



SAUBERE PELLETFEUERUNG FÜR DEZEN- TRALE WÄRMEERZEUGUNG MIT NICHT- HOLZ-BIOMASSE-RESSOURCEN

Zusammenfassung Schlussbericht EUREKA/KTI-Projekt

Autor und Koautoren	Martin Schmid, Christian Gaegauf
beauftragte Institution	Ökozentrum Langenbruck
Adresse	Schwengiweg 12, 4438 Langenbruck BL
Telefon, E-mail, Internetadresse	062 387 31 37, schmid@oekozentrum.ch , www.oekozentrum.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	KTI 7438.3 / EUREKA 3414
BFE-Projektleiter	KTI-Projektleitung: Isabelle Altermatt
Dauer des Projekts (von – bis)	1.10.2005 – 31.12.2007
Datum	11.1.2008

ZUSAMMENFASSUNG

Das Eureka-Projekt Biopoly-Heat (Eureka-Nr. 3414, KTI-Nr. 7438.3) hatte zum Ziel, Lösungen zur emissionsarmen Verbrennung von trockenen, nichthölzigen (pelletierbaren) Brennstoffen zu entwickeln. Dazu bestanden drei jeweils nationale Konsortien in Serbien-Montenegro, Ukraine und in der Schweiz unter der Leitung des Ökozentrums Langenbruck. Das Projekt war eine Antwort auf den in allen erwähnten Ländern und in ganz Europa akuten Druck auf die Ausweitung der Brennstoffsortimente auf landwirtschaftliche Reststoffe, insbesondere Stroh [1]. Solche Stoffe weisen nicht nur deutlich höhere Partikelemissions-Potentiale und zum Teil problematisches Ascheverhalten auf, sondern enthalten zum Teil bedeutende Mengen von Chlor, die bei der Verbrennung und Abkühlung der Abgase ein Dioxin-Bildungspotential darstellen.

Das Schweizer Konsortium fokussierte die Entwicklung auf einen möglichst produktenahen Prototypen eines automatischen Heizkessels für pelletierte Brennstoffe im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 kW. Dabei wurde parallel die Prüfung und Weiterentwicklung eines seriennahen Prototypen Biolyt 70 vorangetrieben und ein Funktionsmuster Bioflox IDDEA[®] entwickelt, aufgebaut und mit verschiedenen Brennstoffen getestet. Bioflox IDDEA (IDDEA = Integrated Dust and Dioxine Avoidance) stellt ein, nun geprüftes, Konzept dar, wie sowohl Stickoxid- (NO_x), Staub- und Dioxin-Emissionen wirkungsvoll vermindert werden können. Diese Massnahmen lassen sich mit geringen Mehrkosten gegenüber einem heutigen Biomasse-Heizkessel in einem Heizsystem integrieren. Im IDDEA-Konzept wird mit der Abgaskondensation der Brennstoff-Ausnutzungsgrad maximiert und die automatische Reinigung der Heizanlage konzeptionell aufgezeigt. Im weiteren ist das Asche-Schlackenverhalten im Glutbett soweit kontrollierbar, dass ein Betrieb ohne Kalkzusatz möglich wäre.

Das Resultat des Projektes umfasst auf der einen Seite ein im Dauereinsatz erprobtes Produkt, sowie Erfahrungen mit dem Funktionsmuster Bioflox-IDDEA, das auch mit Chinaschilf-Pellets sehr gute Emissionswerte aufweist. Die Dioxin-Verhinderungsstrategie soll im Anschluss an den Projektabschluss noch verifiziert werden.

Projektziele

Bedeutung des Projekts: das Potential an nicht anders eingesetzten, trockenen, pelletierbaren landwirtschaftlichen Reststoffen macht in der EU 25 eine rund siebenmal höhere Menge aus, als das Sägemehlpotential aus der Holzverarbeitung [1]. Entsprechend hoch ist der Druck auf diese Brennstoffsortimente. Auch in der Schweiz sind trotz Nutzungsverbot in Anlagen unter 350 kWth solche Nichtholzbrennstoffe auf dem Markt. Dem gegenüber stehen die mindestens fünffach höheren Staub-Emissionen [2] und 20-fach höheren Chlorgehalte (Dioxinbildungspotential), sowie deutlich höheren Stickstoff-Gehalte solcher grasartigen Brennstoffe. Das vorliegende EUREKA-Projekt will eine markt-nahe Antwort geben, wie Kleinanlagen für landwirtschaftliche Betriebe (50 bis 150 kW) konzipiert werden können, die mindestens den schärfsten aktuellen Anforderungen an die Emissionen erfüllen.

Als quantitative Ziele waren für die zu entwickelnde Kesselanlage folgende Werte anvisiert worden:

- Stickoxid-Emissionen (NO_x) bei Verbrennung von Holzpellets unter 100 mg/m³_n, bei Verbrennung von Strohpellets unter 200 mg/m³_n (@13% O₂).
- Kohlenmonoxid-Emissionen (CO) bei beiden Brennstoffen im Nennlastbetrieb unter 50 mg/m³_n (@13% O₂) und 250 mg/m³_n über den ganzen Betrieb mit Teillastphasen.
- Gesamtstaub-Emissionen (TPE) unter 10 mg/m³_n (@13% O₂) bei beiden Brennstoffen.
- Dioxin-Bildungspotential nach aktuellem Stand des Wissens minimiert. Die Überprüfung des PCDD/F-Grenzwertes von 0.1 ng/ m³_n TEQ ist nicht Gegenstand des Projektes.

Als wirtschaftliches Ziel galt es (nach Änderung der Projektziele auf Grund der stark veränderten Marktsituation im Herbst 2005, zu Projektbeginn), einen produktenahen Prototypen zum Produkt (hauptsächlich Leistung des Industriepartners) zu überführen, zu testen und prüfen, sowie die Innovation IDDEA (Integrated Dust and Dioxine Emission Avoidance) in einem Funktionsmuster umzusetzen und zu überprüfen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

1. ENTWICKLUNGEN AM PRODUKTENAHEN PROTOTYP BIOLYT 70



Abbildung 1 Der seriennahe Prototyp Biolyt 70 von Hoval wurde während des Projektes vom Prototypen zum marktfähigen Produkt.

Auf Grund der veränderten Marktsituation Ende 2005 musste der Prototyp, anstelle für die Strohpellets-Anwendung umgebaut umgehend zum marktfähigen Produkt entwickelt werden. Es fanden Dauertests im Felde sowie Emissionsmessungen statt. Insgesamt wurden drei Entwicklungsstufen getestet, sowie das regeltechnische Zusammenspiel mit einem Spitzenkessel im gleichen Heizkreis beobachtet.

2. REDUKTION DER STICKOXID-EMISSIONEN MIT FLOX®

Der für das EC-FP6 Forschungsprojekt Bio-Pro [3] entwickelte neuartige FLOX-Brenner (flammenlose Oxidation [4]) mit Reduktionszone konnte in diesem Projekt erfolgreich für die Verbrennung von Miscanthus-Pellets eingesetzt werden. Die Projektziele bei den Stickoxiden (NO_x) und Kohlenmonoxiden (CO) konnten damit gut erreicht werden. Dabei konnte insbesondere auch die emissionsarme und robuste Verbrennung bei niedrigsten Luftüberschusszahlen (λ) genutzt werden: Zur Verhinderung von Schlackebildung bei Aschen grassartiger Brennstoffe und als Primärmassnahme zur Reduktion von Feinpartikeln wurde das Low-PM-Konzept des Ökozentrums Langenbruck [5] verwendet, das eine Temperaturabsenkung des Glutbettes durch Massenstromerhöhung mittels Kalt-Abgasrezirkulation bei gleichzeitigem Sauerstoffmangel beinhaltet. Dabei sind die niedrigen Gesamtluftzahlen wichtige Voraussetzung, um trotzdem noch hohe Verbrennungstemperaturen (>1'000°C) zur Reduktion des Dioxin-Bildungspotentiales [6] bei chlorreichen Brennstoffen fahren zu können.

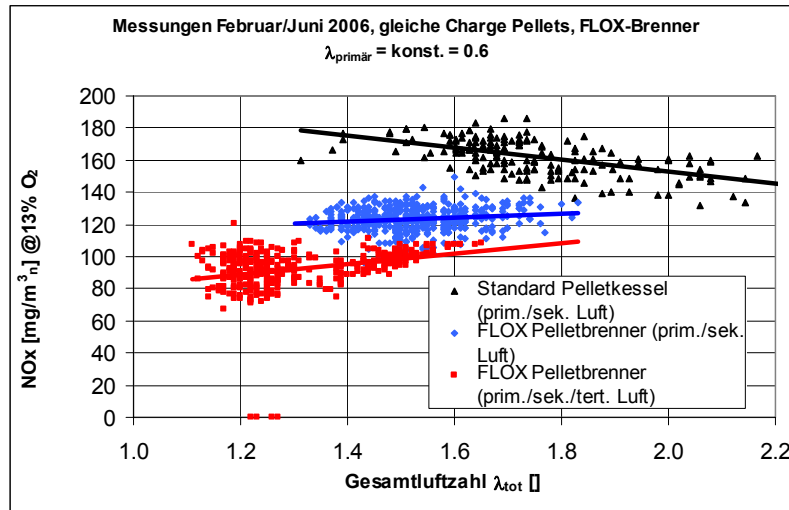


Abbildung 2 Zusammenfassende Überlagerung: Beim konventionellen Pelletskessel (schwarz) steigen die NO_x-Emissionen mit der Verbrennungstemperatur. Höhere Luftüberschusszahlen sind notwendig für die vollständige Verbrennung. Der FLOX-Brenner ohne Luftstufung produziert keine thermischen Stickoxide – d.h. die blauen Punkte zeigen keine Temperaturabhängigkeit. Die roten Punkte zeigen den Betrieb des gestuften FLOX-Brenners mit Reduktionszone. Für die Funktion der letzteren sind möglichst hohe Verbrennungstemperaturen notwendig. Theoretisch ist dabei der Luftüberschuss der Tertiärstufe nicht relevant, dieser wurde aber bei den Versuchen mit der Reduktionsstufe konstant gehalten.

3. GLUTBETT UND ASCHEVERHALTEN

Weitere umfangreiche Untersuchungen umfassten das Ascheschmelzverhalten im Betrieb des Funktionsmodells mit Miscanthus-Pellets. Es konnte mit den im Kapitel 2 beschriebenen Low-PM-Konzept ein Betriebsbereich gefunden werden, innerhalb dem ein störungsfreier Betrieb ohne Hilfsmittel (z.B. Kalk) möglich scheint. Für die regelungstechnische Praxis ist dieses Betriebsparameterfeld aber vermutlich zu klein (ca. 50 K in der Temperatur und abhängig vom Massenstrom, sowie Sauerstoff-Partialdruck im Glutbett), um in der Praxis anwendbar zu sein. Die erwähnten verbrennungstechnischen Vorkehrungen, eine mechanische Entfernung der Asche oder eine Beimischung von bis zu 2% Kalk in den Brennstoff, sind also weiterhin anzuwenden.

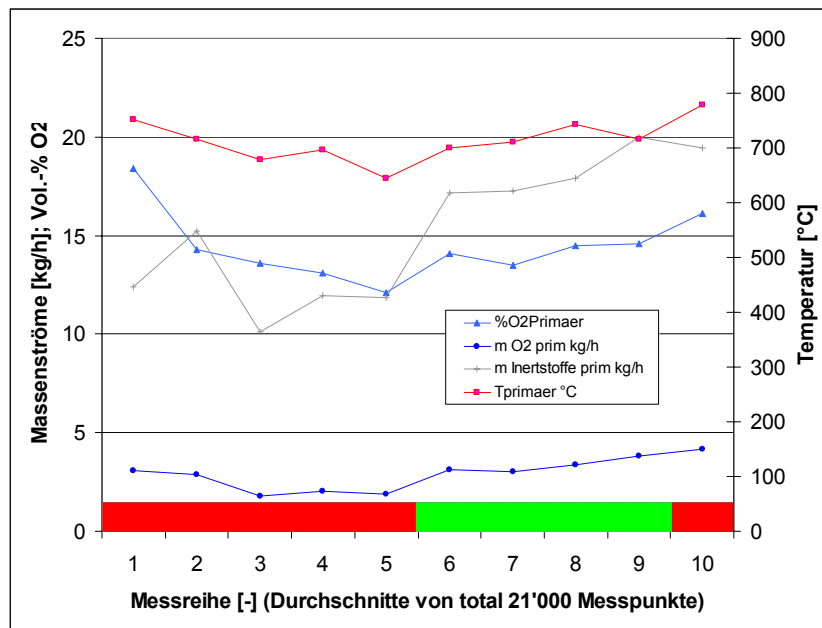


Abbildung 3 Darstellung der Mittelwerte der folgenden Parameter in den 10 Experimenten: Glutbetttemperatur, Sauerstoff-Volumenprozent in der Rostluft, sowie O₂- und Inertstoff- (N und CO₂) Massenstrom. Der grüne Balken bezeichnet die vier Versuche mit befriedigendem Aschenverhalten (keine Betriebsbeeinträchtigung innert 12 h).

4. ENTWICKLUNG UND AUFBAU DES IDDEA[®]-MODULS

Das IDDEA[®]-Modul (Integrated Dust and Dioxine Emission Avoidance) ist die bedeutende Innovation dieses Projekts: Es besteht aus drei Stufen, die den Heizkessel-Körper, die Abgaskondensationsanlage und die Partikelabscheidung vereinen.

- Quenching-Stufe: Um die De-Novo-Synthese zu verhindern, die bei Aufenthalt von Abgasen von chlorreichen Brennstoffen bei Temperaturen zwischen 550 und 150°C und Aufenthaltsdauern über 400ms Dioxin-Bildung ermöglichen kann. Es werden die heißen Abgase des quasi-adiabaten Brenners innerhalb 120 Millisekunden auf 90°C gekühlt. Das zirkulierende Quenchwasser gibt über einen Kunststoff-Plattenwärmetauscher etwa 2/3 der gesamten Heizleistung an den Heizkreis (Betrieb bis etwa 80°C möglich) ab. Ein Teil des Quenchwassers verdampft und gelangt mit den Abgasen in den anschliessenden Tropfenabscheider.
- Tropfenabscheider-Stufe: Die Partikel im kalten Abgas werden von einer Sprühelektrode elektrostatisch geladen und scheiden in der Folge an den Rohrwänden ab. Das feuchtigkeitsgesättigte Abgas kann den Abgaspartikeln als Kondensationskeime genügend Wasser zur Verfügung stellen, um im Abgaskondensator abgeschieden zu werden.
- Abgaskondensator: Damit die Kondensationsstufe unabhängig vom Heizsystem (Flächenheizung oder konventionelle Radiatoren) möglichst bei tiefen Temperaturen betrieben werden kann, wird der Heizungsrücklauf zur Vorwärmung der Verbrennungsluft (Ausensluft) genutzt und damit vorgekühlt.
- Die partikelarmen Abgase sind nun so kalt, dass sie mit einem effizienten Ventilator aus dem System gezogen werden können. Somit ist zu erwarten, dass der elektrische Aufwand trotz des grösseren Luftwiderstandes des beschriebenen IDDEA-Moduls gegenüber einem Standartkessel ohne Abscheider, gleich hoch bleibt.

Sämtliche Komfortfunktionen automatischer Feuerungen, wie die automatische Entaschung der Kesselzüge und der Kondensationsanlage wird durch eine tägliche Spülung (Ersatz von rund 10 Liter Leitungswasser) des Quenchwasserkreises ersetzt.



Abbildung 4 *Aktuellste Variante des Funktionsmusters im verbrennungstechnischen Labor des Ökozentrums Langenbruck. Von hinten links der isolierten Abgasleitung folgend nach unten links: Brenner, 1. Analyse-Sonde, Quench, Hochspannungs-Elektrode, Absetzstrecke, Abgaskondensator, 2. Analyse-Sonde, Abgasventilator.*

5. EMISSIONSMESSUNGEN AM BIOFLOX-IDDEA

Folgende Werte konnten über mehrere Stunden am IDDEA-Modul, befeuert mit dem Feststoff-FLOX-Brenner, gemessen werden:

Beim Betrieb mit Holzpellets:

Gesamtstaubemissionen TPE	$5.7 \pm 0.8 \text{ mg/m}^3_n$	@13% O ₂
Kohlenmonoxid CO	$3.6 \pm 1.9 \text{ mg/m}^3_n$	@13% O ₂
Stickoxid-Emissionen NO _x als NO ₂ angegeben	$87.5 \pm 5.0 \text{ mg/m}^3_n$	@13% O ₂
Gas-Temperatur im Glutbett	$691 \pm 27.9^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur in Reduktionszone	$1153 \pm 35.3^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur nach Tauchtasse	$76 \pm 1.4^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur nach Abgaskondensation	$20 \pm 0.3^\circ\text{C}$	
Kühlwassertemperatur Vorlauf	$15 \pm 0.2^\circ\text{C}$	
Kesselwirkungsgrad bezogen Hu	>100%	

Beim Betrieb mit Miscanthus-Pellets:

Gesamtstaubemissionen TPE	$11.6 \pm 0.9 \text{ mg/m}^3_n$ (*)	@13% O ₂
Kohlenmonoxid CO	$3.4 \pm 1.9 \text{ mg/m}^3_n$	@13% O ₂
Stickoxid-Emissionen NO _x als NO ₂ angegeben	$148 \pm 16.2 \text{ mg/m}^3_n$	@13% O ₂
Gas-Temperatur im Glutbett	$743 \pm 15.2^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur in Reduktionszone	$1185 \pm 38.5^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur nach Tauchtasse	$78 \pm 1.5^\circ\text{C}$	
Gas-Temperatur nach Abgaskondensation	$20.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$	
Kühlwassertemperatur Vorlauf	$14.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$	
Kesselwirkungsgrad bezogen Hu	>100%	

(*) = Dieser Wert ist der einzige der Aufzählung, der die Projektziele (Meilenstein III) knapp nicht einhalten konnte (Projektziel war $< 10 \text{ mg/m}^3_n$)

6. VERGLEICH MIT ANDEREN MESSUNGEN UND BRENNSTOFFANALYSE

Ein Teil der wissenschaftlichen Arbeit stellte eine Gegenüberstellung sämtlicher gemessener Partikelabscheidegrade (sowohl gravimetrisch TPE als auch Feinstaub-Analyse mit SMPS) an kondensierenden Systemen, sowie Klein-Elektrostatik-Abscheider [7] des Ökozentrums Langenbruck seit 2002 dar. Aus der Synthese entsteht die Frage, wieso die Abscheideeffizienz beim IDDEA-Modul durch die Kombination von Elektrostatik-Abscheider, Wasser-Aufsättigung und Abgaskondensation nicht deutlich höher ist, als beim Einsatz des Elektrostatik-Abscheiders alleine. In der Fachliteratur herrschen hier Widersprüche, vor allem in Bezug auf die Abscheide-Effizienz von Abgaskondensationsanlagen.

Die Brennstoffanalyse ergab für die im Projekt eingesetzten Brennstoffe folgende Werte:

Prüfparameter	Methode	Probe 01, Holzpellets / OEZL	Probe 02, Holzpellets / Klus	Probe 03, Getreide- pellets	Probe 04, Chinaschilf- pellets	Einheit
Kohlenstoffgehalt	ASTM D 5291	49,5	49,4	43,7	48,3	% (m/m) TS
Wasserstoffgehalt		6,4	6,3	6,2	6,3	% (m/m) TS
Stickstoffgehalt		0,1	0,1	2,0	0,2	% (m/m) TS
Sauerstoffgehalt		44,1	44,1	44,7	44,5	% (m/m) TS
Schwefelgehalt	DIN EN ISO 20884	0,006	0,014	0,170	0,028	% (m/m) TS
Heizwert, unterer	DIN 51 900-2	18682	18448	16325	18198	J/g TS
Wassergehalt (Feuchte)	DIN 51 718	9,5	8,2	10,9	8,9	% (m/m) OS
Natrium	RFA	<1	<1	791	<1	mg/kg TS
Magnesium		19	128	1760	179	mg/kg TS
Aluminium		52	144	1030	63	mg/kg TS
Silicium		89	388	9380	2280	mg/kg TS
Phosphor		<1	199	4200	361	mg/kg TS
Chlor		<1	<1	1410	162	mg/kg TS
Kalium		371	630	8600	2330	mg/kg TS
Calcium		689	671	4090	1070	mg/kg TS
Titan		<1	<1	80	<1	mg/kg TS
Mangan		62	34	108	84	mg/kg TS
Eisen		<1	<1	226	<1	mg/kg TS
Kupfer		<1	<1	25	<1	mg/kg TS

Tabelle 1 Prüfbericht von 4 Brennstoff-Analysen v.l.n.r.: 1) Holzpellets, welche im Biolyt 70(industrieller Prototyp) eingesetzt wurden; 2) Holzpellets im Labor Klus, im Einsatz im BioFlox 20 IDDEA; 3) Pellets aus Müllereireststoffen; 4) Miscanthus-Pellets.

Nationale Zusammenarbeit

Das Konsortium bestehend aus dem Industriepartner Hoval Werke AG und dem Ökozentrum Langenbruck gestaltete sich sehr effizient. Leider wurden auf Grund der Veränderungen der Bedürfnisse des Industriepartners die Dienstleistungen der Hochschule Luzern (Simulation einer kaskadischen Mehrkesselregelung) nicht beansprucht.

Internationale Zusammenarbeit

Das Eureka-Projekt Biopoly-Heat (Eureka-Nr. 3414, KTI-Nr. 7438.3) hatte zum Ziel, Lösungen zur emissionsarmen Verbrennung von trockenen, nichthölzigen (pelletierbaren) Brennstoffen zu entwickeln. Dazu bestanden drei jeweils nationale Konsortien in Serbien-Montenegro, Ukraine und in der Schweiz unter der Leitung des Ökozentrums Langenbruck. Durch die Gestaltung und Finanzierung der jeweils eigenständigen nationalen Konsortien mit jeweils nationalen Fördermitteln war die internationale Zusammenarbeit eher informeller Art. Dennoch konnten einige Aktivitäten die gegenseitige Arbeit sehr fruchtbar beeinflussen.

- Es fand ein Austausch eines Mitarbeiters aus der Ukraine statt, der in der Schweiz neben der Mitarbeit im Labor eine umfassende Literaturstudie „Dioxines-Review“ [12] erstellte.
- Die Aktivitäten der Schweizer Industrie im Bereich der Biomasse-Energietechnik konnte in Kiew an einem Tempus-Tacis-Workshop der EU präsentiert werden, der die ukrainischen Partner organisierten.

- Das serbische sowie das schweizerische Konsortium bekamen einen gegenseitigen Einblick zum Stand der Technik. In Serbien wurde daraufhin die Evaluation eines O₂-Sensors für hohe Luftüberschüsse angeregt. Im Weiteren wurden Berichte über freiwillige Branchen-Engagements wie das Schweizer Qualitätssiegel für Kleinholzfeuerungen [8] mit Interesse entgegengenommen

Ausblick 2008

Das ursprüngliche wirtschaftliche Ziel, einen voll Nicht-Holz-Biomasse-tauglichen Kessel als seriennahen Prototypen bei Projektende vorliegen zu haben, konnte auf Grund der Veränderungen zu Projektbeginn nicht erreicht werden. Dafür wurden einige zusätzliche Forschungsergebnisse erzielt. Da sich die Dioxin-Verhinderung zu einem Hauptmerkmal des IDDEA-Moduls entwickelte, jedoch nicht innerhalb des vorliegenden Projektes aus Budgetgründen geprüft werden konnte, sollen nun nach dem EUREKA-Projekt Dioxin-Emissionsmessungen erfolgen.

Referenzen

- [1] *Matthew Griffiths*; Pellets Appeal; Renewable Energy World, Nr. 2-2005
- [2] Leitfaden Biomasse FNR, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2001
- [3] *R. Berger, et. al*; EC-FP6 Project Bio-Pro: New Burner Technologies for Low Grade Biofuels to Supply Clean Energy for Processes in Biorefineries, mit Partner aus Finnland, Polen, Schweden, Holland, England, Deutschland und der Schweiz, Stuttgart 2004 – 2006
- [4] *J. A. Wüning, J. G. Wüning*; Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation; Elsevier Science Ltd, 1997
- [5] *C. Gaegauf, M. Schmid*; Measures in the Wood Combustion Process for Particle Emission Reduction, 2nd World Conference Biomass Energy, Rom 2004
- [6] *K. Drozd*; Dioxines-Review, Zusammenfassung des Literaturstudiums von 34 Dokumenten zum Thema Dioxin-Bildung und Vermeidung/Abbau; Ökozentrum Langenbruck 2005
- [7] *M. Sattler, C. Gaegauf, M. Schmid*; Partikelanalytik an Klein-Holzfeuerungen mit elektrostatischem Partikel-abscheider, Ökozentrum Langenbruck, 2006
- [8] *C. Gaegauf, U. Wieser, Y. Maquat*; Erfolgskontrolle, Schweizer Qualitätssiegel für Holzfeuerstätten im Wohnbereich, Ökozentrum Langenbruck 2002