

Babette Hebenstreit

Rosemarie Schnetzinger

Ernst Höftberger

Endbericht ActiveCond

Aktive Abgaskondensation mit Wärmepumpen zur Effizienzsteigerung bei seriennahen, automatisch beschickten Biomassefeuerungen

Datum 30. Jänner 2012
Nummer 506 TR I-1-8 01

Projektleitung Ernst Höftberger
ernst.höftberger@bioenergy2020.eu

Mitarbeit Babette Hebenstreit
Ralf Ohnmacht
Rosemarie Schnetzinger

Projektnummer IK-I-1-8
Projektlaufzeit 01. April 2010 - 31. Oktober 2011

Mit Unterstützung von Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

BIOENERGY 2020+ GmbH

Standort Wieselburg

Gewerbepark Haag 3
A 3250 Wieselburg-Land
T +43 (0) 7416 52238-10
F +43 (0) 7416 52238-99
office@bioenergy2020.eu
www.bioenergy2020.eu

Firmensitz Graz

Innfeldgasse 21b, A 8010 Graz
FN 232244k
Landesgericht für ZRS Graz
UID-Nr. ATU 56877044





Endbericht ActiveCond

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 5 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 5 |
| 1.2 | Schwerpunkte des Projektes | 7 |
| 1.3 | Einordnung in das Programm | 8 |
| 1.4 | Verwendete Methoden & Aufbau der Arbeit | 8 |
| 2 | Stand der Technik | 10 |
| 2.1 | Wärmetauscher und Kondensationsanlagen | 10 |
| 2.1.1 | Sekundärwärmetauscher | 10 |
| 2.1.2 | Kondensationsanlagen | 12 |
| 2.2 | Brennwertkessel bzw. Anwendungen der Brennwerttechnik | 14 |
| 2.2.1 | Brennwerttechnik bei Gas- und Ölfeuerungen | 14 |
| 2.2.2 | Brennwerttechnik bei Biomassefeuerungen | 15 |
| 2.3 | Wärmepumpen | 16 |
| 2.3.1 | Kennzahlen von Kompressionswärmepumpen | 16 |
| 2.3.2 | Wärmetauscher für Kondensation und Verdampfung | 19 |
| 2.3.3 | Anwendungen Adsorptionswärmepumpe | 20 |
| 2.4 | Aktive Abgaskondensation bei Biomassefeuerungen | 21 |
| 2.5 | Patente | 24 |
| 2.6 | Zusammenfassung der Technologierecherche | 26 |
| 2.7 | Emissionen im Abgas und Kondensat | 28 |
| 2.7.1 | Emissionsminderung durch aktive Abgaskondensation | 28 |
| 2.7.2 | Kondensatbehandlung | 30 |
| 2.8 | Mögliche Komponenten für die Verwendung in Kleinanlagen | 32 |
| 2.8.1 | Kondensationswärmetauscher | 33 |
| 2.8.2 | Kondensationsanlagen | 34 |
| 2.8.3 | Pellets-Brennwertkessel | 34 |
| 2.8.4 | Wärmepumpe | 35 |
| 3 | Technisches Konzept und Modellierung | 36 |
| 3.1 | Anforderungen an das ActiveCond-System | 36 |
| 3.1.1 | Abkühlen des Abgases und Kondensation des Wasserdampfs | 36 |
| 3.1.2 | Wärmeübertragung auf die Wärmepumpe | 37 |
| 3.1.3 | Wärmetransformation mittels Wärmepumpe | 38 |
| 3.1.4 | Wärmeübertragung auf Heizungsrücklauf | 39 |
| 3.1.5 | Kondensatabfuhr bzw. Nachbehandlung | 39 |
| 3.1.6 | Abgasabfuhr an Umgebung | 40 |
| 3.2 | Ausgesuchte Anwendungsfälle | 40 |
| 3.3 | Technisches Konzept Kleinanlagen | 41 |
| 3.4 | Modellierung | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.1 | Wärmepumpe | 43 |
| 3.4.2 | Quench | 44 |
| 3.4.3 | Kondensationswärmetauscher | 44 |
| 3.4.4 | Pumpe und Gebläse | 44 |
| 3.4.5 | Abgasmenge & -zusammensetzung nach Kessel | 44 |
| 3.4.6 | Kessel | 45 |
| 4 | Thermodynamische und ökonomische Systemanalyse | 46 |
| 4.1 | Ergebnisse der thermodynamischen Analyse | 46 |
| 4.1.1 | Veränderung des Holzfeuchte | 48 |
| 4.1.2 | Veränderung der Holzfeuchte bei konstanter Quenche- Austrittstemperatur | 50 |
| 4.1.3 | Veränderung der Holzfeuchte bei konstanter Carnot-Effizienz | 51 |
| 4.1.4 | Veränderung der Heizwassertemperatur | 52 |
| 4.1.5 | Veränderung der Abgastemperatur am Eintritt | 52 |
| 4.1.6 | Veränderung der elektrischen Leistung der Wärmepumpe | 54 |
| 4.1.7 | Veränderung der Kesselleistung | 55 |
| 4.1.8 | Zusammenfassung der thermodynamischen Analyse | 55 |
| 4.2 | Ergebnisse der ökonomischen Analyse | 56 |
| 4.2.1 | Kleinleistungsbereich (Pellet und Hackschnitzel) | 56 |
| 4.2.2 | Fernheizwerk | 57 |
| 4.2.3 | Zusammenfassung der ökonomischen Analyse | 58 |
| 4.2.4 | Potentielle Einsatzgebiete | 58 |
| 5 | Ergebnisse und Schlussfolgerungen | 59 |
| 6 | Ausblick und Empfehlungen | 60 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 61 |
| 8 | Anhang | 66 |
| 8.1 | Tabellenverzeichnis | 66 |
| 8.2 | Abbildungsverzeichnis | 66 |

1 Einleitung

Dieses Dokument ist der Abschlussbericht des Projekts ActiveCond. Im Rahmen des Projekts wurde die Nutzung der Abgaswärme von Biomassefeuerung untersucht. Ziel war die Entwicklung eines technischen Konzeptes zur aktiven Abgaskondensation in seriennahen automatisch beschickten Biomassefeuerungen. Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt. In Kapitel 1 werden Motivation und Aufgabenstellung erörtert, sowie die Einbindung in das Programm dargestellt. Außerdem wird eine Kurzzusammenfassung der Methoden und Arbeiten gegeben. Kapitel 2 beinhaltet eine ausführliche Studie zum aktuellen Stand der Technik zur Abgaswärmerückgewinnung und Wärmepumpen. Aufbauend darauf stellt Kapitel 3 ein technisches Konzept zur aktiven Abgaskondensation vor. Alle im Konzept enthaltenen Komponenten wurden modelliert und in Kapitel 4 einer Parameterstudie zur technischen und ökonomischen Bewertung unterzogen. Kapitel 5 fasst nochmals die wesentlichen Ergebnisse zusammen, während Kapitel 6 einen Ausblick über mögliche Anknüpfungspunkte und zukünftige Entwicklungen am Gebiet der aktiven Abgaskondensation gibt.

1.1 Aufgabenstellung

Derzeit verfügbare Biomassefeuerungen, mit Ausnahme eines bereits erhältlichen Brennwertkessels, erreichen einen feuerungstechnischen Wirkungsgrad von bis zu 93%¹ bezogen auf den Heizwert, was je nach Wassergehalt einem brennwertbezogenen Wirkungsgrad von ca. 80–85% entspricht. Das bedeutet, dass 15% - 20% der Brennstoffenergie über das Abgas verloren gehen. Diese Abgasverluste lassen sich unterteilen in:

- Verlust an fühlbarer Wärme
- Verlust durch nicht genutzte Kondensationswärme

Der Verlust an fühlbarer Wärme ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen dem abgeführten Abgas und der zugeführten Umgebungs- bzw. Verbrennungsluft, wie in Abbildung 1-1 im linearen Bereich zu sehen ist. Er nimmt mit steigender spezifischer Verbrennungsgasmenge bzw. mit steigender Luftüberschusszahl λ zu.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der nicht genutzten Kondensationswärme um einen Verlust an latenter Wärme. Das bei der Oxidation von Wasserstoff entstandene und das im Brennstoff eingelagerte Wasser befinden sich nach der Verbrennung in gasförmigem Zustand, und erhöhen somit die spezifische Enthalpie des abgeführten Abgases. Der Verlust an nicht genutzter Kondensationswärme nimmt mit steigendem Wasserdampfgehalt im Abgas zu, und

¹⁾ Der feuerungstechnische Wirkungsgrad berücksichtigt nur Abgasverluste und wurde berechnet bei einer Luftüberschusszahl von 1,5, einer Abgastemperatur von 140°C und einer Umgebungstemperatur von 20°C

hängt somit vom Wassergehalt, dem Wasserstoffanteil im Brennstoff und der Abgasendtemperatur ab (siehe Abbildung 1-1).

Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Abgastemperatur

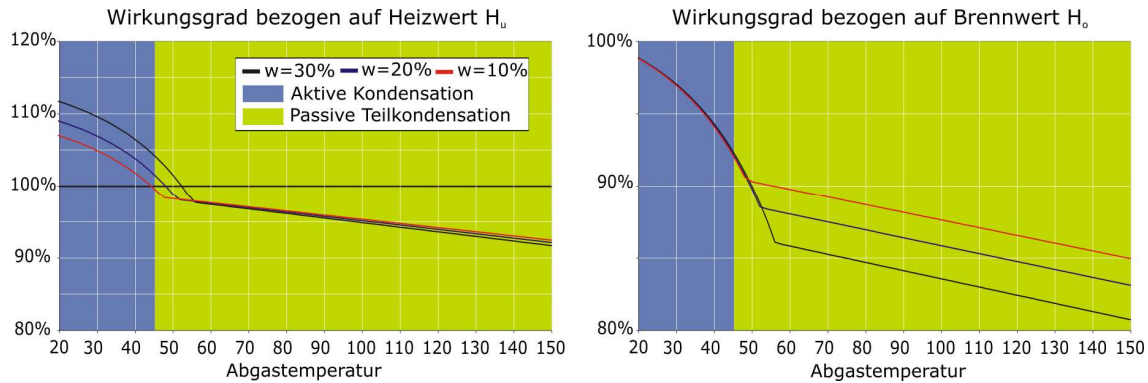


Abbildung 1-1 Erreichbare Wirkungsgrade durch Abgaskondensation (Fichtenholz - Luftverhältnis 1,5 - nur Abgasverlust berücksichtigt, Umgebungstemperatur 20°C)

Abbildung 1-1 links zeigt den Zusammenhang zwischen heizwertbezogenem Wirkungsgrad und Abgastemperatur. Unter einer Temperatur von etwa 55°C beginnt der Wasserdampf im Abgas zu kondensieren, woraus sich ein beträchtlicher Wirkungsgradzuwachs ergibt. Abbildung 1-1 rechts zeigt den Zusammenhang von brennwertbezogenen Wirkungsgrad zu Abgastemperatur. Bei kondensierenden Systemen ist der Brennwert, wenn auch nicht üblich, die aussagekräftigere Bezugsgröße.

Da die zur Wärmerückgewinnung erforderlichen Kondensationstemperaturen jedoch unter dem für Heizwasserkreise üblichen Temperaturniveau liegen, bedarf es einer erweiterten Betrachtung des Gesamtsystems zur Wärmebereitstellung, um geeignete Lösungen zur Nutzbarmachung der Kondensationswärme zu finden.

Im Rahmen des Projektes „ActiveCond“ wurde ein technisches Konzept zur aktiven Abgaskondensation in Biomassefeuerungen ausgearbeitet. Als aktive Abgaskondensation bezeichnet man die Verwendung einer Wärmepumpe zur Kondensation der Abgase einer Feuerung. Im Gegensatz zur „normalen“, passiven Brennwerttechnik ermöglicht die Integration einer Wärmepumpe eine Abkühlung des Rauchgases bis auf Raumtemperatur, wodurch fast vollständige Kondensation erreichbar ist und beinahe der gesamte Brennwert genutzt werden kann. In weiterer Folge sinken die Verluste daher auf ein Minimum. Die nutzbar gemachte Wärme, die bei niedrigem Temperaturniveau zur Verfügung steht, kann anschließend mit geringem zusätzlichem Exergieaufwand durch die Wärmepumpe wieder auf ein verwendbares Niveau angehoben werden. Folglich kann unabhängig von der Temperatur des Heizungsrücklaufes der Großteil der im Rauchgas enthaltenen Kondensationswärme nutzbar gemacht werden.

Die Abgaskondensation hat neben der Brennstoffeinsparung aufgrund des höheren Nutzungsgrades noch zwei weitere Vorteile. Durch die Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes werden Staubpartikel aus dem Rauchgas aufgenommen und in

das Kondensat geschwemmt, das Rauchgas wird also gereinigt. Der zweite Vorteil ist, dass durch die Kondensation das im Rauchgas enthaltene Schwefeldioxid sich mit dem Wasser verbindet und ebenfalls ins Kondensat geschwemmt wird. Folglich sinken die Feinstaubbelastung und die Geruchsbelästigung durch die Rauchgase auf ein Minimum.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines technischen Konzeptes zur aktiven Abgaskondensation in Biomassefeuerungen, das durch geeignete Modellbildung und Bilanzierung eine Abschätzung der Potenziale zur Effizienzsteigerung ermöglicht. Aus Gründen der Flexibilität und Nachrüstbarkeit wurde in diesem Projekt das Entwicklungspotential für eine feuerungsunabhängige Komponentenlösung betrachtet, damit auch bestehende Kessel einfach nachgerüstet werden können. Abbildung 1-2 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise und Energieströme bei aktiver Abgaskondensation.

Schema aktive Abgaskondensation

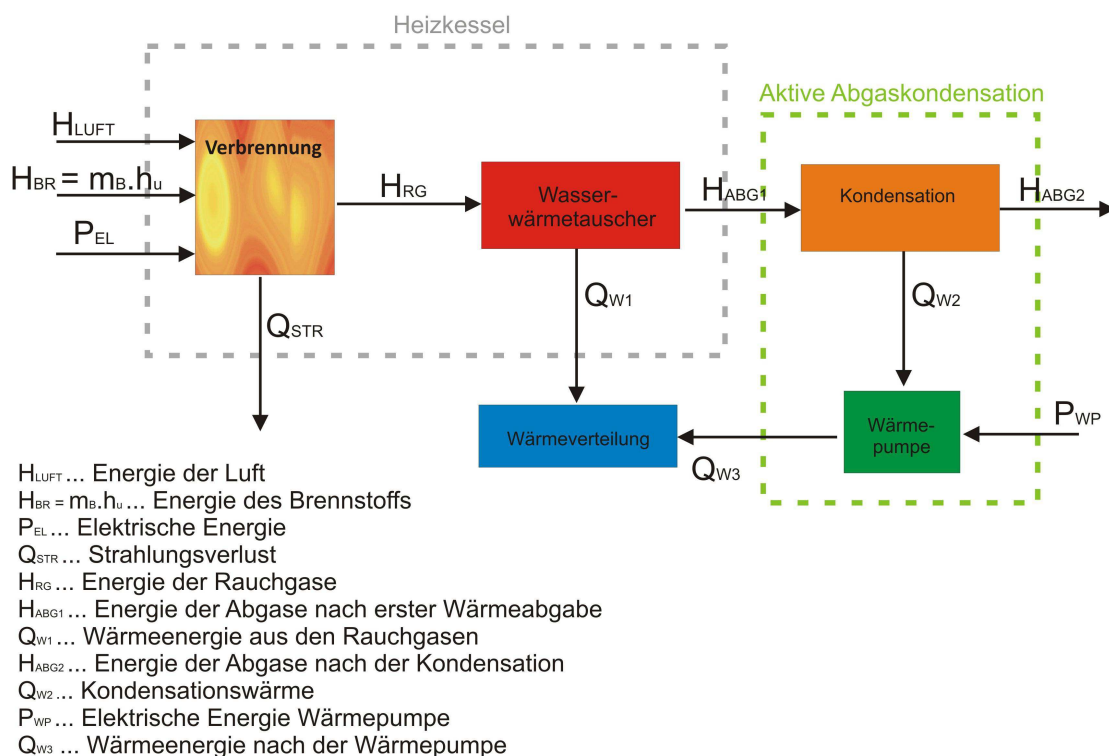


Abbildung 1-2 Schematische Darstellung des Systems zur aktiven Abgaskondensation

Die zwei großen Schwerpunkte der Arbeit waren daher einerseits die Recherche des Stands der Technik zu allen Komponenten und andererseits die Modellbildung, die eine Analyse der Zusammenhänge zwischen den Komponenten erlaubt.

Eine Beurteilung hinsichtlich wirtschaftlicher Umsetzbarkeit erfolgte durch eine Kostenabschätzung des technischen Konzeptes. Ergebnisse des Projektes sind die

Identifizierung geeigneter Anwendungsfelder, sowie die Erörterung und Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale unter zukünftigen ökonomischen Randbedingungen.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt ActiveCond ist im Themenfeld ‚Fortgeschrittene Speicher- und Umwandlungstechnologien‘ des NEUE ENERGIEN 2020 Programms angesiedelt. Im speziellen widmet sich das Projekt dem Thema Wärmerückgewinnung bei Biomassefeuerungen. Ziel des Projekts ist vor allem die Erhöhung der Energieeffizienz bestehender und zukünftiger Biomasseheizungen. Österreich nimmt international eine führende Rolle im Bereich der Entwicklung und Herstellung moderner Biomassekleinanlagen ein. Auch in der Brennwerttechnologie gelang es einem österreichischen Unternehmen, den bisher ersten Pelletbrennwertkessel auf den Markt zu bringen. Des Weiteren besitzt Österreich ein sehr hohes Potential an holzartiger Biomasse, wodurch ein hoher Grad an Selbstversorgung und Unabhängigkeit von Primärenergieimport erreichbar sind. Die Weiterentwicklung und Technologisierung von Biomassefeuerungen in Bezug auf höhere Effizienz dient der Ressourceneinsparung im eigenen Land und stärkt und festigt die österreichische Position am internationalen Heizkesselmarkt. Durch die stark gestiegene Nutzung von Holz als erneuerbarer Rohstoff für Raumwärme im letzten Jahrzehnt, steigen die Preise für Biomasse an. Die optimale Ausnutzung des Energieinhalts sichert langfristig die Attraktivität des Energieträgers. Die in diesem Projekt untersuchte aktive Abgaskondensation führt direkt zu einer Reduktion des Energiebedarfs durch verbraucherseitige Maßnahmen.

Zusätzlich zur Weiterentwicklung am Gebiet der thermischen Biomassenutzung wird durch den Einbau der Wärmepumpe das Gesamtsystem Heizung aus zwei Energieträgern (Biomasse und Strom) gespeist. Ziel des Projekts ist ein Umdenken von Konkurrenz zwischen den einzelnen Heizungstechnologien hin zu einer Kooperation und einem Systemdenken mit dem Ziel die jeweils optimale individuelle Kombination für jedes Gebäude bereitzustellen.

1.4 Verwendete Methoden & Aufbau der Arbeit

Zu Beginn des Projekts wurde der „Stand der Technik“ erhoben (siehe Kapitel 2). Dafür wurden eine Literaturrecherche, Firmenbefragungen und eine Patentrecherche durchgeführt. Ziel war das Erlangen von Überblickswissen über vorhandene Kondensationssysteme in Biomasseanlagen und verwandten Technologien (Öl/Gaskessel) aller Leistungsgrößen, sowie über bestehende Wärmepumpentechnologien. Daneben wurden Informationen zum Thema Abscheidungsraten durch Abgaskondensation recherchiert, die als Basis für die Abschätzung der Emissionsminderung dienen.

Aufbauend auf dem gewonnenen Wissen wurde in einem technischen Entwurfsprozess ein aktives Abgaskondensationssystem konzipiert und geplant (siehe Kapitel 3). Die Konzeption ergab ein Quench-System für die Wärmerückgewinnung als sinnvollste Maßnahme im Kleinleistungsbereich. Zusätzlich wurde die Eignung eines Kondensationsmoduls

(Rohrbündelwärmetauscher) eines Fernheizwerkes für aktive Abgaskondensation untersucht. Die weiteren Untersuchungen wurden für beide Systeme (Quench und Rohrbündelwärmetauscher) durchgeführt. Zur Beurteilung wurde ein thermodynamisches Modell erstellt, das die Bilanzierung und Bewertung der Systeme ermöglicht. Das Modell wurde in Matlab/Simulink implementiert und bildet alle Massen- und Energieströme im System Kessel und aktive Abgaskondensation ab. Aufbauend auf diesem Modell wurde das Gesamtsystem bezüglich des Energieeinsparungspotentials und der Wirtschaftlichkeit beurteilt. Die detaillierten Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Projektergebnisse findet sich in Kapitel 5 sowie ein Ausblick in Kapitel 6.

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Technologierecherche erläutert, sowie Rahmenbedingungen bezüglich Emissionsminderung und Kondensatbehandlung aufgezeigt. Zuerst werden die Prinzipien der Technologien erklärt und erhobene Daten wie Nutzungsgrade und Kosten dargestellt. Den Beginn machen erhältliche Wärmetauschersysteme zur Brennwertnutzung bei Biomassefeuerungen. Dabei werden deren Komponenten, Funktionsweisen, verwendete Werkstoffe und Kosten beschrieben. Im nächsten Schritt sind die Ergebnisse der Recherche über Nutzungsgrade, Abgastemperaturen und andere Kenndaten von derzeit verfügbaren Brennwertkesseln für Öl, Gas und Pellets angegeben. Der anschließende Abschnitt handelt von Wärmepumpen. Zum Beginn werden Leistungszahlen, Kosten, verwendete Kältemittel und Arbeitstemperaturen verfügbarer Kompressionswärmepumpen wiedergegeben und danach Anwendungsbereiche von Adsorptionswärmepumpen aufgezeigt. In weiterer Folge sind Produkte und Verfahren, die sich mit aktiver Abgaskondensation beschäftigen, dargestellt und beschrieben. Am Ende dieses Abschnittes wird auf die Patente, die im Zusammenhang mit aktiver Abgaskondensation und Brennwerttechnik bei Biomasse gefunden worden sind hingewiesen.

Alle recherchierten Technologien sind anschließend zusammengefaßt und werden nochmals konkret auf ihre Eignung für die aktive Abgaskondensation diskutiert. Abschließend wird der aktuelle Informationsstand zur Emissionsminderung und Kondensatbehandlung aufgezeigt.

2.1 Wärmetauscher und Kondensationsanlagen

Wärmetauscher sind in verschiedenen Bauweisen und Werkstoffen erhältlich. In folgender Auflistung sind daher nur Produkte angeführt, die bereits zur Brennwertnutzung bzw. Abgaskondensation verwendet werden.

Neben den derzeit erhältlichen Brennwertkesseln gibt es auch sogenannte Sekundärwärmetauscher, die zur Abkühlung des Abgases eines bestehenden Kessels im Nachhinein ergänzt werden können. Diese Wärmetauscher können entweder an den Kessel angebaut, oder als Rauchrohr-Wärmetauscher, anstatt des herkömmlichen Rauchrohres, integriert werden (z.B. Firma Heizungskontor (GER), Firma NET GmbH (GER)). Bei den genannten Rauchrohrwärmetauschern wird das Abgas nur abgekühlt, eine Kondensation ist meist unerwünscht. Für größere Biomassefeuerungsanlagen (z.B. Heizwerke) gibt es Kondensationsanlagen, die auch eine Staubabscheidung bzw. Rauchgasreinigung vornehmen.

2.1.1 Sekundärwärmetauscher

Sekundärwärmetauscher für die Abgaskondensation bei Biomasse gibt es z.B. von der Firma Bomat, Firma Schröder und Firma Bschor. Die Produkte dieser Firmen, sowie deren Kenndaten, sind in untenstehender Tabelle 2-1 dargestellt.

Der „Bomat Profitherm“ wird an die bestehende Heizung angeschlossen, um dem Abgas mit Hilfe des Heizungsrücklaufes Wärme zu entziehen. Abhängig von den erwünschten

Abgasaustrittstemperaturen nach dem Wärmetauscher wird die notwendige Wärmetauschergröße berechnet. Die in der Tabelle 2-1 angegebenen Preise beziehen sich auf zwei Wärmetauschergrößen um das Abgas einer 50kW-Feuerung auf unterschiedliche Temperaturniveaus abzukühlen. Der Profitherm AWR G1032-200 kühlt das Rauchgas auf ungefähr 58°C und der Profitherm AWR G1064-350 auf ca. 34°C ab, jeweils mit einer Rücklauftemperatur von 30°C. Zusätzlich fallen noch eventuell die Kosten für eine Edelstahl-Kondensatwanne an, da in Deutschland bei Biomassefeuerungen die standardmäßige Kunststoffwanne wegen Rußbrandgefahr nicht erlaubt ist [Bomat 2010] [Humme 2010].

Gegenüberstellung Sekundärwärmetauscher

| Daten | Produkt/Firma „Bomat Profitherm“ Firma Bomat | „AWT-Top“ Firma Schröder | „ÖkoCarbonizer“ Firma Bschor |
|--|--|-----------------------------|--|
| Leistungsbereich Biomasseheizanlage | 20 bis 2.000 kW | 15 bis 1.000 kW | 22 bis 400 kW |
| Abgaseintritts-/ Austrittstemperatur | max. 400°C/60-40°C | max. 300 °C/ca. 50°C | Abgasaustrittstemperatur liegt 15-20K über der Rücklaufeintrittstemperatur |
| Abgaskondensation | JA | JA | JA |
| Werkstoff Wärmetauscher | Keramik | Edelstahl 1.4571/1.4404 | Carbon |
| spezifischer Preis [€/kW Feuerungsleistung] | 120 bis 180 €/kW | 50 €/kW | 50 bis 80 €/kW |

Tabelle 2-1 Übersicht Sekundärwärmetauscher

Der „AWT-Top“ (Fa. Schröder) arbeitet in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird der Heizungsrücklauf verwendet, um das Abgas auf knapp über den Taupunkt abzukühlen (50-90°C) (trockene Abkühlung). Anschließend wird mit Hilfe eines externen Pufferspeichers die Abgastemperatur unter den Taupunkt gesenkt. Dieser Pufferspeicher ist zu Beginn mit kaltem Wasser gefüllt und wird durch die Abgaskondensation langsam aufgeheizt. Listenpreise werden bei dieser Firma nur auf konkrete Anfragen weitergegeben. Daher wurde der in der Tabelle angegebene Preis, von einem Rechenbeispiel im Prospekt entnommen. Dieser Preis bezieht sich auf einem Wärmetauscher für eine 300kW Hackschnitzelfeuerung. Die Abgasendtemperatur beträgt 50°C [Schröder 2010].

Durch den Werkstoff Carbon des Wärmetauschers im „Öko-Carbonizer“ verspricht die Firma Bschor GmbH eine hohe Lebensdauer und hohe Korrosions-Beständigkeit, sowie Wartungsfreiheit [Bschor 2010]. Die Temperaturdifferenz zwischen Wassereintrittstemperatur (Rücklauf) und Abgasaustrittstemperatur wird vom Hersteller mit 15-20K angegeben, d.h. bei einer Rücklauftemperatur von 30°C kann das Abgas auf 45-50°C abgekühlt werden [Kimmerle 2010].

Auch die Firma eMax aus Hamburg (GER) bietet einen Sekundärwärmetauscher (GPH AK 28) zur Brennwertnutzung an. Derzeit ist er nur für Öl- und Gasheizungen bis zu einer Leistung von 28kW geprüft. Der Endkundenpreis beträgt mit Abgasleitung und Neutralisationsbox €1.098,- (exkl. MwSt) (137,25 €/kW). Laut Aussagen des Herstellers könnte er grundsätzlich auch bei Biomassefeuerungen eingesetzt werden, da die verwendeten Werkstoffe (Kunststoff, Glas)

säurebeständig sind. Das Problem ist die Verschmutzung der Wärmetauscheroberflächen durch den hohen Staubgehalt des Rauchgases bei Biomassefeuerungen, weswegen der Betrieb nur eine bestimmte Zeit möglich ist. Derzeit werden von der Firma eMax bereits Versuche zu diesem Thema durchgeführt, um Anpassungen vorzunehmen. Sie werden aber nicht vor Ende 2011 abgeschlossen sein [Kandler 2010].

2.1.2 Kondensationsanlagen

Für Biomasseheiz(kraft)werke ab 100kW sind Kondensationsanlagen der Firma Kolbach (www.kolbach.at), Scheuch (www.scheuch.at), SWET (www.swet.at) und VAS (www.vas.at) in Österreich, sowie die der Firma Svensk Rökgasenergi AB (www.sre.se) aus Schweden erhältlich [Gaderer 2007]. Aus der Schweiz gibt es noch die Firma H. Baumgartner & Sohn, die Kondensationsanlagen vertreibt.

EKO-Rauchgaswärmetauscher. Die Firma H. Baumgartner & Sohn AG (Leipzig, CH) bietet Kondensationsanlagen für Biomassefeuerungen von 100kW bis 1MW (EKO Rauchgaswäscher und –kondensator) und 1,5MW bis 30MW (Renergi) an. Beim EKO Rauchgaswäscher wird mit Hilfe einer Quenche das Rauchgas abgekühlt und die dadurch entstandene Wärme über das Kondensat durch einen Edelstahl-Plattenwärmetauscher an z.B. den Heizungsrücklauf abgegeben. Um den Staubgehalt des Rauchgases noch weiter zu senken wird es anschließend noch mit Filtermatten gereinigt. Die Wärmerückgewinnungsraten werden mit 10-25% angegeben [Baumgartner 2010]. Diese Anlagen werden von der Firma selbst auf Anfrage gefertigt und sind ab €100.000, abhängig von örtlichen Gegebenheiten, erhältlich. Bei Bedarf kann der Edelstahl beim Wärmetauscher gegen ein chlorbeständiges Material getauscht werden [Stahel 2010].

Renergi-Anlage. Bei der Anlage ab 1,5MW handelt es sich um die Kondensationsanlage „Renergi“ der Firma Svensk Rökgasenergi aus Schweden, die von dieser Firma in Österreich und der Schweiz angeboten werden. Die komplette Anlage besteht aus einem Gaskondensator, einem Elektrofilter, einem optionalen Befeuchter für die Verbrennungsluft, einem Wasserbehandlungssystem, einem Trockner und einer Bypassklappe, um den Rückstau der Abgase zu verhindern. Auch bei dieser Anlage wird die Wärme mit Hilfe einer Quenche über das Kondensat zurück gewonnen. Dabei wird das Abgas von ca. 190°C auf 35°C abgekühlt, bevor es über den Schornstein abgeführt wird [Baumgartner 2010a]. Die Investitionskosten für solch eine Anlage zur Kondensation und Abgasreinigung für einen 5MW Biomassekessel betragen CHF 735.000 [Baumgartner 2008], das sind ca. € 518.226 bei einem Kurs von 1,4183 [NB 2010].

Kohlbach RGK. Die Firma Kohlbach bietet für Ihre Biomassefeuerungen zwischen 500kW und 15MW auch ein Rauchgasreinigungs- bzw. Kondensationssystem an. Diese Anlage dient zur Nutzung der Restwärme aus dem Rauchgas, zur Abscheidung des Reststaubgehaltes und zur Entschwadung der Rauchgase durch Beimischung vorgewärmter Luft. Da sie jeweils an die Kundenwünsche angepasst wird und eine eigenständige Einheit bildet, kann diese Anlage auch zur Nachrüstung bestehender Feuerungen verwendet werden. Die wesentlichen Komponenten

sind: Eintrittskonus mit Quenche, Kondensator (aus Edelstahl 1.4571), Entschwadungsluftvorwärmer, Kondensatbecken, Frischluftjalousie, Mischkanal Reingas/Entschwadungsluft, Neutralisationsanlage, sowie die automatische Abreinigungsanlage für die Wärmetauscher. Die Anschaffungskosten liegen laut Herstellerangaben zwischen 10 und 20% der Gesamtanlagenkosten [Graessl 2010].

ERCS-Anlage. Die Firma Scheuch vertreibt die eigens patentierte ERCS-Anlage (Energy Recovery & Cleaning Systems, EP 1230949), die auch zur Nachrüstung einer bestehenden Anlage verwendet werden kann. Bei diesem System handelt es sich um eine Rauchgaskondensationsanlage mit vorgeschalteter Trockenentstaubung. Dabei kann Wasser (Heizungsrücklauf) oder Luft (Verbrennungsluftvorwärmung) erwärmt und bei Bedarf auch eine Entschwadung nachgeschaltet werden. Je nach gewünschter Vorlauftemperatur (bis 100°C) wird beim Einbau zwischen drei Wärmetauschern unterschieden [Scheuch 2010]. Diese Wärmetauscher werden aus korrosionsbeständigem Edelstahl bzw. im Falle einer Entschwadung aus Glas hergestellt [Pretzl 2010]. Falls notwendig kann die Abgaswärme bei zwei verschiedenen Temperaturniveaus ausgekoppelt werden [Scheuch 2010]. Diese Kondensationsanlage ist für Feuerungsleistungen von 800kW bis 50MW einsetzbar. Die kleineren Anlagen sind, abhängig von den Betriebsbedingungen ab €70.000 bis €100.000 erhältlich [Pretzl 2010].

Voll-Brennwert-Kombisystem. Das „Voll-Brennwert-Kombisystem für Biomasse“ der Firma SWET (Sailer Walter Energie Technik) GmbH ist ebenfalls eine Kondensationsanlage für Biomasse-Heiz(kraft)werke (vorwiegend Hackgut). Die Abgaskondensation geschieht in zwei Stufen. Zuerst wird das Rauchgas mit dem Heizungsrücklauf so weit wie möglich abgekühlt. Anschließend wird das Abgas zum Kondensieren gebracht, indem Luft zum Trocknen des Brennstoffes vorgewärmt wird. Diese Luftvorwärmung geschieht durch Glasrohrwärmetauscher und ermöglicht eine Abkühlung der Rauchgase auf bis zu 25°C. Der Trockner (KD-Trockner Kontinuierlicher Silo Durchlaufrockner) dieses Systems stammt von der Firma PMS-Elektro- und Automatisierungstechnik GmbH (St. Stefan/Lavanttal) und kostet je nach Anlagengröße mit Wärmerückgewinnung €340.000 bis €430.000 [SWET 2010].

VAS-Kondensationsanlage. Die Kondensationsanlage der Firma Verfahrenstechnik und Anlagensysteme GmbH (VAS) funktioniert auf 3 Stufen: Economizer bzw. Kondensator, Luftvorwärmung und Reingastrocknung, sowie einer Prozesswasserbehandlung. Sie kann auch bei bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. In der ersten Stufe wird dem Rauchgas die Wärme zur Rücklaufvorwärmung entzogen. Im zweiten Schritt wird das Rauchgas mit der Außenluft über einen Rohrwärmetauscher weiter abgekühlt und somit das Wasser, das durch die Quenche eingebracht wurde, wieder zurück gewonnen. Die dadurch erwärmte Außenluft kann zur Reingastrocknung (Entschwadung) oder als vorgewärmte Verbrennungsluft eingesetzt werden. In der letzten Stufe, der Prozesswasserbehandlung, wird das gesammelte Kondensat von den Feststoffpartikeln (Staub, Flugasche) befreit und in die Neutralisationsanlage (nicht inkludiert) weitergeleitet. Die Feststoffpartikel werden eingedickt, der Schlamm kann zur weiteren Trocknung abgezogen werden [VAS 2010].

2.2 Brennwertkessel bzw. Anwendungen der Brennwerttechnik

Derzeit sind hauptsächlich Gas- und Ölbrennwertkessel am Markt vertreten und fast keine Biomassebrennwertkessel. In diesem Abschnitt werden zuerst die Nutzungsgrade und Abgastemperaturen der verfügbaren Öl- und Gasbrennwertkessel erläutert. Anschließend wird ein Produkt zur Brennwertnutzung von Biomasse vorgestellt.

2.2.1 Brennwerttechnik bei Gas- und Ölfeuerungen

Gas- und Ölbrennwertkessel sind derzeit Stand der Technik und werden vermehrt eingesetzt. Durch den höheren Wasserstoffgehalt von Gas gegenüber Öl ist der theoretisch erzielbare Energiegewinn bei der Gasbrennwertnutzung höher, er liegt bei ca. 11%, bei Öl beträgt er rund 6% [Schramek 2007].

In Tabelle 2-2 sind Jahres- und Normnutzungsgrade von Brennwertkesseln für fossile Brennstoffe aus verschiedenen Quellen dargestellt, in Klammer ist der Nutzungsgrad ohne Brennwerttechnologie angegeben.

Auflistung der Nutzungsgrade von Öl- und Gas-Brennwertkessel

| Kesselart | Gasbrennwertkessel | Ölbrennwertkessel |
|--|---|-------------------------|
| Nutzungsgrad | | |
| Jahresnutzungsgradsteigerung durch Brennwerttechnik im Vergleich zu Niedertemperaturheizungen | +10-14% | +5-7% |
| Norm-Nutzungsgrad | 1,02-1,05 (0,91-0,94) 1,06 bei 75/60°C Auslegungstemperaturen 1,09 bei 40/30°C Auslegungstemperaturen | 0,96-1,046 0,93-0,96 |
| Jahresnutzungsgradsteigerung durch Brennwerttechnik im Vergleich zu Niedertemperaturheizungen | +10-14% | +5-7% |

Tabelle 2-2 Übersicht Nutzungsgrade von Brennwertkesseln nach [Schramek 2007] und [Baehr 2009].

Einige bekannte Hersteller von Gas- und Ölbrennwertkessel sind: Buderus Heiztechnik Austria GmbH, Elco Austria GmbH, Enertech GmbH – Giersch Brenner und Heizsysteme, Junkers Österreich, Oertli Rohleder Wärmetechnik GmbH, Vaillant Austria GmbH, und Viessmann GmbH. Durch den Vergleich ihrer Angaben in Prospekten können die in Tabelle 2-2 angegebenen Richtwerte für Nutzungsgrade bestätigt werden.

Bei den Ölbrennwertkesseln liegt der Normnutzungsgrad zwischen 96% und 104,6%, abhängig von den Systemparametern. Die minimale Abgastemperatur ist, wie bereits erwähnt, abhängig von der Rücklauftemperatur, bei den verglichenen Kesseln sinkt sie auf bis zu 30°C. Die Hersteller der Gasbrennwertkessel versprechen Normnutzungsgrade von 104% bis 110%, wie auch in [Schramek 2007] und [Baehr 2009] angegeben.

Im Bezug auf die eingebauten Wärmetauscher gaben im Zuge dieser Recherche nur Buderus und Viessmann nähere Angaben. Die Gasbrennwertkessel der Firma Buderus haben Rippenrohr-Wärmetauscher aus korrosionsbeständigem plasmapolymersiertem Aluminium. Die Firma Viessmann nutzt Wärmetauscher aus Edelstahl um das Abgas der Öl- und Gasbrennwertkessel abzukühlen.

2.2.2 Brennwerttechnik bei Biomassefeuerungen

Biomassebrennwertkessel sind derzeit am Markt kaum verfügbar, es wurden nur zwei Hersteller gefunden, Firma ÖkoFEN und Firma Fröling, die Pellets-Brennwertkessel anbieten.

Firma Ökofen. Der „PellematicPlus“-Pellet-Brennwertkessel der Firma ÖkoFEN ist für einen Leistungsbereich von 12kW bis 32kW erhältlich. Im Gegensatz zu den anderen Pelletskesseln ist dieser mit einem zusätzlichen Edelstahl-Wärmetauscher ausgestattet, der das Rauchgas aus der Verbrennung abkühlt und den Heizungsrücklauf vorwärmt. Bei einer maximalen Rücklauftemperatur von 35°C wird das Abgas von ca. 150°C auf 30-40°C abgekühlt. Dabei wird im Vergleich zu den „normalen“ Pelletsfeuerungen ein zusätzlicher Energiegewinn von 12% und ein Wirkungsgrad von bis zu 103% versprochen [Ortner 2006], wobei die Randbedingungen (max. 35°C Rücklauftemperatur – Niedertemperaturheizung; Betrieb mit Pufferspeicher) eingehalten werden müssen. Durch die Abgaskühlung bzw. Kondensation fallen dabei ca. 0,3l Kondensat pro kg Pellets an. Das Kondensat kann ohne Aufbereitung direkt in den Kanal eingeleitet werden [Datzreiter 2010].

Um Ablagerungen durch die Kondensation zu verhindern bzw. die Auswirkungen auf den Wärmeübergang zu verringern, ist bei diesem Brennwertkessel eine Reinigungseinrichtung am Wärmetauscher vorgesehen. Eine Wassersprühdüse spült automatisch, abhängig vom Brennraumunterdruck, den Wärmetauscher ab [Ortner 2006]. Die Listenpreise (excl. Just) liegen zwischen € 9.420,- (15kW-Kessel) und € 10.848,- (32kW-Kessel) (jeweils Schneckenkessel). Im Vergleich zu einem Pelletskessel ohne Brennwertnutzung liegen die Mehrkosten bei ungefähr €2.000 (ca. 20%) [Datzreiter 2010].

Ein weiteres Produkt ist der „Pellematic SMART“, ein Schichtspeicher, der mit einem Pellets-Brennwertmodul beheizt wird und auch mit einer Solaranlage kombinierbar ist. Diese Kombination ist seit Anfang des Jahres erhältlich und mit einem Leistungsbereich von 4-8kW besonders für Neubauten (Niedrigenergie- und Passivhaus) geeignet [Datzreiter 2010].

Firma Fröling. Im Leistungsbereich zwischen 8 und 25kW ist der Pelletskessel „P4“ der Firma Fröling auch mit integrierter Brennwertnutzung verfügbar. Bei Rücklauftemperaturen zwischen 30 bis 35 °C kann das Abgas auf 40-70°C abgekühlt werden. Vom Hersteller werden Kesselwirkungsgrade von über 104%, bei vorgegebener Rücklauftemperatur, versprochen. Durch die Brennwertnutzung fallen 1-1,5l (8kW- und 15kW-Kessel) bzw. 2-2,5l (20kW- und 25kW-Kessel) Kondensat pro Nennlaststunde an, die ohne weitere Behandlung in den Kanal eingeleitet werden können [Fröling 2010].

Wie auch bei der Firma Ökofen ist am Wärmetauscher eine Wassersprühdüse angebracht um ihn abhängig vom Unterdruck in der Brennkammer zu reinigen. Für die Leistungsbereiche 15kW und 25kW des P4-Pelletsessel kann der Brennwertwärmetauscher auch nachgerüstet werden. Die Mehrkosten gegenüber Pelletsessel ohne Brennwertnutzung sind im Wesentlichen die Kosten für den Kondensationswärmetauscher (Listenpreis ca. € 1.300 exkl. USt) [Lugmayr 2010].

Bei beiden Pellets-Brennwertkesseln muss das Material im Kamin feuchteunempfindlich, kondensatdicht, rußbrandsicher und für feste Brennstoffe geeignet sein. Auch der Kondensatablauf muss rußbrandsicher ausgeführt werden (z.B. Edelstahl).

2.3 Wärmepumpen

Da die Wärmepumpe ein zentrales Element in der aktiven Abgaskondensation darstellt, wurde auch in diesem Bereich über den derzeitigen Stand der Technik recherchiert. Bevor Produkte und Anwendungen von Absorptionswärmepumpen beschrieben werden, sind wichtige Kennzahlen von Kompressionswärmepumpen, anhand von Daten verschiedener Hersteller, dargestellt.

2.3.1 Kennzahlen von Kompressionswärmepumpen

Mit Hilfe von Angaben folgender Hersteller konnten Rückschlüsse auf den derzeitigen Stand der Technik gezogen werden: Alpha-InnoTec GmbH (www.alphainnotec.at), Buderus Heiztechnik Austria GmbH (www.buderus.at), Danfoss Österreich GmbH (www.danfoss.com), IDM-Energiesysteme (www.idm-energie.at), Junkers Österreich (www.junkers.at), Ochsner Wärmepumpen GmbH (www.ochsner.at), Ökotherm GmbH (www.oekootherm.at), Stiebel Eltron GmbH (www.stiebel-eltron.at), Vaillant Austria GmbH (www.Vaillant.at), Viessmann GmbH (www.viessmann.at), Waterkotte GmbH (www.waterkotte.at).

Es wurden Leistungsgrößen, Arbeitstemperaturen, verwendete Kältemittel, Leistungszahlen und Preise von Kompressionswärmepumpen behandelt. In den folgenden Absätzen werden die Ergebnisse daraus dargestellt.

Die Kennzahlen (Heizleistung, COP etc.) der Wärmepumpen sind von den Randbedingungen (Temperaturen) abhängig. Daher gibt es Normarbeitspunkte für die Leistungsprüfung, um verschiedenen Modelle vergleichen zu können. Diese Normpunkte sind, abhängig von der Art der Wärmequelle, folgende [WPZ 2010]:

- Luft-Wasser-WP: (A2/W35) - 2°C Lufttemperatur, 35°C Vorlauftemperatur
- Sole-Wasser-WP: (B0/W35) – 0°C Bodentemperatur, 35° C Vorlauftemperatur
- Wasser-Wasser-WP: (W10/W35) – 10°C Grundwassertemperatur, 35°C Vorlauftemperatur

Auch die senkenseitige Temperaturspreizung ΔT_s hat einen Einfluss auf die Leistungszahl, daher ist sie in der Norm EN14511 mit 5K seit 2004 festgelegt. Vor 2004 war diese Temperaturspreizung in der Norm EN255 mit 10K bestimmt. Durch diese Minderung der Temperaturspreizung wurde die energetische Effizienz der Wärmepumpen beeinträchtigt –

Verschlechterung der Leistungszahl um 5-10% [WPZ 2009]. Einige Hersteller geben auch jetzt noch die Kennzahlen ihrer Wärmepumpen nach EN255 an. Um das Ergebnis nicht zu verfälschen wurde bei den anschließenden Gegenüberstellungen immer zwischen den beiden Normen unterschieden.

Leistungszahl (COP Coefficient of Performance). Die beste Leistungszahl der betrachteten Wärmepumpen liegt bei 5,7 (lt. EN14511) und 6,2 (lt. EN255), beide Werte wurden nur von Wasser-Wasser-Wärmepumpen erreicht. Auch die mittlere Leistungszahl ist bei Wasser-Wasser-Wärmepumpen am höchsten (vgl. Tabelle 2-3) Luft-Wasser-Wärmepumpen erreichen nur COPs zwischen 2,85 und 4,05 (EN14511) bzw. 3 und 4,3 (EN255). Auch die durchschnittlichen COPs von Luft-Wasser-Wärmepumpen sind mit 3,37 (EN14511) und 3,6 (EN255) am geringsten. Die unterschiedlichen Leistungszahlen der verschiedenen Wärmepumpentypen sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Temperaturspreizung bei der Normprüfung unterschiedlich ist.

Mittlere Leistungszahlen und spezifische Listenpreise nach Art der Wärmepumpe

| Wärmepumpentyp | mittlere COP lt. EN14511 | mittlere COP lt. EN255 | mittlerer spezif. Preis [€/kW] |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Sole-Wasser | 4,22 | 4,67 | 594,91 |
| Wasser-Wasser | 4,85 | 5,46 | 480,61 |
| Luft-Wasser | 3,37 | 3,60 | 857,05 |
| Direktverdampfung | 4,89 | 5,34 | 473,71 |

Tabelle 2-3 Übersicht mittlere COP und Listenpreis (nur Wärmepumpe) der Kompressionswärmepumpen **Kosten.** Wie aus obiger Tabelle 2-3 zu sehen, kostet eine Luft-Wasser-Wärmepumpe pro kW Heizleistung mit durchschnittlich 857€/kW das Doppelte einer Direktverdampfungswärmepumpe. Die zweitbilligste Art von Wärmepumpen ist die Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit 480€/kW.

Darstellung spezifischer Listenpreis (exkl. MwSt.) über Heizleistung

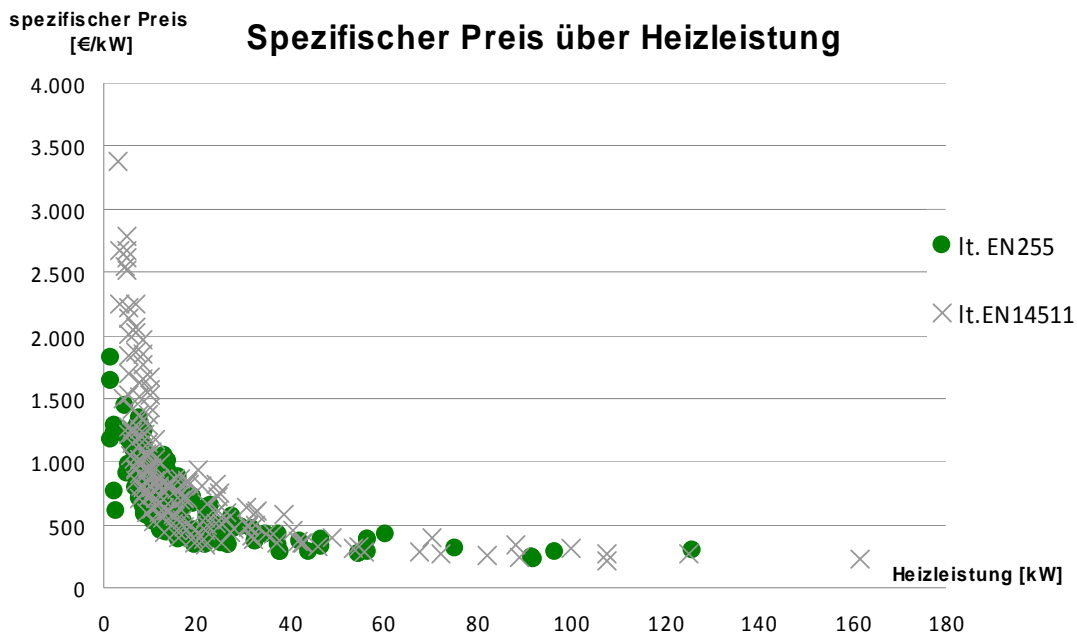


Abbildung 2-1 Spezifischer Preis (nur Wärmepumpe) über Heizleistung

Im Diagramm (Abbildung 2-1) wird der Zusammenhang zwischen Leistungsgröße [kW] der Wärmepumpe und spezifischen Preis [€/kW] dargestellt. Es zeigt sich ganz klar, dass mit der Größe der Wärmepumpe der spezifische Preis pro Leistung sinkt. Aufgrund der niedrigeren Heizleistungen bei $\Delta T_s=5K$ sind auch die spezifischen Preise höher als bei denen nach der Norm EN255.

Kältemittel. Im folgenden Kreisdiagramm sind die Kältemittel nach Häufigkeit ihrer Verwendung dargestellt. Das am häufigsten verwendete ist R407C mit 75% Anteil. R134a liegt mit 11% an zweiter Stelle, R404A knapp dahinter mit 10% und R410 und R290 liegen mit 2% an letzter Stelle. Die Daten beziehen sich auf Angaben und Prospekte, der bereits genannten Hersteller (Abbildung 2-2).

Übersicht Anteile verwendeter Kältemittel

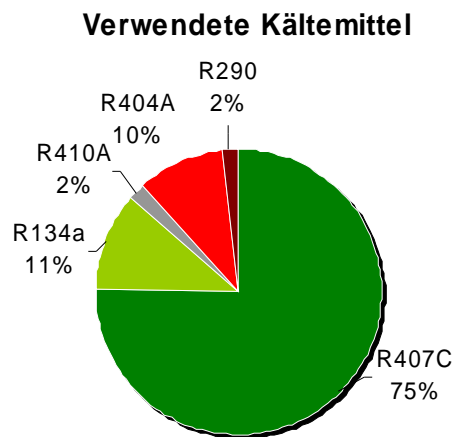


Abbildung 2-2 Einsatz verschiedener Kältemittel

Eigenschaften dieser Kältemittel sind in Tabelle 2-4 nach [Bitzer 2008] dargestellt. Alle eingesetzten Kältemittel der betrachteten Wärmepumpen sind chlorfrei, erfüllen also die ökologische Anforderung eines geringen Ozonabbaupotenzials.

Abhängig von der Quelle und dem Kältemittel werden von den Herstellern verschiedene Grenzwerte für Quelltemperaturen und Vorlauftemperaturen angegeben. Eine Übersicht ist in Tabelle 2-5 zu sehen. Bei den Wärmepumpen mit R290 wurden leider keine Informationen über die entsprechenden Temperaturen gefunden.

2.3.2 Wärmetauscher für Kondensation und Verdampfung

Nicht alle Hersteller geben Auskunft über die verwendeten Wärmetauscher in ihren Prospekten und Datenblättern. Die am häufigsten verwendeten Wärmetauscher zur Kondensation des Kältemittels sind Edelstahl-Plattenwärmetauscher, teilweise mit der Zusatzangabe „kupferverlötet“ (Fa. Danfoss, Fa. IDM-Energiesysteme) und Edelstahl 1.44401 (Fa. Ochsner). Bei kleinen Wärmepumpen der Fa. Ochsner werden auch Cu-Rippenrohrwärmetauscher als Kondensatoren verwendet.

Für die Luft-Wasser-Wärmepumpen der Firmen Ochsner und IDM-Energiesysteme werden als Verdampfer Al/Cu-Lamellenrohrwärmetauscher eingesetzt. Bei den Direktverdampfungswärmepumpen werden Cu-PE-Rohre als Verdampfer im Boden verlegt. Edelstahl-Plattenwärmetauscher sind bei den Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen zum Verdampfen des Kältemittels im Einsatz.

Eigenschaften verwendeter Kältemittel

| Kältemittel | Gruppe | Zusammensetzung | Siedetemperatur bei 1 bar (abs.) [°C] | Verflüssigungs-Temperatur bei 26 bar (abs.) [°C] | Kritische Temperatur [°C] | Krit. Druck [bar] |
|--------------|----------------------------|---|---------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|
| R407C | HFKW – chlorfreie Gemische | R32/125/134a (CHF ₃ /CF ₃ CHF ₂ /CF ₃ CH ₂ F) | -44 | 58 | 86,2 | 46,2 |
| R134a | HFKW – chlorfrei | CF ₃ CH ₂ F | -26 | 80 | 101,03 | 40,56 |
| R410A | HFKW – chlorfreie Gemische | R32/125 (CHF ₃ /CF ₃ CHF ₂) | -51 | 43 | 71,77 | 48,93 |
| R404A | HFKW – chlorfreie Gemische | R143a/125/134a (CF ₃ CH ₃ /CF ₃ CHF ₂ /CF ₃ CH ₂ F) | -47 | 55 | 73 | k. A. |
| R290 | halogenfrei | C ₃ H ₈ (Propan) | -42 | 70 | 96,65 | 42,4 |

Tabelle 2-4 Übersicht Eigenschaften Kältemittel [Bitzer 2008, VDI 2002]

Temperaturbereiche der Quelle und des Vorlaufs nach Kältemittel und Wärmepumpenart

| | R407C | R134a | R410A | R404A | R290 |
|--|--------------------|-------------------|------------------|---------|-------|
| min. Vorlauftemperatur [°C] | 23 | 25 | k. A. | 30 | k. A. |
| max. Vorlauftemperatur [°C] (bei Hochtemperaturwärmepumpen) | 55 (65) | 65 | 60 | 55 (75) | k. A. |
| Quelltemperatur min./max. [°C] | | | | | |
| Sole/Wasser | -5/30 bzw. -7/30 | -5/25 bzw. -10/20 | -5/15 bzw. -5/25 | ---- | ---- |
| Wasser/Wasser | +4/25 | +7/22 | ---- | ---- | ---- |
| Luft/Wasser | -20/35 bzw. -17/35 | -5/35 | ---- | -20/35 | ---- |
| Direktverdampfung | -7/20 bzw. -5/15 | ---- | ---- | ---- | k. A. |
| Sole/Luft | -15/35 | ---- | ---- | ---- | ---- |

Tabelle 2-5 Übersicht Temperaturbereiche Kompressionswärmepumpen

2.3.3 Anwendungen Adsorptionswärmepumpe

zeoTHERM. Die Firma Vaillant bietet seit April 2010 in Deutschland die Zeolith-Gas-Wärmepumpe „zeoTHERM“ an, die wahrscheinlich ab Oktober 2010 auch in Österreich erhältlich sein wird. Sie besteht aus einem Gas-Brennwertgerät in Kombination mit einem Vakuum-Zeolith-Modul. Durch den Gasbrenner wird das Wasser aus dem Zeolith-Wärmetauscher verdampft. Dieses kondensiert darauf hin wieder am zweiten Wärmetauscher. Das Vakuum ermöglicht es das Kondensat, mit Hilfe von Niedertemperaturwärme von einem Solarkollektor bzw. Pufferspeicher, neuerlich zu verdampfen. Der Wasserdampf kann nun wieder vom Zeolith aufgenommen werden. Der Leistungsbereich moduliert von 1,5kW

(Sorptionstechnik) bis 10kW und liegt somit im optimalen Leistungsbereich für ein Einfamilienhaus. Diese Wärmepumpe ist nur in Kombination mit einem Pufferspeicher (400l) und 3 Solarkollektoren erhältlich. Der Preis liegt zwischen €17.000 und €18.000, abhängig von der Aufstellungsart der Kollektoren [Vaillant 2010, Berger 2010].

Heizkessel-Wärmepumpe mit Eisspeicher. Die Kombination mit einem Eisspeicher anstatt des Pufferspeichers und Solarkollektor wird von der Firma Zeolith-Technologie GmbH (Unterschleissheim, GER) unter dem Namen „Heizkessel-Wärmepumpe mit Eisspeicher“ vorgeschlagen. Hier dient der Eisspeicher als Verdampfer in der Adsorptionsphase. Ein solches Produkt ist allerdings noch nicht am Markt verfügbar, da die Firma Zeolith-Technologie GmbH selbst nur im Bereich der Produktentwicklung tätig ist [Zeotech 2010]. Laut Herrn Ralf Schmidt von der Firma Zeolith-Technologie wäre es auch möglich diese Wärmepumpe mit einem Biomassebrenner zu kombinieren, jedoch wurden dazu noch keine Versuche durchgeführt [Schmidt 2010].

Anstatt der Beheizung durch Gas ist es auch möglich die Desorption mit elektrischem Strom anzutreiben. Diese Anwendung wird von Cube in [Cube 1997] detailliert beschrieben.

2.4 Aktive Abgaskondensation bei Biomassefeuerungen

Wie bereits aus den vorhergehenden Kapiteln ersichtlich, gibt es viele Vorteile sowohl der Brennwertnutzung bei Biomassefeuerungen als auch der aktiven Abgaskondensation. Daher ist auch die Kombination dieser beiden Anwendungen sehr interessant. In diesem Abschnitt werden Verfahren und Produkte aktiver Abgaskondensation im Allgemeinen und im Speziellen bei Biomassefeuerungen dargestellt.

Hochtemperatur-Brennwerttechnik. Die Firma BHF Verfahrenstechnik GmbH (GER) hat ein Verfahren zur Abgaskondensation mit einer Absorptionswärmepumpe patentiert (EP 0857 923 B1). Hier kommt das Rauchgas direkt mit dem Arbeitsstoffpaar in Berührung, wodurch der Taupunkt des Wasserdampfes um ca. 40K erhöht wird. Das im Abgas vorhandene dampfförmige Wasser kann zum größten Teil vom Stoffpaar absorbiert werden. Dadurch wird das Rauchgas entfeuchtet (auf ca. 20% relative Feuchte) und Wärme wird frei [Bergmann 2002]. In nachstehender Abbildung ist das Anlagenschema in Anlehnung an die Patentschrift [EP 0857 923 B1] dargestellt. Die verschiedenen Farben stehen für unterschiedliche Fluide bzw. Eigenschaften.

Hochtemperatur-Brennwerttechnik

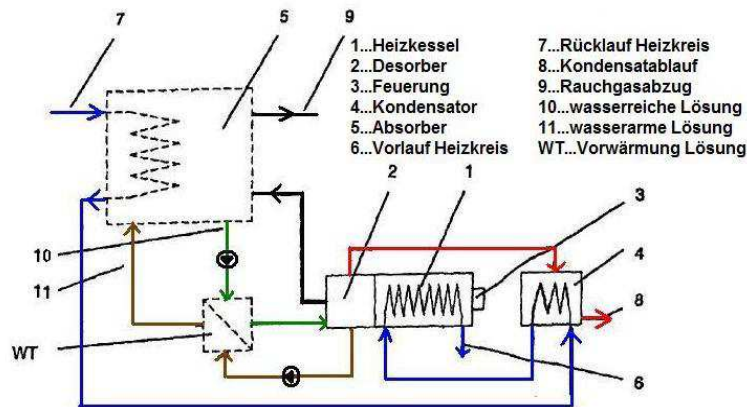


Abbildung 2-3 Schema Hochtemperatur-Brennwerttechnik [EP 0857 923 B1]

Die dafür geeigneten Anlagen werden unter dem Namen „Hochtemperatur Brennwerttechnik“ (HT-BWT) auch für Biomassefeuerungen verkauft und individuell an jede Feuerungsanlage angepaßt [Bergmann 2002]. Als Arbeitsstoffpaar wird entweder eine Lithiumbromid- oder Calciumnitrat-Lösung verwendet. Die Anlagengrößen der bisher installierten Anlagen reichen bis 5MW Heizleistung der Feuerungsanlage. Laut Aussagen von Herrn Bergmann ist eine Feuerungsleistung von mindestens 1MW notwendig, um eine attraktive Amortisation von ca. 2 Jahren zu erreichen, alles darunter erfordert eine längere Amortisationsdauer [Bergmann 2010]. Die spezifischen Investitionskosten für eine HT-BWT-Anlage liegen ca. zwischen 58 €/kW (4,35MW Kesselleistung) und 93 €/kW (970kW BHKW-Leistung). Die erzielbare Leistungssteigerung liegt bei 8% bis 11% [BHF 2010]. Für korrosionsbeständige Oberflächen in der Anlage wird GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) verwendet. Die Plattenwärmetauscher für den Kondensator und Lösungsmittelkühler werden aus säurebeständigem Stahl mit diversen Basislegierungen oder aus Titan hergestellt [Bergmann 2010].

Götaverken Miljö AB (GMAB). Die Firma Götaverken Miljö aus Schweden baut Großwärmepumpen, Rauchgasreinigungs- und Rauchgaskondensationsanlagen für Heizkraftwerke. Bei der Rauchgaskondensation werden auch Wärmepumpen zur aktiven Abgaskondensation eingesetzt. Da die Systeme nur für bestimmte Anlagen und nach Kundenwunsch gefertigt werden, gibt es kein allgemein gültiges Anlagenschema [Hägg 2010]. Das Verfahren wird daher anhand zwei Referenzanlagen erklärt.

Biomasse- und Müllverbrennungsanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung der Umeå Energi AB im nördlichen Schweden: thermische Leistung: 55MW, Rauchgaskondensator: 11MW, Wärmepumpen: 2x 5,7MW [Götaverken 2010]; Die beiden Kompressionswärmepumpen nutzen die Kondensationswärme des Kondensators, um Wärme für das Fernwärmenetz bereit zu stellen [Hägg 2010]. Als Kältemittel wird R134a eingesetzt; das dazugehörige Schema der Anlage ist in Abbildung 2-4 dargestellt [Götaverken 2010].

GMAB Anlage Umeå

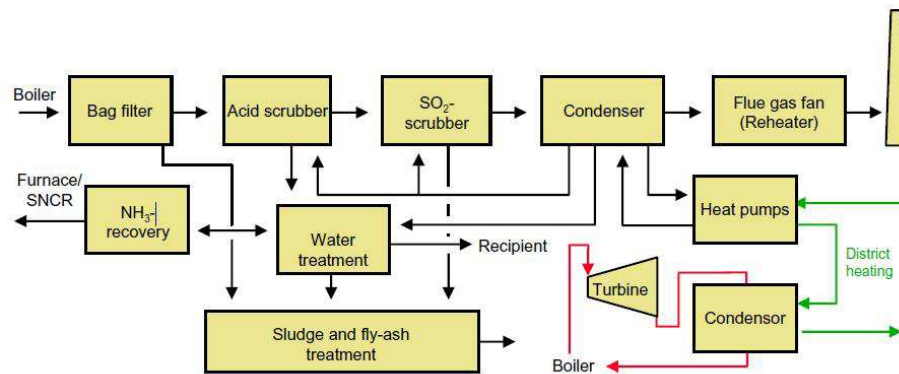


Abbildung 2-4 Schema GMAB Anlage Umeå [Götaverken 2010]

Vestforbraending Müllverbrennungsanlage mit Kraft-Wärmekopplung in Kopenhagen: thermische Leistung: 75MWth, Kondensation: 13MWth bis 17MWth; 2 Absorptionswärmepumpen. Die beiden Absorptionswärmepumpen werden mit der Kondensationswärme aus dem Rauchgasreiniger (bis 17MW) und dem Heißdampf (ca. 8 bar abs., 180°C [Hägg 2010]) aus der Turbine (25MW) betrieben, um Wärme für das Fernwärmenetz bereit zu stellen [Götaverken 2010a]. Das Arbeitsstoffpaar der beiden Wärmepumpen ist Lithium-Bromid. Die Projektkosten dieser Anlage lagen bei ca. € 5Mio [Hägg 2010].

Laut Herstellerangaben betragen die Kosten für eine Rauchgaskondensationsanlage ohne Wärmepumpe ca. € 1 Mio. bis € 3 Mio, mit einer Wärmepumpe steigen sie auf ungefähr € 3 Mio. bis € 6 Mio. bei einem Rauchgasdurchsatz von 40.000 bis 175.000 Nm³/h [Hägg 2010].

TRIG-Verfahren. Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Fraunhofer Institutes für Umwelt-, Sicherheit- und Energietechnik (UMSICHT) wurde mit einigen Partnern ein Verfahren zur gekoppelten Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung für feste Biomasse entwickelt, das sogenannte TRIG-Verfahren (TRIGeneration with Integrated Gascondensation). Hierbei handelt es sich um die Kombination eines Biomassekessels mit einer Dampfturbine zur Stromerzeugung und einer Absorptionswärmepumpe, die auch zur Kälteerzeugung eingesetzt werden kann bzw. soll [Heinz 2004]. Die Wärme für den Überhitzer der Turbine und den Generator der Adsorptionswärmepumpe wird dem Abgas einer Biomassefeuerung entzogen. Der Kreislauf erfolgt folgendermaßen: Das im Generator vom Arbeitsstoffpaar getrennte Wasser wird im Überhitzer für die Turbine noch weiter erwärmt. Nach der Turbine kommt der Wasserdampf in den Absorber, wo er vom Arbeitsstoffpaar aufgenommen wird, dabei wird Wärme frei. Anschließend kommt das Gemisch zum Trennen in den Generator. Das Arbeitsstoffpaar kommt vom Generator in den Resorber. Hier wird das Arbeitsstoffpaar von einem zweiten kältemittelreicheren Zweistoffgemisch aufgenommen, wobei wieder Niedertemperaturwärme frei wird. Im Kondensator wird das Gemisch mit Hilfe der Abgasrestwärme aus dem Rauchgasreiniger verflüssigt, um wieder in den Absorber geleitet zu werden. Im Sommer kann durch die Absorptionswärmepumpe auch Kälte zur Verfügung gestellt

werden. In Abbildung 2-5 ist das Schema zu diesem Verfahren dargestellt [Heinz 2004, TRIG 2010]. Dieses Verfahren wurde einer theoretischen Verfahrensanalyse unterzogen und potenzielle Einsatzgebiete dafür ermittelt.

Das Institut für Zukunfts-Energie-Systeme (IZES) in Saarbrücken (GER) wollte dieses Verfahren testen und zur Marktreife bringen. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde bis heute noch keine Versuchsanlage gebaut. Laut Herrn Groß hat dieses System dennoch Realisierungspotential [Groß 2010].

Schema des TRIG-Verfahrens

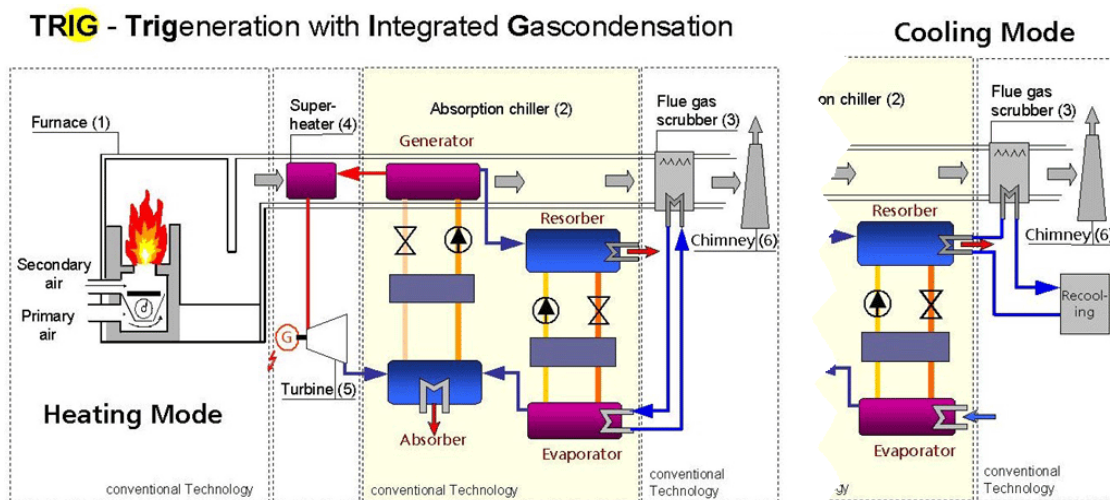


Abbildung 2-5 Schema TRIG-Verfahren beim Heizen und Kühlen [TRIG 2010]

Die Firma Bomat (siehe Kapitel 2.1.1) arbeitet derzeit auch an einem Versuch zur Kombination ihrer Sekundärwärmetauscher mit einer Wärmepumpe. Da sie sich bisher noch in der Entwicklungsphase befinden, wurden noch keine Versuchsreihen durchgeführt. Herr Humme ist aber gerne bereit, sobald Versuche verwirklicht wurden, Informationen darüber bekannt zu geben [Humme 2010].

2.5 Patente

Derzeitige Patente über aktive Abgaskondensation und Biomassebrennwertkessel wurden mit Hilfe des Internetdienstes des europäischen Patentamtes (esp@cenet) recherchiert. In dieser Datenbank sind europäische und weltweite Patentschriften erfasst [EP 2010]. Die Ergebnisse dieser Recherche sind mit Patentnummer, Titel, Inhaber und Gültigkeitsdatum in folgenden Tabellen gesammelt. Die Kurzbeschreibungen geben stichwortartig die grundlegenden Merkmale der Patentschrift wieder. Die Patentnummern in den Klammern stehen für Patentanmeldungen in anderen Ländern bzw. weitere Schriften (Offenlegungsschrift etc.).

Patentübersicht zum Thema „Brennwertnutzung bei Biomasse“

| Patentnummer | Titel | Patentinhaber/ Erfinder | Anmeldetag Beginn Patentdauer | Kurzbeschreibung |
|---|---|--|---|---|
| EP 1250 949 A1 (AT 410 180 B) | Verfahren zur Anlage zur Rückgewinnung der latenten und fühlbaren Wärme von Abgasen | Scheuch GmbH A-4971 Auroldmünster/ Robert Pretzl A-4680 Haag | 08.04.2002 23.10.2002 | ERCS-Anlage der Firma Scheuch – siehe Kapitel 3.1.2 |
| AT 502 821 B1 (AT 502821A4) | Verfahren und Kondensationsteil zur Kondensation von Rauchgas (für Biomasse oder Festbrennstoffkessel) | DI Johann Haselmayr A-4040 Linz | 28.04.2006 15.06.2007 (Offenlegung) | Wärmetauscher, bei dem das Rauchgas über die Oberfläche eines Flüssigkeits- bzw. Kondensationsbad geführt wird, um es abzukühlen |
| AT 411 709 B (AT 462 001) | Abgaswärmetauscher für Heizkessel zur Verbrennung von Biomassebrennstoffen | Einsiedler Solartechnik A-4631 Krenglbach/ Karl Einsiedler A-4631 Krenglbach | 12.01.2001 15.09.2003 | Verbrennungsluft wird durch die Kondensationswärme im Rauchgas vorgewärmt |
| US 6138381 (WO 9714926A1 SE 9503670 L, SE 507409C2, RU 2169889C2 PL 181647B1) | Treatment of moist fuel (Abgaskondensation zur Trocknung der Biomasse) | Vattenfall AB Stockholm, Sweden/ Tomas Abyhammar, Vällingby, Sweden | 21.10.1996 31.10.2000 | Trocknung des Brennstoffes (Biomasse) einer KWK-Anlage durch die Kondensationswärme aus dem Abgas sowie der Restwärme des Dampfes aus der Turbine |

Tabelle 2-6 Patente zur Brennwertnutzung bei Biomasse

Patentübersicht zum Thema „aktive Abgaskondensation“

| Patentnummer | Titel | Patentinhaber Erfinder | Anmeldetag Beginn Patentdauer | Kurzbeschreibung |
|--|---|---|---|---|
| EP 0857 923 B1 (EP0857923 A2, EP0857923 A3, DE19704888A1, AT230473 T) | Verfahren zum Betrieb eines Heizkessels mit Brennwertnutzung und Heizkessel Realisierung des Verfahrens | BHF Verfahrenstechnik GmbH D-04420 Kulkwitz/ Dietrich Hebecker, D-04105 Leipzig | 09.02.1998 02.01.2003 | Hochtemperatur-Brennwerttechnik der Firma BHF Verfahrenstechnik - siehe Kapitel 3.4 |
| AT 411 099 B | Heizanlage mit einer Adsorptionswärmepumpe | Vaillant GmbH A-1231 Wien | 16.08.2001 15.02.2003 | zeoTHERM – Zeolith-Gas-Wärmepumpe der Firma Vaillant – siehe Kapitel 3.3.3 |
| DE19757 819A1 | Vorrichtung um Umlenken des Abgasmassenstromes in zwei oder mehrere Heizzonen, Vorrichtung zur besseren Ausnutzung der Kondensationswärme und Vorrichtung zur zusätzlichen Energiegewinnung mittels Wärmepumpe sowie Vorrichtung zur besseren Funktionalität und Kosteneinsparung in einem Heizkessel | Norbert Scherer D-66773 Schwalbach | 24.12.1997 01.07.1999 (Offenlegung) | Wärmepumpe zur Unterstützung des Gasbrenners; Abwärme aus Kompressor, Elektromotor bzw. Umgebungsluft und gereinigte Abgase werden von der Wärmepumpe genützt |
| US 4 660 76 A (CA1262411 A1) | Flue gas heat pump | Rudy V. Bussjager N. Y. | 07.04.1986 28.04.1987 | Wärmepumpe nützt Rauchgaswärme einer Gasfeuerung zur Vorerwärmung der Verbrennungsluft; Kondensation der Abgase nicht zwingend |

Tabelle 2-7 Patente zu aktiver Abgaskondensation

2.6 Zusammenfassung der Technologierecherche

Die Recherche ergab, dass es bereits viele Systeme (Sekundärwärmetauscher, Kondensationsanlagen) zur Abgaskühlung und -kondensation gibt, die auch für Biomassefeuerungen eingesetzt werden können. Im Bereich der aktiven Abgaskondensation wurden nur wenige Produkte gefunden. In den nächsten Zeilen werden die Ergebnisse nach den Kapiteln geordnet, kurz zusammengefasst und diskutiert.

Sekundärwärmetauscher. Mit Hilfe eines Sekundärwärmetauschers kann eine Heizungsanlage ohne Brennwertnutzung zu einer mit Brennwertnutzung umgerüstet werden. Das Angebot reicht von Wärmetauscher für Anlagen von 15kW Heizleistung bis 2MW. Die Kosten sind abhängig vom Werkstoff des Wärmetauschers und liegen zwischen 50 und 180€/kW Heizleistung. Mit der Größe des Wärmetauschers nehmen die Kosten ab. Als Werkstoffe kommen bei den betrachteten Wärmetauschern korrosionsbeständige Materialien wie Keramik, Edelstahl oder Carbon zum Einsatz. Die Abgasaustrittstemperaturen sind sehr unterschiedlich und hängen in erster Linie von der Rücklauftemperatur des Heizmediums ab.

Kondensationsanlagen. Im Bereich größerer Feuerungen (100kW-50MW) gibt es sogenannte Kondensationsanlagen, die meist auch eine Rauchgasreinigung implizieren. Bei den meisten Anlagen erfolgt die Wärmerückgewinnung durch eine Quench-Stufe, womit auch eine nasse Staubabscheidung herbeigeführt wird. Die ERCS-Anlage der Firma Scheuch sieht zusätzlich vor der Abgaskondensation eine Trockenentstaubung vor, damit das Kondensat möglichst frei von Feststoffen ist. Der Preis dieser Anlagen liegt zwischen 60 und 125€/kW Heizleistung.

Bei dem „Voll-Brennwert-Kombisystem für Biomasse“ (Fa. SWET) erfolgt keine Staubabscheidung. Es ist auch das einzige Verfahren, bei dem die Kondensationswärme für die Brennstofftrocknung verwendet wird.

Brennwerttechnik. „Typische“ Brennwertkessel, wie sie in Einfamilienhäusern verwendet werden, gibt es hauptsächlich für die Brennstoffe Öl und Gas. Nur zwei Hersteller von Biomassefeuerungen bieten Brennwertkessel, genauer gesagt Pellets-Brennwertkessel an. Der „Pellematic-Plus“ der Firma Ökofen ist am längsten am Markt erhältlich. Seit einiger Zeit bietet auch die Firma Fröling einen Pelletskessel („P4-Pellet“) mit einem Zusatzwärmetauscher zur Brennwertnutzung an. Der Kondensationswärmetauscher wird auch zum Nachrüsten von bestehenden „P4-Pellet“-Kesseln angeboten, derzeit leider nur für die Leistungsgrößen 15kW und 25kW.

Mit einer maximalen Rücklauftemperatur von 35°C geben die Firmen einen möglichen Kesselwirkungsgrad von 103% (Ökofen) bzw. über 104% (Fröling) an. Mit diesen Wirkungsgraden liegen diese Pelletskessel im Bereich der Gas- und Ölbrennwertkessel (vgl. Kapitel 2.2.1).

Wärmepumpen. Die Recherche bei den Kompressionswärmepumpen ergab, dass die besten Leistungszahlen bei Wasser-Wasser-Wärmepumpen erzielt werden (im Mittel 4,85 lt. EN14511 bzw. 5,46 lt. EN255). Die kleinsten mittleren Leistungszahlen liegen bei 3,37 bzw. 3,6 (Luft-Wasser-Wärmepumpen).

Die Kosten einer Kompressionswärmepumpe liegen im Mittel zwischen 473 €/kW (Direktverdampfung) und 857 €/kW (Luft-Wasser). Allgemein nehmen die Preise mit der Größe der Wärmepumpe ab. Das am häufigsten verwendete Kältemittel ist R407C. Es wird auch als einziges bei allen Wärmepumpentypen angewendet.

Als Kondensatoren werden meist Edelstahl-Plattenwärmetauscher eingesetzt. Die Verdampfer sind abhängig von der Art der Wärmepumpe. Bei der Direktverdampfung sind es meist Cu-PE-Rohre, bei Luft-Wasser-Wärmepumpen werden Al/Cu-Lamellenrohr-Wärmetauscher verwendet. Bei Wasser-Wasser- bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen sind auch die Verdampfer Edelstahl-Plattenwärmetauscher.

Die zeoTHERM-Wärmepumpe der Firma Vaillant ist eine der bisher wenigen Absorptionswärmepumpen am Markt. Sie wird aber nur in Kombination mit einem Pufferspeicher und drei Solarkollektoren vertrieben.

Aktive Abgaskondensation bei Biomassefeuerungen. In diesem Bereich gibt es bisher nur zwei Anbieter. Beim ersten handelt es sich um die Firma BHF-Verfahrenstechnik GmbH mit der „Hochtemperatur-Brennwerttechnik“, bei der eine Biomassefeuerung mit einem offenen Adsorptionskreisprozess kombiniert wird. Das Arbeitsstoffpaar wird direkt in den Rauchgaszug eingebracht und absorbiert den Wasserdampf im Abgas. Laut Herstellerangaben werden Leistungssteigerungen von 8 bis 11% erreicht. Die Kosten liegen zwischen 58 und 93 €/kW Heizleistung. Wirtschaftlich sinnvoll ist es laut Aussagen des Herstellers erst ab einer Feuerungsleistung von 1MW.

Der zweite Anbieter ist die schwedische Firma Götaverken Miljö AB, die bei ihren Rauchgaskondensationsanlagen auf Wunsch auch Kompressions- oder Adsorptionswärmepumpen integriert. Da diese Systeme nur auf Kundenwunsch und für jede Anlage speziell angefertigt werden, ist jedes ein Unikat. Ein generell gültiges Schema kann daher nicht beschrieben werden. Bei einer der beiden beschriebenen Referenzanlagen wird neben Müll auch Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung verbrannt.

Eine weitere Möglichkeit zur Kombination eines Adsorptionsprozesses mit einer Biomassefeuerung ist das sogenannte „TRIG-Verfahren“. Da es aber nie in einer Versuchsanlage getestet wurde, stehen auch keine genaueren Daten zur Verfügung.

Die Firma Bomat arbeitet derzeit auch an einem Konzept zur Kombination einer Wärmepumpe mit ihren Sekundärwärmetauscher „Bomat Profitherm“. Da sie sich derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden sind noch keine Ergebnisse bekannt [Humme 2010].

Patente. Durch die Patentrecherche konnten einige der bereits bekannten bzw. beschriebenen Produkte und Verfahren ihren Erfindern zugeteilt werden (ERCS-Anlage, HT-BWT, zeoTHERM-Wärmepumpe). Bei den anderen Patenten wurde versucht Produkte und Hersteller zu finden, leider ohne Erfolg.

2.7 Emissionen im Abgas und Kondensat

Neben den zuvor recherchierten technischen Komponenten ist für eine erfolgreiche aktive Kondensation auch die Betrachtung der Emissionen und des auftretenden Kondensats von entscheidender Bedeutung. Ein großer Vorteil der Kondensation ist wie schon eingangs beschrieben, die Bindung von Staub und anderen Emissionen aus dem Abgas. Eine Analyse dieser Abscheidewirkung wird im Folgenden beschrieben. Da die Emissionen direkt ins Kondensat übergehen, welches am Ende entsorgt werden muss, folgt außerdem eine Beschreibung der Entsorgungsvorschriften.

2.7.1 Emissionsminderung durch aktive Abgaskondensation

Im Vergleich zu Erdöl und Erdgas rufen einige Bestandteile der Rauchgase von fester Biomasse spezielle Herausforderungen bei der Brennwertnutzung hervor. Zum einen ist es der Staub, der mit den Rauchgasen mitgeführt wird. Mit dem Begriff „Staub“ sind alle

Feststoffanteile im Abgas gemeint, die mit einer definierten Filterhülse abgeschieden werden können. Hauptsächlich sind dies mineralische Bestandteile des Brennstoffes, also Aschepartikel. Bei unvollständiger Verbrennung können aber auch Teere und Rußbestandteile organischen Ursprungs enthalten sein [Hartmann 2007]]. Im Gegensatz zu Erdgas und Erdöl haben biogene Festbrennstoffe einen hohen Aschegehalt, der die freigesetzten Staubfrachten im Rauchgas erhöht [Kaltschmitt 2001]. Daher sind bei den Rauchgasen von Erdgas keine Staubpartikel, bzw. bei Erdöl nur Rußpartikel in der Startphase der Verbrennung enthalten [Hartmann 2007]].

Der Staub im Rauchgas kann sich an den Wärmetauscheroberflächen ablagern, auch wenn eine Abgaskondensation durchgeführt wird. Grund dafür ist, dass während der Abgaskondensation Stellen im Kondensator entstehen, die unterschiedliche Temperaturen aufweisen und daher entweder nass oder trocken sind [Kaltschmitt 2001]. Durch diese Ablagerungen verschlechtert sich der Wärmeübergang am Wärmetauscher. Außerdem kann diese Verschmutzung auch die Zwischenräume des Wärmetauschers verstopfen und so das Rauchgas hindern durchzukommen um Wärme abzugeben. In weiterer Folge kann es dazu führen, dass keine Abgaskondensation mehr auftritt. Auch bei Testläufen des TFZ konnten bereits nach kurzer Zeit Ablagerungen am Kondensations-Wärmetauscher einer Hackschnitzelfeuerung festgestellt werden [TFZ 2004]. Deshalb sollte bei den Wärmetauschern eine Reinigungsvorrichtung, wie z. B. eine Wassersprühdüse, vorgesehen werden, um den Wärmetauscher von Zeit zu Zeit zu reinigen und so Wärmeübergangseinbußen zu unterbinden (vgl.[Ortner 2006]).

Um solche Verschmutzungen von Bauteilen bzw. Ablagerungen an ihnen im Vorhinein zu verhindern, wird der Abgaskondensation oft eine Quench-Stufe vorgeschaltet. Dabei wird Wasserdampf eingedüst, um das gesamte Abgas schnell unter den Taupunkt abzukühlen und mit Wasser zu sättigen [Kaltschmitt 2001]. Dadurch sind die Betriebsbedingungen eindeutig festgelegt und alle Oberflächen feucht [Good 1998]. Das Wasser reinigt die Oberflächen, indem es die Partikel wegschwemmt. Somit sind, wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, die ausgewaschenen Partikel im Kondensat enthalten [Good 1998]. Der Nachteil dieser Quench-Stufe ist, dass bei bestimmten Witterungsbedingungen am Austritt des Kamins eine sogenannte Dampffahne entstehen kann. Diese Dampffahne ist zwar ungefährlich aber aus ästhetischen Gründen ev. nicht erwünscht. Durch Mischen des abgekühlten Abgases mit vorgewärmter Frischluft kann diese Dampffahne verhindert bzw. der Kamin entschwadet werden [Kaltschmitt 2001].

Bei Brennstoffen mit geringen Ascheerweichungstemperaturen kommt hinzu, dass die Aschepartikel im Rauchgas an den Wärmetauscheroberflächen erweichen und miteinander verschlacken können. Diese Anbackungen sind nicht mehr so einfach mit Wasser abzuspülen und müssen daher meist manuell entfernt werden [Schwabl 2008]. Die Ascheerweichungstemperaturen liegen bei den meisten Halmgutbrennstoffen mit ca. 800-900°C niedriger als bei Holz (ca. 1100-1300°C) [Kaltschmitt 2001].

Auch andere Bestandteile der festen Biomasse bzw. deren Rauchgase können Probleme bei der Verbrennung und/oder der Kondensation verursachen [Hartmann 2004]. Der im Brennstoff enthaltene Schwefel oxidiert bei der Verbrennung zu Schwefeldioxid SO_2 . In weiterer Folge kann sich das Schwefeldioxid bei der Abgaskondensation mit dem kondensierenden Wasserdampf zu Schwefelsäure (H_2SO_4) verbinden, die nicht korrosionsbeständige Werkstoffe angreift [Baehr 2009]. Auch in Verbindung mit Chlor kann Schwefel Korrosionserscheinungen hervorrufen [Eder 2007]. Um Korrosionserscheinungen zu verhindern, müssen bei der Brennwertnutzung von fester Biomasse korrosionsbeständige Werkstoffe für den Wärmetauscher, die Kondensatableitung und den Schornstein verwendet werden.

Nicht nur der hohe Wassergehalt macht eine Holz-Brennwertnutzung attraktiv, sondern auch die Tatsache, dass durch die Abgaskondensation eine Rauchgasreinigung erfolgt (z.B. Abscheiden von Staubpartikeln) und eine zusätzliche Anlage zur Abgasreinigung überflüssig werden kann [Kaltschmitt 2001]. Der Grund dafür ist, dass sich um die Partikel im Abgas feine Tröpfchen bilden und daher als Kondensationskeime wirken. Diese kleinen Tröpfchen schließen sich zu größeren zusammen und entziehen dem Abgas die Staubpartikel [Good 1998]. Dadurch befinden sich die Feststoffe mit ev. erhöhten Schwermetallanteil im Kondensat, das abhängig von der Verschmutzung vor dem Ablassen gereinigt werden muss [Kaltschmitt 2001].

Der Abscheidegrad, also die Menge an abgeschiedenen Partikeln, ist von Partikelgröße, Druckverlust, Konstruktion und Betrieb des Kondensators abhängig [Good 1998]. Sind vor dem Kondensator große Partikel im Rauchgas (z.B. bei Rinde), können hohe Partikelabscheidegrade (bis 90%) erreicht werden [Kaltschmitt 2001]. Eine Analyse von Abscheidegraden im Kleinfeuerungsbereich, die vom TFZ durchgeführt wurde, zeigt eine Staubkonzentrationsminderung von 30%. Die Korngrößenverteilung im Abgas nach der Kondensation hat einen 10-25% höheren Anteil der Submikronpartikel. Das heißt, es werden vor allem Partikel ab einer Größe von $1\mu\text{m}$ abgeschieden. Der Abscheidegrad ist abhängig von der Holzsorte, die höchste Staubminderung wurde bei Fichtenhackschnitzel ohne Rinde aufgezeichnet [Ellner 2010].

2.7.2 Kondensatbehandlung

Eine weitere Herausforderung ist das Kondensat, das durch die Abgaskondensation anfällt. Wie bereits beschrieben, nimmt der kondensierende Wasserdampf Komponenten aus dem Rauchgas auf. Die Konzentration der einzelnen Komponenten ist dabei grundsätzlich von der Zusammensetzung des verwendeten Brennstoffes abhängig [TFZ 2004]. Das Kondensat wird unterteilt in den flüssigen Anteil (Kondensatwasser) und den Kondensatschlamm, der hauptsächlich aus ausgewaschenen Staubfrachten besteht [Stiglbrunner 1995].

Die Emissionsbegrenzung zur Einleitung von Abwässern in Fließgewässer bzw. in eine öffentliche Kanalisation sind in der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (AAEV) unter § 4 vorgeschrieben [AAEV 2010]. Diese Verordnung gilt auch für das wässrige Kondensat aus Verbrennungsanlagen (vgl. [AAEV 2010] § 1 Absatz 3 bzw. [AEV 2010] §1 Absatz 5). Welche

dieser Grenzwerte eingehalten bzw. überwacht werden müssen, wird von der Wasserrechtsbehörde bestimmt [AAEV 2010]. Wird einer dieser Grenzwerte überschritten, ist eine Aufbereitung des Kondensats bzw. gerechte Entsorgung notwendig.

Der pH-Wert des Kondensatwassers muss laut [AAEV 2010] § 4 für die Einleitung in Fließgewässer zwischen 6,5 und 8,5 liegen. In den Kanal darf es mit einem pH-Wert von 6,5 bis 9,5 eingeleitet werden. Weitere Grenzwerte für allgemeine, anorganische und organische Parameter sind in [AAEV 2010] (Anlage A) zu finden. Laut Gaderer [Gaderer 2007] liegen im Kondensatwasser von fester Biomasse, abhängig vom pH-Wert, vor allem Zn, Cd und Hg in hohen Konzentrationen vor. Der pH-Wert beträgt meist zwischen pH 6 und pH 8. Das TFZ bestimmt in [TFZ 2004] die Kondensatqualität nach den Schwermetallgehalten (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), dem pH-Wert, sowie Chlorid-, Nitrid-, Nitrat- und Sulfatgehalt. Bei den Holzbrennstoffen kam es nur bei Zink und Cadmium zu Grenzwertüberschreitungen im Kondensat [TFZ 2004].

Auch bei den Kondensatbestimmungen des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr wurden bei 4 von 16 Untersuchungen erhöhte Zink-Werte festgestellt [Oberberger 1996]. Die gemessenen pH-Werte lagen zwischen 6,2 und 7,8.

Die Feststoffe aus dem Rauchgas bilden mit dem kondensierten Wasserdampf den sogenannten Kondensatschlamm. Je nach Brennstoff kann er hohe Schwermetallkonzentrationen aufweisen [Kaltschmitt 2001]. Besonders bei unbehandelter Biomasse (Hackschnitzel oder Rinde) besteht die Gefahr hoher Konzentrationen [Oberberger 1996]. Um eine kostenpflichtige Entsorgung auf einer Deponie zu verhindern, gibt es zwei Möglichkeiten [Gaderer 2007].

Die erste Möglichkeit zur Vermeidung des schwermetallreichen Kondensatschlammes besteht darin, das Rauchgas bereits vor der Kondensation trocken zu entstauben [Scheuch 2010]. Durch diese Vorentstaubung wird ein Großteil des mitgeführten Staubes als Flugasche vor der Kondensation vom Rauchgas getrennt. Die Flugasche weist geringere Konzentrationen von Schwermetallen auf, da diese sich im Trockenen nicht so leicht lösen wie im Kondensat [Oberberger 1996]. Daher kann die Asche leichter entsorgt werden als der Schlamm.

Um die Entsorgung des Kondensatschlammes zu erleichtern kann auch die Konzentration an Schwermetallen verringert bzw. kontrolliert werden. Dies ist möglich, weil die Löslichkeit der Schwermetalle vom pH-Wert abhängig ist. Deshalb kann durch die Beimischung von Lauge der pH-Wert auf z. B. 7,5 eingestellt und somit die Schwermetallkonzentrationen minimiert werden. Anschließend kann der Kondensatschlamm vom Wasser getrennt und getrocknet werden. Der Rückstand kann wie Flugasche aus der Trockenentstaubung behandelt bzw. entsorgt werden [Kaltschmitt 2001]. Laut Oberberger liegt die Menge an Schlamm anfall zwischen 0,01 und 0,3 kg je MWh Kesselarbeit und sinkt mit steigender Anlagenauslastung [Oberberger 1996]. Bei den durchschnittlichen Hausanlagen fällt daher kaum Schlamm an und muss in weiterer Folge auch nicht vom Kondensat getrennt werden [Kaltschmitt 2001]. Wenn die Grenzwerte eingehalten werden, kann das Kondensat in den Kanal abgeleitet werden.

Laut Angaben der Firma Ökofen darf das Kondensat eines Pelletskessel mit Brennwertnutzung in den Kanal eingeleitet werden, wenn folgende Punkte eingehalten werden [Ökofen 2010]:

- Brennstoffwärmeleistung des Kessels unter 400 kW
- Verfeuerung von Pellets gemäß ÖNORM M 7135
- Vorliegen einer Typenprüfung
- Nachweis der Einhaltung der Emissionsbegrenzungen gemäß AAEV §4 Abs.4
- Verwendung von korrosionsbeständigem Werkstoff für Wärmetauscher und Kondensatableitung
- Wiederkehrende Überprüfung der Verbrennungsanlage

Tabelle 2-8 zeigt die Inhaltstoffe des Abwassers aus der Rauchgaskondensation einer Pelletsfeuerung im Vergleich zu den Grenzwerten laut AAEV § 4. Da kein Grenzwert überschritten wird, kann das Kondensat ohne Nachbehandlung in den Kanal eingeleitet werden.

Tabelle 2-8 Inhaltsstoffe im Kondensat und Grenzwerte lt. AAEV [Ökofen 2010]

| Schadstoff | Menge im Kondensat aus Pellets-Brennwertnutzung | Grenzwert AAEV |
|---------------------|---|------------------|
| Blei | 0,017 mg/l | 0,5 mg/l |
| Cadmium | 0,0053 mg/l | 0,05 mg/l |
| Chrom-Gesamt | 0,004 mg/l | 0,5 mg/l |
| Kupfer | 0,005 mg/l | 0,5 mg/l |
| Nickel | 0,003 mg/l | 0,5 mg/l |
| Zink | 1,66 mg/l | 2,0 mg/l |
| Zinn | < 0,01 mg/l | 0,5 mg/l |

2.8 Mögliche Komponenten für die Verwendung in Kleinanlagen

In den folgenden Tabellen sind die Produkte bzw. Systeme aus der Technologierecherche nochmals zusammengefasst, die beim Einbau in Kleinanlagen in Frage kommen.

2.8.1 Kondensationswärmetauscher

| Firma, Produktname | Einsatzbereich Feuerungsleistung | Spezifischer Preis | Werkstoff Wärmetauscher |
|---|---|-------------------------------|------------------------------------|
| Bomat Heiztechnik „Bomat-Profitherm“ | 20 bis 2.000 kW | ca. 120-180 €/kW | Keramik |
| Bschor „Öko-Carbonizer“ | 22 bis 400 kW | ca. 50-80 €/kW | Carbon |
| eMax „GPH AK 28“ | bis 28kW dzt. nicht für Biomassefeuerung | ca. 137,25 €/kW | Kunststoff, Glas |
| Fröling „Brennwertwärmetauscher“ | 15 und 25 kW für Fröling- Pelletsfeuerungen | ca. 52-87 €/kW | Edelstahl |
| Schräder Abgastechnologie „AWT-Top“ | 15 bis 1.000 kW | ca. 50 €/kW | Edelstahl 1.4571 bzw. 1.4404 |

Tabelle 2-9 Übersicht Sekundärwärmetauscher

Grundsätzlich könnte jeder Wärmetauscher aus Tabelle 2-9 zur Kondensation der Rauchgase verwendet werden, da auch ihre Leistungsbereiche denen der Anwendungsbereiche nahe liegen. Bei keinem der Wärmetauscher ist eine Quench-Stufe integriert. Der Brennwertwärmetauscher der Firma Fröling besitzt aber eine Vorrichtung zum regelmäßigen Abspülen des Wärmetauschers, um ihn abhängig vom Brennraumunterdruck von Verschmutzungen zu befreien. Mit dieser Vorrichtung wäre es ev. auch möglich eine Quench-Stufe ohne großen Aufwand zu verwirklichen.

Bei der Verwendung des „GHP AK 28“ Wärmetauschers der Firma eMax, könnten Probleme mit Rauchgasen aus Biomasse auftreten, da er bis jetzt nur für Gas- und Ölfeuerungen geprüft ist. Laut Herstellerangaben sind die Oberflächen zwar korrosionsbeständig, der Betrieb wäre aber nur für beschränkte Zeit möglich, da die Ablagerungen am Wärmetauscher nicht automatisch gereinigt werden. Die restlichen Wärmetauscher sind für Biomassefeuerungen ausgelegt.

Da die Investitionskosten für die Wärmetauscher der Firmen Bomat (Bomat-Profitherm) und eMax (GPH AK 28) deutlich höhere Investitionskosten aufweisen als Produkte aus anderen Materialien, werden diese im weiteren Verlauf des Projekts nicht mehr für einen Einsatz in Erwägung gezogen.

2.8.2 Kondensationsanlagen

Die Leistungsbereiche der folgenden Kondensationsanlagen liegen zwar über denen der definierten Anwendungsfälle (ca. 15-20kW, ca. 50kW), dennoch ist es ev. Möglich mit den Firmen eine Lieferung von Anlagen mit den notwendigen Leistungsgrößen zu vereinbaren.

| Firma, Produktname | Einsatzbereich Feuerungsleistung | Spezifischer Preis | Besonderheiten |
|---|---|---|--|
| Baumgartner & Sohn „EKO-RGWT“ | 100kW bis 1 MW | ab 100.000€ erhältlich | Quench-Stufe vorhanden zusätzliche Staubabscheidung (Filtermatten) am Ende |
| Baumgartner & Sohn bzw. Svensk Rökgasenergi „Renergi-Anlage“ | 1,5 MW bis 30 MW | ca. 103,6 €/kW | Quench-Stufe vorhanden zusätzliche Staubabscheidung am (Elektrofilter) Ende |
| Kohlbach „Kohlbach RGK“ | 500kW bis 15 MW | ca. 10-20% der gesamten Anlagenkosten | Quench-Stufe vorhanden |
| Scheuch „ERCS-Anlage“ | 800kW bis 5 MW | ca. 88-125 €/kW | trockene Vorentstaubung vor Kondensations- Wärmetauscher |
| SWET „Voll-Brennwert- Kombisystem“ | k. A. | k. A. | Verbrennungsluft wird vorgewärmt |
| V.A.S. „VAS- Kondensations- Anlage“ | 1,6 bis 26 MW 500kW bis 1,75 MW | k. A. | Quench-Stufe vorhanden auch Trocken-Elektrofilter zur Staubabscheidung im Angebot |

Tabelle 2-10 Übersicht Kondensationsanlagen

2.8.3 Pellets-Brennwertkessel

Ist der Kessel der bestehenden Anlage einer von den in Tabelle 2-11 beschriebenen, kann ein zusätzlicher Kondensationswärmetauscher überflüssig werden, da diese Kessel bereits einen Brennwertwärmetauscher integriert haben.

| Firma, Produktname | Leistungsbereich | Mehrkosten im Vergleich zu Kessel ohne Brennwertnutzung |
|-------------------------------|-------------------------|--|
| Fröling „P4-Pellets“ | 8 bis 25 kW | ca. 1.300 € |
| ÖkoFEN „Pellematic-Plus“ | 12 bis 32 kW | ca. 2.000€ (20%) |

Tabelle 2-11 Pellets-Brennwertkessel

2.8.4 Wärmepumpe

Aus wirtschaftlichen Gründen ist der Einsatz einer Kompressionswärmepumpe vorzuziehen, um das Temperaturniveau der Kondensationswärme auf ein nutzbares Niveau zu heben. Da es in diesem Bereich viele Anbieter gibt, macht es Sinn zuerst die notwendige Leistungsgröße, sowie andere Eigenschaften der Wärmepumpe zu bestimmen und sich erst im Anschluss auf einen konkreten Anbieter festzulegen.

Durch die Technologierecherche stellte sich heraus, dass es zwischen den einzelnen Wärmepumpentypen große Preisunterschiede gibt. Am günstigsten ist eine Direktverdampfungswärmepumpe mit ca. 474 €/kW mittleren spezifischen Listenpreis, dicht gefolgt von der Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit ca. 481 €/kW. Die oberste Preisgrenze ziehen Luft-Wasser-Wärmepumpen, die mit ca. 857 €/kW beinahe das Doppelte kosten. Mit ca. 595 €/kW liegen Sole-Wasser-Wärmepumpen ebenfalls im oberen Preisbereich.

Wie aus den Anforderungen hervorgeht, wird die Abgaskondensation mit einer Quenche realisiert. Aus diesem Grund eignet sich eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe, die dem Kondensat-Quenchwasser-Gemisch direkt die Wärme entzieht (ohne zusätzlichen Wärmetauscher). Außerdem wird dadurch auch der Listenpreisvorteil der Wasser-Wasser-Wärmepumpe ausgenutzt werden.

Eine nähere Analyse der Temperaturbereiche zeigt auf, dass die Standard-Wärmepumpen für Heizzwecke auf eine maximale Quelltemperatur von 20°C und eine maximale Senkentemperatur von 65°C. Soll daher das Abgas tiefer abgekühlt werden als 25°C, bzw. ist die Rücklauftemperatur höher als 65°C, kann keine Standardwärmepumpe verwendet werden.

3 Technisches Konzept und Modellierung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Anforderungen an die aktive Abgaskondensation und die dadurch auftretenden Vor- und Nachteile einzelner Technologien. Daran anschließend wird ein technisches Konzept für den Kleinleistungsbereich (bis 100kW Feuerungsleistung) entworfen. Um eine Analyse zu ermöglichen, werden alle Komponenten des Konzepts mathematisch modelliert. Das zusammengesetzte Modell dient als Grundlage für die technische und wirtschaftliche Analyse im Kapitel 4.

Zusätzlich zum Kleinleistungsbereich wird eine potentielle Anwendung in einem mit Hackschnitzel befeuerten Fernheizwerk diskutiert. Die dazu notwendigen zusätzlichen Komponenten wurden ebenfalls modelliert und werden daher auch hier vorgestellt.

3.1 Anforderungen an das ActiveCond-System

Es folgt eine Aufzählung der Anforderungen an ein aktives Abgaskondensationsmodul und dessen Integration in bestehende Biomassefeuerungs-systeme. Dieser Anforderungskatalog fasst die Möglichkeiten und Herausforderungen zusammenfassen und beschreibt die einzelnen Komponenten näher. Das Kondensationsmodul hat der Reihe nach die beschriebenen Funktionen zu erfüllen. Da es zum Nachrüsten einer bestehenden Anlage vorgesehen ist, gehört die Verbrennung von Biomasse selbst nicht zu den Anforderungen. Es wird davon ausgegangen, dass die Rauchgase, die kondensiert werden sollen, bereits vorhanden sind:

- Abkühlen des Abgases und Kondensation des Wasserdampfes
- Wärmeübertragung auf die Wärmepumpe
- Wärmetransformation mittels Wärmepumpe
- Wärmeübertragung auf Heizungsrücklauf
- Kondensatabfuhr bzw. Nachbehandlung
- Abgasabfuhr an Umgebung

3.1.1 Abkühlen des Abgases und Kondensation des Wasserdampfes

Das im Wasser enthaltene Abgas kondensiert nur, wenn die Temperatur unter den Taupunkt fällt. Der Zusammenhang zwischen Taupunkttemperatur und Druck kann mittels der Antoine-Gleichung beschrieben werden. Je nach Wassergehalt des Abgases, ändert sich daher auch die Kondensationstemperatur. Der Wassergehalt des Abgases ist abhängig vom Luftüberschuss (λ) bei der Verbrennung und der Brennstoffzusammensetzung bzw. Brennstoffart (Hackgut, Pellets etc.), vor allem aufgrund des unterschiedlichen Wassergehalts des Brennstoffes.

Der Wasserdampf beginnt zu kondensieren, sobald das Gas an einer Stelle die Kondensationstemperatur unterschreitet. In einem Wärmetauscher fällt daher an der Wand

Kondensat an, sobald die Wandtemperatur unter der Kondensationstemperatur liegt. Dies ist unabhängig davon ob die mittlere Gastemperatur ober oder unter der Kondensationstemperatur liegt. Ist auch die mittlere Gastemperatur unter dem Taupunkt, kann es zu Tröpfchenbildung im Gas selbst kommen. Kondensationskeime sind dabei oft Partikel wie etwa Staub.

Quench-Stufe: Es besteht die Möglichkeit eine Quench-Stufe einzubauen. Dabei wird Wasser in das heiße Gas eingedüst. Durch eine adiabate Abkühlung des Abgases bei gleichzeitiger Verdampfung des Quenchwassers wird rasch ein Sättigungszustand erreicht.

Vorteil:

- Definierte Betriebsbedingung (feucht) – keine trockenen Stellen im Wärmetauscherbereich
⇒ keine Ablagerungsgefahr
- Verunreinigungen des Wärmetauschers werden abgeschwemmt
- Reinigung der Kondensat-Quenchwasser-Mischung kann beim Abführen eines Teilstromes integriert werden

Nachteil:

- Abführen eines Teilstromes notwendig, da die Menge vom Quench-Wasser konstant gehalten werden muss – ohne Quenche kann gesamtes Kondensat abgeführt werden
- Zusätzliche Pumpe notwendig, die das Quench-Wasser im Kreis führt

3.1.2 Wärmeübertragung auf die Wärmepumpe

Für die Wärmeübertragung auf die Wärmepumpe stehen zwei Möglichkeiten offen. Einerseits kann die Wärmeübertragung mit einem Gaswärmetauscher vollzogen werden, an dem die Kondensation des Wasserdampfes erfolgt (=Kondensationswärmetauscher). Andererseits kann beim Einbau einer Quench-Stufe auch die Wärmeübertragung durch das Quench-Wasser erfolgen. In beiden Fällen kann die Wärmeübertragung auf die Wärmepumpe direkt oder über einen Sekundärkreislauf indirekt erfolgen.

Direkt über den Verdampfer der Wärmepumpe wäre bei Quench-Stufe mit Wasser-Wasser Wärmepumpe möglich, im Fall ohne Quench müsste eine Luft-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt werden.

Vorteil:

- keine zusätzlichen Verluste bzw. Nutzungsgradeinbußen, weil kein zusätzlicher Wärmetauscher notwendig

Nachteil:

- Wärmepumpe muss voraussichtlich umgebaut werden (Anpassung ans System z.B. Ausbauen des Verdampfers, Verlängern von Leitungen etc.)
- Korrosionsbeständigkeit des Wärmetauschers in WP muss überprüft werden

Indirekt über zusätzlichen Wärmetauscher:

Vorteil:

- Wärmepumpe muss nicht umgebaut bzw. angepasst werden

Nachteil:

- ev. erhöhte Verluste bzw. Nutzungsgradeinbußen durch zusätzliche Komponente

3.1.3 Wärmetransformation mittels Wärmepumpe

Die Wärmepumpe muss die aus der Abgasabkühlung und –kondensation gewonnene Wärme aufnehmen und auf ein höheres Temperaturniveau anheben. Grundsätzlich gibt es folgende drei verschiedene Arten von Wärmepumpen, die zur Wärmetransformation eingesetzt werden können (Kompression, Absorption, Adsorption).

Kompressionswärmepumpe:Vorteile:

- Serienprodukt: kostengünstig
- Ausgereifte Technologie ⇒ Betriebserfahrungen vorhanden
- In vielen Leistungsgrößen am Markt verfügbar
- Je nach Temperaturanforderung sind verschiedene Kältemittel verfügbar

Nachteil:

- Strom für Betrieb notwendig (Strommix – nicht 100%ig erneuerbar)

Absorptionswärmepumpe: Thermische Verdichtung statt der elektrischen Kompressoren in der Kompressionswärmepumpe. Die Absorptionwärmepumpe hat drei Temperaturniveaus: Hochtemperatur: Wärmeeinkopplung für Generator, Niedertemperatur: Wärmeeinkopplung für Verdampfer, Mitteltemperatur: Wärmeauskopplung von Absorber und Kondensator. Die Einbindung der Abgaswärme würde über das Niedertemperaturniveau erfolgen. Die Nutzwärme wird auf dem Mitteltemperaturniveau erfolgen. Es gibt zwei Prozessvarianten. Im offenen Prozess erfolgt die Einbringung des Arbeitsstoffpaares im Abgas selbst. Diese Variante ist nur mit dem Kältemittel Wasser möglich. Der Wasserdampf im Abgas wird absorbiert und das Abgas teilweise entfeuchtet. Feuchte Brennstoffe sind daher besonders geeignet. Beim geschlossenen Prozess erfolgt die Anbindung über Wärmetauscher, wie auch bei der Kompressionskältemaschine.

Vorteile:

- Hauptsächlich thermischer Antrieb – elektrischer Antrieb der Kältemittelpumpe ist ein Bruchteil des Verdichters einer Kompressionswärmepumpe
- offener Prozess: Absorption direkt im Rauchgasabzug ⇒ ein Bauteil entfällt
- offener Prozess: Rauchgas wird unter Kondensationstemperatur entfeuchtet, da das Absorptionsmittel den Taupunkt senkt ⇒ Entschwadung ev. hinfällig; besonders bei feuchten Brennstoffen interessant
- geschlossener Prozess: auch bei trockenen Brennstoffen (z.B. Pellets) interessant

Nachteile:

- Derzeit noch kein Massenprodukt ⇒ kostenintensiver, vor allem sehr hohe Investitionskosten
- Temperaturbereich nicht frei wählbar, da direkt von Kältemittel abhängig.
- Großer Platzbedarf

- Zusätzliche Auskopplung von Wärme auf höherem Niveau (Antriebswärme) ist wahrscheinlich für Nachrüstmodule nicht realisierbar

Adsorptionswärmepumpe: Funktionsweise ist gleich wie die Absorption im geschlossenen Prozess, nur mit festem Adsorptionsmittel. Daher ist nur ein diskontinuierlicher Prozess möglich.

Vorteile:

- Hauptsächlich thermischer Antrieb – elektrischer Antrieb der Kältemittelpumpe ist ein Bruchteil des Verdichters einer Kompressionswärmepumpe

Nachteile:

- Derzeit noch kein Massenprodukt ⇒ kostenintensiver, vor allem sehr hohe Investitionskosten
- Temperaturbereich nicht frei wählbar, da direkt von Kältemittel abhängig. Nicht viele Varianten verfügbar.
- Großer Platzbedarf
- Zusätzliche Auskopplung von Wärme auf höherem Niveau (Antriebswärme) ist wahrscheinlich für Nachrüstmodule nicht realisierbar

3.1.4 Wärmeübertragung auf Heizungsrücklauf

Die Wärmeübertragung von der Wärmepumpe erfolgt direkt über den Kondensator der Wärmepumpe auf den Heizungsrücklauf. Der vorgewärmte Rücklauf fließt anschließend an den Kessel.

3.1.5 Kondensatabfuhr bzw. Nachbehandlung

Die Anforderungen zur Einleitung in Fließgewässer, bzw. in den Kanal ist in Österreich mit der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (AAEV) des Bundeskanzleramtes geregelt (siehe Kapitel 2.7.2) – werden diese Anforderungen nicht erfüllt, muss das Kondensat nachbehandelt bzw. ordnungsgemäß entsorgt werden.

Reinigung des Kondensats:

Durch die Reinigung des Kondensats können Grenzwertüberschreitungen und unerwünschte Nebenerscheinungen, wie Ablagerungen in den Rohren und anschließendes Verstopfen, vorab verhindert werden.

Indirekt: durch Vorentstaubung der Rauchgase, bevor Kondensat ausfällt
(z.B. Zyklonabscheider)

Vorteile:

- abgeschiedene Flugasche kann einfacher entsorgt werden als Kondensatschlamm
- bei Großanlagen ist Entstaubung sowieso vorgeschrieben ⇒ keine Zusatzkosten

Nachteil:

- bei Kleinanlagen ist dzt. keine Entstaubung vorgeschrieben ⇒ Zusatzkosten

Direktes Abtrennen der Staubpartikel (Kondensatschlamm) vom Kondensat

Vorteil:

- ev. keine zusätzliche Vorentstaubung der Rauchgase notwendig

Nachteil:

- Filter muss gereinigt bzw. ausgewechselt werden (zusätzlicher Aufwand)

3.1.6 Abgasabfuhr an Umgebung

Die Abgasabfuhr an die Umgebung muss bei den weit niedrigeren Gastemperaturen erfolgen. Daher sind der Einbau eines Saugzuggebläses und das Material des Kamins folgendermaßen zu berücksichtigen. Daraus ergeben sich bei Nachrüstung zusätzliche Investitionskosten, falls die Komponenten noch nicht vorhanden sind:

Saugzuggebläse: unbedingt erforderlich, da keine freie Konvektion mehr durch geringe Temperatur des Abgases nach der Kondensation

Kamin: feuchteunempfindlich, rußbrandsicher, korrosionsbeständig – bei Nachrüstung ev. neue/andere Werkstoffe notwendig (z.B. Edelstahl, Keramik etc.), eventuell auch Verkleinerung notwendig wegen des geringeren Volumenstroms

Zusätzlich kann eine Bypasslösung zur Entschwadung und/oder zur Vorwärmung der Verbrennungsluft (abhängig vom Endtemperaturniveau) eingebaut werden.

3.2 Ausgesuchte Anwendungsfälle

Die zuvor aufgezählten Anforderungen werden nun anhand von drei Anwendungsfällen exemplarisch umgesetzt.

- Pelletsfeuerung: ca. 15kW Heizleistung – Einfamilienhaus
- Hackgutfeuerung: ca. 50kW Heizleistung – Mehrfamilienhaus („Mininahwärme“)
- Fernwärme-Hackgutfeuerung: ca. 8MW Heizleistung

Für die ersten beiden Varianten kommt nur ein sehr einfaches und damit kostengünstiges Schema in Frage. Für die dritte Variante (8MW Fernwärme) ist jedoch eine detaillierte Analyse des Temperaturniveaus mit mehreren Wärmetauschern anzustreben. Prinzipiell sind als Auskopplungstemperaturen für größere Anlagen folgende Temperaturniveaus interessant:

- > 100°C Dampferzeugung (Kessel)
- > 60°C Hochtemperaturrücklauf
- > 40°C Niedertemperaturrücklauf
- > 30°C Wärmepumpenquelle
- > 10°C Luftvorwärmung

Die Analyse welche Temperaturniveaus eingesetzt werden hängt von der Anlage ab und sollte nur nach einer genauen Analyse (zB Pinch-Verfahren) gemacht werden. Abbildung 3-1 stellt ein exemplarisches Modellschema mit mehreren Temperaturskopplungen dar. Das Quenchwasser steht exemplarisch für eine externe Energiezufuhr und/oder Energieabfuhr. Die Funktion des Kamins beschränkt sich darauf, das abgekühlte Abgas an die Umgebung abzuführen (Saugzuggebläse). Das Kondensationsmodul selbst beschränkt sich auf die vier Wärmetauscher, da davon ausgegangen wird, dass das Kondensationsmodul zu einer bereits bestehenden Anlage nachgerüstet wird. Deshalb befinden sich der Kessel und der Kamin außerhalb der gezogenen Systemgrenze, die in Grün in Abbildung 3-1 eingezeichnet ist. Richtigerweise muss ergänzt werden, dass sich auch im Kessel ein Wärmetauscher befindet, der den Heizungsvorlauf erwärmt. Dieser wird als Teil des Kessels und nicht als Teil des Kondensationssystems gesehen und daher nicht extra ausgewiesen.

Systemgrenze des Kondensationsmoduls

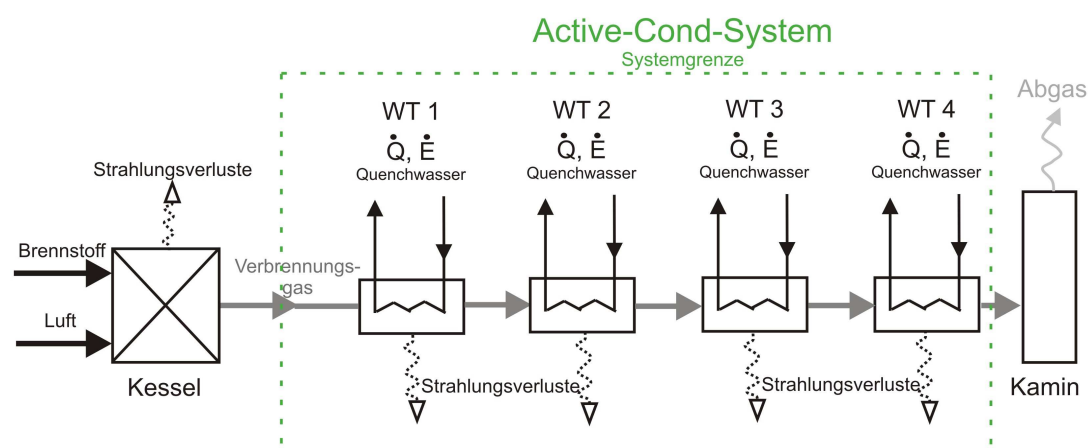


Abbildung 3-1 Modellschema mit Systemgrenze

3.3 Technisches Konzept Kleinanlagen

Für die beiden Anwendungsfälle Pelletsheizung (15kW) und Hackschnitzelheizung (50kW) wurde ein einfaches Konzept entworfen (siehe Abbildung 3-2). Das technische Konzept beschreibt den strukturellen Aufbau des Kondensationsmoduls inklusive der verwendeten Komponenten.

Technisches Konzept im Kleinleistungsbereich

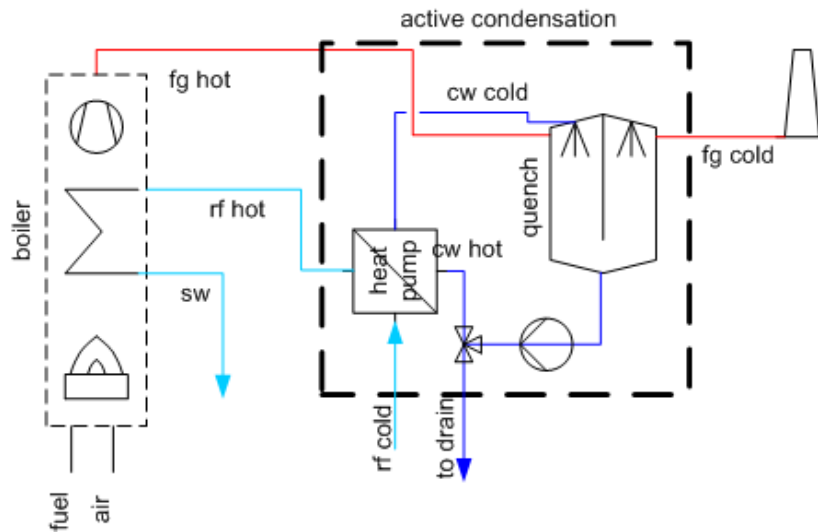


Abbildung 3-2 Schema: Aktive Abgaskondensation über Quench und Wärmepumpe

Ziel des Systems ist die Übertragung der Wärmeenergie des Abgases an den Heizwasserrücklauf, was über den Zwischenschritt eines Quenchs und einer Wärmepumpe bewerkstelligt wird. Dazu muss ein zusätzlicher Wasserkreislauf für das Quenchwasser aufrechterhalten werden. Das Abgas wird nach dem Kessel in den Quench geführt, wo es auf die Austrittstemperatur abgekühlt wird. Die dabei freiwerdende Wärme wird auf das Quenchwasser übertragen. Danach dient das Quenchwasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe, in welcher Wärme auf den Heizwasserrücklauf übertragen wird. Anschließend wird ein Teil des Quenchwassers als Abwasser abgeführt, der Rest des Wassers wird erneut durch den Quench geführt.

Weiters sind in der Skizze alle zusätzlichen Stromverbraucher eingezeichnet:

- Wärmepumpe
- Wasserpumpe – Quenchwasser
- Gebläse (soweit noch nicht vorhanden)

Der in der Abbildung gezeigte Kessel ist nicht Teil der Systemanalyse. Er ist nur zur Darstellung des Ablaufes eingezeichnet.

Die Entscheidung für den Quench statt eines einfachen Kondensationswärmetauschers wurde aufgrund der dadurch klaren Bedingungen (feucht) und dem relativ geringen Materialaufwand durch eine Quenche gerechtfertigt. Der zusätzliche Kreislauf für das Quenchwasser ist notwendig um eine Standard-Wärmepumpe verwenden zu können. Eine direkte Kopplung des Abgases in die Wärmepumpe, würde die Entwicklung eines eigenen Wärmetauschers benötigen. Bei diesem Wärmetauscher verdampft auf der einen Seite das Kältemittel der Wärmepumpe, während auf der anderen Seite die Luft abgekühlt und dadurch der enthaltene Wasserdampf kondensiert. Da derzeitige Luft-Wärmepumpen weder auf die hohen

Abgastemperaturen noch auf die Kondensationsraten ausgelegt sind, kann diese Technologie nicht einfach aus am Markt befindlichen Komponenten zusammengesetzt werden, weshalb dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wurde.

3.4 Modellierung

Für die Berechnung der Abgaszustände an unterschiedlichen Punkten ist eine mathematische Formulierung der Massen- und Energiebilanz der Komponenten notwendig. In diesem Kapitel wird nun jede Komponente kurz beschrieben, sowie die mathematische Repräsentanz erklärt. Die Bilanzierung erfolgt im stationären Fließprozess, d.h. ohne zeitliche Änderungen der zugeführten Stoffströme.

Nachdem die thermochemische Umsetzung des Brennstoffs bereits vor Eintritt in das aktive Kondensationsmodul abgeschlossen ist, spielen für die Berechnung der erreichbaren Effizienzsteigerung nur noch Verluste der neuen Komponenten und deren Leitungen sowie die endgültigen Verluste im Abgas eine Rolle. Die Verluste durch Wärmeübertragung an die Umgebung wurden nicht behandelt, stattdessen wurden nur die endgültigen Verluste im Abgas berücksichtigt. Die genaue mathematische Formulierung wurde bereits publiziert und kann in [Hebenstreit 2011] nachgelesen werden.

3.4.1 Wärmepumpe

Leistungszahlen handelsüblicher Wärmepumpen

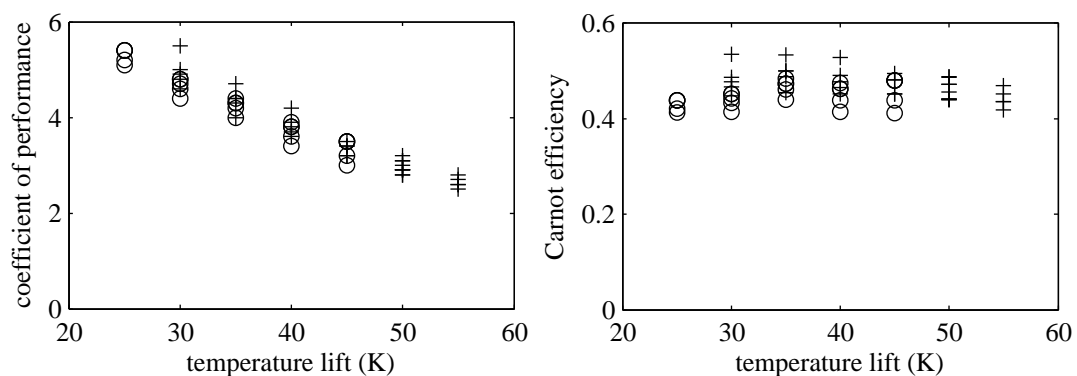


Abbildung 3-3 Leistungszahlen handelsüblicher Wärmepumpen über dem Temperaturhub der Wärmepumpe. +: Sole-Wasser, o: Wasser-Wasser-Wärmepumpen. Links: Leistungszahl, Rechts: Carnoteffizienz = Verhältnis von realem COP zu maximalem COP bei Carnot-Wirkungsgrad [WPZ 2010]

Das Ziel der Wärmepumpe ist die Hebung von Wärmeenergie von einem niedrigen auf ein hohes Temperaturniveau. Die Güte einer Wärmepumpe wird durch ihre Effizienz (COP – Coefficient of Performance) definiert. Dieser beschreibt das Verhältnis von Wärmezufuhr auf der Hochtemperaturseite im Verhältnis zu zugeführter elektrischer Energie. Bei gegebenem elektrischem Input ergibt sich aus dem COP die zugeführte und abgeführte Wärmemenge. Da kommerziell erhältliche Wärmepumpen eine relativ konstante Carnoteffizienz aufweisen (siehe

Abbildung 3-3), wurde dieser Parameter als Alternative in der Modellierung verwendet. Die Carnoteffizienz ist das Verhältnis aus realem COP zu thermodynamisch maximal möglichem COP.

3.4.2 Quench

Im Quench wird Wasser durch Düsen in einen Gasstrom fein verteilt. Dadurch entsteht eine große Grenzfläche zwischen Wasser und Gas, wodurch durch Verdampfung und Kondensation ein Temperatenausgleich stattfindet. Das hier verwendete Modell des Quenchs geht von einer einheitlichen Temperatur des Wassers und Gases am Ausgang aus. Weiters soll das Gas am Ausgang voll befeuchtet sein. Anhand dieser zwei Kriterien lassen sich der Massenstrom von flüssigem Wasser und gesättigtem Gas, sowie deren Temperatur anhand einer Enthalpiebilanz bei gegebenen Eingangsgrößen (Temperatur, Feuchte, Massenstrom) berechnen.

3.4.3 Kondensationswärmetauscher

Für den Kondensationswärmetauscher wird von einem Gegenstromwärmetauscher mit Rohrbündeln ausgegangen, die Berechnung des Wärmeübergangs erfolgt nach [VDI 2002]. Die dabei benötigte Temperaturdifferenz wird iterativ über eine Enthalpiebilanz berechnet, in der auch die Kondensationswärme berücksichtigt wird. Die Kondensationsrate wurde anhand der Druckdifferenz des Wassers im Vergleich zum Sättigungsdruck abgeschätzt [Jeong 2010].

3.4.4 Pumpe und Gebläse

Um den Energieverbrauch von Pumpe und Gebläse abzuschätzen wird die technische Arbeit (Volumen*Druckdifferenz) berechnet und mit einem Effizienzfaktor multipliziert. Der Druckabfall muss jeweils geschätzt werden, weil er in den Komponenten nicht direkt berechnet wird. Aus Erfahrungsgemäß werden etwa 40 W für eine Umlaufpumpe und 30 W für das Saugzuggebläse für übliche Einfamilienhäuser benötigt. Eine Umlaufpumpe ist in jedem Fall für den zusätzlichen Wasserkreislauf notwendig, ein Saugzuggebläse nur falls noch kein Gebläse eingebaut ist.

3.4.5 Abgasmenge & -zusammensetzung nach Kessel

Die Abgasmenge und -zusammensetzung des Abgases direkt nach dem Kessel sind wichtige Eingangsgrößen für alle nachfolgenden Komponenten. Die Berechnung dieser Größen erfolgt über die Bestimmung der für die Kesselleistung benötigten Brennstoffmenge mittels Brennwertberechnung nach Boie. Weiters wird die zugeführte Luft über einen Parameter für den Luftüberschuss berechnet, die Luftzusammensetzung wird mit 79% Stickstoff und 21% Sauerstoff festgelegt.

3.4.6 Kessel

Der Kessel selbst ist nicht Teil des Forschungsprojektes. Um jedoch mögliche Rückwirkungen auf den Kessel qualitativ abschätzen zu können, wurde ein einfaches Kesselmodell angenommen, das von einer adiabaten Verbrennung und anschließender Wärmeabgabe ans Heizwasser durch einen Wärmetauscher ausgeht. Geometrische Details, Strahlung und andere Einflüsse wurden dabei nicht berücksichtigt. Dieses Kesselmodell stellt somit eine Alternative zur Vorgabe der Abgastemperatur dar. Es wurde nur in einzelnen Berechnungen verwendet, die jeweils gekennzeichnet sind. Die Größe des Wärmetauschers wurde so festgelegt, dass sich bei den Standardparametern die Standard-Abgastemperatur (siehe Tabelle 4-1) einstellt.

4 Thermodynamische und ökonomische Systemanalyse

4.1 Ergebnisse der thermodynamischen Analyse

Für die nun folgende Systemanalyse wurde das in Kapitel 3.3 vorgestellte Konzept in Matlab/Simulink mathematisch umgesetzt. Die dafür notwendigen Komponenten wurden nach den Beschreibungen in Kapitel 3.4 modelliert. Damit lassen sich die Wärmeübergänge an das Heizungssystem und daraus abgeleitet die Effizienz berechnen. In den nachfolgenden Kapiteln werden bestimmte Parameter variiert um die jeweilige Auswirkung auf das Verhalten des Systems zu bestimmen. Die restlichen Parameter entsprechen, soweit nicht anders angegeben, den Werten in Tabelle 4-1. Für den überwiegenden Teil der Standardparameter wurde auf die typischen Werte einer 10kW-Heizung zurückgegriffen (Heizwassermenge, Holzzusammensetzung, Luftüberschuss, etc.). Der zusätzlich benötigte Wasserkreislauf (Quenchwasser) wurde mit einer Durchflußrate äquivalent zum Heizkreislauf beaufschlagt.

Standardparameter

| Parameterbezeichnung | Wert | Einheit |
|---|------|--------------------------------------|
| Zusammensetzung des Brennstoffs: | | |
| Kohlenstoff | 0.5 | kg/kg _{trocken} |
| Sauerstoff | 0.44 | |
| Wasserstoff | 0.06 | |
| Wasser | 0.1 | kg/kg |
| Luftüberschuss: | | |
| Lambda | 1.5 | mol/mol |
| Temperaturen: | | |
| Heizwasser-Rücklauf | 60 | °C |
| Abgas nach Kessel | 120 | |
| Durchflussmengen: | | |
| Heizwasser | 500 | kg/h |
| Quenchwasser | | |
| Kesselleistung: | | |
| Brennwert | 10 | kW |
| Wärmepumpenleistung: | | |
| Elektrische Leistung | 200 | W |
| Leistungszahl (COP) | 4 | $W_{\text{therm}}/W_{\text{elektr}}$ |

Tabelle 4-1 Standardparameter für Berechnungen

Die Gesamtverluste bei gleicher Brennstoffleistung variieren bei einer Abgastemperatur von 120°C von 1200W auf 2500W mit dem Wassergehalt zwischen 0.0 und 0.5 im Brennstoff. Diese Verluste sind bei Abkühlung des Abgases auf 25°C fast vollständig vermeidbar, nur der Wasseranteil, der im Abgas bei 25°C enthalten ist, kann nicht genutzt werden. Dieser Anteil ist durch den Taupunkt des Wassers bei 25°C bestimmt, und daher unabhängig vom Wasseranteil im Brennstoff. Bei geringem Wassergehalt ist das Verhältnis von sensibler zu latenter Wärme

etwa gleich groß (ca. 500W). Der Anteil an Kondensationswärme steigt auf etwa 2000W bei hohem Wassergehalt, während der Anteil der sensiblen Wärme fast gleich bleibt. Die Kondensationstemperatur liegt je nach Wassergehalt zwischen 40°C und 60°C. Ein Großteil der Wärme kann aber erst bei einer weiteren Abkühlung um 10-20°C gewonnen werden, dass heißt bei einer Abkühlung auf etwa 30-40°C.

Modellergebnisse ohne aktive Abgaskondensation

| Kesseldaten | Wert | Einheit |
|--------------------------|---------|-----------------------------------|
| Übertragene Wärme Kessel | 8670 | W |
| Wirkungsgrad Brennwert | 0.87 | $W_{\text{Kessel}}/W_{\text{BW}}$ |
| Wirkungsgrad Heizwert | 0.94 | $W_{\text{Kessel}}/W_{\text{HW}}$ |
| Abgas trocken | 0.0047 | kg/s |
| Wassergehalt Abgas | 0.07 | kg/ kg _{trocken} |
| Brennstoffmasse | 5.67e-4 | kg/s |
| Brennstoffmasse trocken | 5.1e-4 | kg/s |
| Heizwert | 9190 | W |

Tabelle 4-2 Aus Standardparametern abgeleitete Daten zum Kessel (noch ohne Kondensationsmodul)

Unter der Berücksichtigung der Parameter in Tabelle 4-1 ergibt sich am Kessel ein Brennwertnutzungsgrad von 0.87 ohne Berücksichtigung eines Kondensationsmoduls. Weiter Angaben zum Kessel und zum Abgas sind in Tabelle 4-2 aufgezählt. Für die angegebenen Standardparameter ergibt sich mittels der Systemanalyse mit den vorher beschriebenen Modellen eine Wirkungsgradverbesserung von 0.94 auf 1.03 bezogen auf den Heizwert und von 0.87 auf 0.95 bezogen auf den Brennwert. Um dies zu erreichen muss ein elektrischer Energieinput von 200W für die Wärmepumpe aufgewendet werden. Zusätzlich werden etwa 70 W für die weiteren zusätzlichen Komponenten (Umlaufpumpe, Saugzuggebläse) benötigt.

Modellergebnisse mit aktiver Abgaskondensation

| COP | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|------|------|------|------|
| Wärmeleistung gesamt [W] | 9270 | 9470 | 9670 | 9870 |
| Wärmeleistung WP [W] | 600 | 800 | 1000 | 1200 |
| Wärmeleistung Quenche [W] | 400 | 605 | 806 | 1003 |
| Wirkungsgrad Brennwert | 0.93 | 0.95 | 0.97 | 0.99 |
| Wirkungsgrad Heizwert | 1.01 | 1.03 | 1.05 | 1.07 |
| Wirkungsgraderhöhung Brennwert | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.12 |
| Wirkungsgraderhöhung Heizwert | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.13 |
| Rücklauftemperatur nach WP [°C] | 61.0 | 61.4 | 61.7 | 62.1 |
| Quenchwasser vor WP [°C] (=Abgasendtemperatur) | 47.2 | 42.8 | 37.3 | 30.1 |
| Quenchwasser nach WP [°C] | 46.5 | 41.8 | 35.9 | 28.4 |
| Wassergehalt Abgas [kg/kg _{trocken}] | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.03 |

Tabelle 4-3 Standardwerte bei unterschiedlichen Leistungszahlen für die Wärmepumpe (COP)

Tabelle 4-3 zeigt zusätzlich die erreichbaren Effizienzen, sowie Temperaturen etc. bei unterschiedlichen Leistungszahlen der Wärmepumpe. Als Standardfall wurde zuvor 4 angenommen, also 4 Wärmeeinheiten pro zugeführter Stromeinheit Energie. Je höher die Leistungszahl desto mehr Wärme wird bei gleicher Stromzufuhr übertragen. Die Leistungszahl ist allerdings stark abhängig von Quell- und Senktemperatur der Wärmepumpe, was hier nicht direkt berücksichtigt wird. Durch einen Vergleich mit dem Carnot-Wirkungsgrad, also der maximal übertragbaren Wärmeenergie, ist eine Bewertung verschiedener Wärmepumpen möglich.

4.1.1 Veränderung des Holzfeuchte

Der wahrscheinlich wichtigste Parameter zur Abschätzung der Effizienz einer Rückgewinnung der Kondensationswärme ist der Wassergehalt des Brennstoffs, da diese maßgeblich den Taupunkt des Abgases beeinflusst. Dies ist schon allein durch einen Vergleich der im Abgas enthaltenen Enthalpie bei unterschiedlicher Feuchte ersichtlich. Abbildung 4-1 zeigt die veränderte Heizleistung durch den Einbau des Quench-Wärmepumpen-Moduls bei konstanter elektrischer Wärmepumpenleistung von 200W. Je nach Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe ergibt sich daraus eine thermische Leistung von 600W bei einem COP von 3 und 1200W bei einem COP von 6.

Wärmeleistung bei unterschiedlicher Holzfeuchte

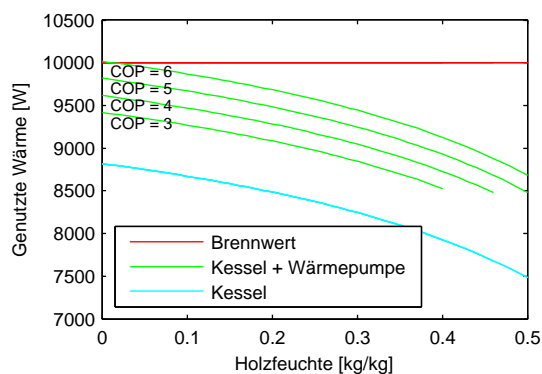


Abbildung 4-1 Wärmeleistung in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

In Abbildung 4-2 ist die Erhöhung des Wirkungsgrades in Bezug auf Brennwert und Heizwert dargestellt. Die Differenz zwischen Kessel- und Gesamtwirkungsgrad beim Brennwert ist unabhängig von der Holzfeuchte, und entspricht den berechneten Werten in Tabelle 4-3. Im Gegensatz dazu steigt diese Differenz beim Heizwert mit der Feuchte an, weil die durch Kondensation gewonnene Wärme im Heizwert nicht berücksichtigt wird. Da der Strom zum Betrieb der Wärmepumpe in Wärme umgewandelt wird, ist auch ein Brennwertwirkungsgrad über 100% möglich. Zusätzlich kann dies bei Abgastemperaturen unter 25°C erreicht werden, da sich der Brennwertwirkungsgrad auf den Brennwert des Holzes bei 25°C bezieht, und das Aufwärmen des Brennstoffs und der Luft auf 25°C nicht berücksichtigt wurden.

Die Berechnungen wurden nur für Fälle durchgeführt, in denen die Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Quenchwasser mindestens 10°C betrug, da bei kleineren Temperaturdifferenzen der Betrieb einer Wärmepumpe nicht sinnvoll erschien. Daher sind bei kleinem COP und hohem Wassergehalt keine Werte in der Abbildung zu finden.

Thermischer Wirkungsgrad bei unterschiedlicher Holzfeuchte

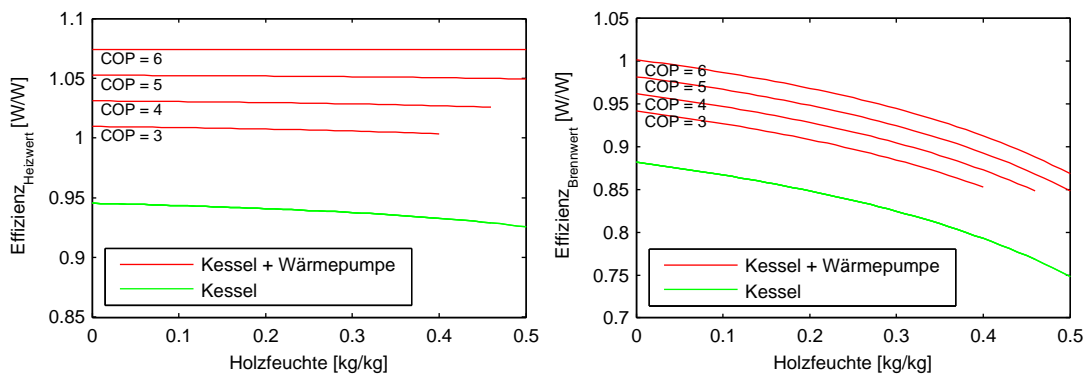


Abbildung 4-2 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

Bei näherer Betrachtung der sich bei diesem Prozess ergebenden Temperaturen (siehe Abbildung 4-3) ist zu erkennen, dass das im Kreis geführte Quenchwasser bei niedrigem Brennstoffwassergehalt deutlich tiefere Temperaturen erreicht. Zugleich wird bei hohem Wassergehalt kaum abgekühlt. Eine Analyse des Wassergehalts des Abgases nach der Quenche zeigt auch, dass bei einem COP von 3 noch keine Kondensation stattfindet, sondern nur das Abgas abgekühlt wird. Je größer der COP desto stärker fällt auch die Kondensation aus, d.h. desto kleiner wird die Feuchte im Abgas. Bei zu geringer Wärmeabnahme durch die Wärmepumpe ist die Temperatur des Quenchwassers so hoch, dass es zur Verdampfung statt zur Kondensation kommt.

Temperaturen und Wassergehalt im Abgas bei unterschiedlicher Holzfeuchte

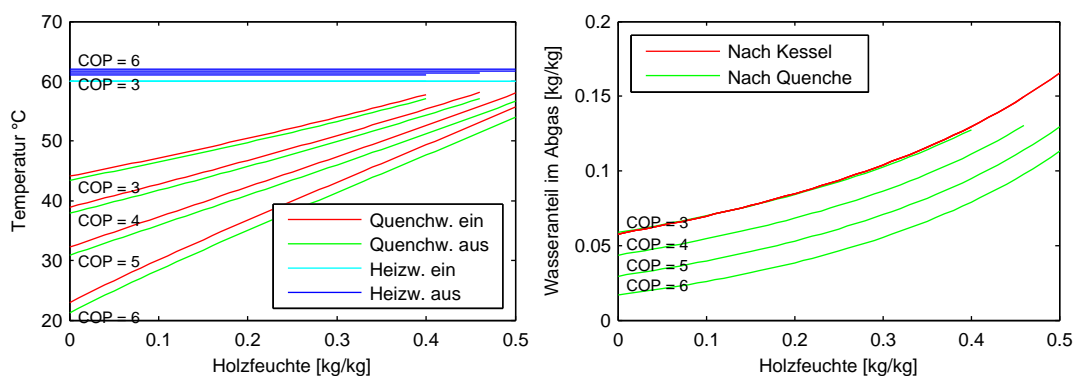


Abbildung 4-3 Quell- und Senkentemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

4.1.2 Veränderung der Holzfeuchte bei konstanter Quenche-Austrittstemperatur

Aus den Abbildungen in Kapitel 4.1.1 ist zu erkennen, dass sich die Temperaturen in der Wärmepumpe stark ändern. Da jedoch der COP bei einer Wärmepumpe stark an die Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Strömen geknüpft ist, soll hier der gleiche Prozess noch einmal erläutert werden. Jedoch unter der Vorbedingung, dass das Quenchwasser am Eintritt der Wärmepumpe eine konstante Temperatur von 25°C hat. Dafür wird die elektrische Leistung der Wärmepumpe danach ausgerichtet, dass das Quenchwasser stark genug abkühlt wird, um im Quench die notwendige Abkühlung zu erreichen. Abbildung 4-4 zeigt die übertragene Wärme im Modul sowie die elektrische Leistung der Wärmepumpe. Deutlich zu sehen ist, dass durch die Wärmeübertragung im Quench fast die ganze Wärme bis zum Brennwert zurückgewonnen wird, unabhängig davon wie feucht der Brennstoff ist. Diese Wärme wird danach in der Wärmepumpe auf ein höheres Niveau gepumpt, wo die dazu notwendige elektrische Energie ebenfalls in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dadurch ergibt sich, obwohl beim ersten Blick paradox, durch einen schlechteren COP eine höhere Gesamtwärmeleistung, da mehr elektrische Energie zugeführt wird.

Wärmeleistung und elektrische Leistung bei unterschiedlicher Holzfeuchte

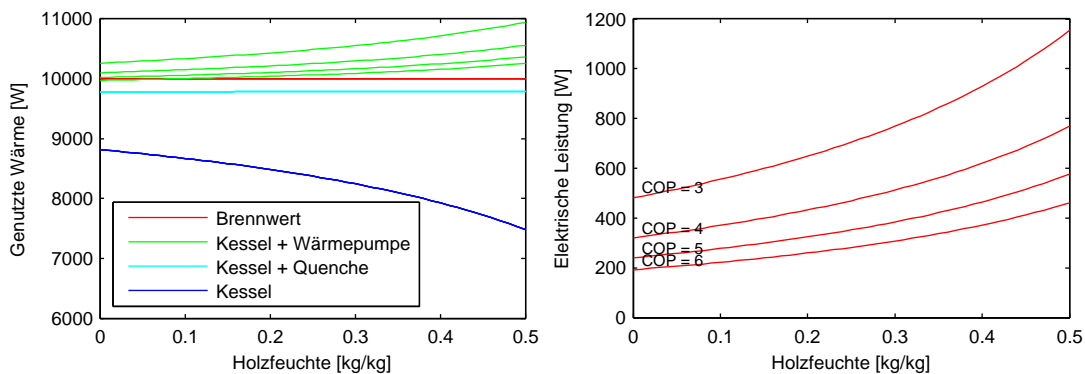


Abbildung 4-4 Wärmeleistung (links) und elektrische Leistung (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C.

Abbildung 4-5 zeigt dazu den Wirkungsgrad bezogen auf Heizwert und Brennwert. Auch hier ist wieder zu sehen, dass ein niedrigerer COP zu einem höheren Wirkungsgrad führt, da der benötigte Strom nicht in den Wirkungsgrad einbezogen wird.

Thermischer Wirkungsgrad bei unterschiedlicher Holzfeuchte

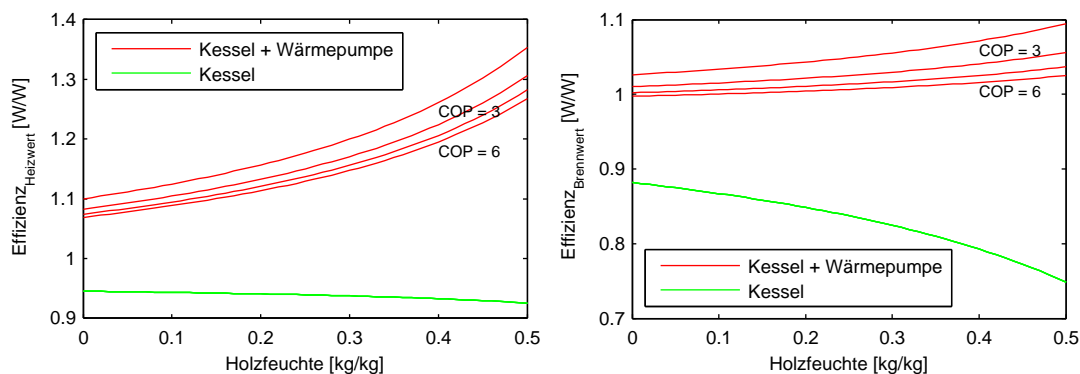


Abbildung 4-5 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C.

Temperaturen und Wassergehalt im Abgas bei unterschiedlicher Holzfeuchte

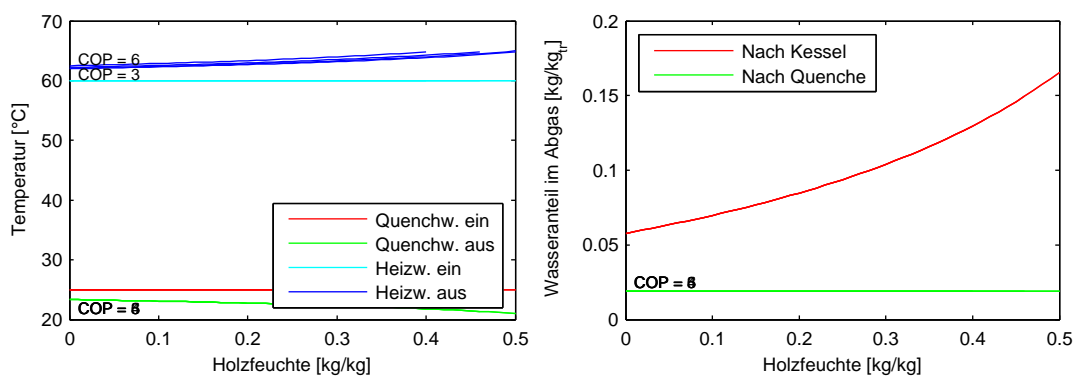


Abbildung 4-6 Wärmeleistung (links) und elektrische Leistung (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C.

4.1.3 Veränderung der Holzfeuchte bei konstanter Carnot-Effizienz

Da der COP der Wärmepumpe stark von den jeweiligen Temperaturen abhängt, wurde nun statt der Variation des COP eine konstante Carnot-Effizienz von 0.5 gesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

Gesamtwirkungsgrad bei unterschiedlicher Holzfeuchte

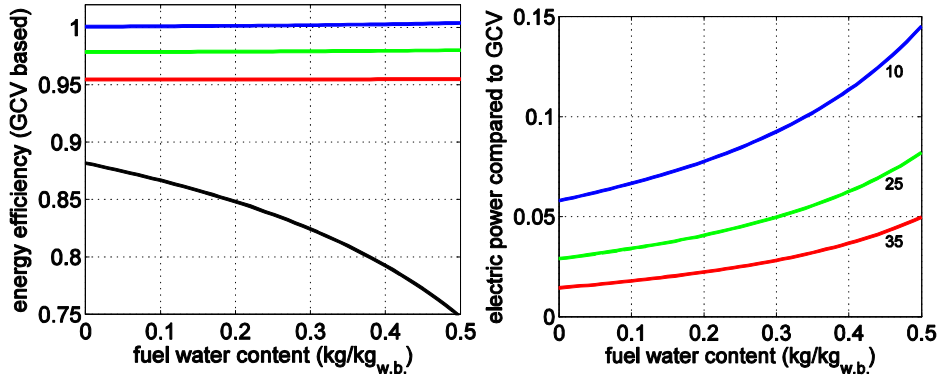


Abbildung 4-7 Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert (links) und Verhältnis von Strom zu Brennstoffenergie (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Quenche-Austrittstemperaturen (blau 10°C, grün 25°C, rot 35° C).

4.1.4 Veränderung der Heizwassertemperatur

Die Veränderung der Heizwassertemperatur bei gegebener Wärmepumpenleistung wurde ebenfalls mit konstanter Carnoteffizienz berechnet. Deutlich zu sehen ist, dass die Energieeffizienz zwar unabhängig von der Heizwassertemperatur ist, der Anteil an elektrischer Energie jedoch deutlich zunimmt.

Gesamtwirkungsgrad bei unterschiedlicher Heizwassertemperatur

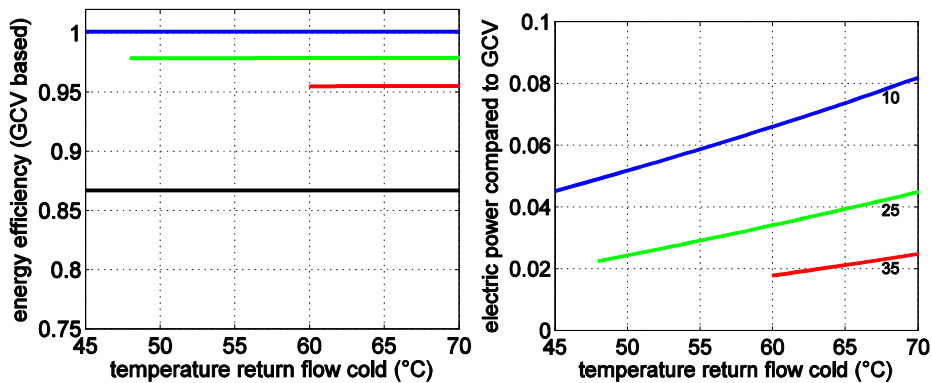


Abbildung 4-8 Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert (links) und Verhältnis von Strom zu Brennstoffenergie (rechts) in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur bei unterschiedlichen Quenche-Austrittstemperaturen (blau 10°C, grün 25°C, rot 35° C).

4.1.5 Veränderung der Abgastemperatur am Eintritt

Die Abgastemperatur nach dem Kessel bestimmt maßgeblich den Kesselwirkungsgrad. Diese Wärme ist jedoch immer sensible Wärme und nicht die Kondensationswärme des Wassers, da

die Abgastemperatur immer über dem Taupunkt des Abgases liegt. Je höher die Abgastemperatur, desto schlechter ist der Kesselwirkungsgrad, und desto mehr Wärme kann im Kondensationsmodul zurückgewonnen werden. Abbildung 4-9 zeigt die gewonnene Wärme bei Abgastemperaturen zwischen 90 und 180°C. Die Effizienzsteigerung in Bezug auf Brenn- und Heizwert entspricht jenen in Tabelle 4-3.

Wärmeleistung bei unterschiedlicher Abgastemperatur

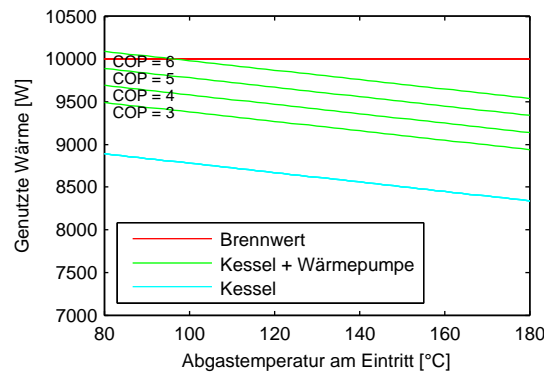


Abbildung 4-9 Wärmeleistung in Abhängigkeit der Abgaseintrittstemperatur bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

Zusätzlich stellt Abbildung 4-10 den Zusammenhang zu den Temperaturen und der Wassermenge im Abgas dar. Deutlich zu sehen ist der Anstieg des Wasseranteils im Abgas bei kleinem COP und gleichzeitig hohen Abgastemperaturen. Das heißt, hier wird in der Quenche nicht kondensiert sondern verdampft. Trotzdem überträgt das Abgas Wärme an das Quenchwasser, allerdings in Form von sensibler Wärme.

Temperaturen und Wassergehalt im Abgas bei unterschiedlicher Abgastemperatur

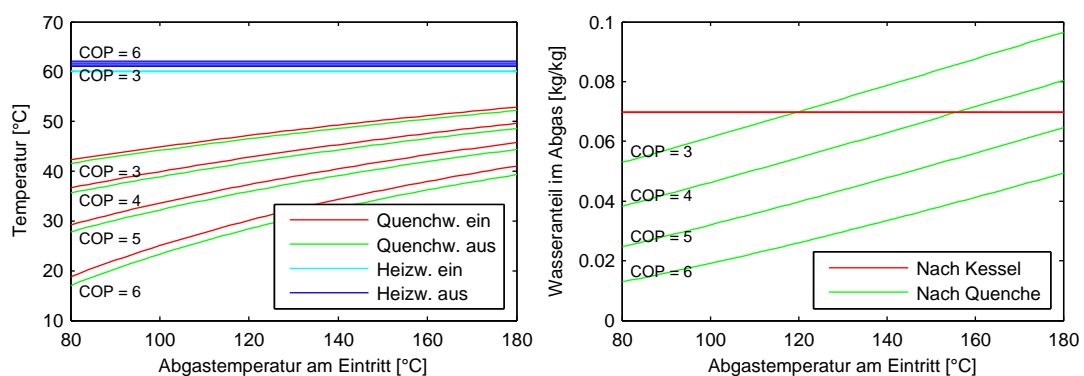


Abbildung 4-10 Quell- und Senktemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der Abgaseintrittstemperatur bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

4.1.6 Veränderung der elektrischen Leistung der Wärmepumpe

Die elektrische Leistung der Wärmepumpe bestimmt gemeinsam mit der Leistungszahl die Wärmeübertragungsleistung der Wärmepumpe. Ziel ist eine optimale Wärmepumpenleistung, die möglichst viel Wärme bei einer hohen Leistungszahl überträgt. Abbildung 4-11 zeigt die Wärmeleistung, die mit Erhöhung der elektrischen Leistung linear ansteigt, wobei die Steigung von der Leistungszahl abhängig ist. Abbildung 4-12 zeigt wieder die Wirkungsgrade in Bezug auf Brennwert und Heizwert.

Wärmeleistung bei unterschiedlicher elektr. Wärmepumpenleistung

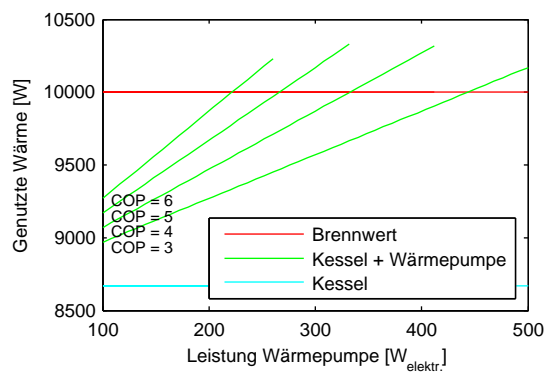


Abbildung 4-11 Wärmeleistung in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

Thermischer Wirkungsgrad bei unterschiedlicher elektr. Wärmepumpenleistung

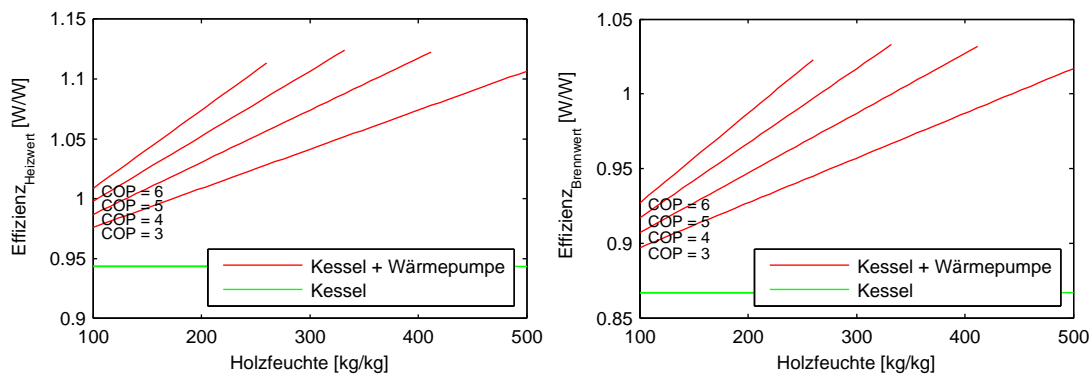


Abbildung 4-12 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

In Abbildung 4-13 sind Temperaturen und Wasserbeladung des Abgases zu sehen. Die Quenchttemperaturen fallen mit höherer Leistung immer stärker ab, während die Feuchtigkeit bei kleinen Leistungen stärker abfällt als bei großen. Bei sehr kleinen Leistungen ist der

Temperatursprung so gering, dass die Wasserbeladung im Quench zunimmt, bei höheren Leistungen ist dies nicht der Fall.

Temperaturen und Wassergehalt im Abgas bei unterschiedlicher elektr. Wärmepumpenleistung

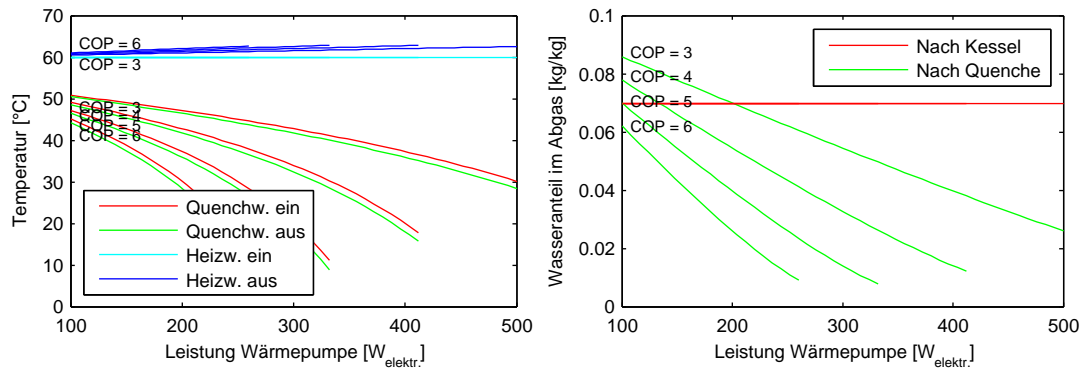


Abbildung 4-13 Quell- und Senkentemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP).

Da der COP von der Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke abhängt, ist eine Optimierung bezüglich der Wärmepumpenleistung in Bezug auf die übertragene Wärme sinnvoll.

4.1.7 Veränderung der Kesselleistung

Alle bis jetzt diskutierten Fälle gehen von einem 10kW-Kessel aus. Wenn eine andere Kesselgröße betrachtet wird, müssen daher alle zeitabhängigen Parameter (Durchflüsse, Massenzufuhr, elektrische Leistung) mit der Kesselgröße skaliert werden. Andere Anpassungen sind nicht notwendig.

4.1.8 Zusammenfassung der thermodynamischen Analyse

Aus den Berechnungen können folgende Rückschlüsse gezogen werden: Aktive Abgaskondensation erhöht deutlich den Wirkungsgrad. Bei den Berechnungen ergibt sich ein brennwertbezogener Wirkungsgrad von 95-100% (im Vergleich zu 75-88% ohne aktive Kondensation). Dies entspricht 102-121% heizwertbezogenem Wirkungsgrad (im Vergleich zu 93-95% ohne aktive Kondensation).

Durch die aktive Kondensation wird der Wirkungsgrad deutlich unabhängiger vom Wassergehalt des Brennstoffs, d.h. es können auch feuchte Brennstoffe mit hohem Wirkungsgrad verbrannt werden. Insgesamt ist zu beachten, dass die Wassertemperaturen einen starken Einfluss auf den benötigten elektr. Strom und den COP der Wärmepumpe haben. In den Berechnungen ergaben sich COP von 2.5-6 und elektrische Energie von 2-15% des Brennwertes.

Zusätzlich zur Betrachtung der Systeme im Kleinleistungsbereich wurde ein Fernheizkraftwerk (FHKW) untersucht. Dies unterscheidet sich deutlich von der Größenordnung, da es eine Feuerungsleistung von bis zu 8MW hat. In diesem FHKW ist bereits eine Kondensationsanlage mit Rohrbündelwärmetauschern eingebaut. Da jedoch der Fernwärmerücklauf relativ hoch ist (48-54°C), wurde im Rahmen des Projekts Voruntersuchungen zum Einbau einer Wärmepumpe durchgeführt. Dazu wurde das Modell an den Aufbau des FHKW's angepasst und für zwei verschiedene Leistungsstufen variiert. Durch den Einbau der Wärmepumpe ist eine Erhöhung der Leistung um bis zu 1.5MW möglich. Bei gleichbleibendem Wärmebedarf kann damit anteilig die Holzzufuhr verringert werden.

4.2 Ergebnisse der ökonomischen Analyse

Anhand der drei Fallbeispiele wurde jeweils eine ökonomische Analyse durchgerechnet. Da die Energiepreise starken Schwankungen unterliegen, ist eine langfristige Analyse nur schwer möglich. Prinzipiell zeigen die thermodynamische Analyse und die Leistungsdaten der Wärmepumpenhersteller, dass im Kleinleistungsbereich mit einem COP von 4 bis 5 gerechnet werden kann. Um im Betrieb wirtschaftlich zu sein, muss das Verhältnis von Brennstoffpreis zu Strompreis größer als der COP sein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Brennstoffpreis pro erzeugte Wärmeeinheit, also inklusive der Verlust, berechnet werden muss.

4.2.1 Kleinleistungsbereich (Pellet und Hackschnitzel)

Für Haushalte kann heute (Winter 2011/12) von einem Strompreis von 19c/kWh, einem Pelletpreis von 6c/kWh und einem Hackschnitzelpreis von 3c/kWh ausgegangen werden.

Für zwei typische Anwendungsfälle wurde die Umsetzbarkeit direkt bewertet. Für eine Hackschnitzelheizung mit Kesselleistung von 50kW, ergibt sich eine Wärmepumpe im Bereich von etwa 7kW, also die kleinsten am Markt verfügbaren Geräte. Hier kann von einem Wärmepumpenpreis von 8000€ ausgegangen werden, das Gesamtmodul inkl. Installationskosten wurde auf 11.000€ geschätzt. Für eine Pelletheizung im Bereich von 15kW Heizleistung sind am Markt keine Geräte vorhanden. Es gibt jedoch Kältetechnikbetriebe, die uns eine selbstzusammengestellte Wärmepumpe mit etwa 1.5kW bei 2500€ angeboten haben, die die Voraussetzungen erfüllt. In diesem Fall wird das Gesamtsystem mit 4300€ abgeschätzt. Die Abschätzung der Amortisationszeit ist stark abhängig von der Entwicklung der Energiepreise.

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Wie die Analyse zeigt, sind zwar die Kosteneinsparungen pro Jahr positiv, doch so gering, dass sich eine Investition nicht direkt rechnet. Da der spezifische Preis pro kWh bei Pellets deutlich höher ist, ergeben sich bei Pelletsheizungen höhere Einsparungen gegenüber Hackschnitzel. Im Gegenzug ermöglichen Hackschnitzel bessere Wirkungsgrade, da die Kondensationstemperatur höher ist. In beiden Fällen ist jedoch die Amortisationszeit nicht wirtschaftlich. Daher ist eine Investition aus wirtschaftlichen Gründen vorerst nicht denkbar. Die

Wirtschaftlichkeit verbessert sich bei geringeren Rücklauftemperaturen und größeren Kesselleistungen, da sich diese Maßnahmen positiv auf den COP auswirken.

Ökonomische Analyse im Kleinleistungsbereich

| Parameterbezeichnung | Pellet 15kW | Pellet 50kW | Hack-schnitzel 50kW | Einheit |
|-------------------------------|-------------|--------------|---------------------|---------------|
| Betriebspunkt | | | | |
| Temperatur WP Quelle Eintritt | 20-30 | 20-30 | 20-30 | °C |
| Temperatur WP Senke Eintritt | 60 | 60 | 60 | °C |
| Kälteleistung | 1.5-1.8 | 1.5-1.8 | 7-8 | kW |
| Leistungszahl | 4 | 4 | 4.5 | kW/kW |
| Investitionskosten | 4300 | 11000 | 11000 | € |
| Wärmepumpe | 2500 | 8000 | 8000 | € |
| Quenche | 1000 | 2000 | 2000 | € |
| Installation | 800 | 1000 | 1000 | € |
| Kosteneinsparung | 54 | 250 | 16 | €/Jahr |
| Brennstoff original | 1100 | 3800 | 1765 | €/Jahr |
| Brennstoff | 975 | 2895 | 1453 | €/Jahr |
| Strom | 71 | 3217 | 296 | €/Jahr |
| Amortisationszeit | 80 | 44 | 687 | Jahre |

Tabelle 4-4: Ökonomische Bewertung für die beiden Standardfälle 15kW Pellet und 50kW Hackschnitzelheizung

Ein Weg zur Verbesserung der ökonomischen Bilanz ist die Erhöhung des Wärmepumpenwirkungsgrades. Wie aus der thermodynamischen Analyse ersichtlich, ist es auch möglich Wärmepumpen mit einem COP von 6 zu betreiben. Allerdings ist in diesem Fall entweder eine sehr hohe Auskopplungstemperatur (also hohe Abgastemperaturen und ein hoher Wassergehalt) oder niedrige Rücklauftemperaturen (z.B. 35-45°C) notwendig.

4.2.2 Fernheizwerk

Zusätzlich zur Betrachtung des Systeme im Kleinleistungsbereich wurde das Fernheizwerk untersucht, das Interesse an einem aktiven Abgaskondensationssystem hat. Dies unterscheidet sich deutlich von der Größenordnung, da es eine Feuerungsleistung von bis zu 8MW hat. Im Fernheizwerk ist bereits eine Kondensationsanlage mit Rohrbündelwärmetauschern eingebaut. Da jedoch der Fernwärmerücklauf relativ hoch ist (48-54°C), wurde im Rahmen des Projekts Voruntersuchungen zum Einbau einer Wärmepumpe durchgeführt. Dazu wurde das Modell an den Aufbau angepasst und für zwei verschiedene Leistungsstufen variiert. Durch den Einbau der Wärmepumpe ist eine Erhöhung der Leistung um bis zu 1.5MW möglich. Bei gleichbleibendem Wärmebedarf kann damit anteilig die Holzzufuhr verringert werden.

Anhand der Daten für ein Winterhalbjahr und der Modellierung der Wärmetauscher wurde der Einbau einer aktiven Kondensationsanlage bewertet. Ausgangsbasis sind folgende 24.3 €/MWh für die Biomasse nach Lagerverlusten und 100€/MWh für Strom. Die Wärmepumpenkosten wurden mit 190.000 für die Wärmepumpe und weiteren 80.000 für Installation und Umbauten

berechnet. Der Betrieb im ersten Jahr ergibt eine Einsparung von etwa 20.000 Euro. Daraus berechnet sich die Zeit bis zur Abzahlung zu 10 Jahren.

4.2.3 Zusammenfassung der ökonomischen Analyse

Abgeleitet aus den derzeitigen Energiepreisen ist der Betrieb einer aktiven Abgaskondensation in Pelletheizungen im Betrieb gewinnbringend. Da Hackschnitzel deutlich günstiger sind, ist der Einbau einer aktiven Kondensationsanlage im Betrieb in etwa gleich zu bewerten wie die Anlage ohne Kondensation.

Werden zusätzlich die Installationskosten berücksichtigt zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse eine deutliche Abhängigkeit von der Leistungsgröße des Zielsystems. Da für Anlagen ab 50kW Kesselleistung bereits alle Komponenten (vor allem die Wärmepumpe) am Markt erhältlich sind, steht einer Umsetzung nichts im Wege. Die Kosten der Wärmepumpe sind am stärksten von der Größe abhängig. Während Wärmepumpen im Leistungsbereich ab 20kW bei Preisen von 300-500 €/kW erhältlich sind, kosten Wärmepumpen im Bereich von 7-10kW 1000-3000 €/kW.

Neben der Wirtschaftlichkeit gibt es jedoch durchaus Gründe für den Einbau solcher Anlagen im Kleinleistungsbereich, nämlich einerseits die Emissionsminderung und andererseits bei zu geringer Kesselleistung als Zusatzheizsystem.

Wie nachfolgend gezeigt ergibt sich im Gegensatz zum Kleinleistungsbereich bei der Analyse des FHKW durchaus eine positive Wirtschaftlichkeit.

4.2.4 Potentielle Einsatzgebiete

Eine Erhöhung des Nutzwärmebedarfs durch Erweiterung der Wohnfläche, Zubauten oder Integration externer Verbraucher (z.B. Schwimmbadheizung) führt in der Regel zur Anschaffung zusätzlicher Einzelheizungen, die aufgrund der geringen geforderten Leistung oft mit Strom betrieben werden. Durch den Einsatz einer aktiven Kondensationskomponente kann die Heizleistung des bestehenden Systems je nach Brennstoff um 10% bis 30% gesteigert werden, ohne die Brennstoffkosten zu erhöhen.

Bei Nahwärmenetzen kann durch die Nachrüstung mit aktiver Abgaskondensation das Wärmeangebot für zusätzliche Kunden erweitert werden, ohne die Kesselgröße oder den Brennstoffbedarf zu erhöhen.

Bei Neubauten oder Renovierung führt die Effizienzsteigerung durch aktive Kondensation zu geringeren nominellen Kesselleistungen, kleineren Abmessungen der notwendigen Brennstofflager und damit zu einer Verringerung des spezifischen Platzbedarfs von Biomasseheizsystemen.

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt ActiveCond wurde die technische Realisierbarkeit und Bewertung von Systemen zur aktiven Abgaskondensation durchgeführt. Die Erhebung des Stands der Technik zeigen, dass für Anlagen ab 50kW Feuerungsleistung alle notwendigen Komponenten am Markt sind. Für kleinere Feuerungsleistungen wurden auch Kältetechnikhersteller gefunden, die Wärmepumpen in dem Leistungssegment fertigen können. Das heißt, dass eine technische Umsetzung prinzipiell möglich ist.

Aus den thermodynamischen Modellierung können folgende Rückschlüsse gezogen werden: Aktive Abgaskondensation erhöht deutlich den Wirkungsgrad. Aus den Berechnungen ergibt sich ein brennwertbezogener Wirkungsgrad von 95-100% (im Vergleich zu 75-88% ohne aktive Kondensation). Dies entspricht 102-121% heizwertbezogenem Wirkungsgrad (im Vergleich zu 93-95% ohne aktive Kondensation).

Durch die aktive Kondensation wird der Wirkungsgrad deutlich unabhängiger vom Wassergehalt des Brennstoffs, d.h. es können auch feuchte Brennstoffe mit hohem Wirkungsgrad verbrannt werden. Insgesamt ist zu beachten, dass die Wassertemperaturen einen starken Einfluss auf den benötigten elektr. Strom und die Leistungszahl der Wärmepumpe haben. In den Berechnungen ergaben sich Leistungszahlen von 2.5-6 und eine benötigte elektrische Energie von 2-15% des Brennwertes. Der zusätzliche Bedarf an Strom führt im Fall von hohen Wärmepumpenleistungszahlen (ab einem COP von 4) zu einer deutlichen Senkung des Primärenergieaufwandes.

Bei der Kondensation von Wasserdampf aus dem abströmenden Abgas im Kondensationswärmetauscher werden Partikel gebunden und mit dem Kondensat abgeschieden. Wärmerückgewinnung durch Kondensation hat somit einen zusätzlichen Nutzen durch die Reduktion von Partikelemissionen im Abgas. Das technische Konzept sieht den Einbau einer Quenche vor, da dadurch die Materialbeständigkeit gewährleistet wird. Das Einspritzen des Wassers in der Quenche führt zu einer Staubreduktion von etwa 30%, wobei vor allem größere Partikel abgeschieden werden.

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass der Einsatz von aktiven Kondensationssystemen im Betrieb stark von den Energiepreisen abhängt. Derzeit ist der Betrieb einer aktiven Kondensation im Haushaltsbereich für Pelletheizungen jedenfalls positiv, für Hackschnitzel ist weder ein Verlust noch ein Gewinn zu erwarten. Berücksichtigt man zusätzlich die Installationskosten, ergeben sich jedoch vor allem im Kleinleistungsbereich (10-15kW) keine wirtschaftlichen Amortisationszeiten. Eine weitere Untersuchung für ein Fernheizwerk (8MW) zeigt, dass die Amortisationszeit durch die Anlagengröße deutlich reduziert werden kann.

Als potentielle Einsatzgebiete kommen vor allem Nachrüstungen im Zuge eines Ausbaus in Frage, wo sonst eine Extraheizung angeschafft werden würde. Ein weiteres Einsatzgebiet sind in jedem Fall Nah- und Fernwärmenetze, da bei dieser Größenordnung die Wirtschaftlichkeit gegeben ist.

6 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse des Projekts ActiveCond zeigen deutlich, dass der Einbau einer Wärmepumpe des Gesamtwirkungsgrad von Biomassekesseln deutlich erhöht. Der zusätzliche Bedarf an Strom führt im Fall von hohen Wärmepumpenleistungszahlen (ab einem COP von 4) zu einer Senkung des Primärenergieaufwandes. Naheliegendes Folgeprojekt ist daher die Umsetzung einer Demoanlage im kleinen oder mittleren Leistungsbereich. Ziel dieser Demoanlage ist die Überprüfung der technischen Machbarkeit und das Monitoring des Systems über einen längeren Zeitraum. Ziel dieser Demoanlage ist

- Zeigen der technischen Umsetzbarkeit
- Überprüfung der Komponenten auf ihre Tauglichkeit bezüglich Materialbeständigkeit etc.
- Vergleich der in diesem Projekt aufgezeigten Betriebsbedingungen mit Monitoringdaten mit einem Schwerpunkt auf den elektrischem Verbrauch
- Messung der realen Partikelabscheidungsgrade

Zusätzlich ergibt sich aus den Projektergebnissen weiterer Forschungsbedarf. Da für Standardanlagen im Kleinleistungsbereich derzeit keine Wärmepumpe am Markt erhältlich ist, ist die Neuentwicklung eines ActiveCond-Moduls mit 1-3kW Heizleistung, die logische Weiterführung der Projektergebnisse.

Unabhängig von der Leistungsgröße sind folgende Punkte möglicher Forschungsgegenstand zur Weiterentwicklung eines ActiveCond-Moduls:

- Kältemittel, das gut an die Temperaturen angepasst ist, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen
- Integration des Verdampfers der Wärmepumpe in den Abgasstrom um eine direkte Wärmeübertragung zu ermöglichen und dadurch den Materialaufwand zu reduzieren
- Tiefergehende Untersuchung zur Kopplungswirkung der Abgasreinigung mit der aktiven Abgaskondensation um den Gesamtnutzen des Moduls in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Emissionsminderung zu optimieren
- Untersuchung alternativer wärmebetriebener Wärmepumpen, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. In diesem Fall ist der Stand der Technik jedoch noch nicht bei der Marktreife, daher würde das auch Grundlagenforschung einschließen

7 Literaturverzeichnis

[AAEV 2010]

Rechtsinformationssystem des Bundes (Hrsg.): *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV)*;
<http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977>; Stand: 2010-06-04; S. 6, 12.

[AEV 2010]

Rechtsinformationssystem des Bundes (Hrsg.): *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Begrenzung von Abwasseremissionen aus der Reinigung von Verbrennungsgas (AEV Verbrennungsgas)*;
<http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002742>; Stand: 2010-06-04.

[Baehr 2009]

Baehr, H. D.; Kabelac, S.: *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*; ISBN 0937-7433, 14. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009; S. 470-471, 584.

[Baumgartner 2008]

Baumgartner, M.; Nussbaumer, T. (Hrsg.): *Abgaskondensation zur Wirkungsgraderhöhung und Feinstaubabscheidung ab 100kW und Kombination mit Nass-Elektroabscheidung ab 1MW*; in: Tagungsband des 10. Holzenergie-Symposium, Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung; Verenum, Zürich; und Bundesamt für Energie, Bern, 2008; S. 217.

[Baumgartner 2010]

H. Baumgartner & Sohn AG (Hrsg.): *Prospekt EKO-Rauchgaswäscher und –kondensator*; www.saveenergy.ch; Stand: 2010-05-12.

[Baumgartner 2010a] H. Baumgartner & Sohn AG (Hrsg.): *Produkteinformation Svensk Rökgasenergi*; www.saveenergy.ch; Stand: 2010-05-12.

[Berger 2010] Persönliches Fachgespräch mit Herrn Erwin Berger; Firma Vaillant Group Austria GmbH, Forchheimergasse 7, A-1230 Wien; am 2010-04-26.

[Bergmann 2002]

Bergmann, T.; Tamm, U.; Ruch, M.: *Erste Betriebserfahrungen – Neue Hochtemperatur-Brennwerttechnologie*, in: Euroheat&Power, 31.Jg. (2002), Heft 12. S. 36-39, 2;

[Bergmann 2010]

Persönliches Fachgespräch mit Herrn Thomas Bergmann; Firma BHF Verfahrenstechnik GmbH, Zwenkauer Straße 159, D-04420 Markranstädt; am 2010-05-12.

[BHF 2010]

Homepage der Firma BHF Verfahrenstechnik GmbH; www.bhf-verfahrenstechnik.de; Stand: 2010-05-12.

[Bitzer 2008]

Bitzer Kühlmaschinen GmbH (Hrsg.): *Der Kältemittelreport*, Sindelfingen (GER), 2008; www.bitzer.de; Stand: 2010-04-13.

[Bomat 2010]

Bomat Heiztechnik GmbH (Hrsg.): *Produktliste Profitherm Abgaswärmetauscher* (gültig ab 01.05.2010), www.bomat.de/index.php?dhid=52; Stand 2010-04-22; S. 8.

[Bschor 2010]

Homepage der Firma Bschor GmbH: www.carbonizer.de; Stand: 2010-05-03.

[Cube 1997]

v. Cube, H. L.; Steimle, F.; Lotz, H.; Kunis, J. (Hrsg.): *Lehrbuch der Kältetechnik, Band 2*; 4. Auflage, ISBN 3-7880-7509-0, C.F. Müller Verlag, Hüthing GmbH; Heidelberg, 1997; S. 1270-1272.

[Datzreiter 2010]

Persönliches Fachgespräch mit Herrn Leopold Datzreiter; Firma ÖkoFEN Metall- & Heiztechnik GmbH, Gewerbestraße 6, 3251 Purgstall/Erlauf; am 2010-06-01.

[Eder 2007]

Eder, G.: *Perspektiven des Einsatzes landwirtschaftlicher Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Pelletsbrennstoffen*; Dissertation, Johannes Kepler Universität, Linz; 2007; S. 209-210, 24.

[Ellner 2010]

Ellner-Schuberth, F.; Hartmann, H.; Turowski, P.; Roßmann P.: *Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen*. Berichte aus dem TFZ Band 22, Straubing; 2010. S. 114ff.

[EP 0 857 923 B1]

Europäischen Patentamt (Hrsg.): *Europäische Patentschrift – EP 0 857 923 B1*; www.espacenet.com; Stand: 2010-05-11. S. 8;

[EP 2010]

Homepage des europäischen Patentamtes: http://ep.espacenet.com/?locale=de_ep
Stand: 2010-04-30.

[Fröling 2010]

Fa. Fröling Heizkessel- und Behälter GmbH (Hrsg.): *Prospekt Pelletskessel „P4-Pellet“*; www.froeling.at; Stand: 2010-06-08.

[Gaderer 2007]

Gaderer, M.: *Wärmeversorgung mit fester Biomasse bei kleiner Leistung*; Dissertation, Technische Universität, München, 2007. S. 53, 151ff, 151-159, S160-161, 58.

[Good 1998]

Good, J.; Neuenschwander, P.; Nussbaumer, T.: *Grundlagen der Abgaskondensation bei Holzfeuerungen*; Publikation des Bundesamt für Energie (BFE) (Hrsg.), Publikationsnummer: 195080, Bern (CH), 1998; <http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/>, Stand: 2010-04-01. S. 12, 16, 13, 18.

[Götaverken 2010]

Firma Götaverken Miljö AB (Hrsg): *Flue gas cleaning and energy recovery Umeå*, SE; www.gmab.se/eng_trycksaker.htm; Stand: 2010-05-25.

- [Götaverken 2010a]
 Firma Götaverken Miljö AB (Hrsg.): *Extended energy recovery using FGC – Vestforbraending WTE plant*, DK;
www.gmab.se/eng_trycksaker.htm; Stand 2010-04-19.
- [Graessl 2010]
 E-Mail von Herrn Harald Gräßl, Kohlbach Gruppe, Grazer Straße 23, A-9400
 Wolfsberg; harald.graessl@kohlbach.at; am 2010-05-28.
- [Groß 2010]
 Persönliches Fachgespräch mit Herrn Bodo Groß; Institut für ZukunftsEnergieSysteme
 (IZES); IT Park Saarland, Gebäude A1, Altenkesseler Straße 17, D-66115
 Saarbrücken; am 2010-05-19.
- [Hägg 2010]
 E-Mail von Herrn Ulf Hägg, Firma Götaverken Miljö AB, Box 8876, S-402 72 Göteborg;
ulf.hagg@gmba.se, Stand: 2010-05-26.
- [Hartmann 2004]
 Hartmann, H. (u. a.): *Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen
 Holz hackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher*, Technologie- und
 Förderzentrum (TFZ) (Hrsg.), Straubing (GER), 2004.
- [Hartmann 2007]
 Hartmann, H. (u. a.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*; Fachagentur
 Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.); Gülzow (GER), 2007; S. 121, 122.
- [Hebenstreit 2011]
 Hebenstreit, B.; Schnetzinger, R.; Ohnmacht, R.; Höftberger, E.: *Efficiency Optimization
 of Biomass Boilers by a Combined Condensation - Heat Pump - System*. 1465-1477,
 ECOS 2011: 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization,
 Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Novi Sad, 2011
- [Heinz 2004]
 Heinz, A. (u. a.): *Gutachten: Nachrüstung bestehender Holzkesselanlagen zu
 schadstoffarmen BHKW mit Brennwertnutzung – Verfahrensanalyse, Bewertung,
 Potenziale*; Juni 2004, www.trig-cycle.info/german/download.htm, Stand: 2010-04-14;
 S. 14-16.
- [Humme 2010]
 Persönliches Fachgespräch mit Herrn Marc Humme, Firma Bomat, Zum Degenhardt
 49, D-8662 Überlingen/Bodensee; am 2010-04-22 und 2010-05-27.
- [Jeong 2010]
 Jeong, K.; Kessen, M.; Bilirgen, H.; Levy, K.: *Analytical modeling of water condensation
 in condensing heat exchanger*. International Journal of Heat and Mass Transfer 53,
 2010. S. 2361-2368.
- [Kaltschmitt 2001]
 Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken
 und Verfahren*; ISBN 3-540-64853-4, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2001. S. 387-
 389, 390, 263, 264-265, 364.
- [Kandler 2010]
 E-Mail von Herrn Kandler; Firma eMAX Energiesysteme GmbH, Große Bleichen 34, D-
 20354 Hamburg; A.Kandler@emax.de; am 2010-05-26.

- [Kimmerle 2010]
Persönliches Fachgespräch mit Herrn Kimmerle, Firma Bschor GmbH, An der Kohlplatte 7, D-89429 Höchstädt/Donau; am 2010-04-30.
- [Lugmayr 2010]
Persönliches Fachgespräch mit Herrn Werner Lugmayr; Firma Fröling Heizkessel- und Behälter GmbH, Industriestraße 12, A - 4710 Grieskirchen; am 2010-06-08.
- [NB 2010]
Homepage der österreichischen Nationalbank: Fremdwährungs-Referenzkurse zum Euro vom 2010-06-01,
<http://www.oenb.at/ebusinesszinssaetze/zinssaetzewechselkurse>; Stand: 2010-06-02.
- [Oberberger 1996]
Oberberger, I.; Panholzer, F.; Arich, A.: *System- und pH-Wert abhängige Schwermetalllöslichkeit im Kondensatwasser von Biomasseheizwerken*, Endbericht; Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr (Hrsg.), Wien; 1996 S. 53, 1 (Anhang 2), 115, 82.
- [ÖkoFEN, 2010]
Firma ÖkoFEN Metall- & Heiztechnik GmbH (Hrsg.): *Verbrennungs- und Kesseltechnik*; Gewerbestraße 6, 3251 Purgstall/Erlauf; 2010.
- [Ortner 2006]
Ortner, H.; Nussbaumer, T (Hrsg): *Technik moderner Pelletskessel mit Brennwerttechnik*, in: Tagungsband des 9. Holzenergie-Symposium, Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung; Verenum, Zürich; und Bundesamt für Energie, Bern, 2006; S. 117-119.
- [Pretzl 2010]
Persönliches Fachgespräch mit Herrn Pretzl, Firma Scheuch GmbH, Weierfing 68, A-4971 Auroldmünster; am 2010-05-12.
- [Scheuch 2010]
Scheuch GmbH (Hrsg.): Prospekt *ERCS (Energy-Recovery-Cleaning-System)*, www.scheuch.at; Stand: 2010-04-22.
- [Schmidt 2010]
Persönliches Fachgespräch mit Herrn Ralf Schmidt; Firma Zeolith-Technologie GmbH; Ohmstraße 3, D-85716 Unterschleissheim; am 2010-05-06.
- [Schräder 2010]
Schräder Abgastechnologie (Hrsg.): *Flyer AL-Top, AWT-TOP*, www.schraeder.at, Stand: 2010-04-19.
- [Schramek 2007]
Schramek, E.-R. (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*, 71. Auflage, ISBN 3-486-26534-2, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2007; S. 206, 693, 622.
- [Schwabl 2008]
Schwabl, M.: *Untersuchung der Staubemissionen einer Prototyp Strohpelletsfeuerung, sowie Ermittlung des Potentials einer Emissionsreduktion durch einen Brennwertwärmetauscher mit Wäscher*, Masterarbeit; Technische Universität, Wien, 2008; S. 93.

- [Stahel 2010]
 Persönliches Fachgespräch mit Herrn Roger Stahel, Firma H. Baumgartner & Sohn AG, Neuhofstraße 52, CH-8315 Lindau/Zürich; am 2010-05-18.
- [Stiglbrunner 1995]
 Stiglbrunner, R. (u. a.): *Beurteilung der Kondensationsanlage der Biomasseheizanlage Pfarffwerfen*; Abschlussbericht; Joanneum Research - Institut für Energieforschung (Hrsg.)Graz, 1995; S. 33.
- [SWET 2010]
 Homepage der Firma SWET (Sailer Walter Energie Technik) GmbH: www.swet.at; Stand: 2010-04-29.
- [TFZ 2004]
 Technologie- und Förderzentrum (TFZ) (Hrsg.): *Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelfeuerungen mit Sekundärwärmetauscher*, Eigenverlag TFZ, Straubing (GER), 2004. S. 33, 22;
- [TRIG 2010]
 Homepage des Projektes „TRIG“ des Fraunhofer Institutes für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik; www.trig-cycle.info; Stand: 2010-05-17.
- [Vaillant 2010]
 Vaillant Group Austria GmbH (Hrsg.): *Das Komplettsystem der Zukunft: Die Energiefusion ist da! – Prospekt „zeoTHERM“-Gas-Wärmepumpe“*; www.vaillant.at; Stand: 2010-04-26.
- [VAS 2010]
 Homepage der Firma Verfahrenstechnik und Anlagensysteme (VAS) GmbH: www.vas.at; Stand: 2010-05-27.
- [VDI 2002]
 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas, 9. Auflage*; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.
- [WPZ 2009]
 Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) (Hrsg.): *WPZ-Bulletin – Informationsblatt des Wärmepumpen-Testzentrum Buchs; Ausgabe 01-2009*, WPZ Buchs (CH), 2009; <https://institute.ntb.ch/ies/waermepumpen-testzentrum-wpz/>.html; Stand: 2010-04-2.; S. 1-2.
- [WPZ 2010]
 Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) (Hrsg.): *WPZ-Bulletin – Informationsblatt des Wärmepumpen-Testzentrum Buchs; Ausgabe 01-2010*, WPZ Buchs (CH), 2010; <https://institute.ntb.ch/ies/waermepumpen-testzentrum-wpz/>.html; Stand: 2010-04-29; S. 1.
- [Zeotech 2010]
 Homepage der Firma Zeolith-Technologie GmbH; www.zeo-tech.de; Stand: 2010-05-06.

8 Anhang

8.1 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-1 Übersicht Sekundärwärmetauscher | 11 |
| Tabelle 2-2 Übersicht Nutzungsgrade von Brennwertkesseln nach [Schramek 2007] und [Baehr 2009]. | 14 |
| Tabelle 2-3 Übersicht mittlere COP und Listenpreis (nur Wärmepumpe) der Kompressionswärmepumpen | 17 |
| Tabelle 2-4 Übersicht Eigenschaften Kältemittel [Bitzer 2008, VDI 2002] | 20 |
| Tabelle 2-5 Übersicht Temperaturbereiche Kompressionswärmepumpen | 20 |
| Tabelle 2-6 Patente zur Brennwertnutzung bei Biomasse | 25 |
| Tabelle 2-7 Patente zu aktiver Abgaskondensation | 26 |
| Tabelle 2-8 Inhaltsstoffe im Kondensat und Grenzwerte lt. AAEV [Ökofen 2010] | 32 |
| Tabelle 2-9 Übersicht Sekundärwärmetauscher | 33 |
| Tabelle 2-10 Übersicht Kondensationsanlagen | 34 |
| Tabelle 2-11 Pellets-Brennwertkessel | 35 |
| Tabelle 4-1 Standardparameter für Berechnungen | 46 |
| Tabelle 4-2 Aus Standardparametern abgeleitete Daten zum Kessel (noch ohne Kondensationsmodul) | 47 |
| Tabelle 4-3 Standardwerte bei unterschiedlichen Leistungszahlen für die Wärmepumpe (COP) | 47 |
| Tabelle 4-4: Ökonomische Bewertung für die beiden Standardfälle 15kW Pellet und 50kW Hackschnitzelheizung | 57 |

8.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1 Erreichbare Wirkungsgrade durch Abgaskondensation (Fichtenholz - Luftverhältnis 1,5 - nur Abgasverlust berücksichtigt, Umgebungstemperatur 20°C) | 6 |
| Abbildung 1-2 Schematische Darstellung des Systems zur aktiven Abgaskondensation | 7 |
| Abbildung 2-1 Spezifischer Preis (nur Wärmepumpe) über Heizleistung | 18 |
| Abbildung 2-2 Einsatz verschiedener Kältemittel | 19 |
| Abbildung 2-3 Schema Hochtemperatur-Brennwerttechnik [EP 0857 923 B1] | 22 |
| Abbildung 2-4 Schema GMAB Anlage Umeå [Götaverken 2010] | 23 |
| Abbildung 2-5 Schema TRIG-Verfahren beim Heizen und Kühlen [TRIG 2010] | 24 |
| Abbildung 3-1 Modellschema mit Systemgrenze | 41 |
| Abbildung 3-2 Schema: Aktive Abgaskondensation über Quench und Wärmepumpe | 42 |
| Abbildung 3-3 Leistungszahlen handelsüblicher Wärmepumpen über dem Temperaturhub der Wärmepumpe. +: Sole-Wasser, o: Wasser-Wasser-Wärmepumpen. Links: Leistungszahl, Rechts: Carnoteffizienz = Verhältnis von realem COP zu maximalem COP bei Carnot-Wirkungsgrad [WPZ 2010] | 43 |
| Abbildung 4-1 Wärmeleistung in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 48 |
| Abbildung 4-2 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 49 |
| Abbildung 4-3 Quell- und Senkentemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 49 |
| Abbildung 4-4 Wärmeleistung (links) und elektrische Leistung (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C. | 50 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 4-5 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C. | 51 |
| Abbildung 4-6 Wärmeleistung (links) und elektrische Leistung (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP) und einer Quenchaustrittstemperatur von 25°C. | 51 |
| Abbildung 4-7 Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert (links) und Verhältnis von Strom zu Brennstoffenergie (rechts) in Abhängigkeit der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Quenche-Austrittstemperaturen (blau 10°C, grün 25°C, rot 35 °C). | 52 |
| Abbildung 4-8 Wirkungsgrad bezogen auf den Brennwert (links) und Verhältnis von Strom zu Brennstoffenergie (rechts) in Abhängigkeit der Rücklaufstemperatur bei unterschiedlichen Quenche-Austrittstemperaturen (blau 10°C, grün 25°C , rot 35°C). | 52 |
| Abbildung 4-9 Wärmeleistung in Abhängigkeit der Abgaseintrittstemperatur bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 53 |
| Abbildung 4-10 Quell- und Senktemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der Abgaseintrittstemperatur bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 53 |
| Abbildung 4-11 Wärmeleistung in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 54 |
| Abbildung 4-12 Thermischer Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (links) und Brennwert (rechts) in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 54 |
| Abbildung 4-13 Quell- und Senktemperaturen der Wärmepumpe (links) und Wasseranteil im Abgas (rechts) in Abhängigkeit der elektrischen Leistung der Wärmepumpe bei unterschiedlichen Wärmepumpen-Leistungszahlen (COP). | 55 |