



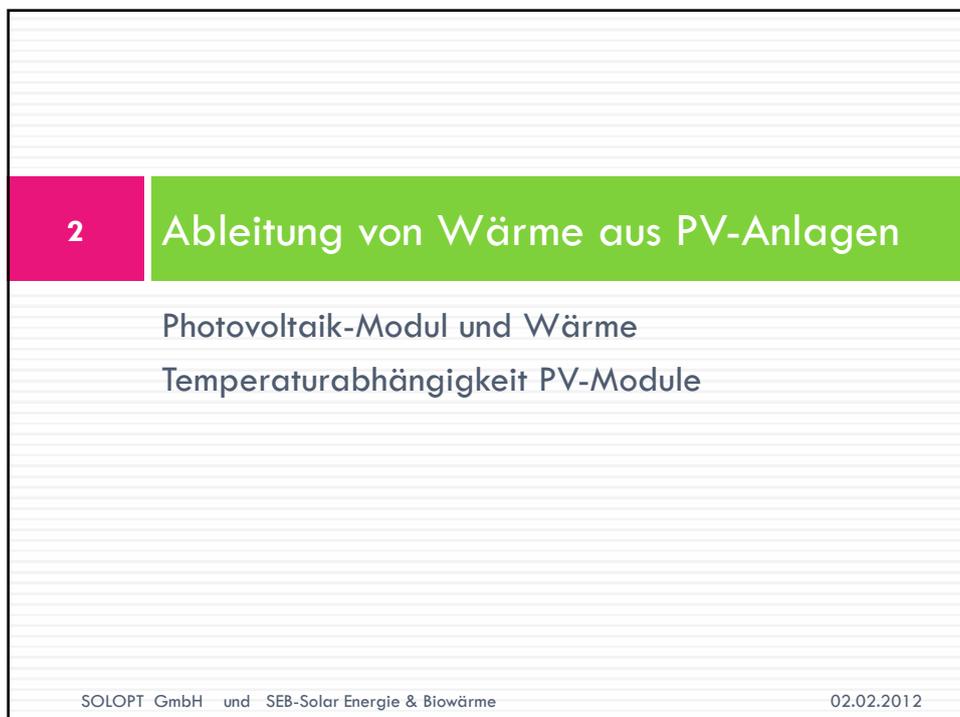
**SOLOPT**

# ABWÄRME NUTZUNG AUS EINER PHOTOVOLTAIK-ANLAGE ZUR TROCKNUNG VON HOLZ

VON  
DIPL. ING. (UNIV)  
SIEGFRIED EBERT

**Solar Energie & Biowärme**

PHAST - Solare Trocknung mit Null-Primärenergie-Verbrauch



**2** **Ableitung von Wärme aus PV-Anlagen**

Photovoltaik-Modul und Wärme  
Temperaturabhängigkeit PV-Module

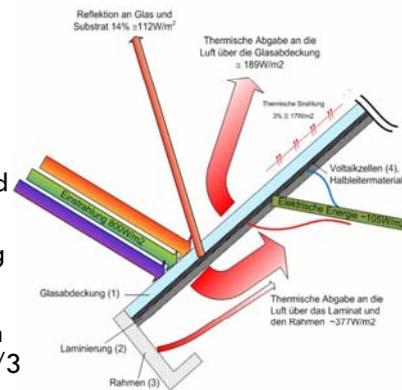
SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme 02.02.2012

## Photovoltaik-Modul und Wärme

3

### Das thermische Modell eines Standard Voltaik-Moduls:

- PV-Module absorbieren fast die gesamte Energie des einfallenden Lichtes, der elektrische Wirkungsgrad beträgt aber nur ca. 15%
- die Reflexion von Strahlung ist gering
- die thermische Abstrahlung ist gering
- Die Wärmeabgabe an den Luftstrom der Unterseite beträgt mindestens 2/3 der in der Zellebene erzeugten thermischen Leistung



Nutzbare thermische Energie bei einer Einstrahlung von 800W/m<sup>2</sup>:

$$P_{NW} \geq 370W/m^2$$

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Temperaturabhängigkeit PV-Module

4

Der Wirkungsgrad kristalliner PV-Module hängt stark von der Temperatur ab.  
 Der Temperaturkoeffizient der MPP\*-Leistung beträgt 0,4%/K

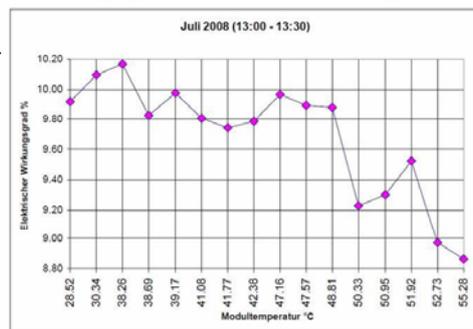
\*) MPP = Maximum Power Point

Beispiel: Untersuchung bei ART

$$\Delta T = 55^\circ - 28^\circ = 27K$$

$$\Delta P = 9,85 - 8,85 = 1 \Rightarrow 12,5\% \text{ der durchschnittlichen Leistung}$$

### Elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Modultemperatur



Photovoltaik | Informationstagung Landtechnik, 13./14.10.2009  
 Ludw. Van Caelegem | © Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

5 **Das PHAST Konzept**

- Der Name
- Die Luftführung
- Transparente Module & Unterschaltung
- Trocknung
- Modulkühlung



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme 02.02.2012

6 **Das PHAST Konzept: Der Name**

Eine auf  
**PHotovoltaik-Abwärme basierende  
Schüttgut-Trocknung (PHAST)**  
angewandt auf Holz & Holzhackgut

Möglicherweise die erste Anlage dieser Art in  
Deutschland oder weltweit.

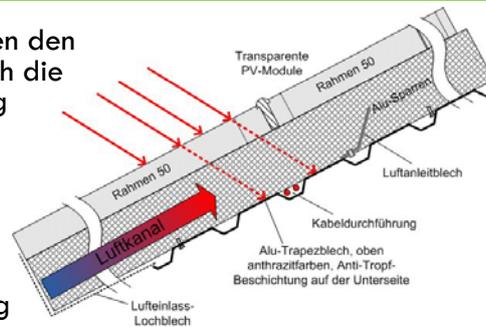
**Ein besonders ökologisches Projekt mit vielen Vorteilen**

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme 02.02.2012

## PHAST Konzept: Der Luftkamin

7

- In den Luftkaminen zwischen den Sparren wird die Luft durch die Trapezblech-Unterschaltung verwirbelt
- Führungsbleche sorgen zusätzlich für eine gezielte Anleitung der Luft an die Modulunterseite
- Die Anti-Tropf-Beschichtung isoliert den Luftkamin gegen zu hohen Wärmeverlust



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Transparente Module & Unterschaltung

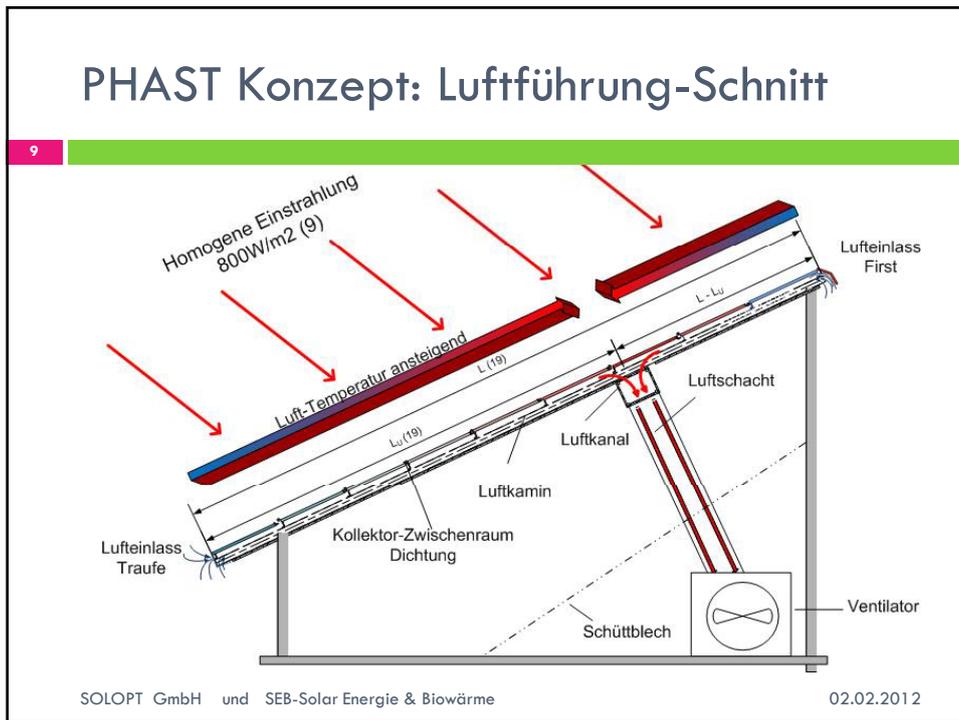
8

- Die Unterschaltung besteht aus Aluminium-Trapezblech. Die Oberseite ist schwarz gefärbt, die Unterseite mit isolierender Anti-Tropf-Beschichtung versehen.
- Durch transparente Module fällt zusätzlich Licht auf die Unterschaltung
- Die Wärmegewinnung wird durch diese Anordnung um 1,2% - 1,5% erhöht!



SEB-Solar Energie & Biowärme

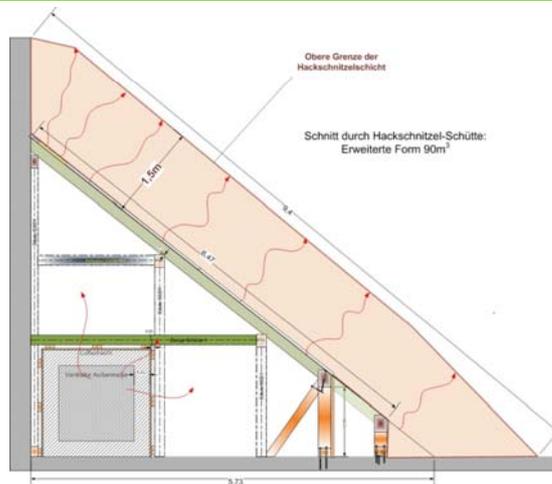
02.02.2012



## PHAST: Schnitt durch eine Schütte

11

- Trocknung durch vorgewärmte Luft die mit einem Ventilator unter der Schütte in den Hohlraum geblasen wird
- Keine beweglichen Teile außer den Ventilatoren
- Feuchte Luft entweicht durch Luftschlitze unter dem Dach



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Hackschnitzeltrocknung: Schütte

12

Trocknungsschütte PHAST 6m Schüttlänge 7,5m Breite



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

13

## Die Vorteile von PHAST

- Ökologische Stromerzeugung
- Steigerung des Strom-Ertrags
- Trocknung mit PV-Abwärme
- Null** Primär Energie Verbrauch

## Ökologische Stromerzeugung

14

- Indachlösung der Firma *Galaxy-Energy*
  - Kollektoren auf Aluminium-Sparren montiert bilden die Dachhaut
  - Geschlossene, glatte Oberfläche lässt Schnee leicht abrutschen
- Planung und Projektierung:
  - 192 Module a 250Wp → 48kWp
- Die PV-Anlage hat die für Solarenergiegewinnung ideale Dachausrichtung, Azimut 191°, Neigung 28°, keine Verschattung.
- Es werden >50.000 kWh Strom pro Jahr erzeugt (Solarstrahlung: 1050kWh/a)
- Eigenbedarf kann in hohem Maß aus PV-Anlage gespeist werden



## Steigerung des Strom-Ertrags

15

- Der Jahresertrages der PV-Anlage wird um durch die aktive Kühlung der Voltaikmodule mehr als 6% gesteigert!  
Normalertrag 980kWh/kWp = 47MWh/a, gekühlt > 50MWh/a
- Die wesentlich niedrigere Spitzen- und Durchschnittstemperatur steigert die Ertragskraft der PV-Anlage weiter durch:
  - die Verlängerung der Lebensdauer der Voltaikmodule
  - die Verringerung der alterungsbedingten Leistungsreduzierung
  - die Verringerung der Ausfallhäufigkeit der Module und der Verkabelung  
z.B. durch geringere mechanische Spannungen, schnelles Abtrocknen

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Trocknung mit PV-Abwärme

16

- Durch die PV-Kühlung werden ca. 150.000kWh /a Wärmeleistung gewonnen **ohne** den Einsatz von Primär-Energie!
- Die Verwendung von transparenten PV-Modulen und einer schwarzen Unterschaltung steigert den Wärmeertrag um weitere 20.000kWh/a
- Die Abwärme der Ventilatoren und Wechselrichter wird auch zum Trocknen eingesetzt
- **Die gesamte Wärmeenergie kostet im Betrieb nichts!**
- Der Hohlraum unter den Trocknungsschütten bietet auch Platz für zusätzliche Wärmetauscher wenn z.B. die Abwärme eines BHKW zusätzlich genutzt werden soll

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Null Primär Energie Verbrauch

17

- Eine 48kWp Anlage liefert bei einer Solarstrahlung von  $800\text{W}/\text{m}^2$ ,  $T_A=25^\circ\text{C}$ , kein Wind, ca. 35kW elektrische Leistung
- Die PHAST - Photovoltaik-Anlage liefert durch die aktive Kühlung bei o.g. Bedingungen ca. 7-8% mehr Leistung, das sind ca. 2,4-2,8kW
- Wenn nach 10 Jahren Betriebsdauer die Module statt 93% noch 96% Wirkungsgrad haben werden ca. 3,5-3,8kW mehr erzeugt.
- Es werden zwei hocheffiziente, voll regelbare Ventilatoren eingesetzt, optimiert auf maximalen Wirkungsgrad.
- Die Leistungsaufnahme eines solchen Ventilators beim Ziel-Volumenstrom und 130pa Druck in der Schütte und 40pa Druckabfall für die Luftkanäle beträgt:  
 $1700\text{W} (x2 = 3,4\text{kW})$

Über die Lebensdauer der Voltaik von 20 Jahren ergibt sich eine ausgeglichene Bilanz an elektrischer Energie!

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

18

## Die erste PHAST Anlage

PHAST Referenzanlage Altdorf: Standort  
Hackschnitzel-Schütte  
Luftkanal, Luftschaft, Ventilator  
Transparente Module & Unterschaltung  
Kapazität

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST Referenzanlage: Standort

19

- **Günstige Lage an der A3 und Umgehungsstraße Altdorf**
- **Gute Verkehrsanbindung wichtig für Auslieferung bei Winterbedingungen**
- **Zielabnehmer für spätere Wärmelieferung in unmittelbarer Nähe**



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Projekt-Planungsdaten

20

- |   |            |
|---|------------|
| <input type="checkbox"/> Beginn der Bauarbeiten:                  | Mai 2009   |
| <input type="checkbox"/> Rohbau-Fertigstellung:                   | Juni 2009  |
| <input type="checkbox"/> Voltauik-Inbetriebnahme:                 | Sept. 2009 |
| <input type="checkbox"/> Probelauf der Hackschnitzel-Trocknung    | Okt. 2009  |
| <input type="checkbox"/> Fertigstellung der Meß- und Regeltechnik | Dez. 2009  |



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST Referenzanlage: Ist-Kapazität

21

Kapazität einer Trocknungs-Schütte: je nach Schütthöhe	90 – 100 srm
Trocknungszyklen je Schütte	10 - 12 pro Jahr
Trocknungskapazität:	1800–2400 srm
Trocknungsenergie aus PV-Anlage:	170.000 kWh/a
Luftleistung:	170.000.000 m <sup>3</sup> /a
Verdunstungskapazität:	400.000 kgH <sub>2</sub> O/a
Lagerkapazität , Raumvolumen:	2x450+250+200 srm

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Scheitholz- Trocknung

22



Markierung ausgewählter Holzstücke mit  
Gewicht & Wassergehaltsbestimmung  
Verteilt im zu trocknenden Haufen

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

23

## PHAST: Meß- & Regelungstechnik

Messtechnik  
PHAST: Luftwege & Messpunkte  
PHAST: PV - Messpunkte  
Überwachung & Regelung

SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Messtechnik & Regelung

24

- Messgeräte
  - Druckmessung
  - Luftgeschwindigkeit
  - Hackschnitzel-Feuchte
- Regelung:
  - 2 x UVR1611 der Firma Technische Alternative mit
  - Temperaturfühler PT1000, Feuchtemesser, Solarstrahlungsfühler, Differenzdrucksensor, 1) Windmesser

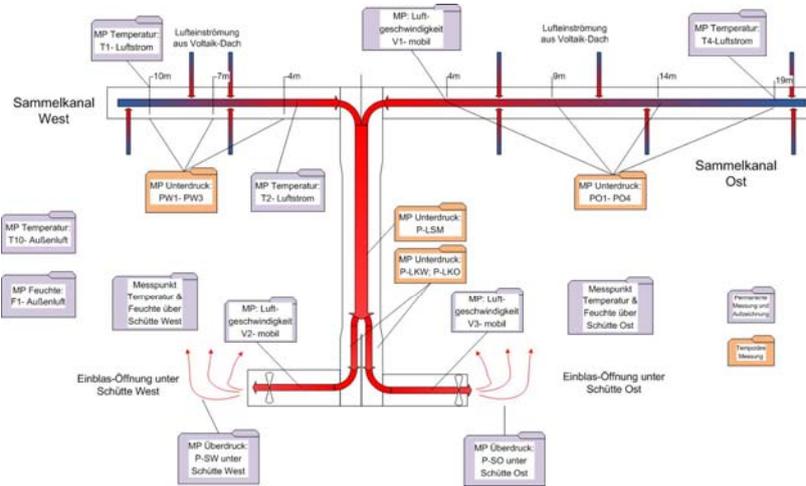


SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST: Luftwege & Messpunkte

25



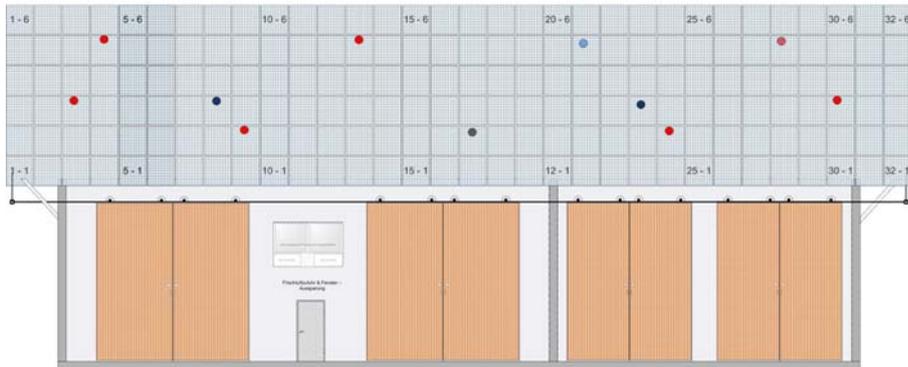
SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST: PV - Messpunkte

26

- Temperaturfühler PT1000, am Alu-Rahmen obere Querstrebe, unten, befestigt
- Temperaturfühler PT1000, befestigt so dass die Lufttemperatur zwischen Modul und Unterblech gemessen wird
- Temperaturfühler PT1000, auf der Unterseite des Modules am Laminat befestigt
- Temperaturfühler PT1000, befestigt auf der Oberseite des Unterbleches

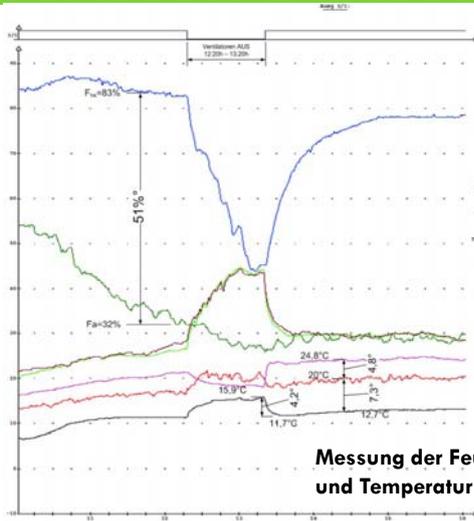


SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Messung Feuchte und Temperatur

27



- Solarstrahlung 12:30h – 13:30h:  
 900W/m2 im Mittel  
 Windgeschwindigkeit:  
 10km/h im Mittel  
 T-K4 -R5\_Ra: Temperatur im 4. Kamin am Rahmen der 5. Reihe  
 T-K13-R5\_Ra: Temperatur im 13. Kamin am Rahmen der 5. Reihe  
 T-SchüttHoWst: Temperatur im Hohlraum unter der Schütte West  
 F-SchwenkOst: relative Feuchte über dem Hackschnitzelbett (Schwenkarm) der Schütte Ost  
 F-Außen: Messpunkt an der Außenwand  
 T-SchwenkOst: Temperatur der Luft direkt über dem Hackschnitzelbett der Schütte Ost

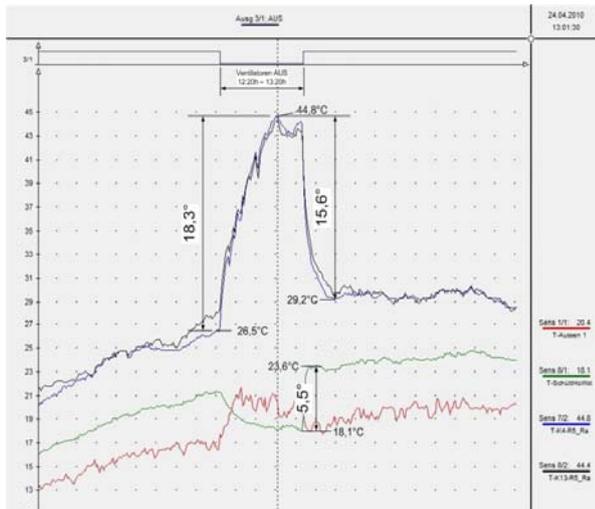
Messung der Feuchte der Außenluft und der Feuchte und Temperatur der Luft über dem Hackschnitzelbett

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Temperatur am Rahmen der Solarmodule mit und ohne Hinterlüftung

28



- Solarstrahlung 12:30h – 13:30h:  
 900W/m2 im Mittel  
 Windgeschwindigkeit:  
 10km/h im Mittel  
 T-K4 -R5\_Ra: Temperatur im 4. Kamin am Rahmen der 5. Reihe  
 T-K13-R5\_Ra: Temperatur im 13. Kamin am Rahmen der 5. Reihe  
 T-SchüttHoWst: Temperatur im Hohlraum unter der Schütte West

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Beispiel: Trocknung von Hackschnitzeln aus Kiefernstammholz

29

	am:	Gewicht [t]	Wassergehalt bestimmt durch Schaller			Volumen srm	Faktor srm/t Kiefer
	[Tage]		Probe 1	Probe 2	Mittelwert		
Beschickung	14.04.2010	51,3	44%	48%	46%	159,03	3,10
Trockenmasse		27,7					
Masse des Wassers:		23,6	bei WG =	46%		Granularität: G30	
Umschichtung ins Lager	10.03.2010						
Masse der Hackschnitzel		30,11	bei WG =	8%			
Masse des Wassers:		2,41				Verdunstungsenergie:	
Diff. Tage, Wasser	15					0,63 kWh/kg H <sub>2</sub> O	
Wasserverdunstung		21,2	Tonnen			13,35 MWh	



In 13 Tagen wurden 160srm von WG=45% auf WG=8% getrocknet. Dabei wurde eine Wassermasse von 21,2 Tonnen verdunstet, also **1,63 Tonne pro Tag**. Die Verdunstungsenergie von 13,4MWh entspricht etwa 1300Litern Heizöl. Bei einem Luftdurchsatz von ca. 400.000 m<sup>3</sup>/Tag ergibt sich eine Wasseraufnahme von durchschnittlich 4g/m<sup>3</sup>.

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Mehrleistung an elektrischer Energie

30

	Elektrische Leistung		gemessen am:		17.04.2010
	Beispiel Wechselrichter 5 (WR5)				
	Messwerte		Leistung auf		
Zeit	Solarstrahlung	WR-Leistung	Strahlung normiert	Leistungsänderung	Leistungssteigerung
			800		
			W/m <sup>2</sup>	Diff.	
12:30	Ventilatoren AUS				
13:27	922	6273	5443	0	
13:27	Ventilatoren EIN, 10.0V				
13:30	922	6316	5480	37	0,68%
13:33	922	6367	5525	82	1,48%
13:36	910	6370	5600	157	2,80%
13:46	896	6453	5762	319	5,54%
13:50	887	6441	5809	366	6,30%
14:10	878	6329	5767	324	5,62%
14:16	871	6347	5830	387	6,64%

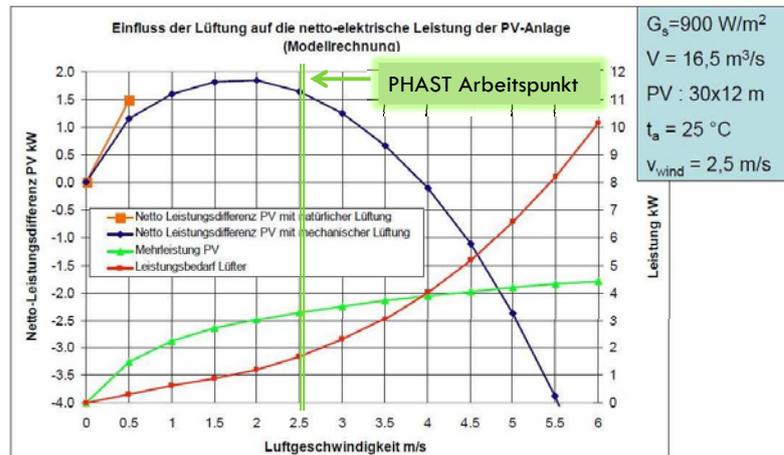
Die Messung der elektrischen Mehrleistung ist nicht trivial. Es gibt praktisch keine zwei Messperioden in denen die exakt gleichen Bedingungen vorliegen und bei der einmal ohne und einmal mit Ventilator gearbeitet wurde. Die Werte in dieser Tabelle bestätigen jedoch die Richtigkeit der theoretischen Betrachtungen auch wenn die quantitativen Aussagen noch mit hohen Toleranzen verknüpft sind.

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Energieverbrauch & -Gewinn in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit

31



Photovoltaik | Informationstagung Landtechnik, 13./14.10.2009  
 Ludo Van Caenegem | © Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

17

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Neue Applikationen PV-Abwärme

32

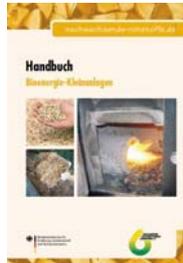


SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Quellenverzeichnis

33



**Autoren:**  
Dr. agr. Hans Hartmann  
Dipl.-Ing.(FH) Klaus Reisinger  
Dipl. Ing. agr. Klaus Thüneke  
Dipl. Forstwirt Dipl. Ing. (BA)  
Alexander Höldrich  
Dipl. Phys. Paul Roßmann

Niedersachsen · Netzwerk  
Nachwachsende Rohstoffe  
www.3-N.info



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
**Forschungsanstalt**  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART



CONA  
Solarlufttechnik  
<http://www.cona.at>

Hochschule Rosenheim  
University of Applied Sciences  
Prof. Dr.-Ing. Kreimes



Bayerische Forstverwaltung  
<http://www.forst.bayern.de/>

Prof. Dr.-Ing. Horst Kreimes c/o Hochschule Rosenheim  
- Energietechnik und Umweltschutz -  
Hochschulstr. 1  
D - 83024 Rosenheim  
kreimes@fh-rosenheim.de

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

34

## PHAST: Hintergrundinformationen

Informationen zur Trocknung und Verbrennung  
von Holz und Hackschnitzeln

SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

35

## Aus Holz wird Brennstoff

Umweltvorteile von Holz

Vorteile von Hackschnitzeln

Holz-Hackschnitzel trocknen

## Umweltvorteile von Holz

36

### Eine überzeugende Ökobilanz

- Holz ist gespeicherte Sonnenenergie
  - Bei seiner Verbrennung werden nur die Stoffe freigesetzt, die während des Wachstums aufgenommen wurden.
  - Eine Tonne trockenes Holz ersetzt dabei ca. 270 Liter Heizöl.
- Im Vergleich zur Gewinnung anderer Rohstoffe
  - Ist der Energieverbrauch bei der Be- und Verarbeitung niedrig.
  - Ist der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verschwindend gering
  - Sind die Transportwege kurz (bei der Verwendung von heimischem Holz)

## Hackschnitzel: Vorteile und Nachteile

37

### Vorteile von Hackschnitzeln

- **Umweltfreundlich:** Hackschnitzel-Heizungen sind **CO<sub>2</sub>**-neutrale Heizungen. Hackschnitzel benötigen nur wenige, nicht energieintensive Verarbeitungsschritte.
- **Rohstoffgünstig:** Die Hackschnitzel-Preise sind im Vergleich mit fossilen Energieträgern in den letzten Jahren annähernd stabil geblieben. Hackschnitzel sind preiswerter als **Holzpellets!**
- **Direktvermarktung:** Keine oder nur wenige Zwischenhändler. Preis ist durch den Markt bestimmt, nicht durch die Industrie.
- **Regenerativ:** Hackschnitzel bestehen aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Versorgung ist auf lange Sicht stabil.

### Nachteile einer HKS Heizung

- **Investitionsintensiv:** Die Umrüstung bzw. Neuausrüstung mit einer Hackschnitzel-Heizung ist deutlich teurer als der Einbau einer **Gas-** oder **Öl-Heizung**.
- **Einäschernd:** Bei Hackschnitzel-Heizungen müssen regelmäßig Ascherückstände entsorgt werden.
- **Raumgreifend:** Ein ausreichend großer und trockener Raum für die Lagerung der Hackschnitzel ist nötig in unmittelbarer Nähe zum Kessel. Der muss in einem getrennten Raum stehen.
- **Bauintensiv:** Hackschnitzel-Heizungen benötigen einen **Schornstein** oder eine **Abgasleitung**.

Quelle: [www.energiwelt.de](http://www.energiwelt.de)

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Warum Hackschnitzel aktiv trocknen I?

38

- Zur effizienteren und umweltfreundlicheren Nutzung der natürlichen Ressource Holz
  - Steigerung des Heizwertes
  - Konservierung (lagerfähig machen)
  - Gewichts- und Volumenreduktion
- Zur Vermeidung von Gesundheitsrisiken (Pilzbelastung)
- Um technische Rahmenbedingungen in Heizanlagen einhalten zu können
- Um die Qualität im Ganzen zu verbessern

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Warum Hackschnitzel aktiv trocknen II?

39

- Mehr Energie/m<sup>3</sup> Lagerraum = längere Vorratsdauer
- Geringere Transportkosten
- Höhere Verbrennungstemperatur =  
sauberere Verbrennung = höherer Wirkungsgrad  
Vorsicht, Ascheerweichungspunkt! Kessel muss für trockenes Holz geeignet sein  
->Trockenschnitzel-Feuerungen
- Verlängerung der Lebensdauer der Kessel  
Zu feuchtes Brennmaterial greift Kessel und Brenner an und reduziert die Lebensdauer.  
Es gibt dazu praktische Erfahrungen, jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Situationen und  
anderen Einflussfaktoren keine genau bezifferbaren Werte.  
Quelle: CONA und andere
- Trockene Hackschnitzel sind gut blasbar mit sog.  
„Pumpcontainern“ (Einblaswagen), ähnlich wie Pellets  
Quelle: Prof. Dr.-Ing. Horst Kreimes

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Warum Hackschnitzel trocknen und lagern?

40

- Durch die Trocknung können die Hackschnitzel praktisch unbegrenzt gelagert werden ohne Substanz zu verlieren.
- Das die Solare-Trocknung meist in den Sommermonaten stattfindet hat auch Vorteile für die Logistik:
- Kontinuierlichere Auslastung der Geräte in der Herstellungskette
    - Holz und Hackschnitzel-Transporter
    - Hacker & Lader
  - Einfache Abdeckung des Spitzenbedarfs im Winter durch Entnahme aus dem Lager vor Ort

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

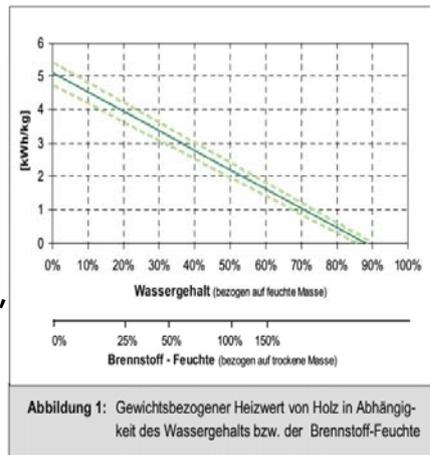
02.02.2012

## Heizwertsteigerung / Gewicht

41

Der **Heizwert pro Kilogramm Holz** steigt bei abnehmendem Wassergehalt deutlich an. Die Verringerung des Wassergehalts von 50 % auf 15 % erhöht den Heizwert von 2,2 auf 4,2kWh/kg, dies bedeutet eine Erhöhung um ca. 90 %!

(Quelle: 3N)



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

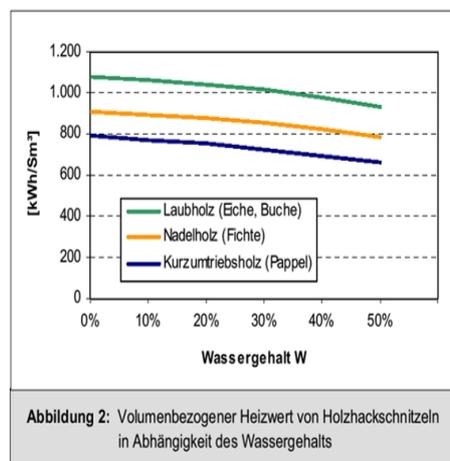
02.02.2012

## Heizwertsteigerung / Volumen

42

Der **Heizwert pro Volumen (Schüttkubikmeter [Sm<sup>3</sup>] oder Schüttraummeter [srm]) Holzhackschnittel** steigt bei der Reduzierung des Wassergehalts von 50% auf 15% um ca. 13 % an. Das Volumen wird um ca. 7% reduziert

(Quelle: 3N)



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Konservierung, Lagerfähigkeit

43

Die Lagerung von trockenem bis leicht feuchtem Brennstoff ( $W < 30\%$ ) ist im Hinblick auf biologische Abbauprozesse, wie z.B. Schimmelpilzwachstum oder Geruchsbildung unbedenklich (Quelle: 3N)

**Ziel PHAST:**

**$\leq 20\%$  Restfeuchte**

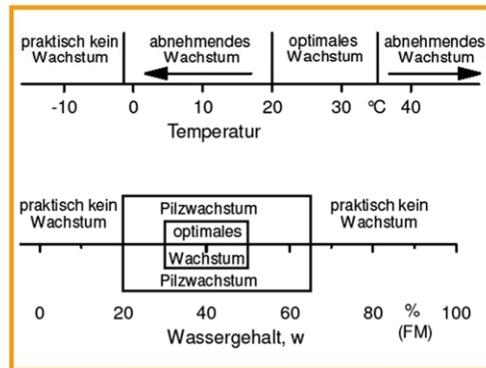


Abb. 3.24: Temperatur- und Wassergehaltsansprüche holzabbauender Pilze (nach [3-12])

Quelle: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

44

## Photovoltaik Abwärme & Trocknung

Anforderungen an ein effizientes Kühlsystem für PV-Anlagen  
Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Abwärme-Nutzung  
Photovoltaik & Hackschnitzeltrocknung

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Anforderungen an ein effizientes Kühlsystem

für PV-Anlagen

45

- Niedrige Herstellungs- und Wartungskosten
- Geringer Eigen-Energieverbrauch
- Geeignet für den Temperaturbereich z.B. 10° bis 60°C an der Moduloberfläche
- Lange Lebensdauer (> 20Jahre, angepasst an die Lebensdauer der PV-Anlage)
- Keine negativen Auswirkungen auf Betrieb und Wartung der PV-Anlage
- Die Ziele der PV-Kühlung und der Anwendung sind nicht konträr zueinander

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Abwärme-Nutzung

46

- Die gewonnene Wärme ist direkt anwendbar d.h. man benötigt keinen zusätzlichen Wärmetauscher
- Das Temperaturniveau der Anwendung passt zum erreichbaren Niveau der PV-Abwärme (keine Temperaturerhöhung z.B. durch Wärmepumpe etc. notwendig)
- Die Applikation ist unempfindlich gegen die starken Schwankungen der Solarstrahlung (durch das Wetter und jahreszeitlich gesehen)
- Die Abwärme-Nutzung erwirtschaftet die „Herstellungs- und Betriebskosten“ in einem angemessenen Zeitraum (ca. 12Jahre)

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Trocknen wg. technischer Rahmenbedingungen

47

Kleinere Holzhackschnitzelkessel können nur mit Holz befeuert werden, das einen Wassergehalt von maximal 30 – 35 % aufweist.

Holzvergaser fordern in der Regel einen Wassergehalt von weniger als 15%.

Bei Rostfeuerungen können in der Anfahrphase mehr Geruchs-Emissionen entstehen, wenn das Holz sehr feucht ist ( $W > 35 \%$ ).

Die Teillastfähigkeit bei Holz mit Wassergehalten von 40 - 50 % ist eingeschränkt (z.B. Teil-Last nur 50 % der Maximalleistung anstatt 25 %)

Bei der Auslegung eines Holzheizkessels wird ein bestimmter Wassergehalt zugrunde gelegt. Mit zu nassem Brennstoff kann die ausgelegte Wärmeleistung des Kessels nur zu 70 – 90% erreicht werden.

Für viele Anwendungen ist die Trocknung auch eine unverzichtbare Grundvoraussetzung z. B. um die Rauchgaswerte einhalten zu können

**Deshalb sollte grundsätzlich die Feuerung dem Brennstoff angepasst werden - nicht umgekehrt** (Quelle: 3N)

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Trocknung ist „Veredelung“ von Holzhackgut!

48

- Verdopplung des Heizwertes pro Gewichtseinheit
- Reduktion des Volumens um 7%, das verringert die Transportkosten
- Herstellung der Lagerfähigkeit, Abbauprozesse werden verhindert
- Die Hackschnitzel können mit sogenannten „Pumpcontainern“ ausgeliefert und wie Pellets in einen Vorratsbehälter geblasen werden
- Kontrollierte, konstante Restfeuchtigkeit des Brennmaterials ermöglicht eine optimale Einstellung der Heizanlagen und Verbrennung!



1A Hackschnitzel



Mittlere Qualität

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST Konzept: Die Trocknung

49

### Vorteile der Abwärme-Nutzung für Holz- oder Hackschnitzel –Trocknung

- Die gewonnene Abwärme wird direkt angewendet. Der Warmluftstrom wird unmittelbar durch die aufgeschütteten Hackschnitzel geleitet
- Das Temperaturniveau der Anwendung passt praktisch immer. Bei hoher Einstrahlung und niedriger Luftfeuchte der Außenluft kann schon ab  $-5^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur getrocknet werden
- Die Anwendung ist unabhängig vom Wetter: Hackschnitzel gehen auch nach 5 Wochen nicht kaputt, wenn so lange keine aktive Trocknung stattfindet
- Die Ziele der PV-Kühlung und der Anwendung sind deckungsgleich :

### Kalte Module durch hohen Luftstrom - Hoher Luftdurchsatz → schnelle Trocknung

- Die Hackschnitzel-Schütte hat eine besonders großer Oberfläche
- Eine elektronische Steuerung regelt den Luftstrom abhängig von verschiedenen Temperaturen, der Luftfeuchtigkeit und der Solarstrahlung auf optimale Energieausbeute und Trocknung

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## PHAST Konzept: Die Modulkühlung

50

### Effizientes Kühlsystem für die Photovoltaik

- Die aktive Hinterlüftung der Voltaikmodule mit sehr hohem Luftdurchsatz kühlt bedarfsabhängig die PV-Anlage und sorgt damit für eine elektrische Mehrleistung
- Temperaturspitzen im Halbleitermaterial (Zellen  $>70^{\circ}\text{C}$ ), die bei hoher Einstrahlung, hoher Außentemperatur und Windstille auftreten, werden verhindert. Das reduziert die Alterung und damit den Leistungsabfall der Module und zusätzlich auch die Ausfall-Häufigkeit.
- Geringe Temperaturunterschiede über die gesamte Fläche durch Luftzuführung von oben und unten. Dadurch wird der Wirkungsgrad der PV-Anlage nochmal verbessert
- Die natürliche Konvektionsbelüftung wird nicht verhindert → bei einem Ausfall der Zwangsbelüftung kommt es nicht zu einem Überhitzen der Module

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

51

## PHAST: Angewandte Physik

Daten und Berechnungen zur Trocknung von Holz und Hackschnitzeln

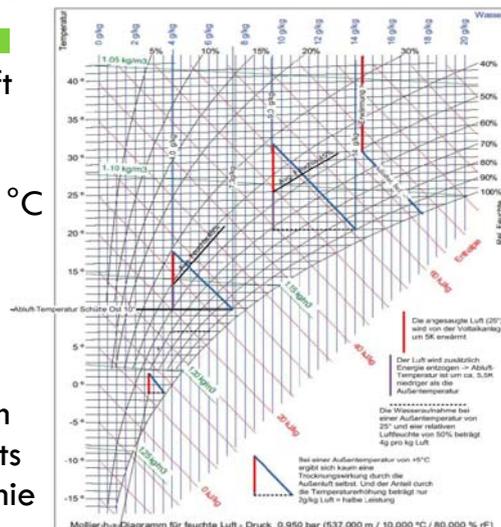
SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Mollier-h-x-Diagramm

52

- Beim Erwärmen der Luft verschiebt sich der Zustandspunkt vertikal nach oben, z.B. von 25 °C auf 31 °C.
- Bei adiabater Befeuchtung verschiebt sich der Zustandspunkt entlang der Isenthalpen (von links oben -> rechts unten) in Richtung Taulinie



Wärmetrocknung: wenig effizient da Dreieck sehr klein

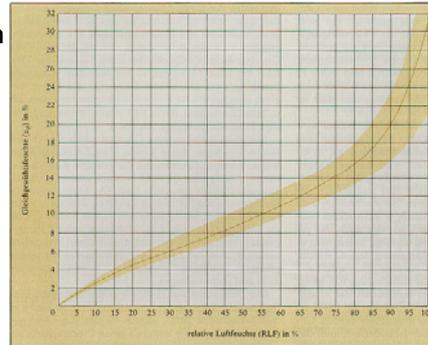
SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Sorptionsgleichgewicht von Holz

53

- Bleibt die relative Luftfeuchte längere Zeit auf einem konstanten Niveau, erreicht das Holz einen **Gleichgewichtszustand**, bei dem weder Feuchte aufgenommen noch abgegeben wird.
- Wenn dieses Gleichgewicht im Feuchteaustausch eingetreten ist, wird die Menge des im Holz enthaltenen gebundenen Wassers als **Gleichgewichtsfeuchte** (Kurzzeichen  $u_{gl}$ ) des Holzes bezeichnet



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Luftdurchsatz Schütte & Voltaik

54

Schüttblechfläche	92 m <sup>2</sup>			
benötigte Luftmenge Soll	66240 m <sup>3</sup> /h			
benötigte Luftmenge Min	33120 m <sup>3</sup> /h			
Mittelwert	49680 m <sup>3</sup> /h			
<b>Ziel: Luftdurchsatz mindestens</b>	<b>50000 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>bei 120 pa</b>		
Betriebsdauer im Schnitt	10 h/Tag			
Luft Jahresleistung	181.332.000	m <sup>3</sup> /a		
Größe des Luftschachtes				
Annahme: die Luftgeschwindigkeit im Luftschacht soll folgenden Wert nicht überschreiten				
V <sub>Lmax</sub> =	25 km/h			
Fläche Luftschacht	2 m <sup>2</sup>			
Kantenlänge	1,4142 m	bei quadratischer Form		
Fläche Lufteinlass durch Voltaik:				
Länge gesamt	32 m	0,1 m	Höhe	
Fläche gesamt (oben und unten)	6,07 m <sup>2</sup>	0,33 m <sup>2</sup>	Abzugsfläche	
Reduzierung durch Lochblech auf	70%			
	<b>4,249 m<sup>2</sup></b>			
Max. Luftgeschwindigkeit unter Voltaik-Modulen	11,767 km/h	3,27 m/s		
Die effektive Fläche ist durch die Luftverwirbelung vermutlich kleiner				
Die Geschwindigkeit durch das Lochblech ist etwa halb so groß wie die Geschwindigkeit im Luftschacht				

SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Theoretische Trocknungsleistung

55

Trocknungsleistung durch Erwärmung der Luft aus der Voltaikanlage			
Wärmeenergie aus der Voltaikanlage Eth [kW] =		127.235 kWh/a	
Masse des jährlich verdunsteten Wassers	mAE /a	187.647 kg	
Trocknung nur durch die Mehr-Energie		1691 SH (rm)/a	
		543.996 kg/a	
Trocknung für Fichte mAE Wasser 50% -> 20% =111kg/srm		4900 SH (rm)/a	
	Gewicht 50%	1529 t	
	Gewicht 20%	985 t	
Jahresleistung ohne Erwärmung			
Durchschnittliche Temperatur / Luftfeuchtigkeit	15 °C /	50 %	
max. Wassergehalt (Mollier)	15°/50%	5,5 g/m3	
	15°/90%	7,7 g/m3	
	Diff. Wassermenge	2,2 g/m3	
Luftdurchsatz gesamt		181.332.000 m3/a	
Gesamtwassermenge die durch aktive Belüftung verdunstet werden k		398.930 kg	
(d.h. ohne zusätzliche Erwärmung); ergibt eine Hackgutmenge von:		3594 SH (rm)/a	
	Gewicht 50%	1121	
	Gewicht 20%	722	
<b>Gesamt-Trocknungsleistung</b>	<b>Gewicht 50%</b>	<b>1649 t</b>	<b>5284 srm</b>
	<b>Gewicht 20%</b>	<b>1062 t</b>	<b>4756 srm</b>
			mit 10% Volumenschwund

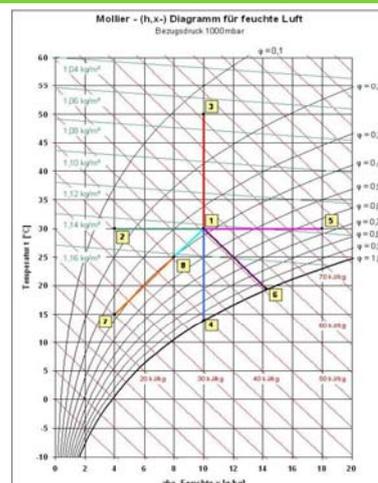
SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

## Mollier-h-x-Diagramm

56

- Beim Erwärmen der Luft verschiebt sich der Zustandspunkt vertikal nach oben, z.B. von 30 °C auf 50 °C (Punkt 1 nach Punkt 3).
- Bei adiabater Befeuchtung (Sprühbefeuchter) verschiebt sich der Zustandspunkt entlang der Isenthalpen (von Punkt 1 nach Punkt 6) in Richtung Taulinie
- Bei Befeuchten der Luft verschiebt sich der Zustandspunkt nach rechts, von Punkt 1 nach Punkt 5.



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

57 **Logistik**

Anlieferung: Hackschnitzel  
Beschickung der Trockenbox und  
Entnahme der Hackschnitzel

SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme 02.02.2012

Anlieferung: Hackschnitzel

58



SEB-Solar Energie & Biowärme 02.02.2012

## Anlieferung und Aufbringen

59

### Stammholz

Vorteil: Aufbringen auf Schütte  
direkt mit dem Hacker



SEB-Solar Energie & Biowärme

### Hackschnitzel

Nachteil: Aufbringen auf Schütte  
durch Teleskoplader notwendig



02.02.2012

## Teleskoplader zum Beschicken und Entnehmen

60

□ Teleskop-Lader  
Schaufelinhalt 2,5sm



SEB-Solar Energie & Biowärme

□ 6m Höhe und  
6m Auslegung



02.02.2012

## Ablieferung: Transportwagen & Traktor

61

Auslieferung mit Teleskop-Lader, Traktor und Großraum-Anhänger



SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012

62

## Die Versuchsanlage

Vor der ersten PHAST-Anlage wurde eine Versuchsanlage errichtet zur Trocknung von Holz



SOLOPT GmbH und SEB-Solar Energie & Biowärme

02.02.2012