

**JAHRESBERICHT 1997**

Über die Arbeiten gemäss Vertrag: 58 108

Titel des Projekts: Abgaskondensation bei Holzfeuerungen**Zusammenfassung:**

Ziel des Projekts ist ein Vergleich verschiedener Abgaskondensationsverfahrens in Bezug auf Energie und Verhinderung von Dampfschwaden. Aufgrund des Vergleichs und der thermodynamischen Prozessgrundlagen sollen Richtlinien für die optimale Auslegung von Kondensationsanlagen aufgezeigt werden. Im weiteren soll die mit Kondensation und Quench ausgerüstete Anlage HGA in Affoltern bezüglich Energiehaushalt optimiert und bezüglich Entschwadung verbessert werden.

Im Berichtsjahr wurde ein Berechnungsprogramm erstellt, welches das Mollier-Diagramm für Abgase aus Holzfeuerungen liefert und die Berechnung des Kondensationsprozesses ermöglicht. Unter Berücksichtigung der wichtigsten Betriebsparameter können damit verschiedene Anlagenkonzepte verglichen und Massnahmen zur Entschwadung beurteilt werden. Der Vergleich zwischen berechneten Daten und Messdaten der Anlage in Affoltern zeigen folgende Ursachen auf für die unzureichende Entschwadung: Zu hohe Rücklaufemperaturen, Übersättigung des Abgases vor der Entschwadung um rund 20% (Nebel), ungenügende Vermischung von Abgas und Entschwadungsluft am Kaminaustritt sowie hoher Luftüberschuss im Abgas und schwankender Lastbetrieb der Anlage.

Durch den Einbau eines Tropfenabscheiders konnte die Übersättigung auf rund 5% vermindert werden. Im weiteren wurde der Luftüberschuss durch Wassereindüsung in den Brennraum abgesenkt, ohne dass Probleme durch Verschlackung oder unzulässige Wandtemperaturen auftraten. Durch Veränderung der Regelparameter konnte zudem das Lastverhalten der Anlage verbessert werden. Mit Staubmessungen vor und nach der Kondensationseinheit konnte eine Partikelabscheidung über den Kondensator bestätigt werden. Infolge des grossen Anteils aerosolförmiger Partikel $< 1\mu\text{m}$ wird allerdings nur eine Staubreduktion um rund 30% erreicht. Die getroffenen Massnahmen verbessern die Entschwadung mit geringem apparativem Aufwand, sie reichen jedoch nicht aus für die Gewährleistung eines schwadenfreien Betriebs. Aus diesem Grund werden weitere Massnahmen geprüft, insbesondere der Einsatz einer Wärmepumpe zur Absenkung der Rücklauftemperatur sowie die Verbrennungsluftbefeuchtung zur Absenkung der Abgastemperatur.

Dauer des Projekts: 1.1.96 – 31.12.98**Beitragsempfänger:** Verenum**Berichtersteller:** Dr. J. Good, Dr. P. Neuenschwander, Dr. Th. Nussbaumer**Adresse:** Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – 8006 Zürich**Telefon:** 01' 364 14 12

1 Projektziele

Die direkte Versorgung von Holzfeuerungen mit Waldhackschnitzeln aus dem Wald, welche ohne aufwendige Zwischenlagerung und Trocknung angeliefert werden, kann die Wirtschaftlichkeit von Holzfeuerungen wesentlich verbessern. Aus diesem Grund hat in den vergangenen Jahren in der Schweiz die Verbrennung von Holzbrennstoffen mit hohem Wassergehalt an Bedeutung gewonnen. Bei der Verwertung von Holz mit hohem Wassergehalt kann bei geeigneten Betriebsbedingungen eine signifikante Wirkungsgradverbesserung durch Abgaskondensation erzielt werden. Es besteht deshalb ein Interesse, vermehrt Feuerungsanlagen mit Kondensationseinheiten einzusetzen. In der Schweiz ist bei der Heizgenossenschaft Affoltern (HGA) die erste grosstechnische Anlage mit einer Gesamtleistung von 6.6 MW_n realisiert worden. Bei der Auslegung der Anlage wurde auf niedrige Rücklauftemperaturen des Fernwärmenetzes geachtet und durch geeignete Anlagenschaltung ein hoher Gesamtwirkungsgrad angestrebt.

In anderen europäischen Ländern sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Holzfeuerungen mit Abgaskondensation realisiert worden. Die dabei gemachten Erfahrungen sollen für den Bau zukünftiger Anlagen in der Schweiz ebenfalls einbezogen werden. Allerdings war der Bau von Kondensationsanlagen in den meisten Fällen nicht durch die Erhöhung des Wirkungsgrades motiviert, da die zu verwertenden Brennstoffe wie im Falle von nasser Rinde meist als zu entsorgende Nebenprodukte der Holzverarbeitung anfallen und die Brennstoffkosten deshalb nur von untergeordneter Bedeutung sind. Vielmehr sind die meisten Kondensationsanlagen durch die Notwendigkeit der Abgasentschwadung motiviert. Da die Abgasmenge durch Beimischung vorgewärmter Luft für die Entschwadung um ein mehrfaches erhöht wird, hat die Abgaskondensation unter Umständen keinen positiven Effekt mehr auf die Energiebilanz. Bis anhin liegen nur vereinzelte Erfolgskontrollen mit zuverlässigen Energiebilanzen vor, weshalb die Auswirkung dieser Anlagen auf den Gesamtwirkungsgrad nicht bekannt ist.

Im vorliegenden Projekt werden in diesem Zusammenhang zwei Teilaufgaben behandelt. Einerseits soll ein thermodynamischer Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten der Abgaskondensation bei Holzfeuerungen erarbeitet werden. Dieser soll den Einfluss der wichtigsten Betriebsparameter (Rücklauftemperatur, Brennstofffeuchtigkeit und Luftüberschuss) auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage sowie den Einfluss der Anforderung auf schwadenreien Betrieb aufzeigen. Der Vergleich soll dazu dienen, dass bei der Planung zukünftiger Anlagen der Gesamtwirkungsgrad maximiert wird. Da die Anlage HGA bis anhin nicht den erwarteten Betrieb ohne Schwaden erzielte, soll in einer zweiten Teilaufgabe das Betriebsverhalten der Anlage HGA im praktischen Betrieb untersucht werden und es sollen Massnahmen zur Optimierung des Gesamtwirkungsgrades und zur Entschwadung aufgezeigt werden. Die Zielsetzung für die beiden Teilaufgaben kann wie folgt formuliert werden:

Teil 1: Systemvergleich verschiedener Abgaskondensationsverfahren

- Beschreibung der Verfahrensprozesse der verschiedenen Abgaskondensationsverfahren, insbesondere Anlagen mit und ohne Quench sowie Prüfung der Möglichkeiten zur Kombination mit Wärmepumpen
- Beschreibung der Thermodynamik der Abgaskondensation für die verschiedenen Verfahren und Berechnung des Wirkungsgrades und des Einflusses der wichtigsten Betriebsparameter (Wassergehalt, Luftüberschuss, Temperatur)
- Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Verfahren
- Vergleich von Betriebsdaten ausgeführter Anlagen in der Schweiz (Affoltern), in Österreich und in Dänemark

- Beurteilung der Einsatzgebiete aufgrund der Auslegungsdaten sowie anhand der verfügbaren Betriebserfahrungen

Teil 2: Erfolgskontrolle und Betriebsoptimierung HGA

- Erfassung des Betriebsverhaltens der Abgaskondensationseinheit in Affoltern und Vergleich mit den Auslegungsdaten
- Vorschlag von Massnahmen zur Betriebsoptimierung der Kondensatoreinheit und apparative oder betriebliche Massnahmen zur sicheren Funktion der Entschwadung. In Frage kommende Massnahmen, welche in einer Vorabklärung zu evaluieren sind, sind insbesondere: Tropfenabscheidung, Prozessregelung in Funktion des Wasserdampfgehalts, Absenkung der Abgastemperatur nach Kondensator z.B. durch Einsatz einer Wärmepumpe
- Erfolgskontrolle der getroffenen Massnahmen nach deren Realisierung
- Erarbeitung von Optimierungsrichtlinien für den Bau und Betrieb zukünftiger Anlagen

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Durchgeführte Arbeiten

- Erstellen eines Programms zur Berechnung des Mollier-Diagramms für Abgase aus Holzfeuerungen und deren Mischung mit Umgebungsluft unter Berücksichtigung der wichtigsten Betriebsparameter (Holzzusammensetzung, Luftüberschuss, Umgebungsdruck, Luft- und Wassertemperaturen). Vergleich mit Messdaten verschiedener Anlagen.
- Untersuchung der Ursachen der Schwadenbildung in Affoltern
- Erarbeitung von Massnahmen zur Sicherstellung der Entschwadung der Abgase, insbesondere:
 - Realisierung folgender Massnahmen zur Verbesserung der Entschwadung:
 - Einbau eines Tropfenabscheiders bei Kessellinie 1
 - Wassereindüsung in die Brennkammer bei Kessel 1 geregelt in Funktion der Leistung
 - Verminderung des Luftüberschusses bei Wassereindüsung durch Erhöhung der Soll-Verbrennungstemperatur
 - Befeuchtung des Brennstoffs im Zufuhrkanal für Kessel 1 bis 3
 - Realisierung folgender Massnahmen zur Stabilisierung des Lastverhaltens:
 - Verhindern der automatischen Zu-/Abschaltung der zweiten Kesselpumpe bei Über-/Unterschreitung von 45 % Leistung
 - Verlangsamung der Leistungsanpassung
 - Prüfung von Möglichkeiten der Verbrennungsluftbefeuchtung (Anlagenbesichtigung in Trollhätten, Schweden; 25 MW Biomassefeuerung, 7.5 MW Kondensator, Elektrofilter)
- Teilnahme an Workshop zum Thema Abgaskondensation am Joanneum Research in Graz (Reisebericht)

2.2 Ergebnisse

- Die thermodynamischen Berechnungen sowie die Messungen an der Anlage in Affoltern zeigen folgende Ursachen auf für die unzureichende Entschwadung (Zwischenbericht vom März 1997):

Berechnung des Mollier-Diagramms für Abgas

In der Regel wird bei der Auslegung von lufttechnischen Anlagen mit dem Mollier-Diagramm für Luft bei Normaldruck ($p_U = 1013 \text{ mbar}$) gearbeitet. Bei der Entschwadung von Abgas muss für eine exakte Auslegung mit der Abgaszusammensetzung und dem Absolutdruck gerechnet werden. Für eine vereinfachte Abschätzung gilt in Bezug auf die Entschwadung:

- Luft ist kritischer als Abgas (Luft enthält bei gleicher Temperatur im Sättigungszustand ca. 8% mehr Wasser) bzw. Abgas mit hohem Luftüberschuss ist kritischer als Abgas mit tiefem Luftüberschuss
- tieferer Druck ist kritischer als hoher Druck (bei 913 mbar enthält das Gas im Sättigungszustand 13% mehr Wasser als bei 1013 mbar).

Um für eine einfache Auslegung der Entschwadung auf der sicheren Seite zu liegen, kann mit dem Mollier-Diagramm für Luft gerechnet werden, wobei der Umgebungsdruck des Anlagenstandorts (Höhe über Meer, Tiefdruck-Wetterlage) berücksichtigt werden muss.

Für eine genauere Auslegung kann im Falle von Affoltern a. A. (488 m. ü. M.) unter Berücksichtigung der Abgaszusammensetzung mit

- $\lambda = 2.5$
- $p_U = 930 \text{ mbar}$

gerechnet werden, um bezüglich Entschwadung auf der sicheren Seite zu liegen.

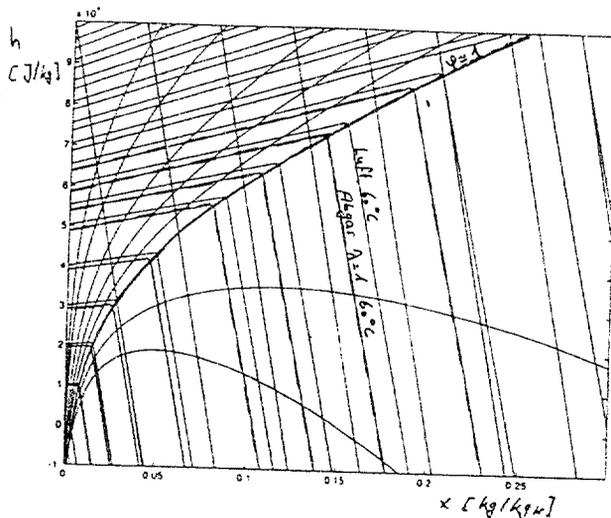


Abbildung 1 Mollier-Diagramm für Luft und Abgas ($\lambda=1$) bei $p_U = 1013 \text{ mbar}$.

Feuchtemessungen im Abgas vor Entschwadung bei Kessel 1

Mittels Feuchtemessungen wurde der Sättigungszustand des Abgases nach dem Kondensator und nach dem Glasrohrwärmetauscher (vor der Entschwadung) überprüft. Dabei wurde erwartungsgemäss festgestellt, dass das Abgas nach dem Kondensator gesättigt ist. Nach dem Glasrohrwärmetauscher wurde eine deutliche Übersättigung des Abgases um 10% bis 20% festgestellt. Dies bedeutet, dass im feuchten Abgas zusätzlich ein Nebel von feinen Wassertropfchen vorhanden ist, der die Entschwadung erschwert.

Vermischung von Entschwadungsluft und Abgas

Da die Entschwadungsluft über eine Ringdüse am Kaminende ausgeblasen wird und sich erst dort mit dem Abgas mischen kann, kann sich bestenfalls die Hälfte der Entschwadungsluft überhaupt mit dem Abgas mischen.

Luftüberschuss

Kessel 1 wird bei 80% Leistung mit einem Luftüberschuss von $\lambda \approx 2.5$ betrieben.

Anlagenbetrieb

Die Feuerungsleistung der Kessel schwankt mit einer Periode von ca. einer Stunde zwischen Minimallast und einer vom Anlagenbetreuer vorgegebenen Maximalleistung. Beim Über- bzw. Unterschreiten von 45% Leistung wird ausserdem eine zweite Kesselpumpe zu- bzw. abgeschaltet. Dies verstärkt die Schwankungen auch auf der hydraulischen Seite, wodurch die Rücklauftemperaturen der Fernleitungen schwanken und somit der Betrieb der Kondensatoren beeinträchtigt wird.

- Aktivitäten zur Verbesserung der Entschwadungssituation in Affoltern

Luftüberschuss:

Bei tiefem Luftüberschuss wird neben der Feuerung auch der Kondensator energetisch optimal betrieben, weil der Taupunkt des Abgases hoch ist. Ausserdem ist der Abgasvolumenstrom niedrig, was die Entschwadung erleichtert.

Durch Eindüsung von Wasser in den Feuerraum konnte Kessel 1 bei tieferem Luftüberschuss ($\lambda \approx 2.0$ bei 80% Leistung) betrieben werden. Die Verdampfung des zusätzlichen Wassers wird im Kondensator wieder zurückgewonnen.

Tropfenabscheider:

Bei Kessel 1 wurde im Glasrohrwärmetauscher ein Tropfenabscheider eingebaut. Feuchtemessungen zeigten, dass der Übersättigungsgrad von ca. 20% auf ca. 5% reduziert werden konnte.

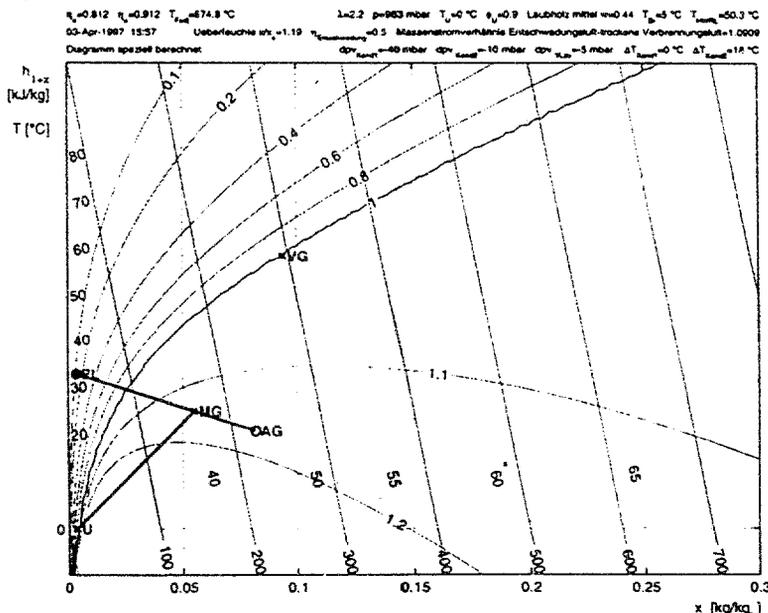


Abbildung 2 Betriebszustand im Mollier-Diagramm vor Einbau des Tropfenabscheiders.

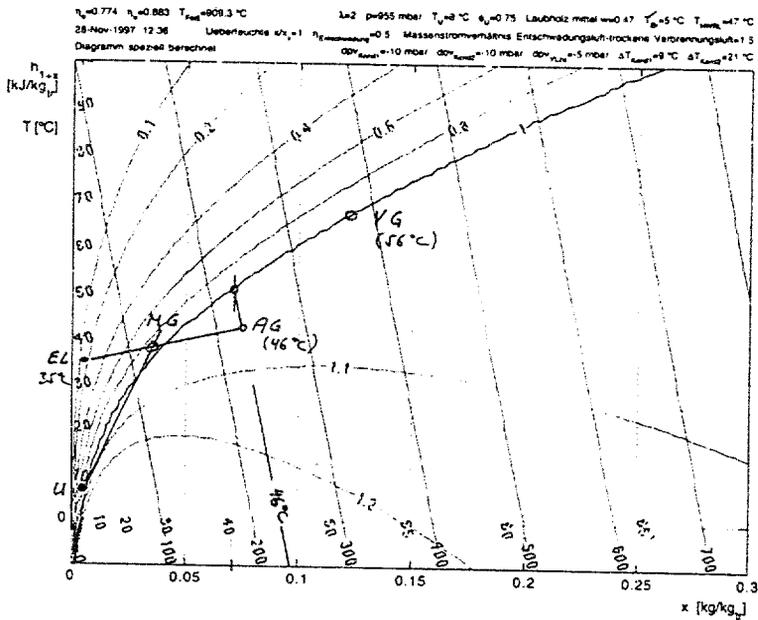


Abbildung 3 Betriebszustand im Mollier-Diagramm nach Einbau des Tropfenabscheiders.

Stabilisierung des Lastverhaltens:

Durch permanentes Zuschalten der zweiten Kesselpumpe wurden sprungartige Veränderungen beim Kesseldurchfluss vermindert. Dies wirkte sich auch positiv auf die Fernleitnetze aus. Durch Veränderung der Parameter der Leistungsregelung wurde die Periodendauer der Leistungsschwankungen von ursprünglich 60 auf 200 Minuten verlängert.

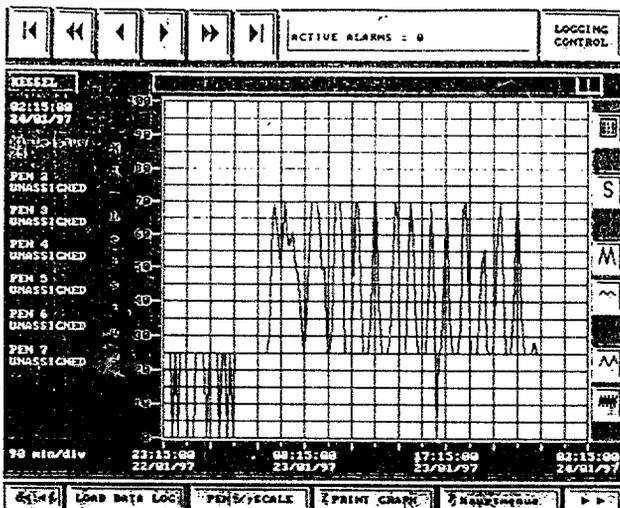


Abbildung 4 Lastverhalten vor Veränderung der Regelparameter.

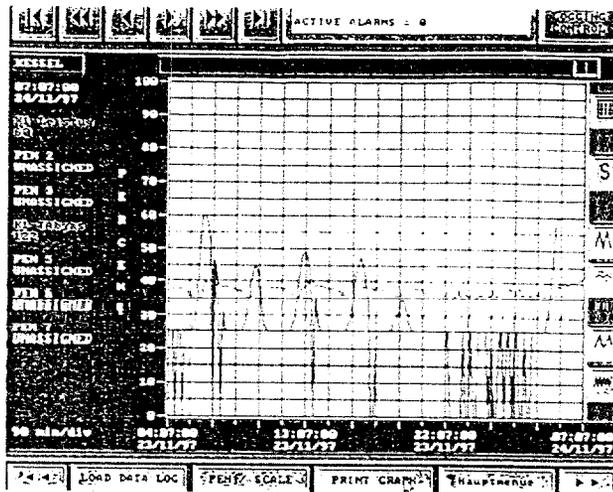


Abbildung 5 Lastverhalten nach Veränderung der Regelparameter.

Verbrennungsluftbefeuchtung:

Verbrennungsluftbefeuchtung ist eine thermodynamisch besonders günstige Möglichkeit, dem Abgas zusätzlich Wärme und Feuchtigkeit zu entziehen. Einerseits wird die energetische Ausbeute vergrößert, andererseits wird die Entschwädung des Abgases erleichtert. Folgende Möglichkeiten wurden geprüft:

- Rotorsysteme für gleichzeitige Wärme- und Feuchteübertragung vom Abgas auf die Verbrennungsluft, wie sie im Kraftwerksbau bekannt sind. Eine Anlagenbesichtigung in Trollhätten (Schweden) zeigte, dass Rotorsysteme (z. B. Fagersta Energetics AB) selbst nach Entstaubung mittels Elektrofilter oft gereinigt werden müssen. Der Einsatz eines solchen Systems ist in Affoltern nicht angebracht, da nur ein Multizyklon zur Staubabscheidung vorhanden ist.
- Wärmetauscher mit Befeuchtung der Verbrennungsluft mittels Wassereindüsung (z.B. Göta-verken Miljö AB). Die Möglichkeit einer Nachrüstung in Affoltern wurde intensiv abgeklärt und wäre technisch machbar gewesen, wurde aber aus Kostengründen nicht realisiert.

Wärmepumpe:

Durch den Einbau einer Wärmepumpe kann die Rücklauftemperatur des Kondensators um 15°C bis 20°C abgekühlt werden, wodurch der Kondensator mehr Nutzwärme abgeben kann. Dem Abgas wird durch die stärkere Abkühlung im Kondensator mehr Wasserdampf entzogen, was die Entschwädung erleichtert.

Vorabklärungen über die Einsatzmöglichkeit von Wärmepumpen zur Absenkung der Rücklauf-temperatur vor dem Kondensator zeigen, dass mit geeigneten Kältemitteln eine Leistungszahl von 8 bis 9 erreicht werden kann. Dabei kann die Rücklauftemperatur von 55°C auf ca. 32°C gesenkt werden.

- Staubemissionen

Staubmessungen bei Brennstoff mit hohem Feinanteil vor und nach dem Kondensator zeigen, dass der Kondensator die Staubemissionen von 235 auf 165 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O₂) reduziert. Dies entspricht einer Minderung um 30%. Dieses Resultat deckt sich nicht mit anderen Untersuchungen, in denen eine Verminderung der Staubemissionen um bis zu einen Faktor 10 gefunden wurden (A. Ewald, H. Jakobsen 1992). Allerdings kann die Partikelgrösseverteilung eine wichtige Rolle spielen. Wie neue Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung bei Holzfeuerungen zei-

gen, besitzen 80% der Partikelmasse einen Durchmesser $< 1\mu\text{m}$ (Hasler, Nussbaumer 1997). Solche Kleinstpartikel sind vermutlich schlecht benetzbar und können im Quench und Kondensator nur abgeschieden werden, wenn sie als Kondensationskeime wirken. Bei Rinde sind die Partikel grösser und werden im Kondensator besser abgeschieden.

3 Zusammenarbeit

- HGA Affoltern am Albis
- Schmid AG Holzfeuerungen, Eschlikon
- IEU AG, Liestal
- Kontakte mit weiteren Firmen:
 - Götaverken Miljö AB, Göteborg, Schweden; Verbrennungsluftbefeuchtung
 - Fagersta Energetics AB, Fagersta, Schweden; Verbrennungsluftbefeuchtung mittels Rotorsystem (Rekuperator, Wärme- und Feuchteübertragung)
- Teilnahme an Workshop zum Thema Abgaskondensation am Joanneum Research in Graz

4 Transfer von Ergebnissen in die Praxis

- Realisierung obigen Massnahmen bei der Anlage HGA.

5 Perspektiven für 1998

- Kontinuierliche Erfassung der wichtigsten Betriebsdaten an der Anlage in Affoltern während der Heizperiode 97/98:
 - Emissionen: CO sowie CO_2 oder O_2 zur Bestimmung des Luftüberschusses
 - Abgastemperaturen vor und nach der Kondensationsstufe, Mengenströme im Kondensator
 - Bestimmung des Wasserdampfgehalts im Abgas (punktuell)
 - Punktuelle Analyse der Kondensate auf wichtige Inhaltsstoffe und Eigenschaften, insbesondere: Schwermetalle, Cl-, F-, N, EOX, KW, AOX, Phenole, DOC
- Berechnung der erwarteten Leistung der Kondensationsstufe und Vergleich mit den effektiv erzielten Werten
- Beurteilung der Auslegung der Kondensationsstufe
- Vergleich mit in der Literatur beschriebenen Anlagen in Dänemark und Österreich
- Vergleich der verschiedenen Verfahrenskonzepte
- Aufzeigen der Einflüsse der wichtigsten Betriebsparameter auf den Wirkungsgrad und die Kondensatzusammensetzung
- Erarbeiten von Richtlinien für den optimalen Betrieb und die Auslegung von Kondensatoreinheiten für Holzfeuerungen
- Vertiefte Abklärungen über den Einsatz von Wärmepumpen, um den absoluten Wasseranteil drastisch zu vermindern
- Abschätzung der Energiebilanz anderer Kondensationsverfahren
- Messungen an anderen Kondensationsverfahren
- Vergleich der verschiedenen untersuchten Verfahren bezüglich Energie und Schwaden.

6 Vorträge und Publikationen 1997

keine

