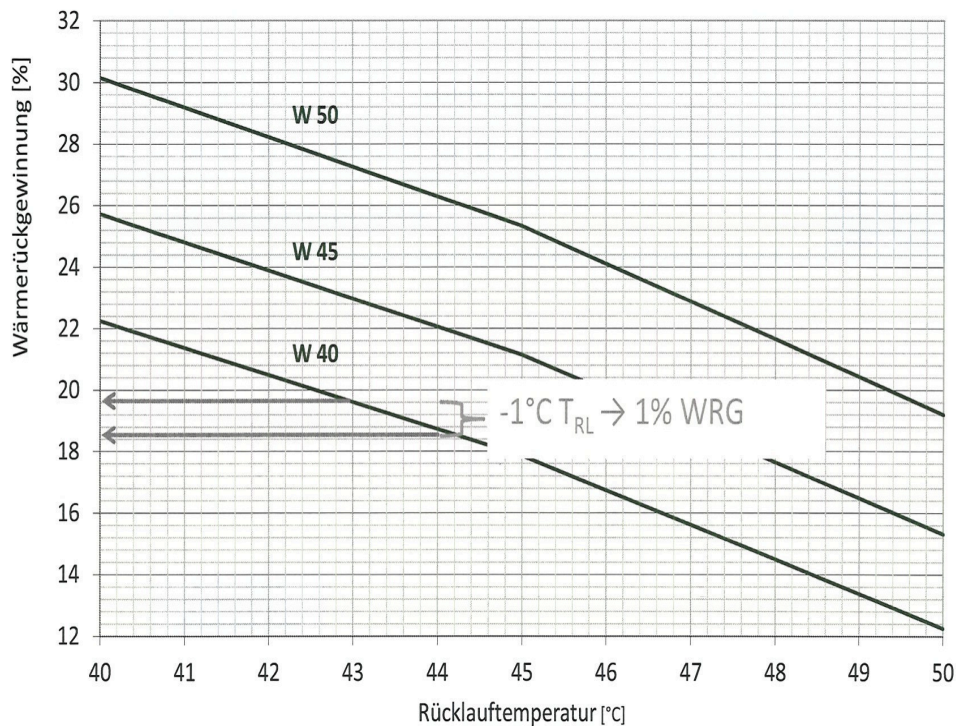




Erfolgskontrolle bei bestehenden Holzkesseln mit Abgaskondensation

Schlussbericht

Wärmerückgewinnung durch Abgaskondensation



O₂ Gehalt (feucht): 8 [vol-%] / Abgastemperatur: 180[°C] / Holzschnittel / Standort: 450 [m.ü.M]

Andres Jenni, ardens GmbH, 4410 Liestal

Liestal, 31. Juli 2014

Erfolgskontrolle bei bestehenden Holzkesseln mit Abgaskondensation

Schlussbericht

Auftraggeber

Bundesamt für Energie

Autor

Andres Jenni, ardens GmbH, 4410 Liestal

Projekt-Begleitung

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie

Bundesamt für Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, Postadresse: CH 3003 Bern

Telefon +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00, www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Daniel Binggeli

Dieser Bericht entstand im Auftrag des Bundesamts für Energie.
Für den Inhalt ist ausschliesslich der Autor verantwortlich.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 4 |
| 1 Ausgangslage | 5 |
| 2 Zielsetzung | 6 |
| 3 Vorgehen | 7 |
| 3.1 Betriebsdaten aufzeichnen und auswerten..... | 7 |
| 3.2 Einsatzgebiet, Qualitätsanforderungen..... | 7 |
| 3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 7 |
| 4 Resultate Heizperioden 2012/2013 und 2013/2014 | 8 |
| 4.1 Wärmeverbund Anlage A..... | 8 |
| 4.1.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung | 8 |
| 4.1.2 Auswertung der Betriebsdaten | 8 |
| 4.1.3 Beurteilung | 9 |
| 4.2 Nahwärmeverbund Anlage B..... | 11 |
| 4.2.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung | 11 |
| 4.2.2 Auswertung der Betriebsdaten | 11 |
| 4.2.3 Beurteilung | 12 |
| 4.3 Anlage C | 15 |
| 4.3.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung | 15 |
| 4.3.2 Auswertung der Betriebsdaten | 15 |
| 4.3.3 Beurteilung | 16 |
| 5 Schlussfolgerungen | 18 |
| 6 Ausblick..... | 24 |
| 7 Literatur | 25 |
| 8 Beilagen..... | 26 |

Zusammenfassung

Abgaskondensationsanlagen ermöglichen die effiziente energetische Nutzung der Ressource Holz.

Die theoretischen Berechnungen bei der Auslegung von Abgaskondensationsanlagen gehen häufig von einem zusätzlichen Wärmeertrag (WRG-Anteil) über die Heizperiode von 20 – (25)% aus gegenüber einem Holzkessel ohne Abgaskondensation beim Verbrennen der gleichen Brennstoffmenge.

In der Praxis liegt der Wärmeertrag (WRG-Anteil) über die Heizperiode von Abgaskondensationsanlagen mit < 10 - 15% häufig unter den theoretischen Auslegungsdaten.

Bei den drei untersuchten Anlagen, welche mit Waldhackschnitzeln betrieben werden, ergeben sich folgende aktuelle WRG-Anteile zu den prognostizierten WRG-Anteilen (Entscheidungsgrundlage für Realisierung der Abgaskondensationsanlage):

| Holzkesselanlage mit Abgaskondensation | Aktueller WRG-Anteil | prognostizierter WRG-Anteil |
|--|----------------------|-----------------------------|
| Wärmeverbund Anlage A | 10% | 15 – 20% |
| Nahwärmeverbund Anlage B | 9.2% | 18.4% |
| Anlage C | 10% | 20% |

Hauptursache des effektiven tieferen WRG-Anteils (Reduktion um ca. - 7%) ist der mittlere Wassergehalt der Waldhackschnitzel über die Heizperiode, welcher bei den drei untersuchten Anlagen im Bereich $W = 37.2 - 40.3\%$ lag. Die theoretischen Berechnungen des WRG-Anteils stützten sich ab auf der Annahme eines mittleren Wassergehalts in den Waldhackschnitzeln von $W = 50\%$.

Folgende Betriebsparameter reduzierten zusätzlich den WRG-Anteil der drei untersuchten Anlagen:

- mittlerer Luftüberschuss λ der Holzkesselanlage über die Gesamtbetriebszeit: **$\lambda = 1.8 - 2.4$ feucht**
- $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}: 45 - 50^\circ\text{C}$
- Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}: 5.7 - 11.5 \text{ K}$

Pro Kelvin, welches das Abgas unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden kann **erhöht** sich der **WRG-Anteil um 1%!**

Rahmenbedingungen, welche eingehalten werden müssen, damit eine **Holzkesselanlage mit Abgaskondensation** beim Verbrennen von Waldhackschnitzeln zu einem Preis von **5 Rp/kWh** Endenergie Holz mit einem mittleren Wassergehalt **$W < 40\%$ wirtschaftlich betrieben werden kann:**

- Luftüberschuss: - im stationären Betrieb des Holzkessels über den gesamten Leistungsbereich 30 - 100%: **$\lambda < 1.5$ feucht** (Abgasrezirkulation erforderlich)
- im Mittel über die jährliche Betriebszeit der Holzkesselanlage: **$\lambda < 1.7$ feucht** (optimale Auslastung der Holzkesselanlage: Vollbetriebsstundenzahl pro Jahr > 3'000)
- Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}: < 45^\circ\text{C}$
 $< 50^\circ\text{C}$ bei Holzkesselanlagen mit einer Kesselnennleistung > 1'000 kW und Verbrennungsluftbefeuchtung
- Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}: \text{Auslegefall maximale WRG-Leistung: } < 4\text{K}$
Mittelwert über Gesamtbetriebszeit: **$< 2 \text{ K}$**
- tiefe Betriebskosten durch das Einhalten der Zielwerte pro MWh zurückgewonnener Wärme; mittlerer Wasserbedarf **$< 0.2 \text{ m}^3/\text{MWh}$** und mittlerer elektrischer Energiebedarf **$< 40 \text{ kWh/MWh}$** .

Abgaskondensationsanlagen werden in der Zukunft nur realisiert, wenn sie wirtschaftlich betrieben werden können. Dieser Nachweis ist durch die Optimierung der bestehenden Anlagen und der Realisierung von Neuanlagen zu erbringen, welche die geforderten Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einhalten können.

1 Ausgangslage

Abgaskondensationsanlagen ermöglichen die effiziente energetische Nutzung der Ressource Holz. Die Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb einer Abgaskondensationsanlage wird stark durch die Rahmenbedingungen des Holzheizwerks und des Wärmenetzes beeinflusst. Die Haupteinflussgrößen sind namentlich der Wassergehalt im Brennstoff, die Rücklauftemperatur im Wärmenetz und der Sauerstoffüberschuss bei der Verbrennung.

Holzfeuerungen mit nachgeschalteter Abgaskondensationsanlage werden mit dem Ziel einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Holzheizwerks durch die erhöhte Energieeffizienz installiert.

Zum Teil wird im Feuerungsleistungsbereich bis 500 kW noch zusätzlich mit der Abgaswäscherfunktion argumentiert (Feststoffgrenzwert $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ bez. $13\% \text{O}_2$), welche aber durch den geringen Abscheidegrad von 30 - 40% einen Feinstaubpartikelabscheider kaum ersetzen kann.

Die theoretischen Berechnungen bei der Auslegung von Abgaskondensationsanlagen gehen häufig von einem zusätzlichen Wärmeertrag von 20 – (25)% gegenüber einem Holzkessel ohne Abgaskondensation aus beim Verbrennen der gleichen Brennstoffmenge.

In der Praxis liegt der Wärmeertrag von Abgaskondensationsanlagen mit < 10 - 15% häufig unter den theoretischen Auslegungsdaten.

Die Ursachen für den geringeren Wärmeertrag sind:

- Brennstoffwassergehalt ist wesentlich tiefer als angenommen
Beispiel: Annahme Wassergehalt Waldhackschnitzel $W = 50\%$,
Ist Wassergehalt Waldhackschnitzel im Mittel $W < 40\%$
- höherer mittlerer Luftüberschuss während der Betriebszeit des Holzkessels
Beispiel: Annahme Luftüberschuss $\lambda = 1.6$, Ist $\lambda = 2.5 - 3$ durch eine nicht konstante, respektive instabile Betriebsweise (kein Bandlastbetrieb, Schwingen der Soll-Kesselleistung, hoher Luftüberschuss im Schwachlastbetrieb bei Ein/Aus Betrieb)
- Hauptrücklauftemperatur ist höher als Annahme

Der wesentlich tiefere Wärmeertrag in der Praxis stellt die Mehrinvestitionen für die Abgaskondensationsanlage in Frage.

Ungünstige Betriebszustände verringern die Wirtschaftlichkeit zusätzlich. Wird zum Beispiel ein Holzkessel in der Übergangszeit bei minimaler Auslastung (Schwachlastbetrieb) mit abgetrockneten Hackschnitzeln mit einer Abgaskondensationsanlage betrieben, kann festgestellt werden, dass kein zusätzlicher Wärmeertrag anfällt, wobei trotzdem elektrische Energie für die Pumpen und eine beträchtliche Menge an Frischwasser benötigt wird. Der Frischwasserbedarf resultiert durch das Ersetzen des verdampften Wassers.

2 Zielsetzung

Durch das Erfassen, Aufzeichnen und Auswerten der Betriebsdaten von bestehenden Holzkesseln mit Abgaskondensationsanlage sind die Einflussfaktoren und das Einsatzgebiet aufzuzeigen, welche einen energetisch sinnvollen und wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Für zukünftige Holzkessel mit Abgaskondensationsanlage sind Qualitätsanforderungen vorzugeben, welche eingehalten werden müssen, damit sie energetisch sinnvoll und wirtschaftlich betrieben werden können.

Zudem soll ein Massnahmeplan für Betreiber von Abgaskondensationsanlagen erarbeitet werden, wie sich die Rahmenbedingungen positiv beeinflussen lassen.

Die Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Konzepten wird vertieft überprüft, wie beispielsweise:

- Mehrkesselanlage mit nachgeschalteter Abgaskondensation und Nasselektroabscheider
- Abgaskondensation ohne Abgasreinigung

Dabei werden auch Einflussfaktoren wie die Entwicklung der Brennstoffkosten analysiert und eine Aussage über realisierbare Amortisationszeiten abgeleitet.

3 Vorgehen

3.1 Betriebsdaten aufzeichnen und auswerten

Bei den drei folgenden Holzkesselanlagen, welche über eine Abgaskondensationsanlage verfügen, wurden in der Heizperiode 2012/2013 und am Anfang der Heizperiode 2013/2014 die relevanten Betriebsdaten aufgezeichnet, damit eine monatliche Auswertung des zusätzlichen Wärmeertrags der Abgaskondensationsanlage unter Berücksichtigung des Bedarfs an elektrischer Energie und Frischwasser erfolgen kann.

Die Holzkesselanlagen verfügen über ein Leitsystem mit Visualisierung der Betriebsdaten und Darstellung der Betriebsdaten in Trendings. Damit kann das Betriebsverhalten der Anlage überprüft werden:

- *Wärmeverbund Anlage A*
Monovalente Holzheizungsanlage ohne Speicher
Holzkesselleistung: 450 kW
Abgaskondensationssystem ohne vorgeschalteten Partikelabscheider
- *Nahwärmeverbund Anlage B*
Bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher
Holzkesselleistung: 850 kW
Abgaskondensationssystem mit vorgeschalteten Trockenelektroabscheider
- *Anlage C*
Monovalente Dreikessel-Holzheizungsanlage mit Speicher
Holzkesselleistung: 2 x 1'000 kW, 1 x 500 kW
Abgaskondensationssystem mit nachgeschalteten Nasselektroabscheider

3.2 Einsatzgebiet, Qualitätsanforderungen

Einflussfaktoren bestimmen, welche das Einsatzgebiet vorgeben.

Qualitätsanforderungen ausarbeiten, welche eingehalten werden müssen, damit die Holzessel mit Abgaskondensationsanlage energetisch sinnvoll und wirtschaftlich betrieben werden können.

3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Aufzeigen des wirtschaftlichen Einsatzgebietes von Abgaskondensationsanlagen in Abhängigkeit der folgenden Rahmenbedingungen, welche den WRG-Anteil bestimmen:

- mittlerer Luftüberschuss λ über die jährliche Betriebszeit der Holzkesselanlage
- mittlerer Brennstoff Wassergehalt W
- Auslastung der Holzkesselanlage: Vollbetriebsstundenzahl pro Jahr
- Temperatur Hauptrücklauf
- Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$
- Kosten Brennstoff

4 Resultate Heizperioden 2012/2013 und 2013/2014

4.1 Wärmeverbund Anlage A

4.1.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung

Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung erfolgte auf der Basis der Messstellenliste der ardens GmbH vom 05.10.2012 (siehe Anhang A1.1) mit folgenden Ausnahmen: Leistungssignal Holzkessel und Pumpendrehzahl Abgaskondensationsanlage auf WT wurden nicht erfasst.

Für die folgenden Zeitintervalle wurden Tagestrendings mit den Datenaufzeichnungen EKO, H1 und KW (siehe Beispiele Anhang A1.2) erstellt: 19.12.2011 – 29.10.2012 (unvollständig), 26.02.2013 – 08.05.2013, 25.10.2013 – 01.11.2013 und 24.11.2013 - 02.12.2013

Zusätzlich wurden in der EXCEL-Tabelle „Anlage A_Datenaufzeichnung.xlsx“ die periodisch abgelesenen Daten ergänzt (siehe Anhang A1.3). Der Wassergehalt der 13 Brennstoffproben, welche in der Zeit vom 13.12.2012 – 30.03.2013 gezogen wurden, wurde durch die ardens GmbH ermittelt (siehe Anhang A1.4).

4.1.2 Auswertung der Betriebsdaten

In den Tagestrendings der Datenaufzeichnungen EKO, und H1 im Zeitintervall vom 19.12.2011 – 29.10.2012 sind die Daten WRG-Leistung und Heizkessel Leistung nicht plausibel nachvollziehbar und das Lambda ist nicht aufgezeichnet.

| Zeitintervall | WRG-Anteil Abgaskondensation | Restsauerstoff O ₂ feucht | Wassergehalt W Brennstoff | Wasserbedarf | elektrische Energie |
|-------------------------------------|---------------------------------|---|------------------------------|------------------------|------------------------|
| Inbetriebnahme 2011 - 09.11.2012 | 9.3% | 9 -10% | - | - | - |
| 09.11.2012 - 26.11.2012 | 0.8% (0.56 MWh) | - | 34% | 1.9 m ³ | 21.5 kWh |
| 26.11.2012 - 26.12.2012 | 2.3% (2.78 MWh) | - | 37% | 11.8 m ³ | 107.1 kWh |
| 26.12.2012 - 23.01.2013 | 2.0% (2.82 MWh) | - | 45% (max. 53%) | 14.27 m ³ | 129.9 kWh |
| 23.01.2013 - 27.02.2013 | 2.5% (4.40 MWh) | 10% (λ feucht 1.9) | 45% | 16.21 m ³ | 171.6 kWh |
| 27.02.2013 - 30.04.2013 | 4.1% (5.73 MWh) | 11% (λ feucht 2.0) | 32% | 0.14 m ³ ?? | 292.0 kWh |
| 30.04.2013 - 05.06.2013 | 1.0% (1.82 MWh) | 12% (λ feucht 2.3) | - | 26.85 m ³ | 110.4 kWh |
| 25.10.2013 - 01.11.2013 | 9.0% | 12% (λ feucht 2.3) | - | - | - |
| 24.11.2013 - 02.12.2013 | 12.0% | 12% (λ feucht 2.3) | - | - | - |

T_{Abgas Eintritt}:

Die Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ schwingt stark im Bereich 100°C - 220°C

T_{Rücklauf Heizsystem}:

Die Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ liegt im Hauptbereich bei 40°C - 50°C

Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$:

Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ betrug im Zeitintervall

- 27.02.2013, 14° - 20° ¹⁾ **13 K** (58°C - 45°C) bei einer WRG-Leistung von **18 kW**
- 28.02.2013, 8° - 11° ¹⁾ **13 K** (59°C - 46°C) bei einer WRG-Leistung von **15 kW**
- 02.12.2013, 8° - 12° **11.5 K** (52°C - 41.5°C) bei einer WRG-Leistung von **25 kW**

1) voraussichtlich waren Wasserdüsen für das Befeuchten der Abgase zum Teil verstopft

4.1.3 Beurteilung

WRG-Anteil Abgaskondensation

Der WRG-Anteil Abgaskondensation betrug in der Heizperiode 2012/2013 (09.11.12 – 05.06.2013) im Mittel 2.2%! Verursacht wurde dieser geringe WRG-Anteil durch eine Fehlmessung der Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ um ca. – 110 K. Bei einer Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ von < 80°C, respektive 190°C wurde die Abgaskondensationsanlage ausgeschaltet, was während der Heizperiode durch die Fehlmessung sehr oft der Fall war. Im Weiteren war die Bypassklappe undicht und voraussichtlich waren auch die Düsen für das Befeuchten der Abgase zum Teil verstopft (grosse Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$). Die Betriebsprobleme wurden nur aufgrund der Datenaufzeichnungen erkannt!

Die WRG-Anteile Abgaskondensation

- Inbetriebnahme 2011 - 09.11.2012 von 9.3%
- 25.10.2013 - 01.11.2013 von 9%
- 24.11.2013 - 02.12.2013 von 12% bei optimaler Auslastung des Holzkessels, wobei die Abgaskondensationsanlage unnötigerweise beim Überschreiten der Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}} > 185^\circ\text{C}$ ausgeschaltet wurde!

zeigen auf, dass der **mittlere WRG-Anteil** der Abgaskondensation über eine Heizperiode bei den aktuellen Betriebsparametern bei **ca. 10%** liegt, wenn die Abgaskondensationsanlage ohne Störungen betrieben werden kann. Die zurückgewonnene Wärme entspricht hauptsächlich (Anteil beinahe 100%) der Nutzung der fühlbaren (sensiblen) Wärme durch das Abkühlen der Abgase bis zum Taupunkt.

Restsauerstoff

Die Holzkesselanlage wird mit einem hohen Luftüberschuss von **λ 1.9 – 2.3** feucht betrieben.

Unter Berücksichtigung der instationären Betriebsphasen (Startphase, Ausbrandphase und Glutbettunterhaltbetrieb) erhöht sich der mittlere Luftüberschuss λ über die Gesamtbetriebszeit auf ca. $\lambda = 2.4$ feucht.

Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel

Der mittlere Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel war über die Heizperiode 2012/2013 bei **W < 40%** (Durchschnitt der Monatsmittel W = 38.6%).

Wasserbedarf

Der Wasserbedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug in der Heizperiode 2012/2013 beinahe 4'000l/MWh! Dieses schlechte Verhältnis ist durch den nicht optimalen Betrieb, respektive durch die Betriebsstörungen zu erklären bei fest vorgegebener Einspeisung von Wasser (Netzwater, konstanter Durchfluss ca. 20l/h).

Elektrischer Energiebedarf Abgaskondensationsanlage

Der elektrische Energiebedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug in der Heizperiode 2012/2013 46 kWh/MWh, respektive ca. 4.6% vom WRG-Anteil.

Optimierungspotential

Wie kann der vorgegebene **Zielwert** für die Energieeffizienzsteigerung durch die WRG der Abgaskondensationsanlage von **15 – 20% WRG-Anteil** (Wärmeverbund Anlage A, Systemwahl Raugasreinigung und Effizienzsteigerung) erreicht werden unter Berücksichtigung des **aktuellen mittleren WRG-Anteils** von ca. **10%**?

Damit die Abgase in Zukunft deutlich unter den Taupunkt abgekühlt werden, um effektiv die latente Wärme (Kondensationswärme) nutzen zu können, sind folgende Massnahmen erforderlich:

- Der mittlere Luftüberschuss λ über die Gesamtbetriebszeit von aktuell ca. $\lambda = 2.4$ feucht ist auf < 1.8 feucht zu reduzieren durch den Betrieb des Holzkessels im stationären Betrieb im Leistungsbereich von 30 - 100% mit einem $\lambda < 1.6$ feucht (O_2 feucht = 8%) (Unterschubfeuerung ohne Abgasrezirkulation) bei stabilem Brennstoffbett und gleichmässiger hoher Auslastung des Holzkessels (Start- und Ausbrandphasen stark reduziert).

Das Reduzieren des mittleren Luftüberschusses λ von 2.4 auf 1.8 über die Gesamtbetriebszeit entspricht einer Taupunkterhöhung von 5 K, respektive einer **Erhöhung des WRG-Anteils um 5%***. (Basis¹: $\Delta \lambda - 0.6$ entspricht + 5% WRG-Anteil)

* Durch den verringerten Abgasvolumenstrom von $\lambda 2.4$ auf < 1.8 reduziert sich der WRG-Anteil der fühlbaren (sensiblen) Wärme um ca. 2% bei der Annahme, dass die Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ in die Abgaskondensationsanlage bei gleichem Niveau erfolgt, wie vor der Optimierung. Diese Reduktion des WRG-Anteils wird kompensiert durch einen höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad η_F des Holzkessels. Die Gesamtwärmeproduktion der Holzkesselanlage mit Abgaskondensation erhöht sich bei gleich bleibendem Brennstoffinput nach der Optimierungsmassnahme gemäss der aufgeführten Erhöhung des WRG-Anteil von 5%. Dabei erhöht sich die Wärmeproduktion des Holzkessels um ca. 2% durch einen höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad η_F und der effektive WRG-Anteil erhöht sich um 3%!

- Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ von **11.5 K** bei einer WRG-Leistung von **25 kW** ist auf **< 3 K** zu reduzieren durch die Optimierung der Wärmeübertragung. Damit kann die **mittlere Temperatur $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** über die **Gesamtbetriebszeit** von ca. **9 K** auf **< 2 K** reduziert werden. Dies hat eine **Erhöhung des WRG-Anteils um weitere 7% zur Folge**. (Basis¹: $\Delta T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} - 7$ K entspricht + 7% WRG-Anteil)

- Kontinuierliche Überwachung der Holzkesselanlage mit Abgaskondensation über die Visualisierung und die Auswertung der Datentrendings, damit Betriebsstörungen und unerwünschte Regelfunktionen (z.B. Verstopfungen der Wasserdüsen oder unnötigerweises Ausschalten der Abgaskondensationsanlage beim Überschreiten der Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}} > 185^\circ\text{C}$) kurzfristig erkannt und behoben werden können.

Der mittlere Brennstoff Wassergehalt $W < 40\%$ ergibt sich durch die vorgegebene Brennstofflogistik, bei welcher die Baumstämme im Wald auf Grosspoltern (mit möglichst trockenem Untergrund) zwischengelagert werden.

Werden die Abgase aufgrund der durchgeführten Optimierungsmassnahmen bedeutend unter den Taupunkt abgekühlt, kann der Wasserbedarf (Netzwasser) durch den kondensierenden Wasserdampf beträchtlich reduziert werden. Weiter kann der Wasserbedarf reduziert werden, wenn das Nachspeisen des Wassers geregelt erfolgt über das Messen des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit.

4.2 Nahwärmeverbund Anlage B

4.2.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung

Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung erfolgte auf der Basis der Messstellenliste Anlage B vom 16.10.2012 (siehe Anhang A2.1).

Für das Zeitintervall vom 26.11.2012 – 30.05.2013 wurden Tagestrendings, Wochentrendings (Datenpunkte 1 und 2) und Monatstrendings (Datenpunkte 1 – 3 und Diagramm–Wasserverbrauch, siehe Beispiel Anhang A2.2) erstellt, auf der Basis der monatlichen EXCEL-Tabellen „Datenpunkte“, in welcher die Betriebsdaten im Intervall von 5 Minuten erfasst sind. Zusätzlich sind in der Tabelle „Biomasse Feuchte“ vom 07.04.2013 (siehe Anhang A2.3) die periodisch erfassten Wassergehalte im Brennstoff aufgeführt.

4.2.2 Auswertung der Betriebsdaten

| Zeitintervall | WRG-Anteil Abgaskondensation | Restsauerstoff O ₂ feucht | Wassergehalt W Brennstoff | Wasser- bedarf | elektrische Energie |
|-------------------------------------|---------------------------------|---|------------------------------|--------------------|------------------------|
| Inbetriebnahme 2011 - 28.11.2012 | 8.4% | - | 20% - 30% | - | - |
| 28.11.2012 - 31.12.2012 | 8.5% (40.28 MWh) | 9.5% (λ feucht 1.83) | - | 58 m ³ | 3'185 kWh |
| 01.01.2013 - 31.01.2013 | 9.6% (44.57 MWh) | 10.56% (λ feucht 2.01) | 37% | 75 m ³ | 3'531 kWh |
| 01.02.2013 - 28.02.2013 | 8.6% (36.71 MWh) | 9.87% (λ feucht 1.89) | 37.5% | 30 m ³ | 3'294 kWh |
| 01.03.2013 - 31.03.2013 | 11.1% (40.57 MWh) | 9.99% (λ feucht 1.91) | 36% | 28 m ³ | 3'711 kWh |
| 01.04.2013 - 30.04.2013 | 9.31% (25.91MWh) | 11.3% (λ feucht 2.17) | 35.5% | 162 m ³ | 2'328 kWh |
| 01.05.2013 - 30.05.2013 | 7.99% (20.38MWh) | 11.9% (λ feucht 2.31) | 37.5% | 590 m ³ | 2'087 kWh |

T_{Abgas Eintritt}:

Die Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ liegt im Bereich 90°C - 160°C

T_{Rücklauf Heizsystem}:

Die Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ liegt im Mittel bei 50°C mit Ausnahmen in den Monaten April und Mai, wo sie zeitweise bis auf 90°C ansteigt.

Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$:

Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ betrug im Zeitintervall 30.01.2013, 6⁰⁵ – 6²⁵ 7 K (55°C - 48°C) bei einer WRG-Leistung von 127 KW und liegt im monatlichen Mittel bei 5 K, wenn die Abgaskondensationsanlage in Betrieb war.

4.2.3 Beurteilung

WRG-Anteil Abgaskondensation

Der **mittlere WRG-Anteil Abgaskondensation** betrug in der Heizperiode 2012/2013 (28.11.12 – 30.05.2013) **9.2%**.

Die monatlichen WRG-Anteile Abgaskondensation zeigen auf, dass die zurückgewonnene Wärme **hauptsächlich der Nutzung (Anteil ca. 75%) der fühlbaren (sensiblen) Wärme durch das Abkühlen der Abgase bis zum Taupunkt entspricht, trotz der bedeutenden Abkühlung der Abgase Kesselaustritt - Eintritt Abgaskondensationsanlage von 45 - 50 K über Multizyklonabscheider und Trockenelektropartikelabscheider**. Betriebsstörungen (z.B. Dezember 2012 währten 8 Tagen) und die hohen kurzfristigen Rücklauftemperaturen im April und Mai haben den mittleren WRG-Anteil der Abgaskondensation über die Heizperiode geringfügig reduziert. Mit den aktuellen Betriebsparametern liegt der **WRG-Anteil** der Abgaskondensation über die Heizperiode bei **ca. 10%**, wenn die Abgaskondensationsanlage ohne Störungen und ohne die hohen kurzfristigen Rücklauftemperaturen betrieben werden kann.

Restsauerstoff

Die Holzkesselanlage wird mit einem hohen Luftüberschuss betrieben von λ **1.83 – 2.31_{feucht}**. Unter Berücksichtigung der instationären Betriebsphasen (Startphasen, Ausbrandphasen und Glutbettunterhaltbetrieb sind sehr gering, durch die optimale Auslastung des Holzkessels) ergibt sich ein mittlerer Luftüberschuss λ über die Gesamtbetriebszeit von ca. $\lambda = 2.1$ feucht.

Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel

Der Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel über die Heizperiode 2012/2013 war nie **W > 40%** (Durchschnitt der Monatsmittel W = 37.2%).

Wasserbedarf

Der Wasserbedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug im

- Dezember 2012 1.44 m³/MWh (Störung Wasserventil 19./20.12.2012)
- Januar 2013 1.68 m³/MWh (Störung Wasserventil 07.01.2013)
- Februar 2013 0.82 m³/MWh
- März 2013 0.69 m³/MWh
- April 2013 6.25 m³/MWh (Störung Wasserventil)
- Mai 2013 28.95 m³/MWh (Störung Wasserventil)

Der Wasserbedarf (Netzwasser) wird hauptsächlich bestimmt durch die fest vorgegebene (nicht geregelte) Einspeisung von Wasser beim Betrieb der Abgaskondensationsanlage, welcher den pH-Wert und den elektrischen Leitwert des Wassers unkontrolliert (ohne Messung des pH-Werts und des elektrischen Leitwerts) in der Abgaskondensationsanlage unter einem kritischen Wert hält, damit Korrosionsbildung durch Chlor ausgeschlossen werden kann. Das Nachspeisen, als Ersatz für das verdampfte Wasser, hat einen untergeordneten Bedarf zur Folge. Beim Betrieb der Anlage ohne Störungen des Wasserventils beträgt der Wasserbedarf pro Betriebsstunde im Mittel ca. 80 - 90 l/h.

Elektrischer Energiebedarf Abgaskondensationsanlage

Der elektrische Energiebedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug in der Heizperiode 2012/2013 88 kWh/MWh, respektive ca. 8.8% vom WRG-Anteil.

Optimierungspotential

Wie kann der vorgegebene **Zielwert** für die Energieeffizienzsteigerung durch die WRG der Abgaskondensationsanlage von **18.4% WRG-Anteil** bei einem angenommenen mittleren Wassergehalt im Brennstoff von $W = 50\%$ (Bericht „Effizienzverbesserung eines Nahwärmeverbunds, R. Troxler, Mai 2011“) erreicht werden unter Berücksichtigung des **aktuellen mittleren WRG-Anteils** von ca. **9.2%** bei einem mittleren Brennstoff Wassergehalt $W < 40\%$?

Damit die Abgase in Zukunft deutlich unter den Taupunkt abgekühlt werden, um effektiv die latente Wärme (Kondensationswärme) nutzen zu können, sind folgende Massnahmen erforderlich:

- Der mittlere Luftüberschuss λ über die Gesamtbetriebszeit von aktuell ca. $\lambda = 2.1$ feucht ist auf < 1.6 feucht zu reduzieren durch den Betrieb des Holzkessels im stationären Betrieb im Leistungsbereich von 30 - 100% mit einem $\lambda < 1.5$ feucht (O_2 feucht = 7%) (Rostfeuerung mit zusätzlich installierter Abgasrezirkulation) bei stabilem Brennstoffbett und gleichmässiger hoher Auslastung des Holzkessels (geringer Anteil Start- und Ausbrandphasen und Glutbettunterhaltbetrieb). In der Heizperiode 2013/2014 konnte der Holzkessel durch die zusätzlich installierte Abgasrezirkulation mit einem reduzierten mittleren Luftüberschuss λ betrieben werden, was den WRG-Anteil merklich erhöht hat, gemäss Auskunft des Betreibers.

Das Reduzieren des mittleren Luftüberschusses λ von 2.1 auf 1.6 über die Gesamtbetriebszeit entspricht einer Taupunkterhöhung von 4 K, respektive einer **Erhöhung des WRG-Anteils um 4%***. (Basis¹): $\Delta \lambda - 0.5$ entspricht + 4% WRG-Anteil)

* Durch den verringerten Abgasvolumenstrom von $\lambda 2.1$ auf < 1.6 reduziert sich der WRG-Anteil der fühlbaren (sensiblen) Wärme um ca. 2% bei der Annahme, dass die Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ in die Abgaskondensationsanlage bei gleichem Niveau erfolgt, wie vor der Optimierung. Diese Reduktion des WRG-Anteils wird kompensiert durch einen höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad η_F des Holzkessels. Die Gesamtwärmeproduktion der Holzkesselanlage mit Abgaskondensation erhöht sich bei gleich bleibendem Brennstoffinput nach der Optimierungsmassnahme gemäss der aufgeführten Erhöhung des WRG-Anteils von 4%. Dabei erhöht sich die Wärmeproduktion des Holzkessels um ca. 2% durch einen höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad η_F und der effektive WRG-Anteil erhöht sich um 2%!

- Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ von **7 K** bei einer WRG-Leistung von **127 KW** ist auf **< 4 K** zu reduzieren durch die Optimierung der Wärmeübertragung. Damit kann die **mittlere Temperatur $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ über die Gesamtbetriebszeit** von ca. **5 K** auf **< 2 K** reduziert werden. Dies hat eine **Erhöhung des WRG-Anteils um 3% zur Folge**. (Basis¹): $\Delta T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} - 3 \text{ K}$ entspricht + 3% WRG-Anteil)
- Kontinuierliche Überwachung der Holzkesselanlage mit Abgaskondensation über die Visualisierung und der Auswertung der Datentrendings, damit Betriebsstörungen und unerwünschte Regelfunktionen (z.B. Störung Wasserventil, kurzfristig hohe Rücklauftemperaturen) kurzfristig erkannt und behoben werden können.

Der mittlere Brennstoff Wassergehalt $W < 40\%$ ergibt sich durch die vorgegebene Brennstofflogistik, bei welcher die Baumstämme im Wald auf Grosspolter (mit möglichst trockenem Untergrund) zwischengelagert werden. Die Reduzierung des mittleren Brennstoff Wassergehalts von $W = 50$ (Annahme im Bericht „Effizienzverbesserung eines Nahwärmeverbunds, R. Troxler, Mai 2011“) auf aktuell $W = 37.2\%$ hat eine Verringerung des WRG-Anteils um 9% zur Folge.

(Basis¹): $\Delta W - 12.8\%$ entspricht - 9% WRG-Anteil).

Der Zielwert von 18.4% WRG-Anteil mit einem mittleren Brennstoff Wassergehalt $W < 40\%$ kann nur erreicht werden, wenn zusätzlich

- eine Verbrennungsluftbefeuchtung (Vorwärmung mit Befeuchtung und Nacherwärmung (damit kein Kondensat in den Verbrennungsluftkanälen anfällt)) installiert wird, welche die Taupunkttemperatur der Abgase um ca. 4 K anhebt.

Mit der **Verbrennungsluftbefeuchtung** kann der **WRG-Anteil um 4% erhöht** werden.

(Basis¹⁾: Taupunkttemperatur + 4 K entspricht + 4% WRG-Anteil)

oder

- die mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ ist über die Heizperiode von 50°C auf 46°C abzusenken.

Die Absenkung der Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ hat eine **Erhöhung des WRG-Anteils um 4% zur Folge**. (Basis¹⁾: $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$, respektive $T_{\text{Abgas Austritt}} - 4 \text{ K}$ entspricht + 4% WRG-Anteil)

Im Weiteren kann der WRG-Anteil erhöht werden durch die Reduzierung der Wärmeverluste über den Multizyklonabscheider sowie den Trockenelektropartikelabscheider.

Der sehr hohe Wasserbedarf (Netzwasser) kann reduziert werden, wenn das Nachspeisen des Wassers geregelt erfolgt über das Messen des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit.

4.3 Anlage C

4.3.1 Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung

Betriebsdatenerfassung und – aufzeichnung erfolgte auf der Basis der Messstellenliste Anlage C vom 16.10.2012 (siehe Anhang A3.1) mit folgenden Ausnahmen: Luftüberschuss λ , Kesseltemperatur, Leistungssignal der Holzessel wurden nicht erfasst.

Für das Zeitintervall vom 01.12.2013 – 31.01.2014 wurden Graphiken (Graphik1_WRG, Graphik_Therm_Effizienz, Graphik_Energie, Graphik_Wasser, siehe Beispiel Anhang A3.2) erstellt bezogen auf unterschiedliche Zeitintervalle, auf der Basis der EXCEL-Tabellen „Daten_Lieferant Abgaskondensationsanlage, in welchen die Betriebsdaten im Intervall von 5 Minuten aufgezeichnet sind“ und „Daten_Betreiber, in welchen die täglich abgelesenen Betriebsdaten ab unterschiedlichen Ableszeitpunkten erfasst sind (Hauptanteil ab 11.01.2014)“. Die fehlende Aufzeichnung des Luftüberschusses λ der Holzessel während des Zeitintervalls vom 01.12.2013 – 31.01.2014 wurde mit der *Datenaufzeichnung der Firma ErnEL vom 08.03.2014 - 07.04.2014 ergänzend überprüft.

4.3.2 Auswertung der Betriebsdaten

| Zeitintervall | WRG-Anteil Abgaskondensation | Restsauerstoff O ₂ feucht * | Wassergehalt W Brennstoff | Wasser- bedarf | elektrische Energie |
|----------------------------|---------------------------------|---|------------------------------|-------------------|------------------------|
| 11.01.2014 - 30.01.2014 | 10% (52.56 MWh) | 7.24% (λ feucht 1.53) | 40.3% | 18m ³ | 2'508 kWh |

T_{Abgas Eintritt}:

Die Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ liegt im Bereich 110°C - 220°C
(Mitteltemperatur 11.01.2014 - 30.01.2014: 154°C)

T_{Rücklauf Heizsystem}:

Die Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ liegt im Mittel bei 50.5°C (45.0°C - 56.6°C)
(Mitteltemperatur 11.01.2014 - 30.01.2014: 49.86°C)

Temperaturdifferenz T_{Abgas Austritt} – T_{Rücklauf Heizsystem}:

Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ betrug im Zeitintervall 14.01.2014, 6³⁰ – 7⁴⁰ **5.7 K** (55°C - 48°C) bei einer WRG-Leistung von **160 KW** und liegt im Mittel bei 3.76 K im Zeitintervall vom 01.12.2013 – 31.01.2014.
(mittlere Temperaturdifferenz 11.01.2014 - 30.01.2014: 4.18 K)

4.3.3 Beurteilung

WRG-Anteil Abgaskondensation

Der **mittlere WRG-Anteil Abgaskondensation** betrug im Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014 **10%** bei hoher Auslastung der beiden Holzkessel.

Der WRG-Anteil Abgaskondensation von 10% zeigt auf, dass die zurückgewonnene Wärme hauptsächlich der Nutzung (Anteil ca. 70%) der fühlbaren (sensiblen) Wärme durch das Abkühlen der Abgase bis zum Taupunkt (mittlere $T_{\text{Abgas Eintritt}}$ 154°C – mittlere Taupunkttemperatur 57°C bei λ_{feucht} 1.53 = 7% WRG-Anteil fühlbare Wärme, mittlere Taupunkttemperatur 57°C - mittlere $T_{\text{Abgas Austritt}}$ 54°C = 3K = 3% WRG-Anteil latente Wärme) entspricht.

Restsauerstoff

Die Holzkessel wurden in Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014 bei hoher Auslastung (ohne Startphasen, Ausbrandphasen und Glutbettunterhaltbetrieb) mit einem tiefen Luftüberschuss von λ **1.53** _{feucht} betrieben.

Unter Berücksichtigung der instationären Betriebsphasen (Startphasen, Ausbrandphasen und Glutbettunterhaltbetrieb) bei geringerer Auslastung der Holzkessel ergibt sich ein mittlerer Luftüberschuss λ über die Heizperiode von ca. $\lambda = 1.8$ feucht.

Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel

Der Brennstoff Wassergehalt W der Hackschnitzel im Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014 lag im Bereich von W = 24 - 50% (Durchschnitt Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014: W = 40.3%).

Wasserbedarf

Der Wasserbedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug im Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014 0.34 m³/MWh

Der Wasserbedarf (Netzwater) wird bestimmt durch die geregelte Einspeisung von Wasser beim Betrieb der Abgaskondensationsanlage, welche den pH-Wert und den elektrischen Leitwert des Wassers kontrolliert und in der Abgaskondensationsanlage unter einem kritischen Wert hält, damit Korrosionsbildung durch Chlor ausgeschlossen werden kann. Das Nachspeisen, als Ersatz für das verdampfte Wasser, hat einen untergeordneten Bedarf zur Folge. Der Wasserbedarf pro Betriebsstunde beträgt im Mittel ca. 26 l/h.

Elektrischer Energiebedarf Abgaskondensationsanlage

Der elektrische Energiebedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug im Zeitintervall vom 11.01.2014 - 30.01.2014 48 kWh/MWh, respektive ca. 4.8% vom WRG-Anteil.

Optimierungspotential

Wie kann der vorgegebene **Zielwert** für die Energieeffizienzsteigerung durch die WRG der Abgaskondensationsanlage von **20% WRG-Anteil** erreicht werden unter Berücksichtigung des **aktuellen mittleren WRG-Anteils** von ca. **10%** bei einem mittleren Brennstoff Wassergehalt $W < 40\%$ der Hackschnitzel?

Damit die Abgase in Zukunft deutlich unter den Taupunkt abgekühlt werden, um effektiv die latente Wärme (Kondensationswärme) nutzen zu können, sind folgende Massnahmen erforderlich:

- Die mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ ist über die Heizperiode von 50°C auf 44°C abzugesenken.

Dies hat eine **Erhöhung des WRG-Anteils um 6% zur Folge**

(Basis¹⁾: $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$, respektive $T_{\text{Abgas Austritt}} - 6.5 \text{ K}$ entspricht + 6% WRG-Anteil)

- Die Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ von **5.7 K** bei einer WRG-Leistung von **160 KW** ist auf **< 3 K** zu reduzieren durch die Optimierung der Wärmeübertragung. Damit kann die **mittlere Temperatur $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** über die **Gesamtbetriebszeit** von ca. **3.76 K** auf **< 2 K** reduziert werden. Dies hat eine **Erhöhung des WRG-Anteils um 2% zur Folge**.

(Basis¹⁾: $\Delta T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} - 2 \text{ K}$ entspricht + 2% WRG-Anteil)

- Installation einer Verbrennungsluftbefeuchtung (Vorwärmung mit Befeuchtung und Nacherwärmung (damit kein Kondensat in den Verbrennungsluftkanälen anfällt)), welche die Taupunkttemperatur der Abgase um ca. 4 K anhebt.

Mit der **Verbrennungsluftbefeuchtung** wird der **WRG-Anteil um 4% erhöht**.

(Basis¹⁾: Taupunkttemperatur + 4 K entspricht + 4% WRG-Anteil)

- Kontinuierliche Überwachung der Holzkessel mit Abgaskondensationsanlage über die Visualisierung und der Auswertung der Datentrendings, damit Betriebsstörungen und unerwünschte Regelfunktionen kurzfristig erkannt und behoben werden können.

1) Basis für die Beurteilung der Optimierungsmassnahmen sind die Diagramme aus dem Schlussbericht des BFE Projekts „Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen, Juni 1995“ [1] (siehe Anhang A4) und die Diagramme bezüglich Wärmerückgewinnung von IS SaveEnergy AG, Nürens Dorf (siehe Anhang A5).

5 Schlussfolgerungen

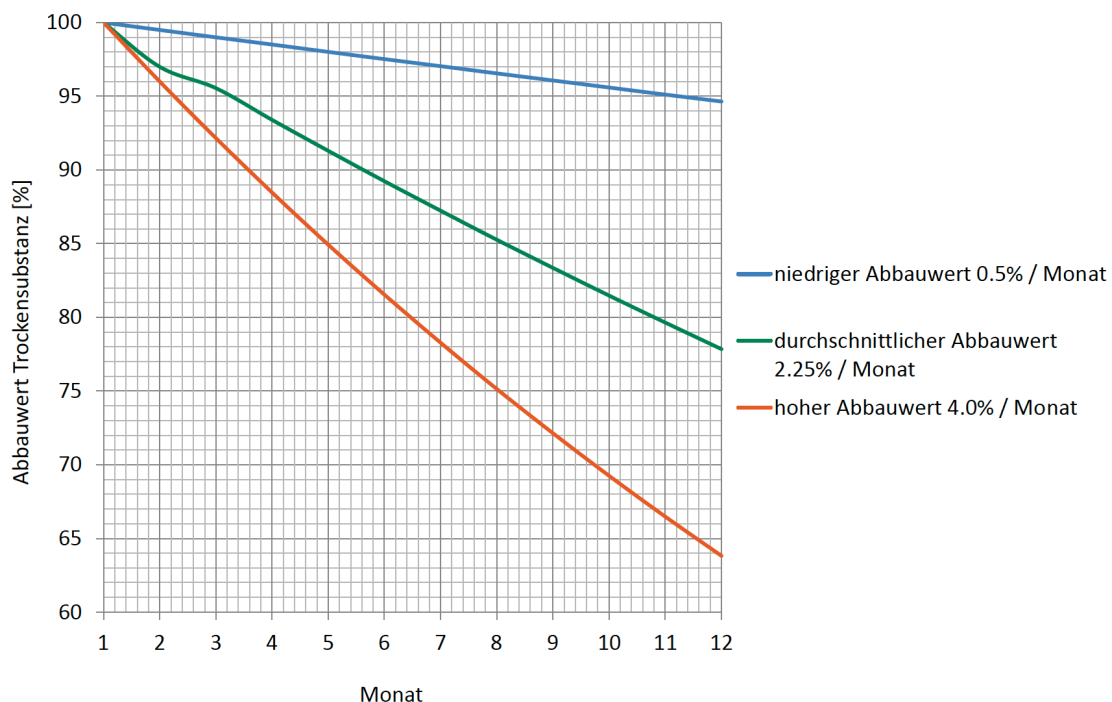
Mittlerer Brennstoff Wassergehalt W von Hackschnitzeln

Der **mittlere Brennstoff Wassergehalt** von Hackschnitzeln **aus dem Wald von $W < 40\%$** bei den drei untersuchten Holzkesseleanlagen mit Abgaskondensation ergibt sich durch die vorgegebene weit verbreitete Brennstofflogistik, bei welcher die Baumstämme im Wald auf Grosspolter (mit möglichst trockenem Untergrund) zwischengelagert werden (wegen LSWA sind Brennstoffaufbereitungsunternehmen nicht interessiert, Wasser zu transportieren). Bei der Annahme, dass der mittlere Brennstoff Wassergehalt von Hackschnitzeln aus dem Wald bei $W = 50\%$ liegt, wird das Potential der Wärmerückgewinnung durch eine Abgaskondensationsanlage bedeutend um bis + 8% WRG-Anteil überschätzt.

Das Erhöhen des mittleren Brennstoff Wassergehalts von Hackschnitzeln aus dem Wald von aktuell $W < 40\%$, durch das Aufbereiten von frischgeschlagenem Holz ($W_{\text{Laubholz hart}} = 45\%$, $W_{\text{Nadelholz}} = 50\%$) zu Hackschnitzeln mit entsprechend aufwendigerer Logistik, bringt energetisch keine Vorteile, auch unter Berücksichtigung des Abbaus von Trockensubstanz, welcher bei der Zwischenlagerung auf trockenem Untergrund bei Grosspolter sehr gering ist (BFE Projekt: Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald, Urs Elber, 2007). Der Abbauwert von Trockensubstanz kann aufgrund der Untersuchungen in Bayern bei feucht eingelagerten, schlecht durchlüfteten Hackschnitzeln beträchtlich sein (siehe Diagramm Abbau Biomasse).

Abbau Biomasse

save energy



Quelle: Studie des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forste

IS SaveEnergy AG / Hinterdorfstrasse 4 / Postfach 174 / CH-8309 Nürensdorf
T +41 (0)43 204 20 20 / info@saveenergy.ch / www.saveenergy.ch

Industrierestholz aus Sägewerken (Hackschnitzel aus Spreisel und Schwarten, Rinde, Sägespäne) weisen einen höheren mittleren Brennstoff Wassergehalt auf als Waldhackschnitzel. Dieser kann im Mittel bei $W = 50 - 55\%$ sein.

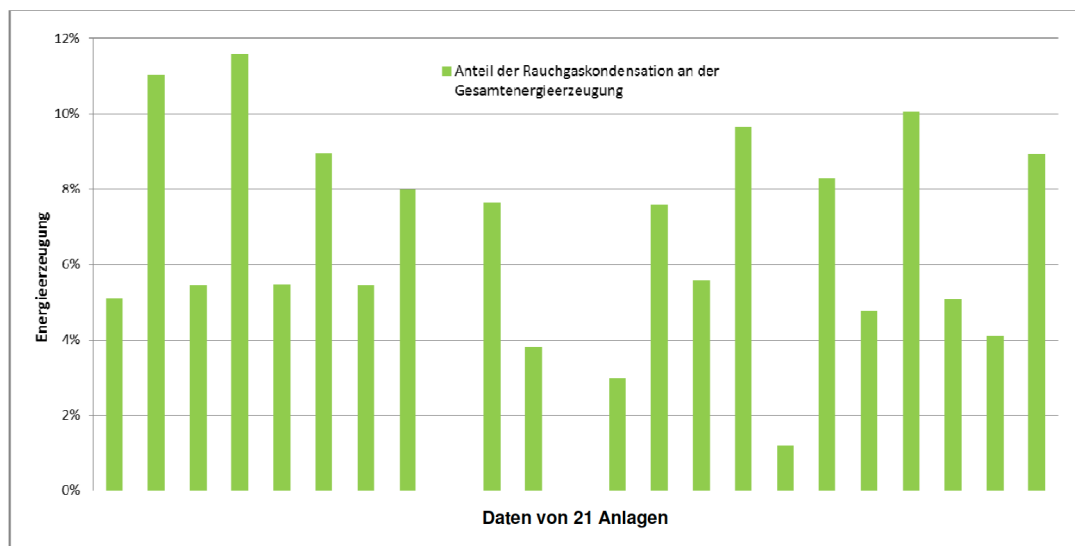
Anteil Wärmerückgewinnungsanteil (WRG-Anteil)

Die **aktuellen WRG-Anteile** der drei Holzkesselanlagen mit Abgaskondensation im Bereich von **10%** ohne Berücksichtigung des reduzierenden Einflusses von Betriebsstörungen entsprechen nicht den Vorgaben oder Zielwerten beim Bauentscheid der Abgaskondensationsanlagen von 15% - 20% WRG-Anteil.

Die tiefen effektiven WRG-Anteile von Abgaskondensationsanlagen im Praxisbetrieb sind gemäss dem Diagramm „Rauchgaskondensation – Anteil an der Energieerzeugung“, in welchem 21 Anlagen in Österreich auf der Datenbasis: qm-heizwerke-Datenbank (Auswertung 06/2013) – Betriebsberichte 2011 durch den LandesEnergieVerein Steiermark (LEV) ausgewertet worden sind, weit verbreitet. Bei nur 3 von den 21 Anlagen liegt der WRG-Anteil bezüglich der Gesamtwärmeerzeugung über 10% im Bereich von 10% -11.5%!

Folie 9

Rauchgaskondensation – Anteil an der Energieerzeugung



Datenbasis: qm-heizwerke-Datenbank (Auswertung 06/2013) - Betriebsberichte 2011



An der Veranstaltung der ERFA-Gruppe von Holzenergie Schweiz vom 24. Oktober 2013 in Stans, wurden vom HEIZVERBUND UNTERE KNIRI AG, Stans die monatlichen WRG-Anteile der Abgaskondensationsanlage im Zeitintervall Oktober 2012 – September 2013 präsentiert. Alleine der WRG-Anteil vom November 2012 mit 11.1% liegt über 10%. Die restlichen monatlichen WRG-Anteile liegen im Bereich von 0.87% - 9.57%! Der mittlere WRG-Anteil der Abgaskondensationsanlage der Holzkessel über das Zeitintervall Oktober 2012 – September 2013 beträgt 7%!

Wasserbedarf

Der mittlere Wasserbedarf pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug über das ausgewertete Zeitintervall im Mittel bei der Holzkesselanlage

- Wärmeverbund Anlage A **4 m³/MWh** verursacht durch Betriebsstörungen (konstanter Durchfluss 20l/h)
- Nahwärmeverbund Anlage B **4.5 m³/MWh** verursacht durch Betriebsstörungen (im Mittel pro Betriebsstunde 80 – 90 l/h, wenn keine Betriebsstörung ansteht)
- Anlage C **0.34 m³/MWh** (im Mittel pro Betriebsstunde 26l/h)

Der Wasserbedarf (Netzwasser) kann reduziert werden durch das Vermeiden von Betriebsstörungen und dem geregelten Nachspeisen des Wassers auf der gemessenen Basis des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit. Der **Zielwert mittlerer Wasserbedarf** soll bei **< 0.2 m³/MWh** liegen, wenn die Abgaskondensationsanlage kontinuierlich kondensierend mit einem mittleren WRG-Anteil > 15% betrieben wird.

Elektrischer Energiebedarf Abgaskondensationsanlage

Der mittlere elektrische Energiebedarf für die Pumpen der Abgaskondensationsanlage pro MWh zurückgewonnene Wärme betrug über das ausgewertete Zeitintervall im Mittel bei der Holzkesselanlage

- Wärmeverbund Anlage A **46 kWh/MWh**, respektive ca. 4.6% vom WRG-Anteil
- Nahwärmeverbund Anlage B **88 kWh/MWh**, respektive ca. 8.8% vom WRG-Anteil
- Anlage C **48 kWh/MWh**, respektive ca. 4.8% vom WRG-Anteil

Der mittlere elektrische Energiebedarf der Abgaskondensationsanlagen liegt im Bereich von 0.5 - 1% der produzierten Wärme der Holzkesselanlage mit Abgaskondensation, wobei zu beachten ist, dass der zusätzliche elektrische Energiebedarf des Abgasventilators, um die Abgase über die Abgaskondensationsanlage zu leiten, nicht mitberücksichtigt ist.

Der **Zielwert mittlerer elektrischer Energiebedarf** der Abgaskondensationsanlage ohne Zusatzanteil Abgasventilator soll bei **< 40 kWh/MWh** liegen bei einem mittleren WRG-Anteil > 15%, respektive die elektrische Pumpenleistung sollte im Maximum 2% der Auslegenennwärmeleistung der Abgaskondensation aufweisen.

Optimierungspotential

Folgende Grundlage hat Einfluss auf den WRG-Anteil:

Pro Kelvin, welches das Abgas unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden kann (Temperaturdifferenz: Taupunkttemperatur – Temperatur_{Abgas Austritt}), **erhöht** sich der **WRG-Anteil um 1%**.

Folgende Optimierungsmassnahmen lassen sich auf der oben beschriebenen Grundlage ableiten:

- Das **Reduzieren des mittleren Luftüberschusses λ_{feucht} um 0.5** über die Heizperiode (z.B. λ 2.2_{feucht} auf λ 1.7_{feucht}) entspricht einer **Taupunkterhöhung von 4 K**, respektive einer **Erhöhung des WRG-Anteils um 4%**.
Zielwert über Heizperiode bei hoher Auslastung des Holzkessels (Auslastung > Forderung QM Holzheizwerke für Vollbetriebsstundenzahl Holzkessel und minimale Tagesheizlast, geringe Anzahl von Start- und Ausbrandphasen mit geringem Anteil Glutbettunterhaltbetrieb [2]): **mittleres $\lambda < 1.7_{\text{feucht}}$** entspricht O_2 feucht < 9%, respektive während des stationären Betriebs des Holzkessels über den gesamten Leistungsbereich 30 - 100% **$\lambda < 1.5_{\text{feucht}}$** entspricht O_2 feucht < 7% (dies ist nur mit **einem stabilen Brennstoffbett und Abgasrezirkulation** möglich).
- Die Qualität der Wärmeübertragung Abgaswärme (sensibel und latent) auf das Wasser des Rücklaufs des Heizsystems wird durch die **Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** bestimmt. Sie bestimmt direkt wie viel Kelvins die Abgase unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden können.
Zielwerte: Auslegefall maximale WRG-Leistung < **4K**, Mittelwert über Gesamtbetriebszeit < **2 K**
- Die **mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** über die Heizperiode bestimmt direkt wie viel Kelvins die Abgase unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden können.
Zielwert mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ über die Heizperiode: < **45°C** (speziell bei Hackschnitzeln aus dem Wald)
Kann der Zielwert mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ über die Heizperiode: < 45°C nicht erreicht werden, ist die Installation einer Verbrennungsluftbefeuchtung (Vorwärmung mit Befeuchtung und Nacherwärmung (damit kein Kondensat in den Verbrennungsluftkanälen anfällt)) zu prüfen, welche die Taupunkttemperatur der Abgase um ca. 4 K anhebt, respektive den **WRG-Anteil um 4% erhöht**.

Eine Holzkesselanlage mit Abgaskondensationsanlage ist eine verfahrenstechnische Anlage, welche für einen optimalen Betrieb eine kontinuierliche Datenaufzeichnung für die Visualisierung und das Erstellen von Datentrendings erfordert, damit Betriebsstörungen (z.B. verstopfte Wasserdüsen, etc.) und unerwünschte Regelfunktionen kurzfristig erkannt und behoben werden können.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezüglich den Zusatzinvestitionen für die Abgaskondensationsanlage des Holzkessels des Nahwärmeverbands B im Bericht: „Effizienzverbesserung eines Nahwärmeverbands, Mai 2011“ zeigt auf, dass die Holzkesselanlage mit dem **aktuellen mittleren WRG-Anteil** über die Heizperiode 2012/2013 von ca. **9.2%** bei einem mittleren Wassergehalt im Brennstoff von $W < 40\%$ gegenüber dem vorgegebenen **Zielwert** für die Energieeffizienzsteigerung durch die WRG der Abgaskondensationsanlage von **18.4% WRG-Anteil** bei einem angenommenen mittleren Wassergehalt im Brennstoff von $W = 50\%$ nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Für die Abgaskondensationsanlage wurde eine Amortisationszeit (Pay-Back) von **9.9 Jahren** ausgewiesen.

Der aktuelle WRG-Anteil von 9.2%, respektive ca. 275 MWh/a, anstelle wie vorgegeben 550 MWh/a ergibt einen aktuellen Erlös (5.85 Rp/kWh verkaufte Wärme entspricht einem Preis von 4.72 Rp/kWh Endenergie Holz) pro Heizperiode von Fr. 16'087.-/a, anstelle Fr. 32'215.-/a.

Die aufgeführten Betriebskosten von Fr. 3'313.-/a verdoppeln sich trotz reduziertem WRG-Anteil auf Fr. 6'830.-/a durch folgende effektiv anfallende Kosten:

- Fr. 1'600.-/a für Wasserbedarf (Netzwasser) von ca. 1'000m³/a statt Fr. 113.-/a für 70 m³/a durch Störungen Wasserventil und erhöhten mittleren Wasserbedarf (Vorgabe pro Betriebsstunde 20l/h, effektiv 80 - 90 l/h pro Betriebsstunde ohne Einfluss Störung Wasserventil!).
- Fr. 3'630.-/a für elektrischen Energiebedarf von 24.2 MWh/a statt Fr. 1'600.-/a für 10.6 MWh/a.

Beim aktuellen Betrieb sind die jährlichen Gesamtkosten von Fr. 24'830.- (Kapitalkosten Fr. 18'450.-/a und Betriebskosten Fr. 6'830.-/a) wesentlich höher als der jährliche Erlös von Fr. 16'087.-/a.

Dies ergibt einen **jährlichen Verlust von Fr. 8'743.-/a**.

Abgaskondensationsanlagen können bei einem Preis im Bereich von **5 Rp/kWh Endenergie Holz** (aktueller Energieholzpreis für Waldhackschnitzel) nur wirtschaftlich betrieben werden, wenn der **WRG-Anteil der nutzbaren latenten Wärme (Kondensationswärme) > 10%** ist und die Betriebskosten tief sind durch das Einhalten der Zielwerte pro MWh zurückgewonnener Wärme; mittlerer **Wasserbedarf < 0.2 m³/MWh** und **mittlerer elektrischer Energiebedarf < 40 kWh/MWh**.

Rahmenbedingungen, welche eingehalten werden müssen, damit eine **Holzkesselanlage mit Abgaskondensation** beim Verbrennen von Waldhackschnitzel zu einem Preis von **5 Rp/kWh Endenergie Holz** mit einem mittleren Wassergehalt **W < 40%** **wirtschaftlich betrieben werden kann**:

- **Luftüberschuss**: - im stationären Betrieb des Holzkessels über den gesamten Leistungsbereich 30 - 100%: $\lambda < 1.5_{\text{feucht}}$ (Abgasrezirkulation erforderlich)
- im Mittel über die jährliche Betriebszeit der Holzkesselanlage: $\lambda < 1.7_{\text{feucht}}$ (optimale Auslastung der Holzkesselanlage: Vollbetriebsstundenanzahl pro Jahr > 3'000)
- **Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** : **< 45°C**
< 50°C bei Holzkesselanlagen mit einer Kesselnennleistung > 1'000 kW und Verbrennungsluftbefeuchtung
- **Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$** : Auslegefall maximale WRG-Leistung: **< 4K**
Mittelwert über Gesamtbetriebszeit: **< 2 K**

Liegt die Rücklauftemperatur Heizsystem über dem Niveau, so dass der WRG-Anteil der nutzbaren latenten Wärme (Kondensationswärme) $> 10\%$ auch unter Einbezug der Installation einer Verbrennungsluftbefeuchtung nicht erreicht werden kann, so ist die Installation eines Economisers vorzuziehen, welcher die sensible (fühlbare) nutzbare Wärme in den Abgasen mit einem möglichst hohen Anteil (mittlerer WRG-Anteil 4 - 6%) direkt auf das Heizsystem überträgt (Anordnung Economiser: Holzkessel mit hoher Auslastung (Bandlastkessel) vor dem Elektropartikelabscheider, Holzkessel mit erhöhtem Schwachlastanteil nach dem Elektropartikelabscheider).

Der wirtschaftliche Betrieb einer Abgaskondensationsanlage mit Wärmepumpe ist durch die hohen zusätzlichen Investitionen und Betriebskosten schnell in Frage gestellt bei einem Preis im Bereich von 5 Rp/kWh Endenergie Holz, speziell wenn die Variante einem optimal eingebunden Economiser gegenüber gestellt wird.

Holzheizwerke, welche zwingend schwadenfrei betrieben werden müssen, sind mit einer Entschwadungsanlage mit Abgaskondensation auszurüsten. Damit können die Abgase möglichst tief abkühlt und der Wassergehalt in den Abgasen stark reduziert werden (Trocknung der Abgase). Die Mehrkosten für die Entschwadung können wirtschaftlich und energetisch nur begründet werden mit dem Betrieb einer Holzkesselanlage mit Abgaskondensation, welche schwadenfrei betrieben werden muss und einen hohen WRG-Anteil $> 20\%$ aufweist.

Bei der detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der effektive WRG-Anteil der Abgaskondensationsanlage zu beachten. Die Leistungserhöhung der Holzkesselanlage durch die Abgaskondensation bildet ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil, welcher zu berücksichtigen ist.

6 Ausblick

Holzesselanlagen mit Abgaskondensation, welche Waldhackschnitzel mit einem mittleren Wassergehalt von $W < 40\%$ verbrennen, können mit der erforderlichen hohen Auslastung und unter der Einhaltung der oben aufgeführten Zielwerte bezüglich Luftüberschuss (Abgasrezirkulation erforderlich), Temperaturdifferenz $T_{\text{Abgas Austritt}} - T_{\text{Rücklauf Heizsystem}}$ und mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} < 45^\circ\text{C}$ mit einem WRG-Anteil (mittlere Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}} 150^\circ\text{C}$ bei $\lambda < 1.5_{\text{feucht}}$) von **17%**, statt aktuell heute von **10%** betrieben werden. Ein WRG-Anteil $> 20\%$ kann nur erreicht werden mit der Installation einer Verbrennungsluftbefeuchtung oder bei einer mittleren Temperatur $T_{\text{Abgas Eintritt}} > 200^\circ\text{C}$.

Abgaskondensationsanlagen von Holzesseln (ein Kessel- oder zwei Kesselanlagen) im Leistungsbereich bis 1.5 MW Gesamtwärmeleistung werden dichte (keine Verdünnung der Abgase !) Trockenelektropartikelabscheider mit hoher thermischer Isolation vorgeschaltet. Damit kann das aufwendige Nassschlammensorgungsverfahren vermieden werden. Nachteilig ist der Verlust an sensibler Wärme durch die Wärmeverluste über den Trockenelektropartikelabscheider von ca. 2% WRG-Anteile.

Bei Abgaskondensationsanlagen von Holzesseln (ein Kessel- oder zwei Kesselanlagen) im Leistungsbereich grösser 1.5 MW Gesamtwärmeleistung kann als Alternative zum vorgeschalteten Elektropartikelabscheider ein Nasselektropartikelabscheider nachgeschaltet werden. Vorteilhaft ist, dass die sensible Wärme in den Abgasen aus dem Holzessel beinahe verlustfrei genutzt werden kann. Das aufwendige Nassschlammensorgungsverfahren ist bei der vorgegebenen Anlagegrösse gerechtfertigt. Die Verfügbarkeit des Nasselektropartikelabscheiders liegt bei 100%, da er nicht in Abhängigkeit der Abgastemperatur ein- und ausgeschaltet wird.

Der Einsatz einer Wärmepumpe bei einer Abgaskondensationsanlage ist technisch sinnvoll, wenn die Abgaskondensationsanlage mit den oben aufgeführten Zielwerten betrieben wird und die mittlere Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} > 55^\circ$ ist. Bei einer mittleren Temperatur $T_{\text{Rücklauf Heizsystem}} < 55^\circ$ ist zusätzlich die Installation einer Verbrennungsluftbefeuchtung zu prüfen. Nicht empfehlenswert ist der Einsatz einer Wärmepumpe, um das Nicht-Einhalten der Zielwerte zu kompensieren (Praxisbeispiel: Holzessel mit Abgaskondensationsanlage und Wärmepumpe ohne Economiser: WRG-Anteil 20%, Jahresarbeitszahl WP = 2!).

Der Betrieb der Wärmepumpenanlage, welche in einem grossen Leistungsbereich (ca. 10 - 100%) optimal mit einer hohen Jahresarbeitszahl betrieben werden soll, ist eine grosse technische Herausforderung. Die sensible (fühlbare) nutzbare Wärme in den Abgasen ist mit einem möglichst hohen Anteil mit einem Economiser direkt auf das Heizsystem zu übertragen, um die Übertragungsleistung der Wärmepumpe zu reduzieren, respektive um nur den Hauptanteil der nutzbaren latenten Wärme (Kondensationswärme) auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben.

Durch das Einhalten der Zielwerte bezüglich des mittleren Wasserbedarfs $< 0.2 \text{ m}^3/\text{MWh}$ und des mittleren elektrischen Energiebedarfs der Abgaskondensationsanlage ohne Zusatzanteil Abgasventilator $< 40 \text{ kWh}/\text{MWh}$ bei einem mittleren WRG-Anteil $> 15\%$ kann die Abgaskondensationsanlage effizient und mit tiefen Hilfsenergiekosten betrieben werden, was einen grossen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Abgaskondensationsanlage hat.

Der Förderung der Energieeffizienz von Holzesselanlagen hat hohe Priorität.

Zu beachten ist, dass Abgaskondensationsanlagen in der Zukunft nur realisiert werden, wenn sie wirtschaftlich betrieben werden können.

Dieser Nachweis ist durch die Optimierung der bestehenden Anlagen und der Realisierung von Neuanlagen zu erbringen, welche die geforderten Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einhalten können.

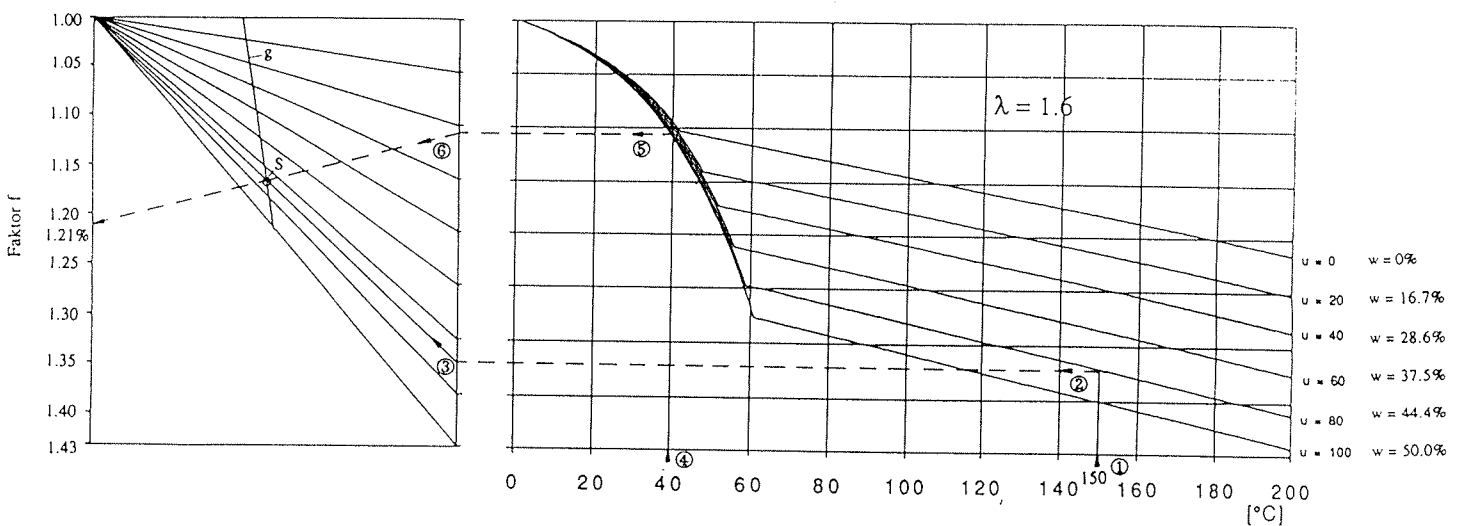
7 Literatur

- [1] Schlussbericht BFE: *Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen*, Arbeitsgemeinschaft IEU, Nussbaumer und Steiger, Juni 1995
- [2] QM Holzheizwerke: Ruedi Bühler, Hans Rudolf Gabathuler, Andres Jenni: *Q-Leitfaden Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 1*, Holzenergie Schweiz, 3. Auflage 2011, ISBN 978-3-937441-91-7

8 Beilagen

- Anhänge A1.1 – A.1.4 (detaillierte Datenaufzeichnungen Wärmeverbund Anlage A)
- Anhänge A2.1 – A.2.2 (detaillierte Datenaufzeichnungen Nahwärmeverbund Anlage B)
- Anhänge A3.1 – A.3.2 (detaillierte Datenaufzeichnungen Anlage C)
- Anhang A4 Diagramme BFE Projekt „Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen
- Anhang A5 Diagramme Wärmerückgewinnung von IS SaveEnergy AG

Mit dem untenstehenden Diagramm kann die Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur bestimmt werden. Bei Grünschnitzelfeuerungen ($u = 80\%$, $\lambda = 1.6$, $T_{AG} = 150^\circ\text{C}$) kann mit der Kondensation der Abgase eine Wirkungsgradverbesserung von Faktor $f = 1,21$ erzielt werden. Dazu müssen die Abgase auf 40°C abgekühlt werden.



Bestimmung der Wirkungsgradverbesserung

Beispiel: Brennstoff $u = 80\%$, ($w = 44.4\%$), die Abgase können von 150°C , $\eta_f = 90\%$ auf 40°C abgekühlt werden

Bestimmung: Die Bestimmung der Wirkungsgradverbesserung erfolgt nach den Schritten \pm bis \pm wie oben im Diagramm eingezeichnet. Beim Schritt \pm ist eine Gerade durch den Schnittpunkt S zu legen. Der Schnittpunkt S liegt immer auf der Geraden g und ergibt sich aus dem Schritt \pm .

Ergebnis: Durch die Abkühlung der Abgase erhöht sich der Wirkungsgrad gegenüber dem Ausgangspunkt um den Faktor $f = 1.21$. Der Wirkungsgrad bei 40°C erhöht sich somit auf $1.21 \times 90\% = 108.9\%$

Diagramm 1: Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur für $\lambda = 1.6$

Einfluss der Luftüberschusszahl:

Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur

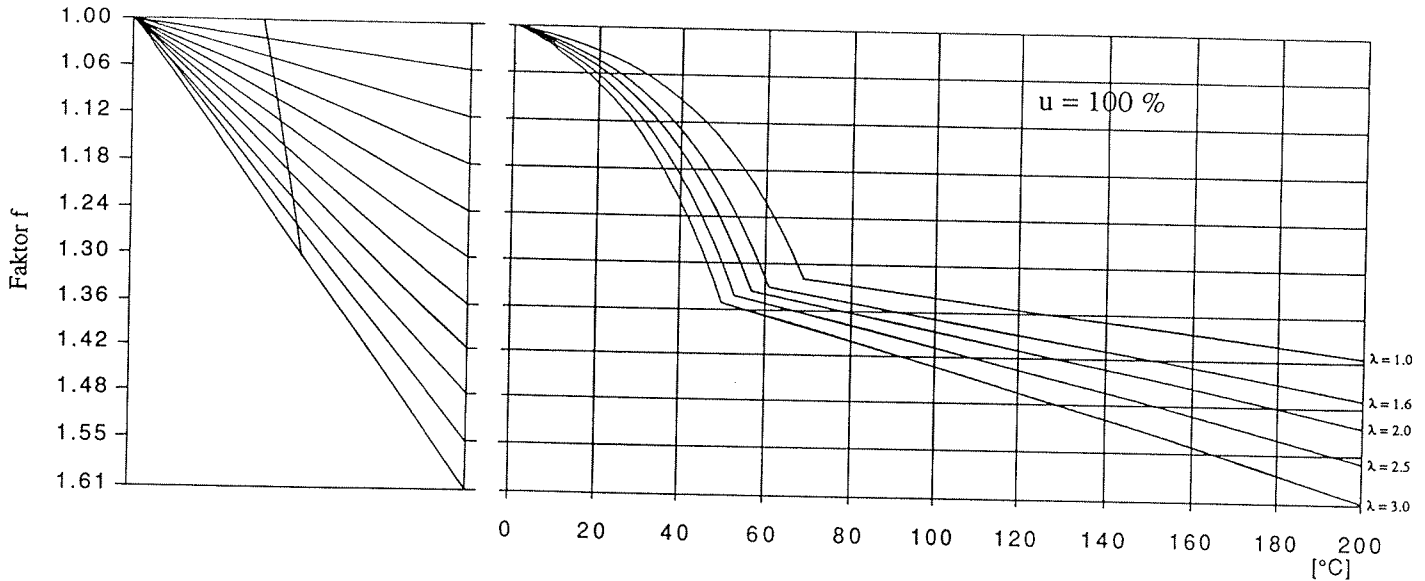
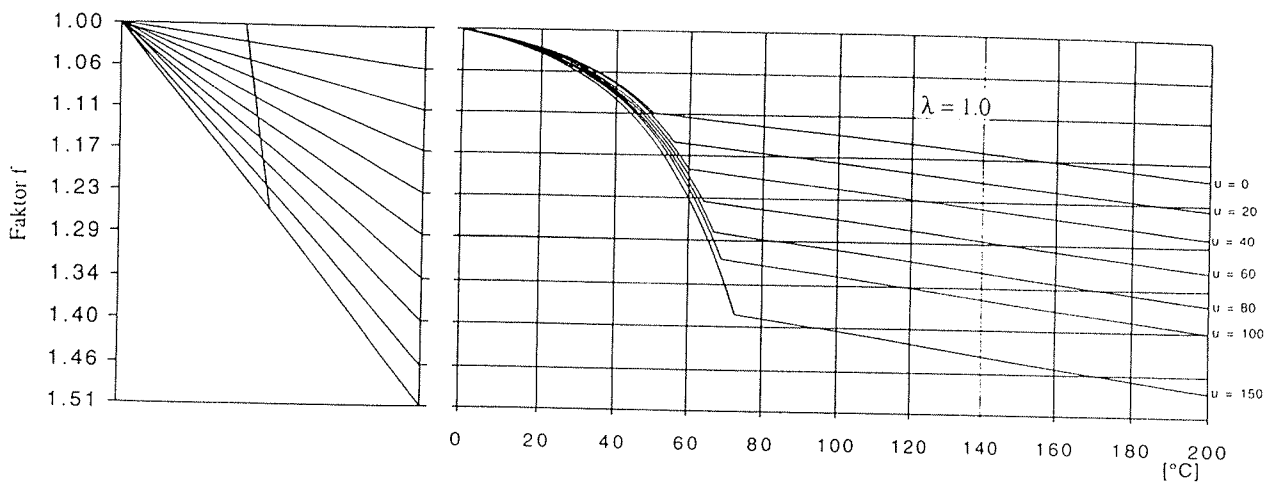


Diagramm 4: Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur bei $u = 100\%$

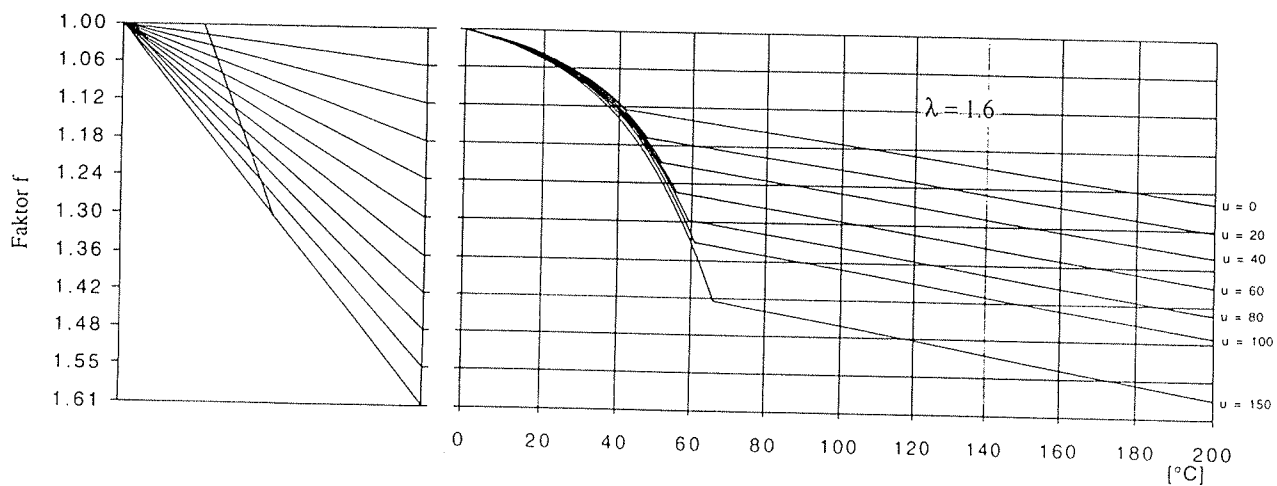
Mit zunehmender Luftüberschusszahl λ nimmt die nutzbare Wärme aus den Abgasen auf eine bestimmte Temperatur bezogen ab. Zudem senken hohe Luftüberschusszahlen den Taupunkt. Wird also von der heute idealen Luftüberschusszahl $\lambda = 1.6 - 1.7$ abgewichen, muss mit einer reduzierten Wirkungsgradverbesserung gerechnet werden. Bei einer Erhöhung der idealen Luftüberschusszahl $\lambda = 1.6 - 1.7$ muss mit einer Wirkungsgradverschlechterung von ca. 0.88% pro $\Delta\lambda = 0.1$ gerechnet werden.

Das Diagramm, welche den Einfluss der Luftüberschusszahl λ für die Holzfeuchte $u = 20\%$ aufzeigt, befindet sich im Anhang A.6.

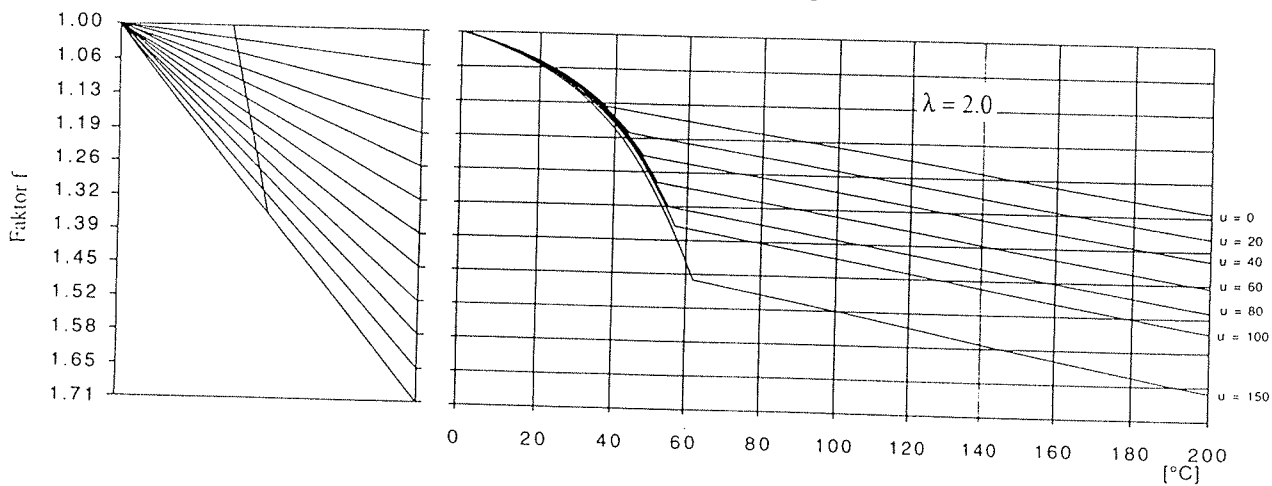
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



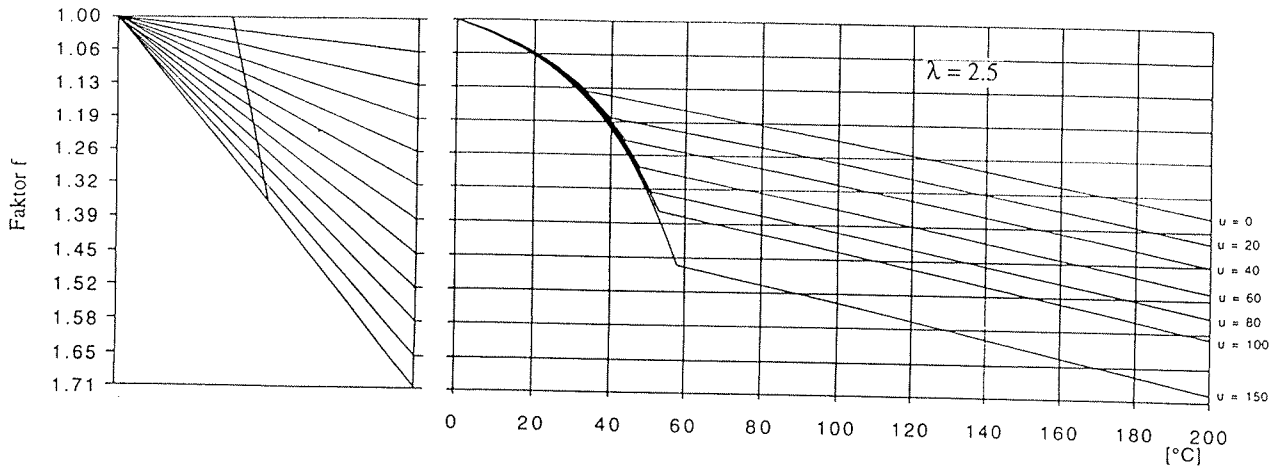
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



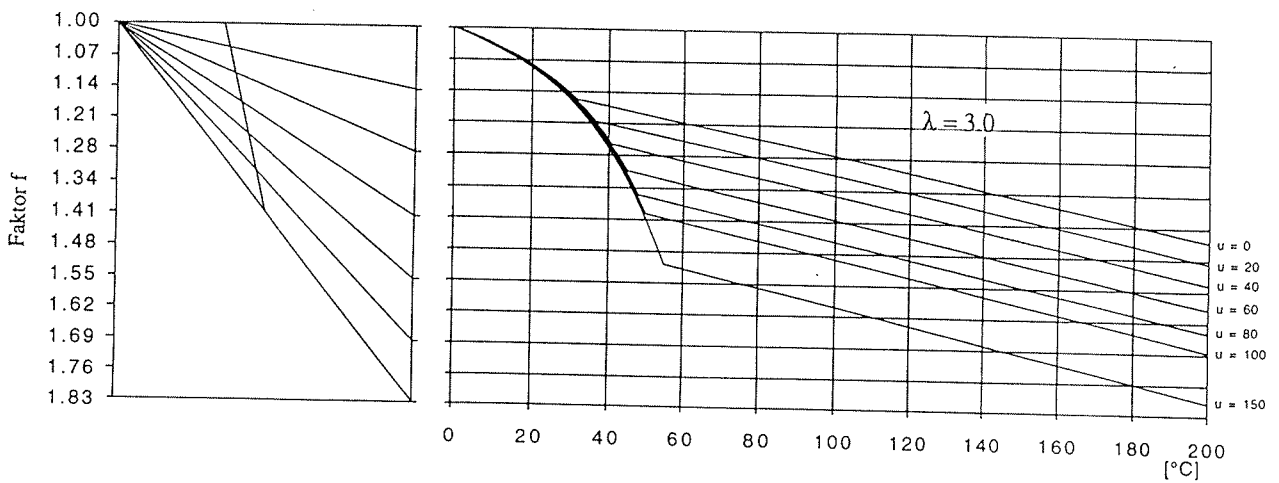
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



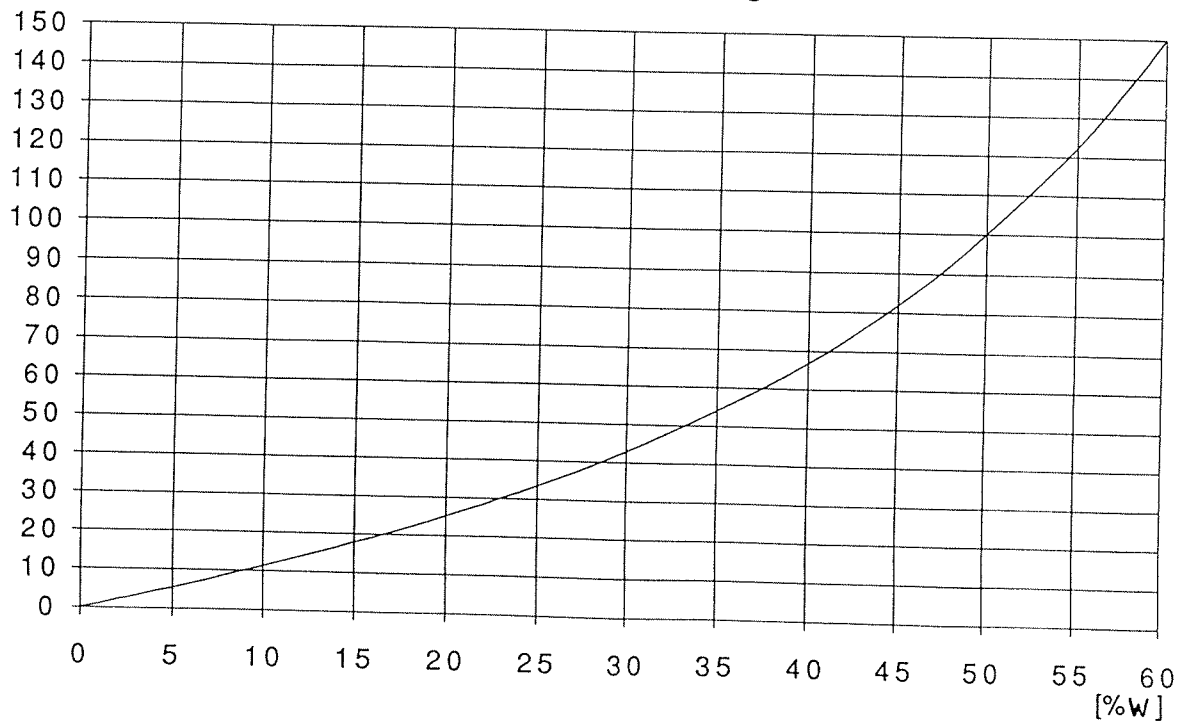
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



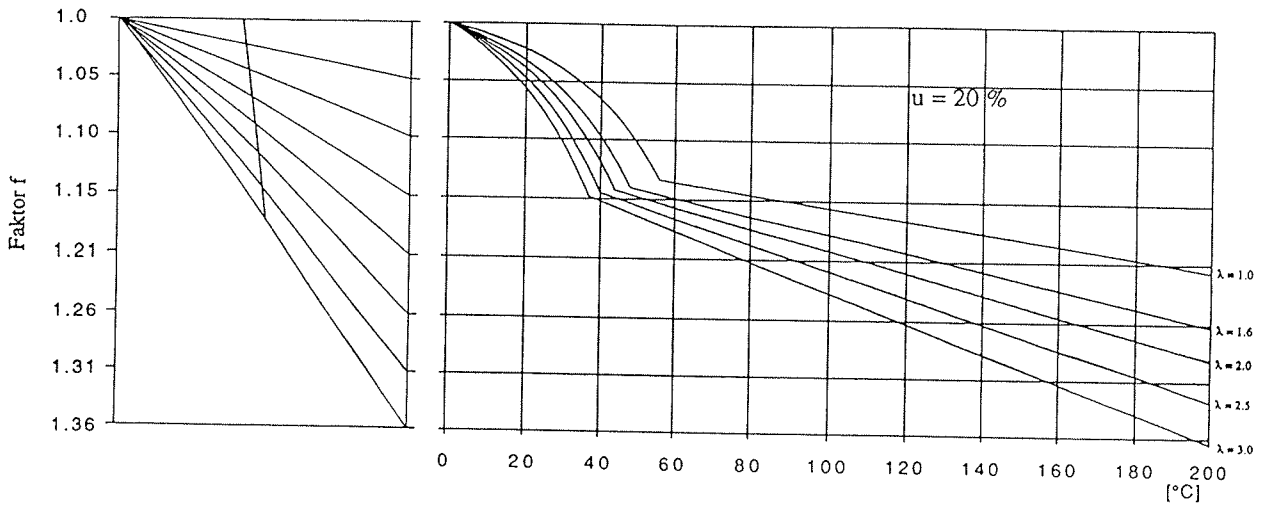
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



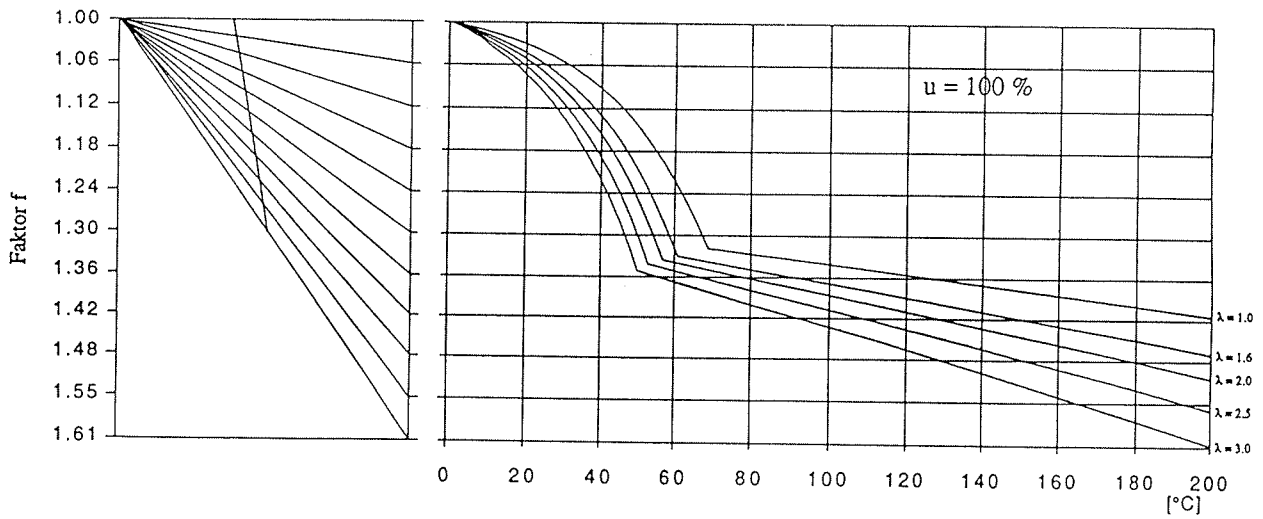
[% u] Zusammenhang Holzfeuchte x und Wassergehalt w



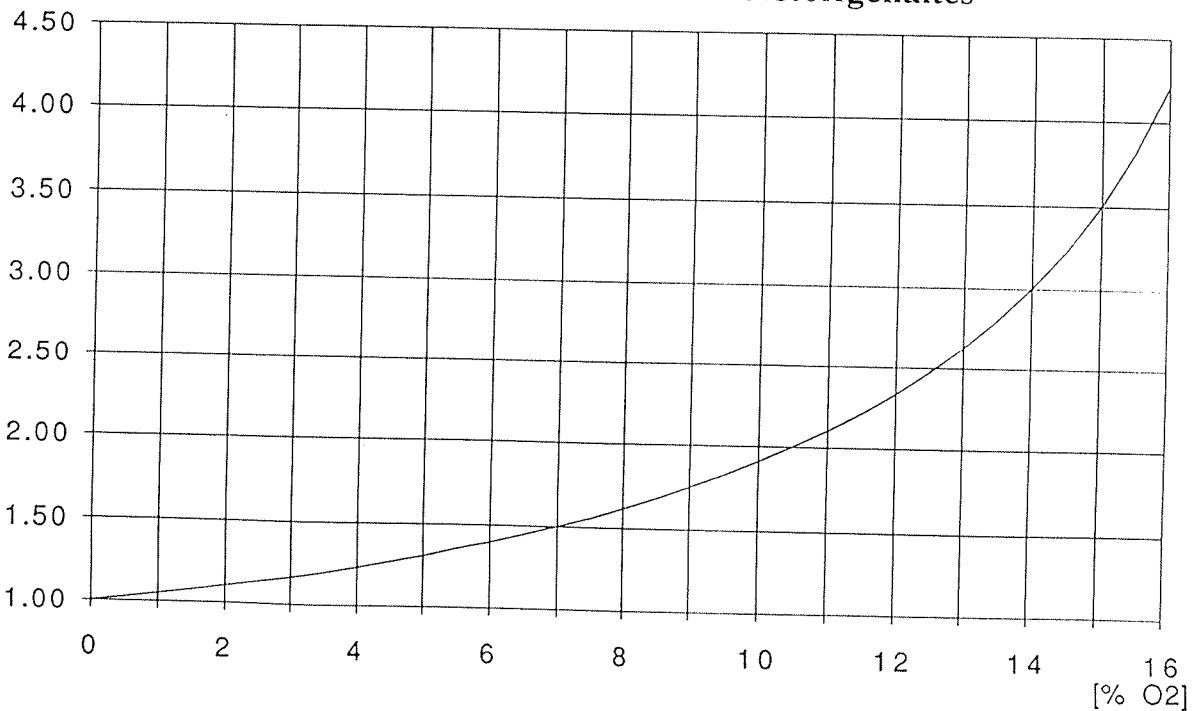
Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur

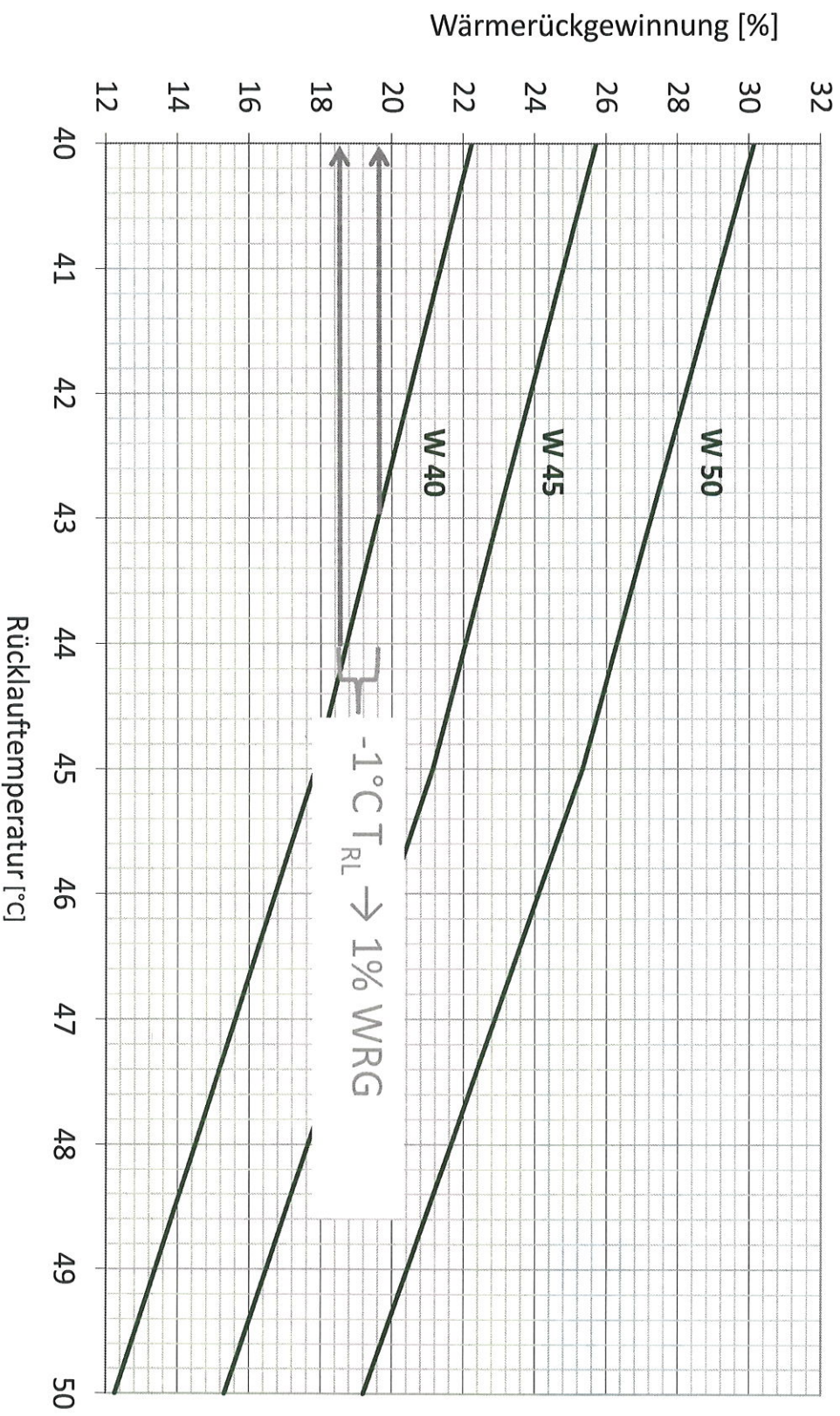


Wirkungsgradverbesserung in Funktion der Abgastemperatur



[λ] Luftüberschusszahl in Funktion des Sauerstoffgehaltes





O₂ Gehalt (feucht): 8 [vol-%] / Abgastemperatur: 180[°C] / Holzsplitzel / Standort: 450 [m.ü.M]

Der Phasenwechsel vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand ist energetisch aufwendig. Beim Verbrennungsprozess von Holz wird eine grosse Menge Wasser verdampft. Die dafür aufgewendete Energie geht im Abgas verloren. Durch die Abgaskondensation lassen sich die latente und die sensible Wärme zurückgewinnen.

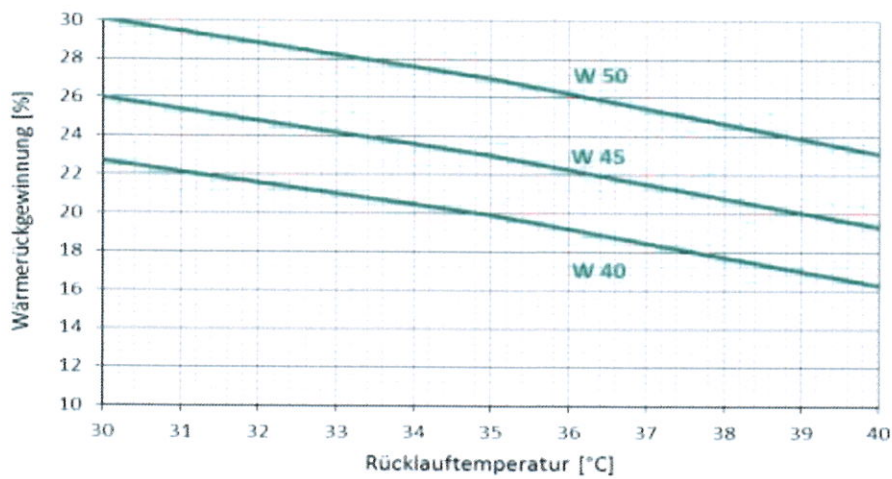


Abbildung 1: Wärmerückgewinnungspotential (280 m.ü.M., O₂(nass): 8%, Abgast.: 130 [°C], Holzschnitzel)