



Schlussbericht 14.02.2012

Miscanthus-Kleinf Feuerung

Nutzung des kostengünstigen Potentials bedingt
angepasste Feuerungen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Iseli AG, Kreuzmatt 8, 6242 Wauwil
Christian Schenk, Hardstrasse 9, 8570 Weinfelden
Agroscope ART, Tänikon, 8356 Ettenhausen

Auftragnehmer:

Thomas Anken
Agroscope ART
CH-8356 Ettenhausen
www.agroscope.ch

Autoren:

Thomas Anken, Matthias Hatt, Agroscope ART, Tänikon, 8356 Ettenhausen,
thomas.anken@art.admin.ch; matthias.hatt@art.admin.ch

Christian Schenk, Hardstrasse 9, 8570 Weinfelden
christian.schenk@art.admin.ch

Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro Hersener, Unt. Frohbergstr. 1, 8542 Wiesendangen
hersener@pop.agri.ch

Ruedi Bühler, Umwelt + Energie, Bühlstrasse 11, 8933 Maschwanden
ruedi.buehler@udena.ch

Vitus Iseli, Iseli AG, Kreuzmatt 8, 6242 Wauwil
vitus.iseli@iseli-ag.ch

Robert Bösch, Amt für Umwelt, Bahnhofstrasse 55, 8510 Frauenfeld
robert.boesch@tg.ch

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter: Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153700 / 102882

Bei P+D-Projekten: **Installationsstandort** CH-Koordinaten 727'870 / 269'810

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Einleitung	4
Problemstellung	4
Anbau und Ernte von Miscanthus	4
Thermische Nutzung in einer Kleinf Feuerung	6
Praktischer Betrieb der Pilotfeuerung	6
Abgasmessungen mit Holz und Miscanthus	13
Rauchgaswäscher: Betrieb, Chlorschäden und Abwasseranalyse.....	14
Kostenberechnung von Miscanthus	16
Ökologische Überlegungen	19
Informationstätigkeit	19
Schlussfolgerungen	21
Literatur	22

Einleitung

Miscanthus ist eine C4-Pflanze, die in der Schweiz auf kleineren Flächen seit den 1990-er Jahren angebaut wird. Die geringen Ansprüche der Pflanze verbunden mit hohen Erträgen, verleihen ihr ein interessantes Potential. Neben der Nutzung als Streu oder als Unterlage für Erdbeeren bietet sich die thermische Nutzung an. Die Pflanze lässt sich weder als Nahrungs- noch als Futtermittel einsetzen.

Neben den Energieträgern Holz, Kurzumtriebsplantagen und anderen Biomasseträgern hätte Miscanthus das Potential eine angemessene Rolle in der künftigen Energieversorgung der Schweiz zu spielen. Der aus Schweizer Wäldern verfügbare Rohstoff Holz wird zur Zeit zu schätzungsweise 80 % ausgenutzt. Gemäss Gesamtenergiestatistik wird daraus eine Wärmemenge von zirka 40 000 TJ gewonnen, was zirka 4 % des schweizerischen Energieverbrauches darstellt (Bundesamt-Für-Energie 2011). Bei einer konservativ angenommenen Anbaufläche von 50 000 ha Miscanthus, liesse sich eine Energiemenge von beachtlichen 10 000 TJ (zirka 300 000 t Heizöläquivalent) produzieren.

Da Miscanthus im Frühjahr trocken geerntet, gepresst und gelagert werden kann, stellt dies eine einfache und sehr kostengünstige Form der Speicherung von Sonnenenergie dar.

Problemstellung

Die thermische Nutzung von Miscanthus stellt im Gegensatz zu Brennstoffen wie Holzschnitzeln oder Pellets auf Grund des tiefen Ascheschmelzpunktes und des hohen Chlorgehaltes hohe Anforderungen an die Verbrennung. Anhand einer Pilotanlage in Form einer Kleinfeuerung galt es folgende Punkte aufzuzeigen:

- Eine Kleinfeuerungsanlage kann über längere Zeit zu 100 % mit Miscanthus betrieben werden.
- Feinstaubemissionen lassen sich mittels Rauchgaswäscher auf das Niveau vergleichbarer Holzfeuerungen reduzieren.
- Aufzeigen, dass Miscanthus hohe Energieerträge pro Nutzfläche generiert und sich umweltfreundlich anbauen lässt.

Anbau und Ernte von Miscanthus

In Tänikon wird seit 18 Jahren auf einem Feld Miscanthus angebaut. Im Durchschnitt der Jahre wurde ein Ertrag von 14 t Trockensubstanz/ha erzielt (Abb. 1). Ausser der Herbizide während der ersten beiden Jahre wurden keine Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Die Düngung bestand aus einer jährlichen Güllegabe von 40 m³/ha. Dies zeigt, dass sich diese Pflanze mit wenig Input sehr ökologisch anbauen lässt.

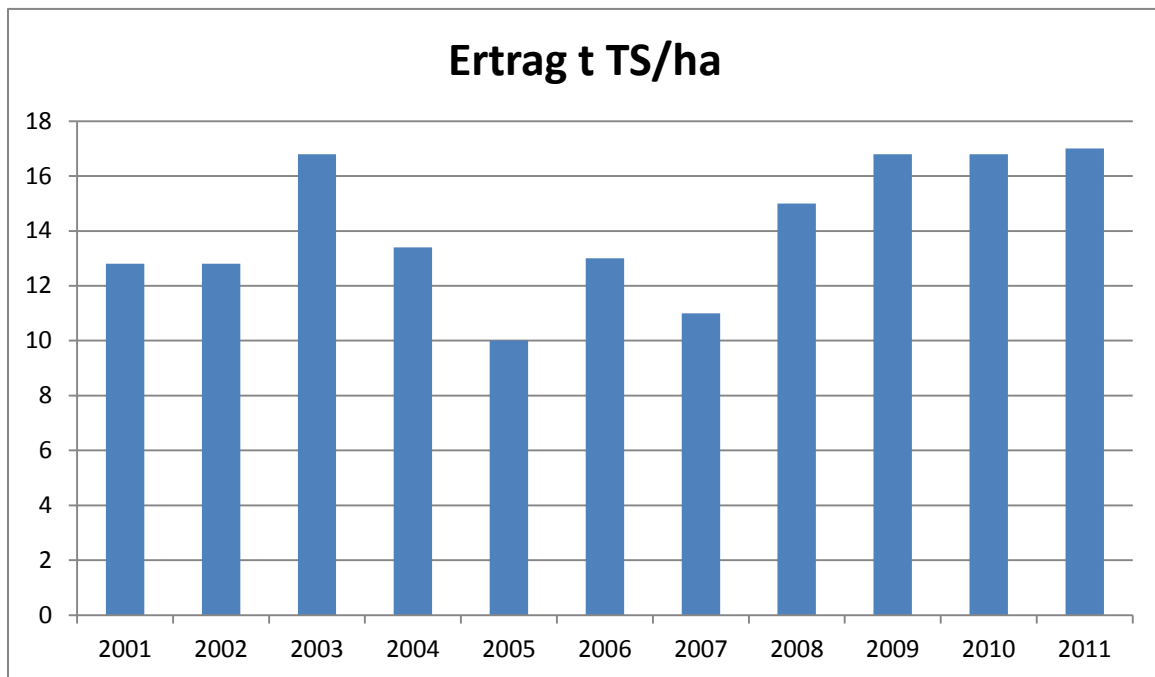


Abb. 1: Trockensubstanzerträge von *Miscanthus* in den Jahren 2001 bis 2011 erzielt auf dem Standort Tänikon, Ettenhausen TG. Der durchschnittliche Ertrag beträgt 14 t Trockensubstanz/ha.

Aus den bald zwanzig jährigen Anbauerfahrungen mit *Miscanthus* in Tänikon und Weinfeldern lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Konventionelle Agrartechnik ist für Anbau und Ernte einsetzbar.
- Nach den ersten beiden Anbaujahren war keinerlei chemischer Pflanzenschutz notwendig. Die Kultur ist bestens für den biologischen Anbau geeignet.
- Die Düngung beschränkte sich auf eine Güllengabe im Frühjahr von 40 m³/ha Rindervollgülle.
- Frühe Schneefälle im November können die Kultur zum Lagern bringen. In Tänikon war dies in zirka der Hälfte der Jahre der Fall. Die Ernte wird erschwert, da mit dem reihenunabhängigen Maishäcksler nur gegen die Fallrichtung der Pflanzen gefahren werden kann. Neue, angepasste Mähwerke könnten Abhilfe schaffen.
- Das Verdichten des Erntematerials durch das Pressen von Rundballen mit der Technik von Maissilageballen ist möglich, stellt aber einen hohen Kostenpunkt dar.
- Die Erntekette mit Häcksler und Lose-Transport mit anschliessender Lagerung funktioniert problemlos. Sie bedingt bei unverdichteten Häckseln grosse Lagervolumina. Eine interessante Alternative würde das Pressen von Grossballen mit Vorbauhäcksler darstellen, wie sie prototypisch in Luxemburg realisiert wurde (Abb. 2). In der Verbesserung der Logistik steckt noch ein grosses Optimierungspotential.
- Wie die Abb. 1 zeigt, ist auch nach 20 Jahren kein Ertragsabfall feststellbar. Die Kultur ist äusserst ausdauernd.



Abb. 2: Die kombinierte Ernte mittels einer Grossballenpresse erleichtert das Handling und die Lagerung. Denkbar wäre auch die Kombination eines Rotationsmähwerkes mit einem Vorbauhäcksler an der Quaderballenpresse. (Quelle: www.miscanthus.lu)

Thermische Nutzung in einer Kleinfeuerung

Praktischer Betrieb der Pilotfeuerung

Erhobene Parameter

Für die Versuche wurde die Feuerung Heizomat RH-AK 35 (Heizomat GmbH, D-Gunzenhausen), von Christian Schenk, in Weinfeldern mit Miscanthus betrieben (Abb. 3 und 4). Für die Installation und Wartung der Feuerung war die Firma Iseli, Wauwil zuständig. Die Reinigung der Feuerung und des Kamins erfolgte in den üblichen Intervallen zwei Mal jährlich durch den Kaminfeger.



Abb. 3: Pilotfeuerung Heizomat RH-AK 35, die von der Firma Iseli, Wauwil installiert und von Christian Schenk, Weinfelden betrieben wird.



Abb. 4: Das Glutbett der Feuerung wird durch einen Kratzboden bewegt. Rechts ist der Kettenantrieb sowie eine Kratzbodenleiste (Pfeil) sichtbar.

Die erzeugte Wärmemenge wurde durch einen Wärmezähler zwischen Vor- und Rücklauf der Feuerung erhoben und manuell abgelesen.

Folgende Feuerungsparameter wurden ab der RS 232-Schnittstelle der Steuerung der Feuerung mit einem PC fortlaufend geloggt:

Temperaturen: Vor- und Rücklauf, Abgas, Kessel

Last: Auslastung des Kessels in Prozent.

O₂: Sauerstoffgehalt der Abgase mit Lambdasonde

Die Temperatur der Aussenluft stammt vom Wetterdienst www.meteowebfelden.ch. Nach den Vorversuchen im Jahre 2009, die der Bestimmung der Leistungs- und Emissionsparameter der Feuerung mit Holzhackschnitzeln diente, wurde sie im Herbst 2009 auf Miscanthus umgestellt. Der Brennstoff wird in reiner Form ohne Mischung mit Holz verbrannt.

Verschlackung

Die Feuerung lief während mehr als zwei Jahren zu 100 % mit Miscanthus. Die Beschickung der Feuerung sowie die gesamte Anlage liefen weitgehend störungsfrei.



Abb. 5: Die Verbrennung war verbunden mit einer starken Verschlackung des Glutbetts (links). Rechts ist sichtbar, dass am Rande des Glutbetts die Luftzufuhr zu hoch (Flammen) und in der Mitte des Glutbetts keine Verbrennung erfolgte. Die Neueinstellung der Feuerung schaffte Abhilfe.

Im praktischen Betrieb zeigte sich ein grosser Einfluss des Feuchtegehaltes der Hacksel auf die Verschlackung des Glutbetts (Abb. 5). Sobald die Feuchte der Hacksel 20 % H_2O überschritt, erfolgte eine viel stärkere Schlackenbildung als wenn die Feuchte bei 15 % H_2O lag.

Neben dem Feuchtegehalt zeigte sich erwartungsgemäss, dass bei hohen Verbrennungstemperaturen im Vollastbetrieb die Verschlackung stärker ausfiel als bei niedrigeren Temperaturen im Teillastbereich.

Die Verschlackung führte während der ganzen Versuchsperiode zu keinem Heizunterbruch, musste aber während Kälteperioden (höhere Auslastung und Abgastemperaturen) täglich durch manuelles Auflockern und Aufbrechen der Verschlackung unter Kontrolle gehalten werden. Das System mit Kratzboden erwies sich als betriebssicher.

Die Veränderung der Primärluftzufuhr und der Einstellungen (Abb. 6) wirkte sich nicht nur auf die Emissionen sondern auch positiv auf die Verschlackung aus.

Korrosion und Kondensation

Während des zweijährigen Betriebes traten an der Feuerung selber keine besonderen Abnutzungserscheinungen oder Schäden durch Korrosion auf. Da die Feuerung permanent auf einer Kesseltemperatur von mind. 70 °C betrieben wurde, kann Kondensation im Inneren der Feuerung ausgeschlossen werden. Dies dürfte der Grund sein, weshalb das in Miscanthus enthaltene Chlor (Salzsäure HCl) in der Feuerung nicht zu Korrosion führte. Im Gegensatz dazu führte das Chlor innerhalb von 3 Wochen zu einem kompletten Durchkorrodieren des aus Chromstahl gefertigten Rauchgaswäschers (siehe Abb. 13).

Kondensation entsteht, sobald die maximale Wassersättigung der Luft erreicht ist, und der Taupunkt unterschritten wird (Mollier-Diagramm). Laut Kaltschmitt und Hartmann (2001) wird

bei der Verbrennung von trockenem Holz der Taupunkt bei einer Abgastemperatur von 45 °C erreicht. Bei nassem Holz liege er bei 62 °C. Da sich die Heizwerte von Miscanthus und Holz nur wenig unterscheiden, kann davon ausgegangen werden, dass die für Holz zitierten Taupunkte auch für Miscanthus gelten. Beim niedrigen Feuchtegehalt des eingesetzten Miscanthus von zirka 12-15 % kann davon ausgegangen werden, dass eine Kesseltemperatur von 50 °C genügt hätte um der Kondensation vorzubeugen.

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Im Vergleich zu Holz besitzen Miscanthushäcksel eine ganz andere physikalische Beschaffenheit. Die Häcksel sind deutlich feiner und deren scheinbare Dichte ist mit zirka 100 kg/m³ (anonym 2008) halb so gross wie diejenige von Holzschnitzeln mit 200 kg/m³ (Schweiz 2010). Da Miscanthushäcksel andere Teilchenform, -Grössen und Dichten aufweisen, ist die Feuerung entsprechend einzustellen.

Der erzielte feuerungstechnische Wirkungsgrad lässt sich nach Kaltschmitt et al. (2001) bestimmen:

η_f = feuerungstechnischer Wirkungsgrad

$$\eta_f = 1 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}}$$

V_{therm} = thermische Verluste (Abgas)

V_{chem} = chemische Verluste

$$V_{\text{therm}} = 0.01 \frac{(T_A - T_U) \left(1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02u \right)}{\left(\frac{H_{u(wf)}}{100} \right) - 0.25u}$$

$$V_{\text{chem}} = 0.01 \frac{11800}{\left(\frac{H_{u(wf)}}{100} \right) - 0.25u} * \frac{CO}{CO_2 + CO}$$

T_A = Abgastemperatur °C

T_U = Umgebungstemperatur °C

CO, CO₂ = Gehalte in Vol %

μ = Masse Wasser in Brennstoff *100/Trockenmasse Brennstoff

$H_{u(wf)}$ = Heizwert pro kg TS in MJ

Tabelle 1 Feuerungstechnischer Wirkungsgrad und dessen bestimmende Parameter anlässlich der drei Abgasmessungen

	Holzschnitzel 28.04.2009	Miscanthus 19.01.2010	Miscanthus 30.09.2011
CO(N)	547 mg/m ³	5845	413 mg/Nm ³
Restsauerstoff	14.0 %	18.3	15.2 %
T_A	300*	250*	170
T_U	20	20	20
$H_{u(wf)}$	18'000	18'000	18'000
η_f	0.68	0.31	0.8

* Die Abgastemperatur wurde in diesen Fällen am Heizkessel abgelesen, da sie bei der Abgasmessung durch T. Wehrli erst nach dem Wäscher bestimmt wurde. Beim letzten Termin wurde die Temperatur von T. Wehrli exakt erfasst.

Bei der ersten Messung mit Holzschnitzeln wurde der Heizkessel mit einer sehr hohen Abgastemperatur gefahren, was sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirkte (Tabelle 1). Bei der ersten Messung mit Miscanthus trat das Problem der unvollständigen Verbrennung

und Verschlackung (Abb. 5) deutlich zu Tage. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad lag auf Grund des sehr hohen Kohlenmonoxydgehaltes nur bei 30 %.

Vor der zweiten Messung mit Miscanthus am 30.09.2011 wurde die Primärluftführung durch einen zusätzlichen Ventilator (Abb. 6) ergänzt. Damit soll das Glutbett, das aus fein gehäckseltem Miscanthus, mit nur kleinen Lufträumen zwischen den kleinen Teilen besteht, gleichmässiger durchströmt werden. Zusätzlich wurde die Anzahl Sekundärluftöffnungen vermindert und die Feuerung neu eingestellt.

Diese Massnahmen zeigten eine sehr gute Wirkung. Es wurde ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad von 80 % erreicht, was für diesen Praxisseinsatz als zufriedenstellend bis gut einzustufen ist.



Abb. 6: Durch einen zusätzlichen Ventilator und eine zusätzliche Lufteinführung beim Kratzbodenanfang, wird die Durchströmung des Glutbetts mit Primärluft verbessert.

Kesselwirkungsgrad und Ascheanfall im Praxisbetrieb

Während der Heizperioden wurde die Menge des verfeuerten Miscanthus anhand des Ballengewichts bestimmt. Die Ablesung der Wärmemenge über den Wärmezähler, der zwischen Vor- und Rücklauf der Feuerung installiert war, erlaubte die Bestimmung des Wärmeertrages pro Kilogramm Frischgewicht Miscanthus.

Der Mittelwert des erzielten Wärmeertrages liegt bei 1.85 kWh pro kg Frischgewicht (Abb. 7). Somit liegt dieser Ertrag deutlich tiefer als der in der Literatur zitierte Heizwert von 3.79 kWh/kg FG bei 20 % H₂O (Anonym 2008). Der Ascheanfall betrug im Mittel 2.6 % (Abb. 7) was im Vergleich zur Literatur (Reisinger 2009) tief lag.

Der Grund für den tiefen, ermittelten Kesselwirkungsgrad lässt sich nicht genau eruieren. Gemäss Prüfbericht der BLT Wieselburg erreicht die Feuerung einen Wirkungsgrad mit Holzschnitzeln von 89-91 % (Blt 2004). Eine unvollständige Verbrennung wie sie anlässlich der zweiten Messung (siehe Tabelle 1) festgestellt wurde, war sicherlich mit verantwortlich für den tiefen, auf der Anlage gemessenen Kesselwirkungsgrad.

Weder der Ascheanfall, der mit einer unvollständigen Verbrennung in Verbindung steht (Abb. 9) noch die Lufttemperatur, korrelierten mit dem Heizwert. Diese beiden Parameter lassen also nicht auf eine unvollständige Verbrennung rückschliessen.

Wie Abb. 10 und Abb. 11 aufzeigen, läuft die Feuerung über sehr weite Strecken im Teillastbereich. Die Abgastemperaturen weisen rund um die Uhr hohe Werte auf. Über Nacht stellte die Feuerung nie ab (Last = Null). Dies bedeutet, dass rund um die Uhr viel Energie über den Abgaskanal (Abgase und Rohre) verloren geht.

Diese installations- und einstellungsbedingten Faktoren scheinen somit die wichtigsten Gründe für den tiefen, erzielten Kesselwirkungsgrad zu sein.

Der hohe Wasserverlust des Wäschers durch Verdampfung der um die 150 Liter pro Tag lag, deutet ebenfalls auf einen hohen Wärmeverlust im Abgasstrang hin.

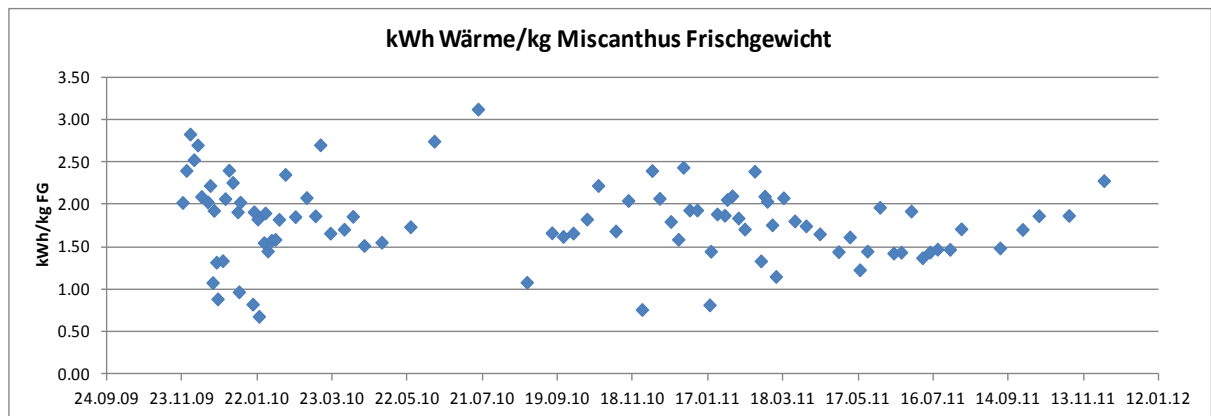


Abb. 7: Durch die Pilotanlage erzielter Heizwert von Miscanthus (Frischgewicht) erhoben mittels Wärmezähler und Ballengewicht. Der Mittelwert lag bei 1.85 kWh/kg FG.

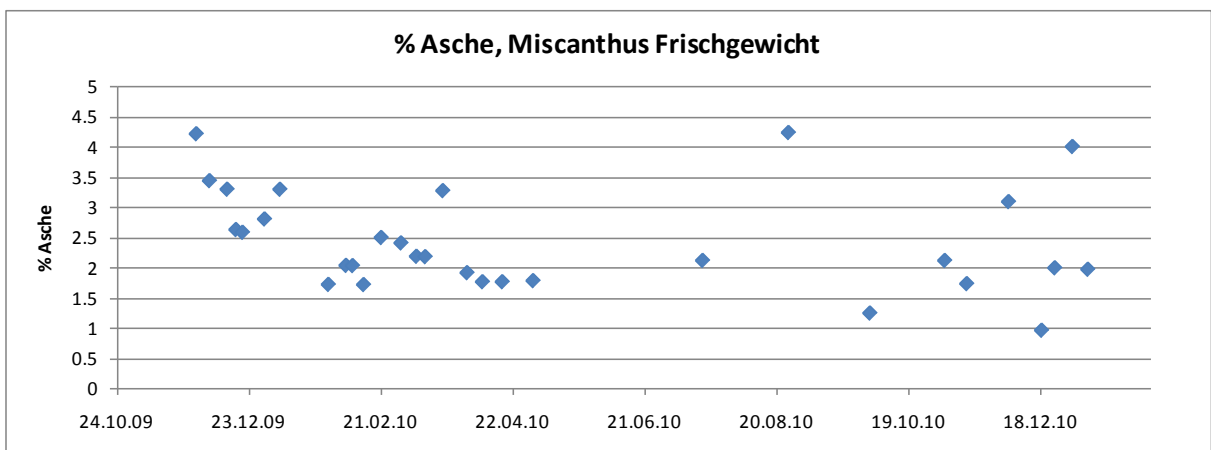


Abb. 8: Ascheanfall in Prozent in Bezug auf das Frischgewicht der Miscanthushäcksel. Der mittlere Ascheanfall betrug 2.6 %.

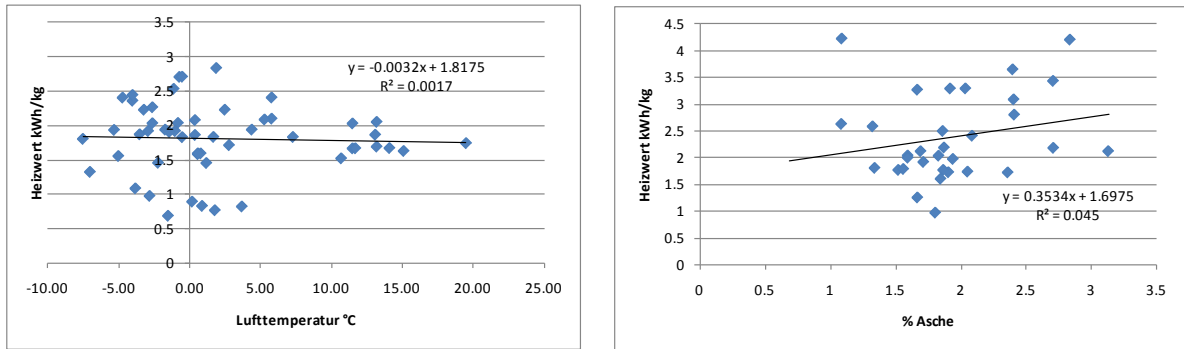


Abb. 9: Zwischen dem Ascheanfall und dem Heizwert (links) sowie zwischen Lufttemperatur und Heizwert (rechts) besteht kein direkter Bezug.

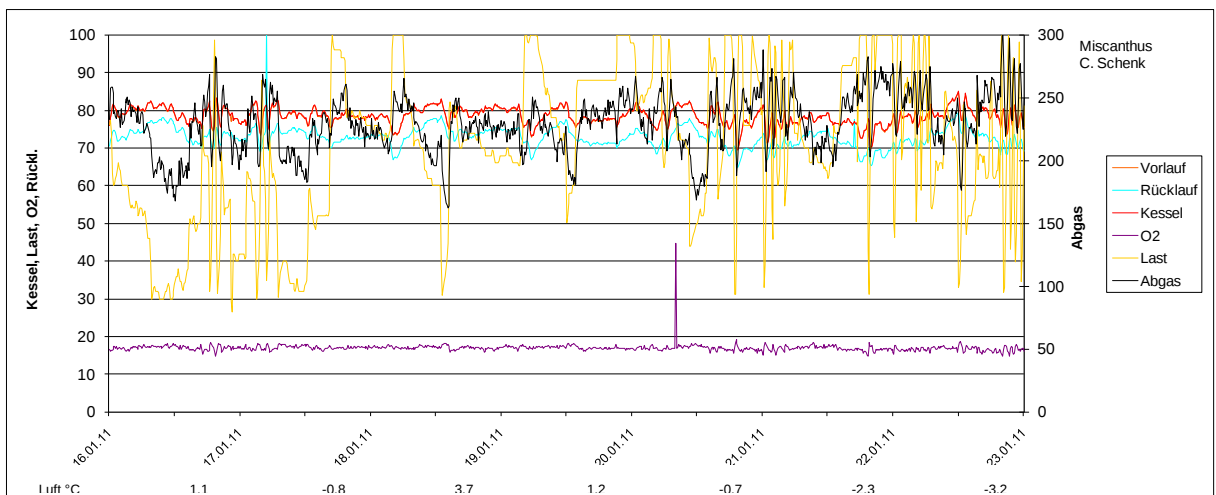


Abb. 10: Beispiel der Kesselparameter vom 16.-23. Januar 2011. Die Kesseltemperatur wird auf 80 °C durch variieren der Kessellast eingehalten. Der Restsauerstoff liegt mit 18 % auf hohem Niveau. Die Abgastemperatur liegt dauernd im Bereich zwischen 200 und 300 °C.

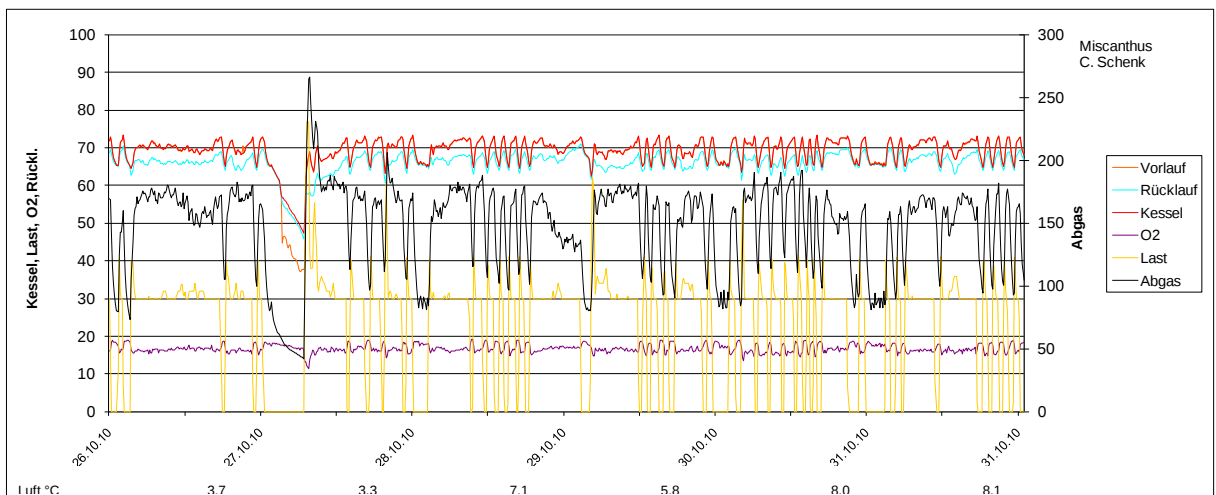


Abb. 11: Beispiel der Kesselparameter 26. Oktober – 31. Oktober 2010. Die Kesseltemperatur wird auf 70 °C gehalten. Kessellast liegt meist 0-30 %, die Abgastemperaturen liegen zwischen 100 und 200 °C, was gegenüber Abb. 10 auf die höhere Aussentemperatur zurückzuführen ist.

Abgasmessungen mit Holz und Miscanthus

Die Firma Tino Wehrli Emissionsmessungen, 5103 Moeriken führte am 28.04.2009 mit Holzschnitzeln und am 19.01.2010 sowie am 30.09.2011 Emissionsmessungen mit Miscanthus durch. Die Messungen zeigten, dass zum zweiten Zeitpunkt die Feuerung nicht optimal eingestellt war. Hohe CO-Gehalte zeugten von einer unvollständigen Verbrennung (Tab. 2). Dies wurde auf die unvollständige Durchströmung des Glutbetts als Folge der feinen Häcksel und deren Verschlackung zurückgeführt. Auf Grund dieser Werte wurde die Feuerung nochmals angepasst und neu eingestellt (siehe feuerungstechnischer Wirkungsgrad). Am 30.09.2011 erfolgte eine zusätzliche Emissionsmessung. Sie bestätigte, dass es möglich ist, bei entsprechend ausgelegter und eingestellter Feuerung, Miscanthus mit Ausnahme der erhöhten Feinstaubfracht emissionsarm zu verbrennen.

Dass der CO-Wert ein gutes Mass des Verbrennungsgrades und der Menge der Staubemissionen ist, bestätigen die Messungen von Ellner und Schubert (Ellner-Schubert et al. 2010).

Tabelle 2 Mittelwert aus je 3 durchgeführten Emissionsmessungen. Die Resultate beziehen sich auf 13 % O₂, 0 °C, 1013 mbar, trocken. Der Wäscher wurde vor der Messung mit frischem Wasser gefüllt.

	Holzschnitzel 28.04.2009	Miscanthus 19.01.2010	Miscanthus 30.09.2011
Staub (N) vor Zyklon und Wäscher	52 mg/m ³	498 mg/m ³	767 mg/Nm ³
Staub nach Zyklon	(kein Zyklon)	(kein Zyklon)	556 mg/Nm ³
Staub (N) nach Wäscher	47 mg/m ³	461 mg/m ³	221 mg/Nm ³
CO(N)	547 mg/m ³	5845 mg/m ³	413 mg/Nm ³
NO _x als NO ₂ (N)	203 mg/m ³	201 mg/m ³	223 mg/Nm ³
Restsauerstoff	14.0 %	18.3 %	15.2 %

Der Wäscher bewirkte bei dieser hohen Belastung eine Reduktion des Feinstaubes um fast 40 mg/m³ (8%). Beim letzten Zeitpunkt verminderte der Wäscher die Staubfracht um ca. 60 % von 556 mg/Nm³ auf 221 mg/Nm³. Warum die Wirkung des Wäschers so stark variiert lässt sich nicht bestimmen.

Rauchgaswäscher: Betrieb, Chlorschäden und Abwasseranalyse

Um den Feinstaubgehalt der Abgase zu minimieren wurde der Feuerung ein Abgaswäscher, Modell Racoonizer der Firma Enerclean, Wauwil CH installiert (Abb. 12).



Abb. 12: Der Wäscher Racoonizer der Firma Enerclean besteht aus einem Wasserbecken (Bild links, unten) von welchem das Wasser über den Schlauch nach oben auf eine 4-stufige Treppe (Bild rechts) gepumpt wird.

Der Chlorgehalt von Miscanthus liegt bei ca. 2000 mg/kg TS, wogegen derjenige von Holz nahe bei Null liegt (Reisinger 2009). Dies führte beim eingesetzten Rauchgaswäscher aus Edelstahl innerhalb 4 Wochen zu starker Korrosion und Leckagen (Abb. 13).

Die Firma Enerclean stellte uns grosszügigerweise einen neuen Wäscher zur Verfügung. Um ein erneutes Durchkorrodieren zu verhindern, wurde dieser Wäscher mit einer Spezialbeschichtung (Nanobeschichtung Nanocamp PPLT 42, Fa. Kapyfract, Schlatt (TG)) versehen. Zusätzlich wurden im Wäscher die Treppen neu angeordnet um den Saugwiderstand des Ventilators zu vermindern.



Abb. 13: Korrosionsschäden durch Chlor führten innerhalb weniger Wochen zu Leckagen am Wäscher.

Die hohen Aschemengen führten im Wäscher zu Schlamm- und Verstopfungen. Um den Wäscher in Betrieb halten zu können, musste das Wasser alle zwei Tage gewechselt werden.

Gezogene Wasserproben aus dem Wäscherwasser (Mischprobe Mai-Juni 2009) ermittelten hohe Gehalte an Schwermetallen (Tabelle 3).

Tabelle 3 Analyseresultate des Wäscherwassers (Mischprobe Mai-Juni 2009)

	Gemessener Wert in mg/l	Grenzwert gemäss Gewässerschutzverordnung SR 814.201 (p. 41) mg/l
Blei	1.46	0.5
Kupfer	5.22	0.5
Nickel	5.2	2
Zink	12.2	2
CSB	13600	-

Die gemessenen Gehalte liegen also über den Grenzwerten, die gemäss Gewässerschutzverordnung für eine Einleitung in die Kanalisation erlaubt sind.

Vorversuche mit der Beigabe von gebranntem Kalk (Ca(OH)_2) ins Wäscherwasser zeigten, dass sich die hohen Schwermetallgehalte im Wäscherwasser auf ein tieferes Niveau absenken lassen und die Einleitung in die Kanalisation ermöglichen sollten. Evt. liesse sich das Wasser im Wäscher wiederverwerten und der Schlamm separat entsorgen.

Der hohe Wasserverbrauch des Wäschers, von zirka 150 l pro Tag sowie der Stromverbrauch der Pumpe (zirka 300 W) verursachen zusätzliche Kosten für den Betrieb des Wäschers.

Auf Grund dieser Fakten wird der Wäscher nicht als zielführendes Mittel zur Reduktion der Feinstaubemissionen angesehen.

Einbau eines Zyklon

Um die Staublast vor dem Wäscher zu verringern, wurde im Juni 2011 ein Zyklon (Zyklon ZA 200, Fa. Fuchs, Aadorf, CH) vorgeschaltet (Abb. 14). Vor dessen Einbau wurde dieser wie der Wäscher ebenfalls mit einer korrosionsfesten Beschichtung (Nanobeschichtung Nanocamp PPLT 42, Fa. Kapyfract, Schlatt (TG)) versehen.

Gemäss dem Planungshandbuch der Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke lassen sich mit dem Zyklon vor allem grössere Ascheteile ($> 2 \mu\text{m}$) abscheiden (Holzheizwerke 2004).

Im Abluftstrom weist ein grosser Teil der Feinstaubpartikel aber Grössen $< 1 \mu\text{m}$ auf. Dies zeigt, dass für die Reduktion des Feinstaubgehaltes neben dem Zyklon eine zusätzliche Einrichtung für die Abscheidung der Feinstpartikel benötigt wird. Die Emissionsmessung vom 30.09.2011 bestätigt diese Aussage.



Abb. 14: Zwischen Wäscher und Feuerung zwischengeschalteter Zyklon (links im Bild), der Ascheteile grösser 2 μm abscheidet. In den Rohren sind die Messstutzen für die Abgasmessungen sichtbar.

Die in Tabelle 2 aufgelisteten Staubwerte zeigen, dass mit Zyklon und Rauchgaswäscher die Staubbelastungen nicht unter 50 mg/Nm^3 gesenkt werden konnten. Dieses Ziel wurde somit nicht erreicht.

Kostenberechnung von Miscanthus

In Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe Betriebswirtschaft (Gregor Albisser) von Agroscope ART wurden die Kosten der Chinaschilfproduktion berechnet (Tab. 4). Diese Zahlen zeigen, dass bei einem Verkaufspreis von angenommenen 6 Rp./kWh Wärme die Chinaschilfproduktion ohne Direktzahlungen profitabler ist als die Produktion von Weizen. Nicht eingeschlossen sind darin die Kosten für die Verbrennung.

Tab. 4: Kosten der Chinaschilfproduktion bei einer angenommenen Amortisation von 20 Jahren.

Kostenfaktor	Fr.
Anlagekosten total	4990.8
- Pflanzgut 10'000 Stück (ca. 30 Rp/Stk)	3228.0
- 1 x Pflügen	207.0
- 1 x Federzinkenegge	65.2
- 1 x Kreiselegge	121.1
- 1 x Setzen	530.0
- 1 x Hacken	67.4
- 2 x Maisherbizid	300.0
- 2 x Spritzen	65.8
- Arbeitskosten à Fr. 28.- /h	406.3
Jährl. Anlagekosten (20 J. Ammort., 2 % Zins)	370.8
- Abschreibung der Anlage	249.5
- Zinsanspruch für gebundene Anlagenkosten	121.3
Jährlich anfallende Kosten	1881.7
- Häckselvollservice Franko Silo Lohnunternehmer LU	1030.0
- 1 Güllegabe à 30 m3 Gülle	129.5
- Pachtzins Fr. 600.-/ha	600.0
- Betriebsführungsaufwand 3 Std, Arbeitskosten à Fr. 28.- /h	122.2
Jährlich anfallende Direktzahlungen	2660.0
Flächenbeitrag	1660.-
Anbaubeitrag	1000.-
Energieertrag¹ kWh pro Jahr (- Ertragsausfall Jahr 1+2)	59800
Kosten pro kWh (Rp./kWh) ohne Direktzahlungen	3.8
Angenommener Verkaufspreis/kWh 6 Rp.	3588
Jährliche Kosten	2252.5
Gewinn ohne Direktzahlungen/ha (inkl. Arbeit)	1335.5

¹ Heizwert für Miscanthus gemäss Reisinger (2009).

Im Vergleich zu den Gestehungskosten von Holzhackschnitzeln schneidet die Chinaschilfproduktion günstig ab. Gemäss Albisser (2010) sind für die Hackschnitzelproduktion im Bauernwald mit Kosten von 70 bis 162 Franken pro Festmeter Holz zu rechnen. Umgerechnet ergibt dies Produktionskosten von 3.5 bis 8 Rp./kWh. Diese Kosten liegen somit im Bereich der durch die Vereinigung Holzenergie Schweiz angegebenen Preis von rund Fr. 40/m³ Schnitzel. Was einen Preis von ca. 4 Rp/kWh ergibt.

Wird dabei in Betracht gezogen, dass der jährliche Häckselvollservice für Chinaschilf von Fr. 1030.- in keiner Weise optimiert ist, zeigt sich, dass das finanzielle Potential von Miscanthus noch nicht ausgeschöpft ist.

Der kostengünstige Anbau von Miscanthus wird ebenfalls durch die Literatur bestätigt (Hölscher et al. 2007). Miscanthus stellt in dieser Studie im Vergleich verschiedener Biomassen den kostengünstigsten Energieträger dar.

Kostenvergleich für die thermische Nutzung von Miscanthus und Holz

Der Vergleich zum Brennstoff Holz basiert auf obiger Kalkulation und den Grundlagen der Pilotanlage.

Tabelle 5 Jahreskosten der Feuerungen von Miscanthus und Holzhackschnitzeln unter der Annahme einer Amortisationsdauer von 20 Jahren und eines zusätzlichen Feinstaubfilters bei der Miscanthusfeuerung.

	Holz	Miscanthus		
Jahreskosten Feuerung (inkl. Zuführung ohne Lager) ¹	1650	1750		
Jahreskosten Feinstaubfilter für Miscanthus ²		250		
Zinskosten bei 4 % Jahreszins (20 Jahre)	792	960		
Reparaturen (20 Jahre), Reparaturfaktor 0.4	660	800		
Brennstoff für 7000 l Heizöläquivalent = 70 000 kWh = 252 GJ ³	2800	2800		
Gesamtkosten Rappen pro kWh	8.4	9.4		

¹ Heizomat RA30 mit Austragung ca. Fr. 33'000 (für Holzschnitzel); Heizomat RH-AK35 mit Austragung für Miscanthus ca. 35'000 Fr.; Amortisation 20 Jahre

² Annahme für die Anschaffungskosten eines Elektrofilters: Fr. 5'000.-.

³: Sowohl für Holz wie auch für Miscanthus wurde ein Preis von 4 Rp/kWh angenommen (siehe oben).

Ökologische Überlegungen

Im Rahmen dieses Projektes war es nicht möglich näher auf ökologische Fragen einzugehen. In der Literatur sind aber schon viel Angaben zu finden, die hier in Kürze dargestellt werden:

Tab. 6: Natural- und Energieerträge verschiedener Biomasseträger pro ha

	Ertrag pro ha t	Brennstofftertrag	Brutto-Energieertrag in kWh/ha
Raps (RME)	3 t	1.1 t RME	10 000 kWh/ha
Zuckerrüben (Ethanol)	80 t	6500-8400 l Ethanol	38 000-45 000 kWh/ha
Miscanthus	14 t	14 t Biomasse	70 000 kWh/ha

Wie Tab. 5 darstellt, lassen sich im Vergleich zur Herstellung von Agrartreibstoffen über die thermische Nutzung von Miscanthus wesentlich höhere Energieausbeuten pro Hektare erzielen. Ausserdem beschränkt sich der Einsatz von grauer Energie bei der Miscanthusproduktion auf weniger als 10 % des Heizwertes (Hersener et al. 1997). Bei der thermischen Nutzung fallen industrielle Prozesse wie Umesterung bei RME oder die gesamte Vergärung und Destillation für die Ethanolproduktion weg. Miscanthus wird auf dem Feld zu Ballen gepresst und benötigt vor der Verfeuerung keine weitere Aufbereitung. Im grenzübergreifenden Projekt "Energieproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse am Oberrhein – Auswirkungen für Landwirtschaft und Umwelt" (Hölscher et al. 2007) schnitt Miscanthus denn auch bezüglich Oekobilanz im Vergleich zu anderen Bioenergieträger am besten ab. Loeffel und Nentwig (1997) fanden durch die hohe Bodenbedeckung zahlreiche Arthropoden und Regenwürmer und schätzen den Einfluss auf die Fauna sehr positiv ein, da die Felder über Winter gute Rückzugsmöglichkeiten bieten.

Diese positiven ökologischen Eigenschaften werden ergänzt durch den tiefen Düngerbedarf (eine Güllegabe von 40 m³/Jahr) und dass ausser den Herbizidbehandlungen während der ersten beiden Anbaujahre kein chemischer Pflanzenschutz benötigt wird.

Somit lässt sich mit Miscanthus pro Hektare Nutzfläche ein hoher Energieertrag bei tiefem Input und sehr ökologischer Anbauweise generieren.

Informationstätigkeit

Im Verlauf des Projektes haben folgende Informationstätigkeiten stattgefunden:

Im Rahmen der Ausstellung „Nachwachsende Rohstoffe“ in Tänikon wird das Projekt dem interessierten Publikum zugänglich gemacht (Abb. 15). Anlässlich des Tag der offenen Tür von Agroscope ART in Tänikon (4. & 6. September 2009) wurde das Projekt einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt. Schätzungsweise 3000 Personen besuchten den Tag der offenen Tür.

Zahlreiche Besuchergruppen wird die Ausstellung weiterhin gezeigt, wodurch jedes Jahr mehrere hundert Personen erreicht werden.

Chinaschilf statt Heizöl

☛ Eine Hektare erzeugt die Energie von zirka 6 Tonnen Heizöl



Herausforderung der Verbrennung

- Tiefer **Ascheschmelzpunkt**: Zahflüssige Asche kann Heizungsroste verstopfen
- Hoher **Salzgehalt** (Chlor) wirkt korrosiv
- **Feinstaubbelastung** höher als bei Holz



Pilotanlage in Weinfeldern:

- Einsatz in **speziellem Heizkessel**
- Einsatz **Rauchgaswäscher**
- Testen der praktischen Umsetzung




Chinaschilf

Hohe Erträge...

- Höhe bis zu **4 Meter**, Wachstum von bis zu **5 cm pro Tag**
- 13 Tonnen Trockensubstanz-Ertrag pro Hektar (C4-Pflanze wie Mais)



...mit wenig Input:

- **Keine Pestizide** notwendig
- Düngung: **Eine Güllegabe** im Frühjahr



Anbau

- Durch **Setzlinge** oder **Auslegen** von Rhizomen
- Dauerkultur: Ein Mal pflanzen, bis zu **20 Jahre** nutzen!
- **Ernte**: März/April (einmal pro Jahr)



Verwendung

Energiegewinnung und Feststoffe (Bautelle, Formteile, Tofersatz, Tiereinstreu)




Kompostierbare Pflanztöpfe

Einstreu für Schweine

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement (EVD)
Bundesdepartement
Agrarische Hochschule Tänikon AHF



Abb. 15: Poster (oben), die in der Ausstellung „Nachwachsende Rohstoffe“ besichtigt werden können. Teil Miscanthus (unten) der Ausstellung in Tänikon. Weiter sind in der Ausstellung noch Biotreibstoffe und Hanf ausgestellt.

Anlässlich der „Agrartechniktage Tänikon 2010“ vom 16. Juni 2010 wurde das Projekt 70 Lehrern, Beratern, Lohnunternehmern und Firmenvertretern vorgestellt.

- Im Februar 2010 erschien der Artikel „Heizen mit Schilf?“ in der „Schweizer Landtechnik 2010“.
- Im Oktober 2011 erschien eine Sondernummer der landwirtschaftlichen Zeitschrift „Die Grüne“ zum Thema Energie und Biomasse mit einem Artikel über das Miscanthusprojekt.
- Ein Dossier zu erneuerbaren Energien inkl. Miscanthus erschien im Schweizer Bauer im Dezember 2011.

Schlussfolgerungen

- Miscanthus ist ein sehr kostengünstiger Energieträger (3.8 Rp/kWh), der hohe Energieerträge und Deckungsbeiträge generiert.
- Der Anbau von Miscanthus stellt keine besonderen Anforderungen und ist sehr gut für den biologischen Landbau geeignet.
- Die Verbesserung der Erntelogistik stellt noch viel Optimierungspotential dar.
- Die thermische Nutzung stellt höhere Anforderungen als die Nutzung von Holzschnitzeln, die Pilotanlage belegt aber die Machbarkeit.
- Die hohe Chlorkonzentration des Miscanthus erfordert resistente Materialien (Beschichtungen) im Bereich wo die Abgase kondensieren.
- Der tiefe Ascheschmelzpunkt bedingt Feuerungen, die mit dem tiefen Ascheschmelzpunkt (Verschlackung) umgehen können und mit Miscanthus einen hohen feuerungstechnischen Wirkungsgrad erzielen.
- Die Feinstaubabscheidung ist noch weiter zu verbessern. Der Einsatz des verwendeten Wäschers wird auf Grund seiner begrenzten Wirkung, des Wasserverbrauchs und den hoch befrachteten Abwässern für den Einsatz mit Miscanthus nicht als zielführend angesehen. Der Zyklon reduzierte die Staubfracht um ein gutes Viertel, wobei dessen Abscheidegrad ebenfalls noch nicht als zufriedenstellend bezeichnet werden kann.
- Gemäss der Luftreinhalteverordnung (LRV, 814.318.142.1), Ziffer 743, dürfen Erzeugnisse der Landwirtschaft nicht in Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 70 kW verbrannt werden. Es ist zu erwarten, dass diese Regelung kurzfristig bis mittelfristig nicht aufgehoben wird. In diesem Sinne bietet sich für Miscanthus die Verbrennung in Grossfeuerungen mit Feinstaubfiltern an.

Literatur

- Albisser G. 2010: Wirtschaftlichkeitsberechnungen für den Bauernwald. ART-Schriftenreihe, 12, S. 75-83.
- anonym 2008: Heizwerttabelle für verschiedene Halmgutbrennstoffe. Technologie und Förderzentrum, Straubing, 08/08, S. 2S.
- BLT 2004: Prüfbericht Hackgutfeuerung Heizomat RH-AK 50, BLT Aktnr.: 107/04. Franzisco Josephinum, Wieselburg (A), 22 S.
- Bundesamt-für-Energie 2011: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010. Bern, 64 S.
- Ellner-Schubert F., Hartmann H., Turowski P. u. Rossmann P. 2010: Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz. Berichte aus dem TFZ 22, Straubing (D), 139 S.
- Hersener J. L., Meister E., Mediavilla V., Lips A., Rüegg J., Nussbaumer T., Baserga U., Müller D., Dinkel F., Waldeck B., Trauboth Müller T. u. Hirs B. 1997: Schlussbericht Projekt Energiegras-Feldholz. Tänikon.
- Hölscher T., Deimling S., Freiermuth, Knuchel, R., Gaillard G., Kägi T. u. Müller-Sämann K. 2007: Energieproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse am Oberrhein – Auswirkungen für Landwirtschaft und Umwelt. Bericht des Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG, S. 1-70.
- Holzheizwerke A. Q. 2004: QM Holzheizwerke / Planungshandbuch: BD 4. (C.A.R.M.E.N.) C. A.-R.-M.-u. E.-N., 245 S.
- Kaltschmitt M. u. Hartmann H. 2001: Energie aus Biomasse. Springer, Berlin, 770 S.
- Loeffel K. u. Nentwig W. 1997: Ökologische Beurteilung des Anbaus von Chinaschilf (*Miscanthus sinensis*) anhand faunistischer Untersuchungen. Agrarökologie 26, Verlag Agrarökologie Hannover, 133 S.
- Reisinger K. 2009: Thermische Verwertung von *Miscanthus* im Vergleich zu Holz. 20 Jahre *Miscanthus*-forschung in Bayern – Eine Bilanz für die Praxis Status Quo-Seminar, 18. September 2009 TFZ Straubing, Straubing (D).
- Schweiz H. 2010: Energieinhalt von Holzschnitzeln und Pellets / Graue Energie. 403, 2 S.