aus Tabelle 35 gelten für alle Heizungssysteme. Bei der Vollkostenrechnung wurden keine Förderungen für Pelletkessel und Solaranlage berücksichtigt. Alle Preisen sind inklusive MwSt. angegeben.

Tabelle 35: Allgemeine Rahmenbedingungen und Basisdaten für die Vollkostenrechnung verschiedener Heizungssysteme

Erläuterungen: Strom Preisbasis 8/2012; Pellet Preisbasis 8/2012 bei einer Abnahmemenge von 6t; Datenquelle [3, 21, 25]; eigene Angaben; Richtlinie VDI 2067

Parameter	Wert	Einheit
Heizwert	4,81	kWh/kg (w.b.)
Schüttdichte Pellets	625	kg (w.b.)/m ³
Elektrische Leistungsaufnahme (in % der Kesselleistung)	0,70	%
Brennstoffpreis (absolut)	226	€t (w.b.) _p
Brennstoffpreis (spezifisch)	47,0	€/MWh _{NCV}
Strompreis	195,0	€/MWh
Wartungs- und Organisationsaufwand (Eigenleistung)	0,19	h/Woche
Arbeitsstundensatz (Eigenleistung)	6,00	€/h
Baukosten Lager- und Kesselraum	250	€/m ²
Versicherung (in % d. Investitionskosten)	0,50	% p.a.
Rauchfangkehrer	150,00	€/p.a.
Nutzungsdauer Kessel plus Übergabestation	20	Jahre
Nutzungsdauer Tank/Lagerung	20	Jahre
Nutzungsdauer Pufferspeicher	20	Jahre
Nutzungsdauer Solaranlage	20	Jahre
Nutzungsdauer Bautechnik, Kamin	50	Jahre
Instandsetzung Feuerungsanlage (% der Investitionskosten)	2,0	% p.a.
Instandsetzung Pufferspeicher u. Solaranlage (% der Investitionskosten)	2,0	% p.a.
Instandsetzung Bautechnik (% der Investitionskosten)	1,0	% p.a.
Kalkulationszinssatz	6,0	% p.a.

Der Heizwert entsprach dem in TRNSYS verwendeten Wert. Der Brennstoffpreis entspricht dem Preis für August 2012 in Österreich [24]. Transportkosten und Abfüllpauschale sind nicht im Preis enthalten, jedoch alle Steuern und Abgaben. Der Strompreis ist ein Endverbraucherpreis inklusive aller gesetzlichen Steuern, Abgaben und Zuschläge, der als Mittelwert über alle Wiener Stromanbieter im August 2012 ermittelt wurde [25]. Alle anderen Parameter sind aus „Herstellung und energetische Nutzung von Pellets“ [3] entnommen, nur die Baukosten für Lager- und Kesselraum und Rauchfangkehrerkosten wurden angepasst.

Tabelle 36 listet die Investitionskosten der installierten Komponenten für die Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher auf. Hierbei ist zu beachten, dass die Preise der Pelletkessel für alle Varianten gleich sind, d.h. dass für die Optimierungsmaßnahmen am Kessel keine Mehrkosten angenommen wurden. In den Kesselkosten sind neben den Investitionskosten des Pelletkessels auch die Installationskosten des hydraulischen Systems im Heizraum (Kessel und Pufferspeicher/Lademodul/Elektrowärmespeicher) ohne Solaranlage mitberücksichtigt. Der 15kW Pelletkessel kostet 9.500,-€ und der 8kW Pelletkessel 8.635,-€. Die Installationskosten für das Heizungssystem ohne Pufferspeicher betragen 2.150,-€ (angenommen) und mit Pufferspeicher 2.350,-€ laut „Herstellung und

energetische Nutzung von Pellets“ [3]. Für die Heizungssysteme mit Biomassekleinfeuerung integriert im Pufferspeicher waren keine Kosten vorhanden und deshalb wurden die Kosten für den Pelletkessel und den Pufferspeicher genommen. Für die Raumaustragung wurde ein Schneckenfördersystem gewählt. Die Raumaustragung mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Lagerräumeinbauten (Tür, Prallschutz, Schrägboden, Einbau) beträgt 2.700,-€ laut „Herstellung und energetische Nutzung von Pellets“ [3]. Für die Hydraulikkosten (Rohre, Pumpe, Beimischventil) wurden 1.000,-€ mit Rohrisolierung beziehungsweise 750,-€ ohne Rohrisolierung pro Kessel-, Verbraucher- und Warmwasserkreis und 1.250,-€ mit Rohrisolierung beziehungsweise 1.000,-€ ohne Rohrisolierung für den Solarkreis angenommen. Nicht enthalten sind die Investitionskosten für die Wärmeverteilung in den Wohnbereichen. Die Kosten für Pufferspeicher plus Hydraulik setzen sich aus dem Pufferspeicher/Lademodul/Elektrowärmespeicher und den Hydraulikkosten pro Kreis zusammen. Das ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis) besteht aus einem Lademodul (1.400,-€) [26] und zwei Verbraucherkreisen (unisoliert) und einen Warmwasserkreis (unisoliert), um jeweils 750,-€ Das ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) ist vom Aufbau gleich wie die Basisvariante, nur mit isolierten Kreisen (1.000,-€ pro Kreis). Das ZHS mit BKF (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) besteht aus einem Elektrowärmespeicher (1.550,-€) [27], zwei Verbraucherkreisen (isoliert) und einen Warmwasserkreis (isoliert), um jeweils 1.000,-€ Das ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis) besteht aus einem Pufferspeicher ohne Solarwärmetauscher (3.980,-€) [7] einem Kesselkreis (unisoliert), zwei Verbraucherkreisen (unisoliert) und einen Warmwasserkreis (unisoliert), um jeweils 750,-€ Das ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert) ist vom Aufbau gleich wie die Basisvariante, nur mit isolierten Kreisen (1.000,-€ pro Kreis). Beim ZHS mit BKF (8W) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert) entfällt im Gegensatz zum ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert) der Kesselkreis (isoliert). Die Kosten für den Kamin wurden laut „Herstellung und energetische Nutzung von Pellets“ [3] übernommen. Der Brennstofflagerraum wurde für 120% Jahresbrennstoffbedarf ausgelegt. Die Baukosten für den Lagerraum und des Heizraumes der einzelnen Heizungssystem, berechnet sich aus der benötigten Fläche mal den Baukosten pro m² (250,-€), siehe Tabelle 35.

Tabelle 36: Investitionskosten der Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher

Erläuterungen: ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfeuerung; Datenquelle [3, 18, 7, 26,27]; eigene Angaben

Investitionskosten	Einheit	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF
		(15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis)	(15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert)	(15kW) ohne separater Warmwasserbereitung (optimiert)	(15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis)	(8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert)	(8kW) int. im Pufferspeicher (970l) (optimiert)
Kessel	€	11.650	11.650	11.650	11.850	10.985	10.985
Raumaustragung	€	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
Pufferspeicher + Hydraulik	€	3.650	4.400	4.550	6.980	7.980	6.980
Solaranlage	€	0	0	0	0	0	0
Kamin	€	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700
Baukosten Heizraum	€	900	900	900	900	900	900
Baukosten Lagerraum	€	478	478	782	753	753	695
Summe Investitionskosten	€	22.078	22.828	23.282	25.883	26.018	24.960

Tabelle 37 listet die Investitionskosten der installierten Komponenten für die Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage auf. Die Kosten für den Kessel, Raumaustragung, Pufferspeicher plus Hydraulik, Kamin, Baukosten für Lagerraum und Heizungsraum sind oben erklärt. Die Kesselpreise wurden bereits im vorangegangenen Absatz behandelt. Das ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis) besteht aus einem Pufferspeicher mit Solarwärmetauscher (3.145,-€) [7], einem Kesselkreis (unisoliert), zwei Verbraucherkreisen (unisoliert) und einen Warmwasserkreis (unisoliert), um jeweils 750,-€ sowie einem Solaranlagenkreis (unisoliert), um 1.000,-€. Das ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) ist vom Aufbau gleich wie die Basisvariante, nur mit isolierten Kreisen (1.000,-€ pro Kreis und für den Solaranlagenkreis 1.250,-€). Das ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) (optimiert) ist vom Aufbau und den Hydraulikkosten gleich wie das ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert). Beim ZHS mit BKF (8W) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) entfällt im Gegensatz zum ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) der Kesselkreis (isoliert). Die Solaranlagen mit einer Kollektorfläche von 10m² kostet 3.145,-€ [26] und für die Montage wurden 500,-€ angenommen. Die Solaranlagen mit einer Kollektorfläche von 20m² kostet 5.675,-€ [26] und für die Montage wurden 700,-€ angenommen.

Tabelle 37: Investitionskosten der Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage

Erläuterungen: ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinföderung; Datenquelle [3, 18, 7, 26]; eigene Angaben

Investitionskosten	Einheit	ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (Basis)	ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)	ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m ²) (optimiert)	ZHS mit BKF (8kW) int. im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)
Kessel	€	11.850	10.985	10.985	10.985
Raumaustragung	€	2.700	2.700	2.700	2.700
Pufferspeicher + Hydraulik	€	8.450	9.700	11.175	8.700
Solaranlage	€	3.645	3.645	6.375	3.645
Kamin	€	2.700	2.700	2.700	2.700
Baukosten Heizraum	€	900	900	900	900
Baukosten Lagerraum	€	578	578	368	532
Summe Investitionskosten	€	30.823	31.208	35.203	30.162

In den Investitionskosten sind neben den reinen Komponentenkosten auch alle Nebenkosten für die Installation enthalten. Die Baukosten für Lager- und Heizraum werden auch bei den Investitionskosten berücksichtigt. Die Instandsetzungskosten wurden anhand von Richtwerten prozentuell von den Investitionskosten für jede Komponente ermittelt und auf die Lebensdauer aufgeteilt. Die kapitalgebundenen Kosten setzen sich aus den Kapital- und Instandsetzungskosten zusammen. Die verbrauchsgebundenen Kosten enthalten alle Kosten für Brennstoff, Strom und den Zinsendienst für die Brennstofflagerung. Der Aufwand für Wartung und Organisation als Eigenleistung sowie Rauchfangkehrer fallen unter die betriebsgebundenen Kosten die aus dem Betrieb der Anlage entstehen. In den sonstigen Kosten sind die Kosten für Versicherung enthalten.

Die Vollkostenrechnung nach VDI 2067 wird nachfolgend beispielhaft nur für ein Heizungssystem dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse für die anderen Varianten sind im ANHANG zu finden.

Tabelle 38 zeigt die Ergebnisse der Vollkostenrechnung für das optimierte Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage unter Berücksichtigung der in Tabelle 35 und Tabelle 36 dargestellten Rahmenbedingungen.

Tabelle 38: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das optimierte Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 35; Investitionskosten aus Tabelle 37; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen

	Investitions- kosten €	Kapital- kosten €/a.	Instand- setzungs- kosten €/a.	Verbrauchs- gebundene Kosten €/a.	Betriebs- gebundene Kosten €/a.	Sonstige Kosten €/a.	Summe der Kosten €/a.	Spezifische Kosten €/MWh
Pelletkessel	10.985	958	220				1.177	104,97
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	9.700	846	194				1.040	92,69
Solaranlage	3.645	318	73				391	34,83
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lageraum, 2,31m ²	578	37	6				42	3,78
Brennstoffkosten				594			594	52,93
Stromkosten				13			13	1,17
Wartung (Eigenleistung)					59		59	5,28
Sonstige Kosten						156	156	13,91
Zinsendienst Brennstofflagerung				18			18	1,59
Rauchfangkehrer					150		150	13,37
Summe der Kosten	31.208	2.622	582	625	209	156	4.194	373,9
Spezifische Kosten in €/MWh		233,7	51,9	55,7	18,7	13,9		373,9

Insgesamt ergeben sich für das in Tabelle 38 dargestellte System spezifische Wärmegestehungskosten von 373,9,-€/MWh. Den größten Anteil an Kosten haben die kapitalgebundenen Kosten mit insgesamt 285,6,-€/MWh gefolgt von den verbrauchsgebundenen Kosten mit 55,7,-€/MWh. Die übrigen Kosten spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 39 zeigt die spezifischen Kosten für die Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher und Tabelle 40 für die Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage die in Abbildung 49 dargestellt sind.

Tabelle 39: Spezifischer Kostenvergleich der Heizungssysteme ohne und mit Pufferspeicher

Erläuterungen: aufbauend auf Tabelle 35 und Tabelle 36; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfeuerung

spezifische Kosten	Einheit	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF
		(15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis)	(15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert)	(15kW) ohne separater Warmwasserbereitung (optimiert)	(15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis)	(8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert)	(8kW) int. im Pufferspeicher (970l) (optimiert)
Kapitalkosten	€/MWh	163,8	168,8	171,7	193,4	193,1	185,0
Instandsetzungskosten	€/MWh	35,9	37,1	37,6	42,5	42,5	40,7
Verbrauchsgebundene Kosten	€/MWh	89,8	85,0	64,0	66,0	56,4	53,1
Betriebsgebundene Kosten	€/MWh	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7
Sonstige Kosten	€/MWh	9,9	10,2	10,4	11,6	11,6	11,1
Summe der Spezifischen Kosten	€/MWh	318,0	319,8	302,4	332,1	322,2	308,5

Tabelle 40: Spezifischer Kostenvergleich der Heizungssysteme mit Pufferspeicher und Solaranlage

Erläuterungen: aufbauend auf Tabelle 35 und Tabelle 36; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfeuerung

spezifische Kosten	Einheit	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF	ZHS mit BKF
		(15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (Basis)	(8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)	(8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m ²) (optimiert)	(8kW) int. im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m ²) (optimiert)
Kapitalkosten	€/MWh	232,0	233,7	265,2	225,7
Instandsetzungskosten	€/MWh	51,4	51,9	59,2	50,1
Verbrauchsgebundene Kosten	€/MWh	64,4	55,7	57,6	52,9
Betriebsgebundene Kosten	€/MWh	18,7	18,7	18,7	18,7
Sonstige Kosten	€/MWh	13,8	13,9	15,7	13,4
Summe der Spezifischen Kosten	€/MWh	380,3	373,9	416,5	360,8

Abbildung 49 stellt die spezifischen Gesamtkosten der Wärmeerzeugung, aufgeschlüsselt nach kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundene- und sonstige Kosten dar. Die optimierten Varianten sind dabei den Basisvarianten gegenübergestellt.

Die betriebsgebundenen- und sonstigen Kosten tragen nur wenig zu den Gesamtkosten bei, gefolgt von den verbrauchsgebundenen Kosten. Den größten Kostenanteil der Gesamtkosten haben die kapitalgebundenen Kosten, wobei bei diesen Kosten Unterschiede zwischen den einzelnen Heizungssystemen festzustellen sind, siehe Tabelle 39 und Tabelle 40.

Die kapitalgebundenen Kosten bestehen aus den Kapital- und Instandsetzungskosten. Die Kapitalkosten machen den größten Anteil (ca. 78%) der kapitalgebundenen Kosten aus. Bei den Zentralheizungssystemen mit Pufferspeicher und Solaranlage überwiegen die kapitalgebundenen Kosten und machen zwischen 75 bis 79% der Gesamtkosten aus. Die verbrauchsgebundenen Kosten sind beim ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung am größten mit 27%, aufgrund des Stromverbrauchs für die

Warmwasserbereitung. Es ist auch gut zu sehen in Abbildung 49, dass zwischen dem Basis- und optimierten ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung fast kein Unterschied ist. Die Basisvariante (ohne Rohrisolierung) ist um 1,8,-€MWh spezifischer Wärmegestehungskosten gegenüber der optimierten Variante (mit Rohrisolierung) billiger (Investitionskosten der Rohrisolierung sind größer als die Pelleteinsparungskosten). Also ist es auch eine Überlegung wert, ob bei diesem Heizungssystem eine Rohrleitungsisolierung sinnvoll ist.

Das wirtschaftlichste Zentralheizungssystem ist das ZHS mit BKF (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) (302,4,-€MWh), gefolgt vom ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert) (308,5,-€MWh). Wobei beim letzten Zentralheizungssystem keine Kostenangaben vom Pelletkessel bekannt waren. Deshalb wurden der Preis für den integrierten Pelletkessel im Pufferspeicher aus den Kosten des Pelletkessels (8kW) und des Pufferspeicher (970l) verwendet. Danach kommen das ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis) (318,-€MWh), das ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) (319,8,-€MWh), das ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert) (322,2,-€MWh) sowie das ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis) (332,1,-€MWh). Es stellte sich heraus, dass die Zentralheizungssysteme mit Biomassekleinfeuerung mit Pufferspeicher und Solaranlage am unwirtschaftlichsten sind, besonders die Anlage mit 20m² Kollektorfläche und einem Puffervolumen von 2.260l, da dort die kapitalgebundenen Kosten am größten sind.

Wie bereits erwähnt, wurden bei den optimierten Pelletkesseln keine Mehrkosten für die Optimierungen berücksichtigt. Es ist aber durchaus möglich, dass die vorgeschlagenen Kesseloptimierungen zu einer Erhöhung der Preise führen. Deshalb wurde berechnet, wie teuer die Verbesserungsmaßnahmen am Pelletkessel sein dürfen, um maximal 95% der Wärmegestehungskosten der jeweiligen Basisvariante zu erreichen. Bei den beiden ZHS mit BKF (15kW) ohne/mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) sind keine Mehrkosten des Pelletkessels mehr möglich, da beide optimierten Varianten schon teurer als 95% der Wärmegestehungskosten von der Basisvariante sind. Bei den Heizungssystemen mit Pufferspeicher kann der Preis für den Pelletkessel beim ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert) um 700€ steigen. Bei der zweiten Variante dieses Heizungssystems ist keine Preissteigerung mehr möglich. Bei den Heizungssystemen mit Solaranlage sind nur beim ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) eine Preissteigerung des Pelletkessels um 50€ möglich. Bei dieser Summe ist zu beachten, dass bei der VDI 2067 keine Änderung der betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten über die Lebensdauer der Heizungsanlage mitberücksichtigt wird. Es zeigt sich, dass fast keine Verteuerungen des Pelletkessels möglich sind, damit dieser im Vergleich zur Basisvariante wirtschaftlich bleibt.

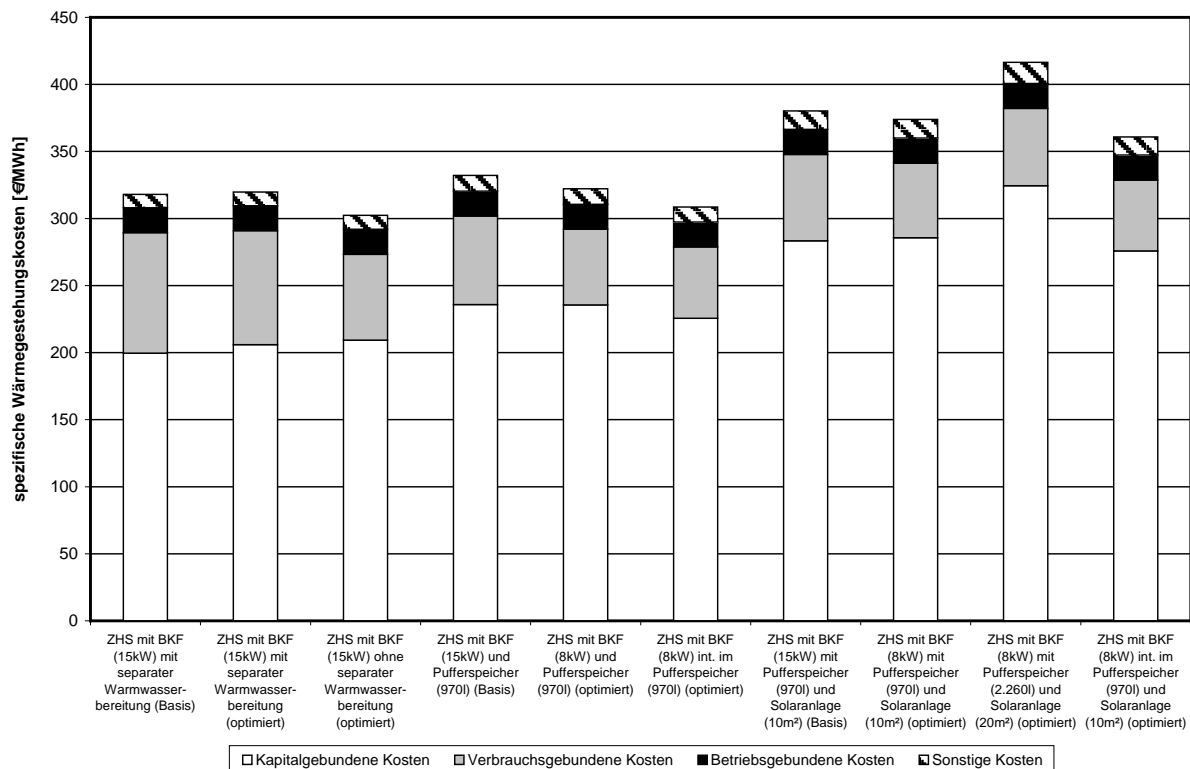


Abbildung 49: Vergleich der spezifischen Wärmegestehungskosten, aufgeschlüsselt nach kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundenen- und sonstigen Kosten

Erläuterungen: aufbauend auf Tabelle 35 und Tabelle 36; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; ZHS ... Zentralheizungssystem; BKF ... Biomassekleinfeuerung

Schlussfolgerung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Heizungssysteme mit Solaranlage am unwirtschaftlichsten sind, weil die kapitalgebundenen Kosten bis zu 78% (ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher 2.260l und Solaranlage (10m²) (optimiert)) im Vergleich zu den verbrauchsgebundenen Kosten (bis zu 17% beim ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (10m²) (Basis)) der Gesamtkosten ausmachen können. Bei den Heizungssystemen mit und ohne Pufferspeicher dürfen durch die Optimierungsmaßnahmen fast keine Mehrkosten anfallen, sonst werden die optimierten Heizungssysteme unwirtschaftlicher als die Basisheizungssysteme. Die Optimierungsmaßnahme (Kesseldimensionierung) hat einen Einfluss auf die kapitalgebundenen Kosten, aufgrund der Investitionskosten. Die Optimierungsmaßnahmen (Anlagenregelung, Isolierung von Rohrleitungen, Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehaltes im Rauchgas sowie der Kesselstillstandsverluste) beziehen sich auf die verbrauchsgebundenen Kosten (Pelleteinsparung) und diese betragen maximal 26,6% (beim ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert)) der Gesamtkosten. Deshalb ist zu überlegen, ob eine Investition in eine Rohrleitungsisolierung sinnvoll ist oder nicht.

6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Datenauswertung

Die Auswertung von Messdaten wurde für ein beziehungsweise zwei Heizperioden von vier verschiedenen Anlagen durchgeführt. Folgende Anlagen wurden untersucht:

- Zentralheizungssystem (ZHS) mit Biomassekleinfeuerung (BKF) (15kW) und separater Warmwasserbereitung mittels Elektrowärmespeicher
- ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (750l)
- ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²)
- ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²)

Bei der Messdatenauswertung sind einige Probleme aufgetreten. Aufgrund der großen Auflösung und Ungenauigkeit der Messgeräte (speziell Brennstoffwaage) sowie des großen Aufzeichnungsintervalls von meist einer Stunde, konnten einige Parameter (Kesselnutzungsgrad, Kesselbetriebszeit und Kesselstarts) nur sehr ungenau ermittelt werden. Wegen dieser Probleme waren auch fast keine Korrelationen erkennbar bezüglich Zusammenhang von Einflussgrößen mit dem wöchentlichen Kesselnutzungsgrad.

Die Messdatenauswertung zeigte, wie schlecht die Heizungsanlagen teilweise im Feld betrieben wurden. Die Kessel-Jahresnutzungsgrade lagen im Bereich von 73 bis 84,5% im Gegensatz zum Wirkungsgrad laut Datenblatt von ca. 92%. Die Gesamtanlagennutzungsgrade waren wegen der hohen Wärmeverluste des hydraulischen Systems im Heizraum noch deutlich niedriger und lagen im Bereich von 58 bis 72% mit Berücksichtigung des Stromverbrauchs und 59 bis 73% ohne Stromverbrauch.

Beim Anlagenvergleich wurde festgestellt, dass bei den Heizungssystemen mit Pufferspeicher und Solaranlage der Kessel-Jahresnutzungsgrad am größten war (78-84,5%), im Gegensatz zu den Heizungssystemen ohne Pufferspeicher (73%). Beim Heizungssystem ohne Pufferspeicher mit separater Warmwasserbereitung ist allerdings zu beachten, dass kein Wärmemengenzähler beim Kesselkreis installiert werden konnte und daher auch die Verluste des hydraulischen Systems im Heizraum im Kessel-Jahresnutzungsgrad berücksichtigt sind. Der tatsächliche Kessel-Jahresnutzungsgrad ist in diesem Fall daher höher als der berechnete. Aus der Datenauswertung ist auch zu sehen, dass mit zunehmender Größe des Pufferspeichers und Solaranlage der Kessel-Jahresnutzungsgrad steigt. Im Vergleich zum Kessel-Jahresnutzungsgrad ist der Gesamtanlagennutzungsgrad hingegen bei Heizungssystemen ohne Pufferspeicher am größten (72%). Die Pufferspeicherverluste und die zusätzlichen Rohrleitungsverluste (Solaranlage) tragen wesentlich zur Verschlechterung des Gesamtanlagennutzungsgrades bei den Heizungssystemen mit Pufferspeicher beziehungsweise mit Solaranlage bei, wodurch diese Systeme einen deutlich niedrigeren Gesamtjahresnutzungsgrad als Heizungssysteme ohne Solaranlage und Pufferspeicher aufweisen.

Bei der Messdatenauswertung wurde festgestellt, dass bei den Anlagen mit Pufferspeicher der Pelletkessel zu groß dimensioniert ist, da die Bandlast im Winter nur etwa die Hälfte der Nennleistung des Kessels entspricht. Zusätzlich war anhand der Messdaten ein schlechtes beziehungsweise kein genau definiertes Regelungsmanagement für die Pufferladung erkennbar. Deshalb sollten die Anlagenkomponenten richtig dimensioniert (nicht zu groß) und regelungstechnisch untereinander abgestimmt werden. Bei der richtigen Dimensionierung des Pelletkessels, kann der Pelletkessel im modulierenden Leistungsbereich gefahren werden, wodurch der Stop-and-Go-Betrieb minimiert werden kann. Außerdem sollte bei zukünftigen Untersuchungen an Heizungsanlagen das Aufzeichnungsintervall sinnvoll gewählt werden (maximal 15 Minuten oder kürzer), um genauere Auswertungen durchführen zu können. Weiteres sollte das Datenaufzeichnungssystem mit einem Betriebs- und Startzähler des Kessels ausgestattet werden.

6.2 Simulation TRNSYS

Mit Hilfe der Simulation in TRNSYS können relevante Einflussfaktoren auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad sowie Gesamtanlagennutzungsgrad eines gesamten Heizungssystems einzeln analysiert und bewertet werden. Das Simulationsmodell wurde entsprechend der Anlage B mit ihren Komponenten (Pelletkessel, Solaranlage, Pufferspeicher, Pumpen, Misch- und Regelventilen) und der hydraulischen Verschaltung nachgebildet. Die Einstellungen aller relevanten Komponenten wurden anhand von Messdaten sowie auf Basis von Spezifikationen und Herstellerangaben parametrisiert. Mittels Parametervariation wurde das Betriebsverhalten des Pelletkessels in der Simulation so angepasst, dass der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels laut Simulationsergebnissen dem auf Basis der Messdaten ermittelten Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels der Anlage B entsprach.

Die Types (Modelle) in TRNSYS verfügen über sehr viele Einstellparameter, sodass ein Heizungssystem realistisch nachsimuliert werden kann. Mittels TRNSYS-Simulationen können die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten (z.B. Wärmeverluste von Wasserhydraulik und Kessel) bei Veränderung einzelner Einstellparameter untersucht werden.

6.3 Sensibilitätsanalyse zur Identifizierung von Schwachstellen sowie der Definition von Optimierungsmaßnahmen

Mit Hilfe einer Sensibilitätsanalyse wurden die Auswirkungen einzelner Parameter auf den Jahresnutzungsgrad von Kessel und Heizungsanlage, den Pelletverbrauch sowie das Betriebsverhalten untersucht. Folgende Parameter wurden variiert:

Änderungen, die den Kessel betreffen (Kessel-Änderungen):

- Rauchgasaustrittstemperatur
- O₂-Gehalt im Rauchgas
- Wärmeübergangsfaktor von der thermischen Masse an Umgebung (bei Stillstand)
- Reduzierung der thermischen Masse

Änderungen, die die Regelung betreffen (Software-Änderungen):

- Kesselstartleistung

- Kesselvorlauftemperatur
- Solaranlagenabschaltung
- Solaranlagenfreigabe
- Kesselabschaltung
- Kesselfreigabe

Änderungen, die die Ausführung/Dimensionierung von Anlagenkomponenten betreffen (Hardware-Änderungen):

- Rohrleitungsisolierung
- Pufferspeicherisolierung
- Solaranlagengröße
- Pufferspeichergröße
- Kesselnennleistung

Die Ergebnisse der Sensibilitätsanalyse zeigten, dass große Unterschiede bezüglich der Auswirkungen einzelner Parameter auf den Kessel-Jahresnutzungsgrad und den Pelletverbrauch der Heizungsanlage bestehen. Zieht man den Pelletverbrauch als Bewertungskriterium heran, dann haben die Isolierung der Rohrleitung (sinken des Pelletverbrauchs mit steigender Isolierstärke), die Solaranlagengröße (sinken des Pelletverbrauchs mit steigender Kollektorfläche), eine optimierte Dimensionierung des Kessels (sinken des Pelletverbrauchs mit kleiner Nennleistung, bessere Ausnutzung) sowie die Kesselstillstandsverluste (sinken des Pelletverbrauchs mit geringeren Stillstandsverlusten) einen großen Einfluss auf den Pelletverbrauch. Einen mittleren Einfluss auf den Pelletverbrauch haben die thermische Kesselmasse (sinken des Pelletverbrauchs mit Reduktion der thermischen Kesselmasse), die Pufferspeichergröße (sinken des Pelletverbrauchs mit größerem Pufferspeicher), die Rauchgasaustrittstemperatur (sinken des Pelletverbrauchs mit niedrigerer Rauchgasaustrittstemperatur), die Kesselfreigabe (sinken des Pelletverbrauchs mit niedrigerer Temperatur für die Kesselfreigabe) sowie die Solaranlagenabschaltung (sinken des Pelletverbrauchs mit möglichst kleiner Temperatur für die Solaranlagenabschaltung). Nur wenig Einfluss auf den Pelletverbrauch haben der O₂-Gehalt im Rauchgas (sinken des Pelletverbrauchs mit kleineren O₂-Gehalt im Rauchgas) sowie die Kesselstartleistung (sinken des Pelletverbrauchs mit kleiner Startleistung).

Eine Variation der Bedingung für die Kesselabschaltung (Temperatur an den Wärmeverbrauch anpassen) und die Solaranlagenfreigabe (Temperatur möglichst klein wählen) haben fast keinen Einfluss auf den Pelletverbrauch. Die Pufferspeicherisolierung sowie die Kesselvorlauftemperatur haben natürlich auch einen wesentlichen Einfluss auf den Pelletverbrauch. Die beiden Parameter werden im Ranking nicht angeführt, da bereits das Referenzmodell über eine ausreichende gute Isolierung des Pufferspeichers verfügte und der Kessel bereits mit einer sehr niedrigen Vorlauftemperatur betrieben wurde.

Aus den oben genannten Ergebnissen lassen sich folgende Optimierungsmaßnahmen ableiten, um den Pelletverbrauch beziehungsweise den Kessel-Jahresnutzungsgrad sowie Gesamtnutzungsgrad der Anlage zu verbessern:

Kessel-Änderungen:

- Rauchgasaustrittstemperatur soweit wie möglich verringern (weniger Rauchgasverluste); Ziel: 120°C bei Volllast, 60°C bei Teillast
- O₂-Gehalt so gering wie möglich halten (weniger Rauchgasverluste); Ziel: 7,8Vol% trockenes Rauchgas bei Volllast und Teillast
- Thermische Kesselmasse reduzieren (weniger Wärmeverluste an Umgebung); Ziel: Reduktion um die Hälfte der thermischen Kesselmasse
- Abgasklappe einbauen (weniger Wärmeverluste bei Kesselstillstand); Ziel: Stillstandsverluste maximal 10% höher als die Betriebsverluste
- Integration des Kessels in den Pufferspeicher (weniger Wärmeverluste an die Umgebung); Ziel: die Kesselverluste an die Umgebung gehen nicht an die Umgebung verloren, sondern werden im Pufferspeicher gespeichert und dadurch kann Primärenergie gespart werden

Software-Änderungen:

- Möglichst geringe Kesselstartleistung einstellen; Ziel: kleinstmögliche Kesselleistung
- Kesselvorlauftemperatur so gering wie möglich halten (weniger Wärmeverluste an Umgebung); Ziel: die minimale Vorlauftemperatur laut Kesselhersteller
- Optimierungen der Freigabe- und Abschaltbedingung (Position der Temperatursensoren, Setpoints) für Pelletkessel und Solaranlage; Ziel: mit einer richtigen Regelungseinstellung (Abstimmung zwischen Kessel und Solaranlage) kann die Anlage effektiver betrieben und dadurch Primärenergie gespart werden

Hardware-Änderungen:

- Rohre und Pufferspeicher ausreichend isolieren; Ziel: Rohrisolierung 30mm, Pufferspeicherisolierung 130mm
- Richtige Komponentendimensionierung (Kessel/Pufferspeicher/Solaranlage); Ziel: mit einer richtigen Auslegung bzw. Abstimmung der Komponenten untereinander. Aufgrund einer besseren Auslastung kann eine Menge Primärenergie eingespart werden.

Abhängig von der Prioritätensetzung werden Empfehlungen für bestehende und zukünftige Heizungsanlagen sowie für Kesselhersteller gemacht.

Bestehende Heizungsanlagen

Bei der Optimierung von bestehenden Heizungsanlagen wurde in TRNSYS eine Regelungsanpassung sowie eine Isolierung der Rohrleitungen untersucht. Speziell bei Heizungsanlagen mit Pufferspeicher ist die Regeleinstellung für die Pufferspeicherladung mittels Pelletkessel sehr wichtig. Die Einschalttemperatur (Einschaltbedingung) für die Kesselpumpe im Pufferspeicher soll so niedrig wie möglich sein (knapp über der notwendigen Verbrauchervorlauftemperatur). Damit die Pufferspeicherladung optimal funktioniert, soll der Temperatursensor für die Ausschalttemperatur (Abschaltbedingung) der Kesselpumpe auf der Höhe des Kesselrücklaufs beim Pufferspeicher gelegt werden und die Ausschalttemperatur an

den jahreszeitlichen (Sommer-, Übergangs- und Winterzeit) Wärmeverbrauch angepasst werden. Wenn es möglich ist, dann soll bei Heizungsanlagen mit Pufferspeicher die Kesselleistungsregelung mit der Pufferspeicherladung abgestimmt werden. Der Regelparameter für die benötigte Kesselleistung kann in diesem Fall die durchschnittliche Temperatur von den Temperatursensoren im Pufferspeicher sein. Die Maximal- und Minimaleistung des Pelletkessels wird dabei mit einer Temperatur festgelegt und dazwischen fährt der Kessel modulierend in seinem Leistungsbereich. Die Regelung funktioniert ähnlich einer Beimischschaltung. Mit dieser Regelung kann der Kesselbetrieb optimal an die Pufferspeicherladung angepasst werden. Ist eine Solaranlage installiert, dann soll eine Abstimmung zwischen Solaranlagen- und Kesselregelung durchgeführt werden, damit der Pelletkessel und die Solaranlage optimal ausgelastet sind. Die Solaranlagenregelung soll so eingestellt werden, dass möglichst viel Solaranlagenenertrag erzeugt wird. Dies kann erreicht werden, indem die Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher, auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs (für die Ein- und Ausschaltbedingung), möglichst klein gewählt wird.

Bei Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: 30mm Rohrisolierung. Bei der Anlagenregelung wurden keine Änderungen durchgeführt, da kein Pufferspeicher vorhanden war) unter gegebenen Rahmenbedingungen (spezifischer Gesamtwärmeverbrauch $50,5\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$ bei 170m^2 Wohnfläche) kann der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage des ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) im Vergleich zum ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis) von 59,9 auf 65,8% erhöht werden. Der Pelletverbrauch kann um 310kg/a gesenkt werden.

Der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage des ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) (optimiert) verbessert sich im Vergleich zum ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) (Basis), bei Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: 30mm Rohrisolierung, Startleistung 5kW, Kesselfreigabe Temperatursensor (4) mit 52°C , Kesselabschaltung Temperatursensor (3) mit drei verschiedenen Ausschaltbedingungen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit), 45°C Rücklaufanhebung) unter gegebenen Rahmenbedingungen von 60,5 auf 68,8% erhöht werden. Der Pelletverbrauch kann um 515kg/a gesenkt werden.

Wird der Jahresnutzungsgrad des Kessels des ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m^2) (optimiert) mit dem ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m^2) (Basis) verglichen, dann kann mit den Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: 30mm Rohrisolierung, Startleistung 5kW, Kesselfreigabe Temperatursensor (4) mit 52°C , Kesselabschaltung Temperatursensor (3) mit drei verschiedenen Ausschaltbedingungen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit), 45°C Rücklaufanhebung, Solaranlagenabschaltung Temperatursensor (2)+1K) unter gegebenen Rahmenbedingungen, eine Verbesserung von 63,3 auf 72,1% erzielt werden. Der Pelletverbrauch kann um 390kg/a gesenkt werden.

Die oben diskutierten Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Isolierung der Rohrleitungen ein großes Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch aufweist. Durch die damit verbundene Reduktion des Wärmebedarfs sinkt allerdings die Auslastung des Pelletkessels, was sich negativ auf den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels auswirkt. Dieser negative Einfluss kann allerdings durch eine Optimierung der Kessel- und Anlagenregelung (geringe Kesselstartleistung, kleine Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs für die Solaranlagenabschaltung,

möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) kompensiert werden, sodass insgesamt eine deutliche Reduktion des Pelletverbrauchs sowie eine signifikante Steigerung des Jahresnutzungsgrades der Gesamtanlage auch bei bestehenden Anlagen erzielt werden kann.

Zukünftige Heizungsanlagen

Bei der Optimierung von zukünftigen Heizungsanlagen wurde in TRNSYS eine optimale Anlagenauslegung/Dimensionierung (Pelletkessel, Pufferspeicher, Solaranlage), eine Regelanpassung, eine Isolierung der Rohrleitungen, eine Verringerung der Stillstandsverluste (Abgasklappe) sowie Kesselloptimierungen untersucht. Bei den zukünftigen Heizungsanlagen soll besonders auf die richtige Dimensionierung der Komponenten (Kessel, Pufferspeicher, Solaranlage, Rohre, Kamin usw.) geachtet werden. Bei zu groß ausgelegtem Pelletkessel fährt der Pelletkessel in Stop-and-Go-Betrieb beziehungsweise es entstehen mehr Rauchgasverluste und Kesselverluste an die Umgebung. Bei Anlagen ohne Pufferspeicher und Solaranlage muss der Pelletkessel auf den maximalen Wärmebedarf ausgelegt werden. Bei Anlagen mit Pufferspeicher ohne Solaranlage hängt die Pufferspeicherdimensionierung vom Wärmebedarf ab. Die optimale Kesseldimensionierung soll aufgrund der Pufferspeicherdimensionierung erfolgen. Bei Anlagen mit Pufferspeicher und Solaranlage, soll die Solaranlagengröße anhand des Verwendungszwecks (nur für die Warmwasserbereitung oder auch für die Heizung) dimensioniert werden. Die Pufferspeicherdimensionierung hängt jedoch wiederum von der Pelletkesselgröße sowie der Solaranlagengröße ab. Ist der Pufferspeicher zu groß dimensioniert, dann entstehen speziell in den Sommermonaten relativ zum Wärmebedarf große Pufferspeicherverluste. Wird der Pufferspeicher zu klein dimensioniert, dann ist das Betriebsverhalten des Pelletkessels sowie der Solaranlage schlecht. Der Pelletkessel wird im Stop-and-Go-Betrieb fahren, aufgrund der zu schnell erreichten Ein- und Ausschaltbedingung. Dadurch verschlechtert sich der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels und schlussendlich auch der Jahresnutzungsgrad der Anlage. Aus diesem Grund ist eine Abstimmung (richtige Dimensionierung) des Pelletkessels mit der Solaranlage und mit dem Pufferspeicher sehr wichtig. Prinzipiell gelten die gleichen Vorgaben bei der Anlagenreglung wie bei den bestehenden Heizungsanlagen. Jedoch ist bei der Anlagenregelung darauf zu achten, dass die Temperatursensoren für die Kessel- und Solaranlagenregelung auf der optimalen Position im Pufferspeicher eingebaut sind. Wenn möglich, soll die Kesselleistungsregelung bei den Anlagen mit Pufferspeicher mit der durchschnittlichen Pufferspeichertemperatur erfolgen, siehe vorangegangenes Kapitel. Bei den Simulationen der zukünftigen Heizungsanlagen wurde die Position der Temperatursensoren im Pufferspeicher zu den bestehenden Anlagen nicht verändert.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die richtige Kamindimensionierung. Der Kamin sollte so dimensioniert werden, dass der notwendige Kaminzug für einen störungsfreien Betrieb höchstens so groß ist wie erforderlich. Bei zu groß dimensioniertem Kamin stellt sich ein sehr großer Kaminzug ein und dadurch entstehen unnötige Kesselstillstandsverluste. Ein Einbau einer Rauchgasklappe kann im Kesselstillstand den Kaminzug ebenfalls verringern.

Großes Verbesserungspotential gibt es laut Simulation noch beim Pelletkessel. Die Kesselhersteller sollen ihre Entwicklungsschwerpunkte auf die Reduktion folgende Parameter richten:

- O₂-Gehalt im Rauchgas

- Rauchgasaustrittstemperatur
- Stillstandsverluste
- thermische Kesselmasse

Können die oben genannten vier Parameter minimiert werden, dann erhöht sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad. Eine Minimierung der Rauchgasaustrittstemperatur kann zu einer deutlichen Reduktion der Rauchgasverluste im Dauerbetrieb führen. Ähnlich gleiche Auswirkungen hat die Reduktion des O₂-Gehalts im Rauchgas, vor allem im Teillastbetrieb. Mit einer regelbaren Abgasklappe können die Kesselverluste an die Umgebung im Stillstand reduziert werden, indem der Kaminzug auf ein notwendiges Minimum reduziert wird. Die Kesselverluste an die Umgebung im Stillstand sowie der Kesselanfahrbetrieb können durch eine Reduktion der thermischen Kesselmasse verbessert werden, da weniger Wärmemenge beim Auskühlen verloren geht beziehungsweise für das Aufheizen der thermischen Kesselmasse benötigt wird.

Bei Umsetzung aller möglichen Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: 30mm Rohrisolierung, Rauchgasaustrittstemperatur 120/60°C (Voll-/Teillast), O₂-Gehalt im Rauchgas 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast), UA_{OFF}-Wert 7,78W/K (repräsentiert den Wärmeverlust an die Umgebung bei Stillstand)) unter gegebenen Rahmenbedingungen (spezifischer Gesamtwärmeverbrauch 50,5kWh/m²*a bei 170m² Wohnfläche) verbessert sich der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage des ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert) im Vergleich zum ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis) von 59,9 auf 73,6%. Der Pelletverbrauch kann um 640kg/a gesenkt werden.

Der Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage des ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) (optimiert) verbessert sich im Vergleich zum ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) (Basis), bei der Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: Nennleistung 8kW, Startleistung 2,4kW, 30mm Rohrisolierung, Kesselfreigabe Temperatursensor (4) mit 52°C, Kesselabschaltung Temperatursensor (1) mit drei verschiedenen Ausschaltbedingungen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit), 45°C Rücklaufanhebung, Rauchgasaustrittstemperatur 120/60°C (Voll-/Teillast), O₂-Gehalt im Rauchgas 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast), UA_{OFF}-Wert 4,18W/K (repräsentiert den Wärmeverlust an die Umgebung bei Stillstand)) unter gegebenen Rahmenbedingungen von 60,5 auf 79,1%. Der Pelletverbrauch kann um 930kg/a gesenkt werden.

Wird der Jahresnutzungsgrad des Kessels des ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) mit dem ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis) verglichen, dann kann mit den Optimierungsmaßnahmen (Einstellungen für die optimierte Variante: Nennleistung 8kW, Startleistung 2,4kW, 30mm Rohrisolierung, Kesselfreigabe Temperatursensor (4) mit 52°C, Kesselabschaltung Temperatursensor (3) mit drei verschiedenen Ausschaltbedingungen (Winter-, Sommer-, Übergangszeit), Solaranlagenabschaltung Temperatursensor (2)+1K, 45°C Rücklaufanhebung, Rauchgasaustrittstemperatur 120/60°C (Voll-/Teillast), O₂-Gehalt im Rauchgas 7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast), UA_{OFF}-Wert 4,18W/K (repräsentiert den Wärmeverlust an die Umgebung bei Stillstand)) unter gegebenen Rahmenbedingungen, eine Verbesserung von 62,4 auf 79,9% erreicht werden. Der Pelletverbrauch kann um 700kg/a gesenkt werden.

Wie schon bei den bestehenden Heizungsanlagen diskutiert, kann ein großes Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch durch die Isolierung der Rohrleitungen erfolgen. Durch die damit verbundene Reduktion des Wärmebedarfs sinkt allerdings die Auslastung des Pelletkessels, was sich negativ auf den Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels auswirkt. Dieser negative Einfluss kann allerdings durch eine richtige Dimensionierung des Pelletkessels und Optimierungen am Pelletkessel (Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur, des O₂-Gehalts im Rauchgas sowie der Kesselverluste an die Umgebung bei Stillstand) sowie einer Optimierung der Kessel- und Anlagenregelung (geringe Kesselstartleistung, kleine Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs für die Solaranlagenabschaltung, möglichst kleine Temperatur im Pufferspeicher für die Kesselfreigabe, Temperaturanpassung für die Kesselabschaltung je Wärmebedarf) kompensiert werden, sodass insgesamt eine deutliche Reduktion des Pelletverbrauchs sowie eine signifikante Steigerung des Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels sowie des Jahresnutzungsgrades des Gesamtsystems erzielt werden kann. Mit der Ausführung Pelletkessel integriert im Pufferspeicher kann der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels, des Jahresnutzungsgrades der Gesamtanlage sowie das Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch im Vergleich zu den optimierten herkömmlichen Pelletkesseln noch weiter gesteigert werden. Einen großen Anteil zur zusätzlichen Verbesserung tragen die geringeren Kesselverluste an die Umgebung bei (die Temperaturdifferenz zwischen thermischer Kesselmasse und Pufferspeichertemperatur ist deutlich niedriger als bei herkömmlichen Kesseln).

6.4 Heizungssystemvergleich/Vollkostenrechnung

Im Anschluss an die technische Bewertung erfolgte eine wirtschaftliche Betrachtung verschiedener Heizungssysteme im Hinblick auf die spezifischen Wärmegestehungskosten. Für die Bewertung wurde jeweils der Wärmeverbrauch der Anlage B herangezogen. Die Basisvarianten entsprachen der jeweiligen Anlagenverschaltungen der Feldanlagen (Anlage A, B und I). Die optimierten Varianten enthielten die auf Basis der Ergebnisse der Sensibilitätsanalyse ausgewählten Optimierungsmaßnahmen und sind wie die Basisvarianten nachfolgend aufgelistet.

Beim Heizungssystemvergleich wurden die Basisvarianten mit den optimierten Varianten entsprechend verglichen:

- Zentralheizungssystem (ZHS) mit Biomassekleinfeuerung (BKF) (15kW) mit separater Warmwasseraufbereitung (Basis)
- ZHS mit BKF (15kW) mit separater Warmwasseraufbereitung (optimiert)
- ZHS mit BKF (15kW) ohne separater Warmwasseraufbereitung (optimiert)
- ZHS mit BKF (15kW) und Pufferspeicher (970l) (Basis)
- ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert)
- ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert)
- ZHS mit BKF (15kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (Basis)
- ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert)

- ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) (optimiert)
- ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert)

Die Basisvarianten der drei Heizungssysteme (Anlage A, B und I) wurden jeweils mit einem 15kW Pelletkessel, wie in den Feldanlagen verbaut und dem Wärmebedarf der Anlage B (ca. 12.000kWh/a, entspricht einem spezifischen Gesamtwärmeverbrauch von 50,5kWh/m²*a bei 170m² Wohnfläche), simuliert. Die zwei optimierten Anlagen ohne Pufferspeicher wurden mit einem 15kW Pelletkessel simuliert, da sonst die Leistungsspitzen im Winter nicht abgedeckt werden konnten. Bei den anderen fünf optimierten Heizungssystemen wurde die Leistung des Pelletkessels auf 8kW reduziert, damit der Pelletkessel bestmöglich betrieben werden konnte. Die Vollkostenrechnung berücksichtigt die Investitionskosten, Instandsetzungskosten, sowie verbrauchs-, betriebsgebundene- und sonstige Kosten. In den Investitionskosten sind die Anschaffungskosten von Kessel, Raumaustragung, Pufferspeicher plus Hydraulik, Solaranlage, Baukosten für Heizraum und Lagerraum, Kamin und die aus dem Betrieb der Anlage verbundenen Kosten enthalten. Die verbrauchsgebundenen Kosten enthalten die Brennstoff- und Stromkosten und den Zinsendienst für die Brennstofflagerung. Der Aufwand für Wartung und Organisation als Eigenleistung sowie Rauchfangkehrer fallen unter betriebsgebundene Kosten. Die sonstigen Kosten enthalten Kosten für Versicherung.

Laut der Vollkostenrechnung ist unter den untersuchten Rahmenbedingungen das wirtschaftlichste Heizungssystem das ZHS mit BKF (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) (302,4,-€/MWh). Das ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) (optimiert) hat ähnliche spezifische Wärmegestehungskosten wie das zuvor erwähnte Heizungssystem. Die Heizungssysteme mit Solaranlage schneiden aufgrund der höheren Investitionskosten bei der Vollkostenrechnung am schlechtesten ab, obwohl sie höhere Nutzungsgrade sowie einen geringeren Pelletverbrauch aufweisen. Bei der Vollkostenrechnung stellt sich heraus, dass die kapitalgebundenen Kosten (bis 78%) den größten Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Die verbrauchsgebundenen Kosten, in denen der Pelletverbrauch enthalten ist, bewegen sich in einem Bereich von 14 bis 28% der Gesamtkosten. Dementsprechend gering ist das Kosteneinsparungspotential durch die Reduktion des Brennstoffverbrauchs. Aus diesem Grund sind in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit jene Optimierungsmaßnahmen am effektivsten, die ohne relevante Mehrkosten realisiert werden können (z.B. optimierte Regelungseinstellung). Optimierungsmaßnahmen, die mit Zusatzkosten verbunden sind (z.B. verstärkte Isolierung) können die Wirtschaftlichkeit hingegen kaum verbessern.

6.5 Gesamtheitliche Betrachtung

Die anerkannte Norm für die Bewertung der Effektivität einer Biomassekleinfeuerung ist momentan der Nenn-/Teillastwirkungsgrad. Jedoch gibt der Nenn-/Teillastwirkungsgrad keine Aussage über die Wirtschaftlichkeit einer Biomassekleinfeuerung im Feldbetrieb, sondern nur der Nutzungsgrad. Deshalb sollte in Zukunft der Nutzungsgrad als Bewertungskriterium für die Qualität von Biomassekleinfeuerungen herangezogen werden. Allerdings gibt es derzeit noch keine anerkannte Norm, die den Nutzungsgrad von Biomassekleinfeuerungen als Bewertungskriterium beinhaltet. Eine einheitliche Bewertung für optimierte Heizungsanlagen

ist nicht möglich, da für die einzelnen Zielsetzungen (Steigerung des Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage sowie eine Verringerung des Brennstoffverbrauchs) zum Teil andere Gesichtspunkte relevant sind. In den nächsten Absätzen werden Empfehlungen für optimierte Heizungsanlagen abgegeben.

Allgemeine Empfehlungen für die Heizungsanlagenoptimierung

Bei allen Heizungsanlagen wird allgemein eine richtige Dimensionierung der einzelnen Anlagenkomponenten (Kessel, Pufferspeicher; Solaranlage sowie Hydraulik) empfohlen. Speziell die richtige Kesseldimensionierung hat einen positiven Einfluss auf den Kesselnutzungsgrad und auf die Investitionskosten. Außerdem soll bei Heizungsanlagen die Kesselregelung als auch die Regelung der Gesamtanlage an die lokalen Rahmenbedingungen (Wärmebedarf, Betriebsverhalten) optimal eingestellt werden, damit die Anlage bestmöglich (mit möglichst wenig Wärmeverlusten) betrieben werden kann. Die Kesselvorlauftemperatur sowie die Kesselfreigabetemperatur im Pufferspeicher sollen möglichst klein sein, aber es ist darauf zu achten, dass beide Parameter von der Verbrauchervorlauftemperatur abhängig sind. Ist eine Solaranlage vorhanden, dann soll die Einschaltbedingung (Temperaturdifferenz zwischen Solarkollektorausstritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs) für die Solarkreispumpe möglichst klein gewählt werden, damit die Solaranlage viel Wärmemenge produzieren kann. Die Kesselabschaltbedingung (Temperatur und Temperatursensorposition im Pufferspeicher) soll an den jahreszeitlichen (Winter-, Übergangs-, Sommerzeit) Wärmebedarf angepasst werden, damit möglichst wenig Wärmemenge über den Pufferspeicher verloren geht. Im Winter sollte die Abschalttemperatur im Pufferspeicher für den Kessel höher sein, um den Pufferspeicher durchladen zu können. Dagegen soll im Sommer die Abschalttemperatur im Pufferspeicher für den Kessel eher niedriger sein, da sonst große Pufferspeicherverluste entstehen. Generell ist darauf zu achten, dass der Pufferspeicher ausreichend isoliert ist (mindestens 100mm), da sonst die Pufferverluste sehr groß werden. Die weiteren Empfehlungen hängen von der Zielsetzung der Optimierung (Verbesserung des Kessel-Jahresnutzungsgrades und des Gesamtnutzungsgrades der Anlage sowie einer Verringerung des Brennstoffverbrauchs) ab.

Empfehlungen, um den Nutzungsgrad des Pelletkessels zu erhöhen

Steht die Maximierung des Nutzungsgrades des Pelletkessels im Vordergrund, sind sowohl Optimierungen am Kessel als auch eine optimale Auslegung von Kessel und Gesamtanlage (Pufferspeicher, Solaranlage, Rohrleitungen, Kamin usw.) notwendig. Um bei einer optimalen Dimensionierung des Pelletkessels den Nutzungsgrad des Pelletkessels noch weiter erhöhen zu können, müssen die Rauchgasverluste sowie die Kesselverluste an die Umgebung minimiert werden. Die Reduktion der Rauchgasverluste kann einerseits über die Absenkung der Rauchgasaustrittstemperatur (Ziel: 120/60°C bei Voll-/Teillast) und andererseits über die Reduktion des O₂-Gehalts im Rauchgas (7,8/7,8Vol% (Voll-/Teillast)) erreicht werden. Bei der Reduktion der Rauchgasaustrittstemperatur müssen wahrscheinlich Änderungen am Pelletkessel durchgeführt werden, wie z.B. größerer Wärmetauscher, die auch Auswirkungen auf den Kesselpreis haben. Bei der Reduktion des O₂-Gehalts im Rauchgas muss eine Änderung der Kesselregelung erfolgen, dass trotz geringeren O₂-Gehalts im Rauchgas die Verbrennung noch optimal abläuft. Die Minimierung der Kesselverluste an die Umgebung kann durch eine Reduktion der thermischen Kesselmasse, einer möglichst niedrigen Kesselvorlauftemperatur sowie durch Minimierung der Stillstandsverluste, z.B. durch Einbau

einer regelbaren Abgasklappe (Wärmeverlustminimierung beim Kesselstillstand), erreicht werden. Die Reduktion der thermischen Kesselmasse, kann nur von den Kesselherstellern (durch Weiterentwicklung) erreicht werden. Beim Pelletkessel soll die Regelung so eingestellt werden, dass während der Startphase der Pelletkessel mit der kleinsten möglichen Leistung betrieben wird. Dadurch ist eine längere Betriebszeit speziell bei geringerem Wärmebedarf gewährleistet.

Wird auf das Bewertungskriterium Nutzungsgrad des Pelletkessels Wert gelegt, dann wäre für das untersuchte Szenario das ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert) das beste mit 93,8%, gefolgt vom ZHS mit BKF (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) mit 93,6%. Beim Pelletkessel integriert im Pufferspeicher, werden die Kesselverluste an die Umgebung minimiert, da die Temperaturdifferenz zwischen thermischer Kesselmasse und Pufferspeicher deutlich niedriger sind als bei herkömmlichen Kesseln. Die Minimierung der Kesselverluste an die Umgebung führt zur Steigerung des Wirkungsgrades und somit auch zur Steigerung des Nutzungsgrades des Pelletkessels. Da aber auf keine Kesselherstellerangaben zurückgegriffen werden konnte, mussten für diese Varianten Annahmen für die Simulationen getroffen werden. So wurde für die Berechnung der Kesselverluste an die Umgebung die Durchschnittstemperatur aus dem Pufferspeicher herangezogen. Aufgrund dieser Vereinfachung sind die Ergebnisse für die Varianten mit Vorsicht zu betrachten. Betrachtet man nur die Varianten mit den herkömmlichen Pelletkesseln, dann würde das ZHS mit BKF (8kW) mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert) den größten Kessel-Jahresnutzungsgrad mit 88,8% aufweisen, aufgrund der optimalen Kesselauslastung (Pufferspeicherladung wird genutzt). Laut TRNSYS-Simulationen stellt sich heraus, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Wärmebedarf der Anlage B) die Heizungsanlage ohne Pufferspeicher den geringsten Kessel-Jahresnutzungsgrad hat, aufgrund der unregelmäßigen Auslastung des Pelletkessels (Betrieb je nach Wärmebedarf).

Empfehlungen, um den Nutzungsgrad der Gesamtanlage zu erhöhen

Soll hingegen auf den Nutzungsgrad der Gesamtanlage Wert gelegt werden, dann spielt speziell die Isolierung von Rohrleitungen und Pufferspeicher eine wesentliche Rolle. Die Isolierung verbessert den Gesamtanlagenutzungsgrad, da die Wärmeverluste der Hydraulik/Pufferspeicher minimiert werden und dadurch weniger Brennstoff für die Wärmebereitstellung verbraucht wird. Aus diesem Grund sollen die Rohrleitungen (mit mindestens 30mm) und der Pufferspeicher (mit mindestens 100mm) isoliert werden. Zusätzlich tragen auch die Maßnahmen zur Optimierung der Regelung beziehungsweise der Regelungseinstellungen des Kessels und der Solaranlage sowie die Kessel-, Pufferspeicher- und Solaranlagendimensionierung einen entscheidenden Beitrag bei. Sowie bereits in den beiden vorangegangenen Abschnitten erklärt, sollen die Rauchgasaustrittstemperatur, der O₂-Gehalt im Rauchgas, die Kesselvorlauftemperatur, die Kesseleinschalttemperatur im Pufferspeicher, die Temperaturdifferenz (zwischen Solarkollektoraustritt und Pufferspeicher auf der Höhe des Solaranlagenvorlaufs) so gering wie möglich sein. Weiters soll die Kesselabschaltbedingung an den jahreszeitlichen (Winter-, Übergangs-, Sommerzeit) Wärmebedarf angepasst werden (Erklärung siehe Abschnitt Allgemeine Empfehlungen für die Heizungsanlagenoptimierung).

Laut Simulation zeigt sich, dass ein Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage beim optimierten ZHS mit BKF integriert im Pufferspeicher (970l) bis zu 85,8% (ohne Stromverbrauch)

erreicht werden kann. Betrachtet man aber nur die optimierten Heizungsanlagen mit herkömmlichen Pelletkesseln, dann erreicht das optimierte ZHS mit BKF mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) einen Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage von 79,9% (ohne Stromverbrauch). Den zweitbesten Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage erreicht das optimierte ZHS mit BKF mit Pufferspeicher (970l) einen Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage mit 79,1% (ohne Stromverbrauch). Das optimierte ZHS mit BKF mit größeren Pufferspeicher (2.260l) und größerer Solaranlage (20m²) erreicht einen Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage von 75,6% (ohne Stromverbrauch). Den schlechtesten Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage weist das optimierte ZHS mit BKF mit separater Warmwasserbereitung mit 73,6% (ohne Stromverbrauch) auf.

Im Vergleich zur Messdatenauswertung, ergibt sich ein anderes Bild. Hier hat die Anlage ohne Pufferspeicher den größten Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage mit 73,1% (ohne Stromverbrauch). Gefolgt von der Anlage mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) mit einem Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage von 64,7% (ohne Stromverbrauch). Danach kommt die Anlage mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) mit einem Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage von 61,8% (ohne Stromverbrauch). Den kleinsten Jahresnutzungsgrad der Gesamtanlage hat die Anlage mit Pufferspeicher (750l) mit 58,7% (ohne Stromverbrauch).

Die Ursachen für den Unterschied werden nun erklärt. Einerseits wurde bei den Simulationen im Vergleich zu den Feldanlagen immer der gleiche Wärmebedarf (Anlage B) verwendet, dadurch verändern sich die hydraulischen Verluste im Heizungssystem. Der Wärmeverbrauch bei der Messdatenauswertung bei der Anlagen A (mit Pufferspeicher) und Anlage I (ohne Pufferspeicher) war um ca. 35% höher als der Simulationswärmeverbrauch. Außerdem wurden bei den simulierten Heizungssystemen alle Optimierungsmaßnahmen berücksichtigt. Dadurch stellte sich eine bessere Kesselauslastung ein im Vergleich zu den Feldanlagen, wo der Pelletkessel in Stop-and-Go-Betrieb fuhr. Der Unterschied zwischen den beiden Anlagen mit Solaranlage kann dadurch erklärt werden, dass die Anlage mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) im Feldbetrieb besser geregelt wurde als die Anlage mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²). Bei der Simulation sind jedoch die Regelungseinstellungen der Anlage mit Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) auch für die Anlage mit Pufferspeicher (2.260l) und Solaranlage (20m²) verwendet worden. Der Grund warum bei der Simulation die Anlage ohne Pufferspeicher am schlechtesten abschneidet, ist damit zu erklären, da bei dieser Anlage fast keine Optimierungsmaßnahmen (keine Anlagenregelung) durchgeführt werden konnten, aufgrund des Fehlens der Komponenten (geringere Verbesserung möglich).

Empfehlungen, um den Ressourceneinsatz und die Ökologie zu verbessern

Eine genaue ökologische Bewertung in Bezug auf Emissionen konnte nicht gemacht werden, da keine Emissionsmessdaten vorlagen. Deshalb wurde nur eine qualitative ökologische Bewertung auf Basis des Brennstoffverbrauchs gemacht, da der Brennstoffverbrauch direkt mit dem Emissionsausstoß zusammenhängt.

Wird auf den Punkt Ressourcen und Ökologie Wert gelegt, dann ist es zu empfehlen, eine Solaranlage zu installieren. Die Solaranlage und der Pufferspeicher sollen im Verhältnis zum Gesamtwärmeverbrauch und auch im Verhältnis zueinander (Richtwert ca. 1m³ Pufferspeichervolumen/10m² Solarkollektorfläche) richtig dimensioniert werden. Eine optimierte Regelung des Solarkreises ist wichtig, damit die Solaranlage effizient genutzt

werden kann (siehe allgemeine Empfehlungen für die Heizungsanlagenoptimierung). Ebenfalls einen Einfluss hat die Größe der Solaranlage. Die Solaranlage (20m²) bei der optimierten Heizungsanlage produziert unter gegebenen Rahmenbedingungen (spezifischer Gesamtwärmeverbrauch 50,5kWh/m²*a bei 170m² Wohnfläche) ca. 4.870kWh im Vergleich zur Solaranlage (10m²) bei der optimierten Heizungsanlage welche mit 3.210kWh produziert. Dadurch können mit einer Kollektorfläche von 20m² im Gegensatz zur Kollektorfläche mit 10m² ca. 140kg Pellets eingespart werden. Desto größer die Solaranlage ausgeführt wird, desto weniger sind Brennstoffverbrauch und Emissionsausstoß. Der Solaranlagengröße muss aber eine sinnvolle Grenze gesetzt werden. Die Größe der Solaranlage soll in einer sinnvollen Relevanz zum Wärmebedarf im Sommer stehen.

Weiters soll sowohl für Anlagen mit und ohne Solaranlage eine Isolierung der Rohrleitungen durchgeführt werden, da diese Maßnahme ein großes Einsparungspotential bezüglich Brennstoffverbrauch aufweist.

Bei den Heizungssystemen ohne Solaranlage, ist bei unter den gegebenen Rahmenbedingungen das Heizungssystem mit Pufferspeicher zu empfehlen, da der Pelletkessel gleichmäßiger betrieben wird und dadurch stellt sich ein besserer Kessel-Jahresnutzungsgrad ein. Bei einem höheren Kessel-Jahresnutzungsgrad verringert sich der Pelletverbrauch.

Ebenfalls ein großes Brennstoffeinsparungspotential besitzt ein Pelletkessel integriert im Pufferspeicher, aufgrund der geringeren Kesselverluste an die Umgebung.

Bei einem gleichmäßigeren Betrieb des Pelletkessels (weniger Starts) verringern sich die Emissionen. Deshalb sollen die Anlagen mit Pufferspeicher bevorzugt werden, da dort der Pelletkessel gleichmäßiger betrieben werden kann. Im Zusammenhang von Pufferspeicher und Solaranlage, soll die Auslegung der Komponenten so erfolgen, dass der Kessel nicht in Stop-and-Go betrieben wird (z.B. zu kleine Solaranlage, dann muss der Pelletkessel im Sommer starten für die Warmwasseraufbereitung).

Empfehlungen, um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern

Wird auf die Wirtschaftlichkeit geachtet, dann ist unter den gegebenen Rahmenbedingungen (spezifischer Gesamtwärmeverbrauch 50,5kWh/m²*a bei 170m² Wohnfläche) das ZHS mit BKF (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert) die sinnvollste Variante, dicht gefolgt vom ZHS mit BKF (8kW) und Pufferspeicher (970l) (optimiert). Dementsprechend ist die Entscheidung des zu wählenden Heizungssystems vom Wärmebedarf abhängig. Bei höherem Wärmebedarf wird wahrscheinlich die Heizungsanlage mit Pufferspeicher wirtschaftlicher sein (geringere verbrauchsgebundene Kosten). Bei niedrigerem Wärmebedarf wird wahrscheinlich die Heizungsanlage ohne Pufferspeicher wirtschaftlicher sein. Darüber hinaus kann auch die Entscheidung des Pelletpreises die Wärmegestehungskosten zugunsten der Heizungsanlage mit Pufferspeicher ändern, z.B. wenn der Pelletpreis ansteigt. Die Heizungsanlagen mit Solaranlagen weisen hingegen deutlich höhere spezifische Wärmegestehungskosten auf, da die Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Pelletverbrauchs deutlich geringer ausfallen als die hohen Zusatzinvestitionskosten für die Solaranlage. Darüber hinaus steigen die Wärmegestehungskosten mit zunehmender Solaranlagengröße weiter an.

Um die Anlagen mit geringerem Ressourcenverbrauch (mit Solaranlage) auch wirtschaftlich konkurrenzfähiger machen zu können, müssen Änderungen an den Förderkriterien

vorgenommen werden. Ein Mindest-Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels sollte in Zukunft ein Kriterium für Förderungen sein. Dafür muss aber noch eine Norm für die Bestimmung des Jahresnutzungsgrades des Pelletkessels festgelegt werden. Bei den Neubauten werden die Solaranlagen bereits über die Wohnbauförderung gefördert. Wenn für die Altbauten die Solaranlage konkurrenzfähiger gemacht werden soll, dann müssen die Fördersätze im Vergleich zu den Komponentenkosten erhöht werden.

7 Literaturverzeichnis

- 1 KONERSMAN Lars, HALLER Michel, VOGELSANGER Peter, 2007: Pelletsolar- Leistungsanalyse und Optimierung eines pellet-solarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser, Schlussbericht, SPF Institut für Solartechnik, Rapperswil, Schweiz
- 2 SCHRAUBE Christian, 2012: per E-Mail übermittelte Daten am 20.03.2012
- 3 OBERNBERGER Ingwald, THEK Gerold, 2009: Herstellung und energetische Nutzung von Pellets. Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit, Institut für Prozesstechnik (Hrsg.), ISBN 978-3-9501980-5-8, Graz, Österreich
- 4 SAAM, 2012: Homepage, <http://www.saamgmbh.de>, Saam GmbH, Bornheim, Deutschland [13.10.2012]
- 5 BLT Wieselburg; 2005: Pelletsfeuerung Pellematic PE08, Prüfbericht, Wieselburg, Österreich, verfügbar unter <http://www.blb.bmlfuw.gv.at> [12.10.2012]
- 6 JURATHERM, 2012: per E-Mail übermittelte Daten, Juratherm GmbH, Bayreuth, Deutschland
- 7 JENNI Energietechnik, 2010: Homepage, <http://www.jenni.ch>, Jenni Energietechnik AG, Oberburg bei Burgdorf, Schweiz [15.04.2012]
- 8 DSTTP, 2012: Homepage, <http://www.solarthermietehnologie.de>, Bundesverband Solarwirtschaft (BSW-Solar), Berlin, Deutschland [18.11.2012]
- 9 HACKENBERG Rudolf, 2012: Homepage, <http://www.pb-hackenberg.de>, Projektierungsbüro EHLKS-Haustechnik, Emmerting, Deutschland, [18.11.2012]
- 10 SCHRAUBE Christian 2011: Small pellet boilers-Investigation of efficiencies from field measurements, Präsentation, EIFER; Graz, Österreich, verfügbar unter <http://www.biomasseverband.at> [11.09.2012]
- 11 SCHRAUBE Christian, 2012: Persönliche Mitteilung per Telefon am 11.04.2012
- 12 GASSEL Andreas, 1997: Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme, Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Deutschland
- 13 DIEFENBACH Nikolaus, BORN Rolf, STÄRZ Norbert, 2009: Solarthermie/Abluft-Wärmepumpe/Pelletofen: Kombisysteme zur nachhaltigen Wärmeversorgung von Niedrigenergiehäusern im Gebäudebestand, Bericht vom Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), ISBN 978-3-941140-11-0, Darmstadt, Deutschland
- 14 TRNSYS Coordinator, 2010: TRNSYS 17 a TRAnsient System Simulation programm. Volume 4 Mathematical Reference, Madison, USA
- 15 HALLER Michel (Übers.), 2010: Combined solar and pellet heating systems. Improvement of energy efficiency by advanced heat storage techniques, hydraulics, and control, Dissertation an der Technischen Universität Graz, Österreich
- 16 DRÜCK Harald, 2006: MULTIPORT Store-Model for TRNSYS, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland
- 17 HEIMRATH Richard, HALLER Michel, 2007: The Reference Heating System, the Template Solar system of Task 32, Bericht vom Institut Wärmetechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- 18 HMS UMWELTTECHNIK, 2012: Homepage, <http://www.hms-umwelttechnik.de>, HMS Umwelttechnik GmbH, Nürtingen, Deutschland [15.09.2012]
- 19 JENNI Josef, 2000: Swiss Solartank, Fachpublikation, Jenni Energietechnik AG (Hrsg.), Oberburg bei Burgdorf, Schweiz

-
- 20 PREIß Lars, 2002: Optimierung von Tunnelquerschnitten statische und wirtschaftliche Gesichtspunkte, Diplomarbeit an der Bauhaus- Universität Weimar, Weimar, Deutschland
 - 21 RICHTLINIE VDI 2076, 1983: Betriebstechnische und wirtschaftliche Grundlagen-Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland
 - 22 EBERMANN Erwin, 2010: Homepage, <http://univie.ac.at>, Institut für Kultur-und Sozialanthropologie, Wien, Österreich [06.12.2012]
 - 23 GLYKOL & SOLE, 2012: Homepage, <http://www.glykolundsole.com>, Glykol & Sole GmbH, Cottbus, Deutschland [13.05.2012]
 - 24 PROPELLETS Austria, 2012: Homepage, <http://www.propellets.at>, proPellets Austria, Wolfsgraben, Österreich, [14.09.2012]
 - 25 E-CONTROL, 2012: Homepage, <http://www.e-control.at>, E-Control Austria, Wien, Österreich, [14.09.2012]
 - 26 WALLNER, 2012: Homepage, <http://www.wallnergmbh.co.at>; Wallner- Abwasserreinigungssysteme GmbH, Großlobming, Österreich [16.10.2012]
 - 27 KRATZ Carsten, 2012: Homepage, <http://www.ck-heiztechnik.de>, CK- Heiztechnik, Stuhr, Deutschland, [16.10.2012]

Anhang

Vollkostenrechnung nach Richtlinie VDI 2067

Tabelle A: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (Basis)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; keine Rohrisolierung; 7,8/12,4Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 160/100°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 14,15W/K; Warmwasserbereitung wird mit einem Elektrowärmespeicher erzeugt

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	11.650	1.016	233				1.249	111,32
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	3.650	318	73				391	34,88
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 1,91m ²	621	39	6				46	4,07
Brennstoffkosten					724		724	64,54
Stromkosten					261		261	23,30
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						111	111	9,91
Zinsendienst Brennstofflagerung					22		22	1,94
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	22.221	1.837	402	1.007	209	111	3.567	318,0
Spezifische Kosten in €/MWh		163,8	35,9	89,8	18,7	9,9		318,0

Tabelle B: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit separater Warmwasserbereitung (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 7,78W/K; Warmwasserbereitung wird mit einem Elektrowärmespeicher erzeugt

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	11.650	1.016	233				1.249	111,32
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	4.400	384	88				472	42,04
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 1,91m ²	483	31	5				35	3,16
Brennstoffkosten					672		672	59,93
Stromkosten					261		261	23,30
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						114	114	10,18
Zinsendienst Brennstofflagerung					20		20	1,80
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	22.833	1.894	416	954	209	114	3.587	319,8
Spezifische Kosten in €/MWh		168,8	37,1	85,0	18,7	10,2		319,8

Tabelle C: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) ohne separate Warmwasserbereitung (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 7,78W/K; Warmwasserbereitung wird geschieht mit Lademodul über den Kessel

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	11.650	1.016	233				1.249	111,32
Raumastragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	4.550	397	91				488	43,48
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 3,13m ²	792	50	8				58	5,19
Brennstoffkosten					681		681	60,70
Stromkosten					16		16	1,44
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						116	116	10,38
Zinsendienst Brennstofflagerung					20		20	1,82
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	23.292	1.926	422	717	209	116	3.392	302,4
Spezifische Kosten in €/MWh		171,7	37,6	64,0	18,7	10,4		302,4

Tabelle D: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) (Basis)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; ohne Rohrisolierung; 7,8/12,4Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 160/100°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 14,15W/K

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	11.850	1.033	237				1.270	113,23
Raumastragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	6.980	609	140				748	66,70
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 1,91m ²	1.001	64	10				74	6,55
Brennstoffkosten					687		687	61,26
Stromkosten					32		32	2,87
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						131	131	11,65
Zinsendienst Brennstofflagerung					21		21	1,84
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	26.131	2.169	477	740	209	131	3.726	332,1
Spezifische Kosten in €/MWh		193,4	42,5	66,0	18,7	11,6		332,1

Tabelle E: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (970l) (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 4,18W/K; Regelanpassung

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	10.985	958	220				1.177	104,97
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	7.980	696	160				855	76,25
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 3,01m ²	762	48	8				56	4,99
Brennstoffkosten					597		597	53,26
Stromkosten				17			17	1,53
Wartung (Eigenleistung)					59		59	5,28
Sonstige Kosten						130	130	11,60
Zinsendienst Brennstofflagerung				18			18	1,60
Rauchfangkehrer					150		150	13,37
Summe der Kosten	26.027	2.166	477	633	209	130	3.614	322,2
Spezifische Kosten in €/MWh		193,1	42,5	56,4	18,7	11,6		322,2

Tabelle F: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 35; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 4,18W/K; Regelanpassung; Annahmen für Simulation getroffen, weil keine Herstellerdaten zur Verfügung standen (darum mit Vorsicht bewerten)

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	10.985	958	220				1.177	104,97
Raumaustragung, Lagerraumeinbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	6.980	609	140				748	66,70
Solaranlage	0	0	0				0	0,00
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 2,78m ²	703	45	7				52	4,60
Brennstoffkosten				562			562	50,10
Stromkosten				17			17	1,50
Wartung (Eigenleistung)					59		59	5,28
Sonstige Kosten						125	125	11,13
Zinsendienst Brennstofflagerung				17			17	1,50
Rauchfangkehrer					150		150	13,37
Summe der Kosten	24.968	2.075	456	596	209	125	3.461	308,5
Spezifische Kosten in €/MWh		185,0	40,7	53,1	18,7	11,1		308,5

Tabelle G: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (15kW) mit Pufferspeicher (970l) mit Solaranlage (10m²) (Basis)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 36; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; ohne Rohrisolierung; 7,8/12,4Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 160/100°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 14,15W/K

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€/MWh
Pelletkessel	11.850	1.033	237				1.270	113,23
Raumaustragung, Lagerraumbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	8.450	737	169				906	80,74
Solaranlage	3.645	318	73				391	34,83
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 1,91m ²	798	51	8				59	5,22
Brennstoffkosten					677		677	60,39
Stromkosten					25		25	2,19
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						155	155	13,84
Zinsendienst Brennstofflagerung					20		20	1,81
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	31.043	2.602	577	722	209	155	4.266	380,3
Spezifische Kosten in €/MWh		232,0	51,4	64,4	18,7	13,8		380,3

Tabelle H: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) mit Pufferspeicher (2.260l) mit Solaranlage (20m²) (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 36; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 4,18W/K; Regelanpassung

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€p.a.	€/MWh
Pelletkessel	10.985	958	220				1.177	104,97
Raumaustragung, Lagerraumbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	11.175	974	224				1.198	106,78
Solaranlage	6.375	556	128				683	60,92
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 1,47m ²	372	24	4				27	2,44
Brennstoffkosten					616		616	54,93
Stromkosten					12		12	1,06
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						176	176	15,69
Zinsendienst Brennstofflagerung					18		18	1,65
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	35.207	2.975	664	646	209	176	4.671	416,5
Spezifische Kosten in €/MWh		265,2	59,2	57,6	18,7	15,7		416,5

Tabelle I: Vollkostenrechnung nach VDI 2067 für das Zentralheizungssystem mit Biomassekleinfeuerung (8kW) integriert im Pufferspeicher (970l) und Solaranlage (10m²) (optimiert)

Erläuterungen: Basisdaten siehe Tabelle 34; Investitionskosten aus Tabelle 36; Richtlinie VDI 2067; spezifische Wärmegestehungskosten auf Nutzwärme bezogen; Kesselnennleistung 15kW; 30mm Rohrisolierung; 7,8/7,8Vol% O₂-Gehalt im trockenen Rauchgas (Voll-/Teillast); 120/60°C Rauchgasaustrittstemperatur (Voll-/Teillast); UA_{OFF}-Wert ist 4,18W/K; Regelanpassung; Annahmen für Simulation getroffen, weil keine Herstellerdaten zur Verfügung standen (darum mit Vorsicht bewerten)

	Investitions- kosten	Kapital- kosten	Instand- setzungs- kosten	Verbrauchs- gebundene Kosten	Betriebs- gebundene Kosten	Sonstige Kosten	Summe der Kosten	Spezifische Kosten
	€	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/a.	€/MWh
Pelletkessel	10.985	958	220				1.177	104,97
Raumaustragung, Lagerraumbauten	2.700	235	54				289	25,80
Pufferspeicher plus Hydraulik	8.700	759	174				933	83,13
Solaranlage	3.645	318	73				391	34,83
Kamin	2.700	171	27				198	17,68
Baukosten Heizraum, 3,6m ²	900	57	9				66	5,89
Baukosten Lagerraum, 2,13m ²	538	34	5				40	3,52
Brennstoffkosten					563		563	50,22
Stromkosten					13		13	1,15
Wartung (Eigenleistung)						59	59	5,28
Sonstige Kosten						151	151	13,45
Zinsdienst Brennstofflagerung					17		17	1,51
Rauchfangkehrer						150	150	13,37
Summe der Kosten	30.168	2.532	562	593	209	151	4.047	360,8
Spezifische Kosten in €/MWh		225,7	50,1	52,9	18,7	13,4		360,8