

Solare und solarunterstützte Trocknung

Thomas Schmalschläger* und Uli Luboschik**

* energy-21, Klessingweg 17, 80997 München, Tel. 089 / 189 21 79-0, Fax –1
eMail tschmalschlaeger@energy-21.de, www.energy-21.de

** ist Anlagenbau GmbH, Ritterweg 1, 79400 Kandern, Tel. 07626 / 9154-0, Fax –30
eMail anlagenbau@istnet.de, www.ist-anlagenbau.de

Was ist eigentlich Trocknung? Eine Erklärung gibt das Meyers Online Lexikon: „Trocknung, Abtrennen von anhaftender Flüssigkeit (Feuchte) aus Feststoffen, auch die Entfernung von Wasserdampf aus Gasen (z. B. durch Trockenmittel oder Kondensation) und von gelöstem oder emulgiertem Wasser aus Flüssigkeiten (z. B. organischen Lösungsmitteln). Nach Art des Wasserentzugs unterscheidet man Verdunstungstrocknung, Verdampfungstrocknung und Sorptionstrocknung; Freilufttrocknung ist eine natürliche Trocknung durch die Sonne und Wärme der Luft. Bei der thermischen Trocknung (künstlichen Trocknung) wird Wärme zugeführt (von außen oder im Inneren des zu trocknenden Gutes entwickelt). Je nach Art der Wärmezufuhr liegt Konvektions-, Kontakt-, Strahlungs- oder Hochfrequenz Trocknung vor.“

Dies ist sehr knapp formuliert. Daher werden im ersten Teil dieses Artikels die Grundlagen, die zum Verstehen des Trocknungsprozesses wichtig sind, detailliert beschrieben. Im zweiten werden dann die für den Praktiker wichtigeren Beispiele vorgestellt und diskutiert.

Grundlagen der Trocknung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein Material – auch Trocknungsgut genannt - zu trocknen:

- Bei der Gefriertrocknung, wie sie den Meisten aus einer früheren Kaffeewerbung bekannt ist, wird das Trockengut zunächst gefroren. Anschließend geht das Wasser vom festen Zustand (Eis) direkt in den gasförmigen (Wasserdampf) über. Man sagt auch es sublimiert. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das gefrorene Material konserviert ist.

Steht auf einem Hof Abwärme aus einem BHKW zur Verfügung, kann mit Hilfe einer Absorptionskälteanlage, die zum „Antrieb“ hauptsächlich Wärme braucht, die Kälte bereitgestellt werden. Dieses Verfahren ist nur für große Trocknungsleistungen geeignet und wird in diesem Artikel nicht weiter verfolgt.

- Bei der Kondensationstrocknung nimmt die über das zu trocknende Material strömende Luft Feuchtigkeit auf und wird dabei abgekühlt. Unterschreitet man dabei die Kondensationstemperatur (siehe auch Mollier-Diagramm, Abbildung 1), kondensiert das Wasser in der feuchten Luft und kann abgeführt werden.

Da die Luft nun wieder trocken ist, kann sie erneut zum Trocknen genutzt werden. Ein Teil der bei der Kondensation frei werdenden Wärme kann zum Aufheizen der Trocknungsluft verwenden. Dieses Verfahren ist daher wenig energieaufwändig.

Da die Kondensationstrocknung bei niedrigen Temperaturen abläuft (z.B. 20 °C), handelt es sich um eine sehr schonendes Verfahren.

- (Warm-)Lufttrocknung. Die einfachste Form ist das Trocknen an der Luft.

Die reine Lufttrocknung wird häufig zur Kondensierung von Lebensmitteln benutzt. Umgebungsluft überströmt das Trocknungsgut und entzieht ihm Feuchtigkeit. Nach der Trocknung hat das Lebensmittel einen Wassergehalt von 20 bis 25 %. Dadurch bleibt es länger haltbar und verdirbt oder verschimmelt später. Der Geschmack bleibt erhalten oder verstärkt sich teilweise sogar.

Die Lebensmittel werden auf einem Lattenrost ausgebreitet, auf Zwirnfäden aufgezogen oder sonst wie an der zirkulierenden Luft vor Regen und direkter Sonne geschützt aufbewahrt. Dieser Lattenrost wurde früher als Darre bezeichnet, daher auch die Bezeichnung „dörren“.

Effizienter aber genauso schonend ist die Warmlufttrocknung. In diesem Fall wird die Luft angewärmt, bevor sie mit dem zu trocknenden Material in Berührung kommt. Die dafür benötigte Wärme kann Abwärme aus einem BHKW sein oder sie kann von der Sonne geliefert werden. Der Wassernetz durch Verdunstung. Die Trocknungsgeschwindigkeit hängt von den vier Parametern

- Temperatur
- Strömungsgeschwindigkeit der Luft
- Luftfeuchtigkeit und
- effektive Oberfläche des Trockengutes im Vergleich zu dessen Volumen

ab.

Das Gut befindet sich in Darren, Trocknungskammern oder –schränken oder in Bandrocknern.

Die Warmlufttrocknung wird auch angewandt für

- Gras, Getreide, Samen
- Tee
- Kräuter
- Pilze
- Hülsenfrüchte wie Bohnen, Erbsen, Linsen
- Obst
- Fleisch
- Fisch

Die Erwärmung der Trocknungsluft mit Sonnenenergie bietet sich insbesondere bei landwirtschaftlichen Produkten an. Denn Angebot (Sonnenschein) und Nachfrage (es wird nur bei schönem Wetter geerntet) fallen ideal zusammen. Warmluftkollektoren sind preisgünstig und leicht zu installieren. Sie stehen als industriell gefertigte und als Selbstbau-Kollektoren zur Verfügung.

Eine weitere sinnvolle Wärmebereitstellung soll hier aber nicht unter den Tisch fallen: Die Abwärmenutzung von BHKWs. Betreibt ein Landwirt eine Biogasanlage in Verbindung mit einem BHKW, so erzeugt er in den Sommermonaten meist Überschusswärme, die er bisher wegekühlen musste. Deren Nutzung ist in zweifacher Hinsicht vorteilhaft. Er bekommt die höhere Einspeisevergütung nach dem EEG und er kann kostengünstig trocknen.

Das Mollier-Diagramm

Um den Prozess der Luft- und Warmlufttrocknung besser verstehen zu können, zieht man gerne das Mollier- oder auch h-x-Diagramm zu Rate. In ihm lässt sich die Luft hinsichtlich ihrer relativen und absoluten Feuchte sowie der Temperatur charakteri-

sieren und die einzusetzende bzw. freiwerdende Energie bei der Veränderungen der Luftzustände berechnen.

Die Abbildung 1 zeigt ein Mollier-Diagramm für feuchte Luft.

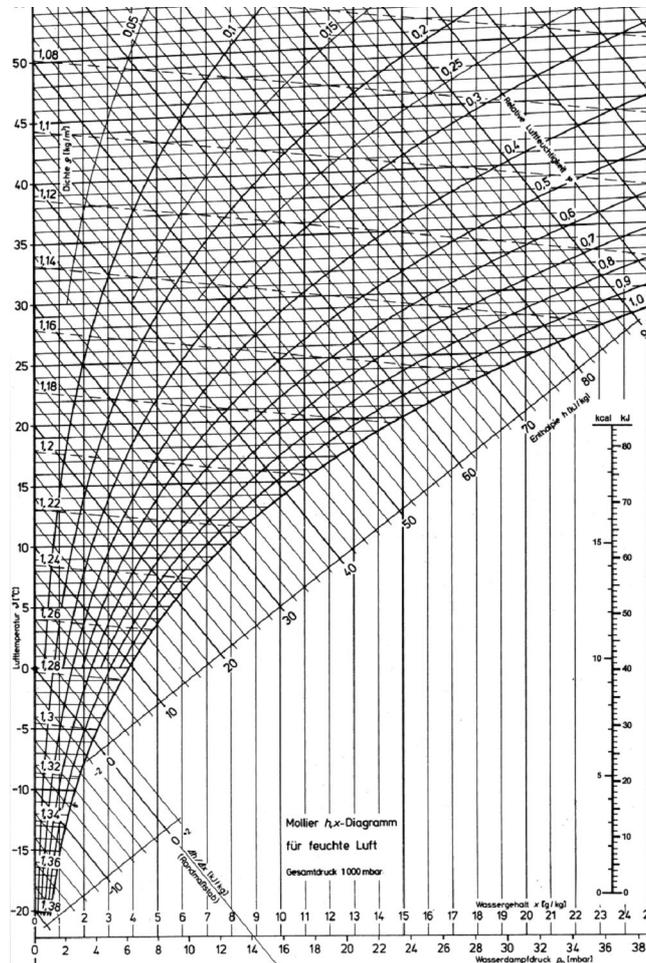


Abbildung 1: Mollier-Diagramm für feuchte Luft

Um das h - x -Diagramm benutzen zu können, müssen mindestens zwei Größen bekannt sein, die anderen lassen sich daraus ableiten.

Die waagrechten Linien geben die Lufttemperaturen an (z.B. 30 °C), die senkrechten die absoluten Feuchten (z.B. 10 g/kg); das bedeutet, dass in einem Kilogramm Luft 10 g Wasser enthalten sind. Eine Erwärmung der Luft bedeutet, im Mollier-Diagramm senkrecht nach oben zu gehen. Die absolute Feuchte bleibt gleich, die relative Feuchte nimmt ab. Die hyperbolischen (gekrümmten) Kurven geben die relativen Feuchten (z.B. 37 %) wider. Die Taupunkttemperatur (bei deren Unterschreitung kondensiert die feuchte Luft) erhält man, indem man senkrecht nach unten bis zur Taulinie (unterste Kurve) folgt. Dann die Temperatur auf der Temperaturachse ablesen (z.B. knapp 14 °C; bei einer absoluten Feuchte von 10 g/kg).

Die von links oben nach rechts unten verlaufenden Linien, geben die in der Luft enthaltene Energie (genauer ihre Enthalpie) an (z.B. 56 kJ/kg). Die Gerade nennt man Isenthalpe.

Wie lässt sich mit diesem Diagramm das Trocknungspotenzial eine solaren Warmlufttrocknung beschreiben.

Das Trocknungspotential (in g Wasseraufnahme/kg Luft) kann mit Hilfe des Mollier-Diagramms bestimmt werden. Von einem Ausgangszustand ausgehend wird durch die Temperaturerhöhung der Luft in einem Kollektor oder einem anderen Luftheritzer das Wasseraufnahmepotential wesentlich erhöht. Im Idealfall (adiabatische Zustandsänderung) könnte der Trocknungsverlauf parallel zu einer Isenthalpen (Linie gleichen Wärmeinhalts) verlaufen. Verluste verhindern das jedoch.

Die theoretisch höchste Luftfeuchte stellt sich erst nach einem viel größerem Zeitraum ein, als die Luft im Trockner verweilt, d.h. der Luftweg und die Verweildauer haben Einfluss auf die erzielbare Wasseraufnahme.

Das h-x-Diagramm kann auch für einfache Überlegungen bei der praktischen Konzeption von Anlagen verwendet werden. Denn je flacher die Verbindungsgerade zwischen Lufteintritts- und Austrittszustand liegt, um so niedriger wird der Wärmeverbrauch und umgekehrt. Andererseits ergibt sich bei großer Änderung des Feuchtigkeitsgehalts ein geringer Luftbedarf und aufzuwendende Ventilatorleistung.

Nach so viel Theorie sollen nun einige Praxisbeispiele vorgestellt werden.

Solare Heutrocknung

Das Trocknen von Gras auf dem Feld hat zwei Nachteile. Erstens das häufige wenden erhöht die Bröckelverluste. Zweitens es besteht die Gefahr, dass ein Regen den Erfolg zunichte macht. Daher ist es ein Qualitätsvorteil, wenn das angewelkte Heu nach dem ersten Tag eingebracht werden kann. Seine Einbringfeuchte sollte idealerweise zwischen 25 und 35 %, im Extremfall zwischen 45 und 55 % liegen. Da das lagerfähige Heu nicht mehr als 12 bis 14 % Feuchte haben darf, muss es auf dem Hof nachgetrocknet werden.

Am Beispiel der Rundballentrocknung wird die solare Trocknung beschrieben. Entscheidend ist, dass die Ballen möglichst einheitlich gepresst sind. Andernfalls wird der Ballen nicht gleichmäßig von der Warmluft durchströmt. Die Pressdichte sollte 100 kg/m³ aber nicht überschreiten, um eine regelmäßige Trocknung zu gewährleisten. Da pro Ballen stündlich etwa 1.500 bis 2.000 m³ Warmluft benötigt werden, sind große Ventilatoren notwendig.

In der Praxis werden die Ballen mit dem Frontlader senkrecht in Reihen auf leichte Holzroste gesetzt. Anschließend werden sie einzeln mit einer Folienhaube überzogen, die fast bis zum Boden reicht und mit zwei Spanngurten fest angepresst wird. (siehe Abbildung 2) Über einen Verteilkanal wird Warmluft von oben her durch den ganzen Ballenquerschnitt geblasen, wodurch die Luftwiderstände mit 10 bis 30, selten mit 40 mm WS sehr niedrig liegen.

Wie Futterwertbestimmungen ergaben, gelingt es bei dem Haubentrockner mit solar erwärmter Luft, erstklassige Heuqualitäten mit hohem Eiweißgehalt und Stärkewert zu erzielen. Die Hauben wurden in den Jahren so verbessert, dass eine Arbeitskraft nur noch eine bis eineinhalb Minuten zum Auf- oder Abziehen einer Haube braucht. Die zugegebenermaßen schon älteren Schemazeichnung in Abbildung 2 veranschaulichen das Verfahren sehr gut.

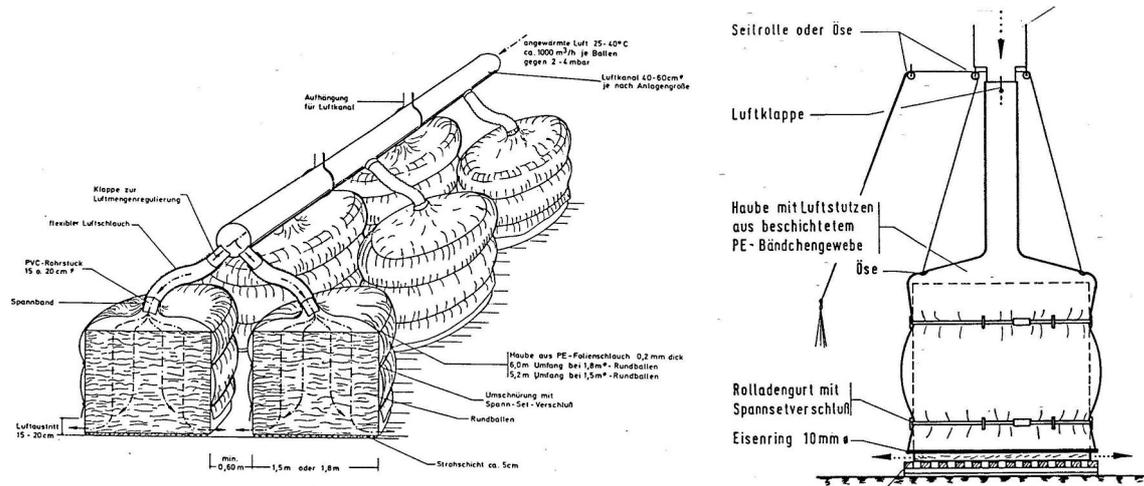


Abbildung 2: Gesamt- und Detailansicht einer Rundballentrocknung; Quelle Landtechnik Weihenstephan

Solare Klärschlamm-trocknung

Verschmutztes Wasser wird in der Natur dadurch gereinigt, dass Mikroorganismen von den Schmutzstoffen leben und sich zwangsläufig vermehren. Diese Biotechnik wird seit über 150 Jahren in Kläranlagen ausgenutzt, indem man Wasserbecken mit Schmutzwasser füllt und die Mikroorganismen durch gute Belüftung wachsen lässt. Verständlicherweise müssen nach einiger Zeit die sich vermehrenden Mikroorganismen teilweise aus den Klärbecken abgezogen werden. Das entnommene Material nennt man Klärschlamm. Dieser ist schwierig zu handhaben und wegen der erwähnten Struktur kann er mechanisch nur auf ca. 20 – 30% Trockensubstanz entwässert werden. 70 - 80% ist dann noch Wasser, welches man praktisch nur durch thermische Verfahren dem Schlamm entziehen kann. Dazu sind große Wärmemengen erforderlich. Ist Abwärme vorhanden geht das kostengünstig. Ist dies nicht der Fall, bietet die solare Trocknung eine Alternative. Dazu muss aber Platz und Zeit vorhanden sein, was auf vielen Kläranlagen der Fall ist. Der Schlamm wird in Gewächshäusern ausgebreitet. Die einfallende Solarstrahlung trifft direkt auf den Schlamm der sich als Absorber erwärmt. Dadurch steigt der partielle Dampfdruck im Innern des Schlammes an und die Wassermoleküle diffundieren in die Luft. Da die Verdunstung an der Oberfläche erfolgt, muss das Trocknungsgut regelmäßig gewendet werden. Dazu kommen verschiedene Geräte zum Einsatz:

- selbstfahrende Automaten, genannt elektrische Schweine
- auf seitlichen Mauern aufliegende Schubwender die über die ganze Beetbreite wenden (Dieses Verfahren wird im weiteren ausführlich beschrieben und ist in Abbildung 3 und 4 dargestellt)
- Rechen die regelmäßig durch den Schlamm gezogen werden.

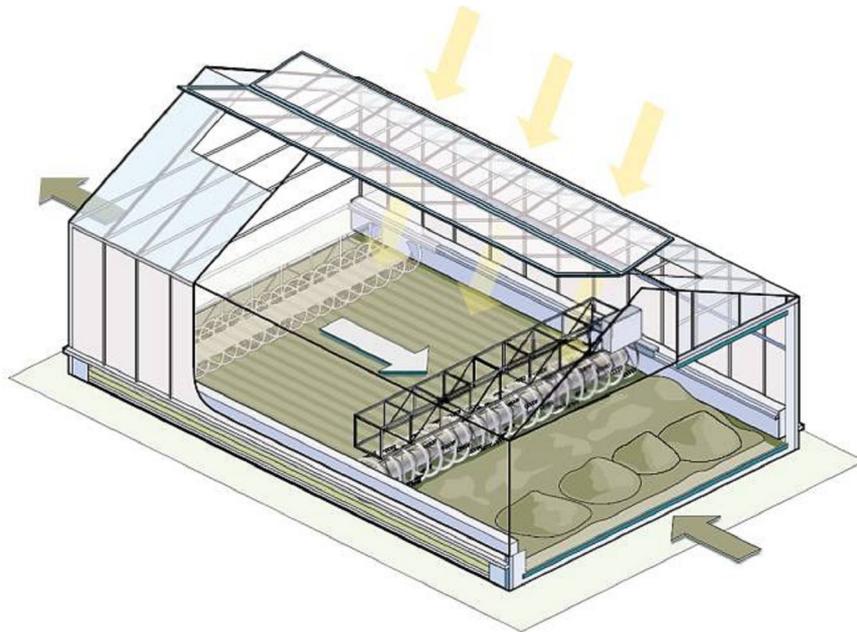


Abbildung 3: Schemazeichnung einer solaren Klärschlamm-trocknung

Im Betrieb unterscheiden sich die Batch und Durchlaufverfahren deutlich. Im Batchtrockner wird die Fläche gleichmäßig vollgefüllt und dann das gesamte Trockengut solange gewendet bis es den gewünschten Trocknungsgrad erreicht hat. Während dieser Zeit anfallender Schlamm muss zwischen gelagert werden.

Die Durchlaufverfahren (siehe obige Abbildung) ermöglichen einen kontinuierlichen Betrieb und zeichnen sich durch unterschiedliche Mechanisierungsgrade aus. Der Vergleich von industriellen und solaren Trocknern besteht im wesentlichen im Energiebedarf. Benötigen industrielle Trockner um 800 kWh pro Tonne Wasserverdunstung, kommen Solartrockner mit 30 – 40 kWh aus. Fossil befeuerte Trockner werden auf Grund der Energiekosten praktisch nicht mehr betrieben. Man siedelt diese an Standorten an, an denen kostengünstige Abwärme zur Verfügung steht, wie bei Kraftwerken, Biogasanlagen oder Zementwerken.

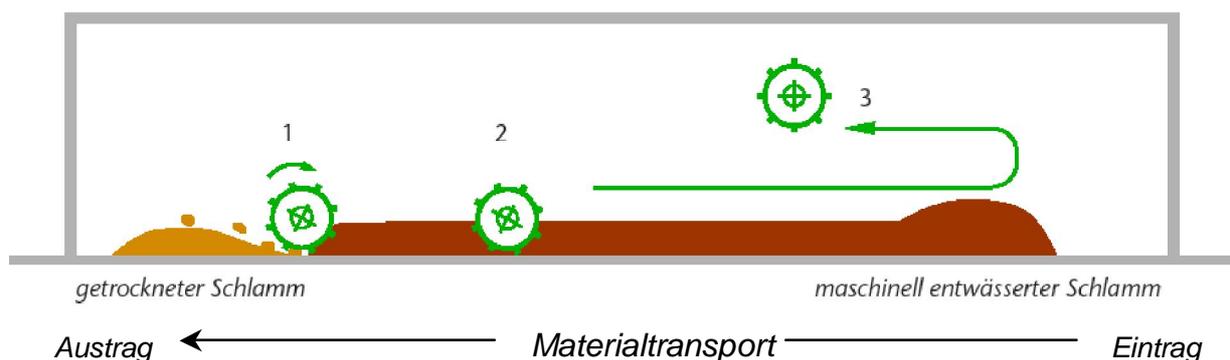


Abbildung 4: Durchlaufverfahren

Das Wendewolf® -Verfahren

Die Anlage besteht aus einer transparenten Halle in Form eines Gewächshauses – 10 m oder 12 m breit und bis zu 120 m lang, das auf einem asphaltierten, straßenähnlichen Untergrund errichtet wird. Das Kernstück ist der Wendewolf®, ein auf

Schienen laufender Schubwender in Form einer Wendehaspel, der in Höhe, Dreh- und Laufrichtung frei programmierbar ist (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Solare Klärschlamm-trocknung nach dem Durchlaufverfahren. In der Bildmitte der Wendewolf®

Die Besonderheiten des Verfahrens sind:

- der feuchte Schlamm wird an einer Stirnseite eingebracht, entweder mit MUL-DEN, Radladern oder automatischen Fördersystemen und mit dem Wendewolf® während des Trocknungsvorgangs durch die Halle transportiert.
- Der getrocknete Schlamm wird als Granulat am anderen Ende entnommen.
- Vollflächiges und gleichmäßiges Wenden über die gesamte Hallenbreite.
- Kontinuierliche Beschickung täglich/wöchentlich möglich.
- Möglichkeit alle anderen Schüttgüter wie Hackschnitzel, Sägemehl oder Gärreste mit der gleichen Maschinenteknik zu behandeln.
- Die Hallen werden so dimensioniert, dass kein Zwischenlager erforderlich wird.
- Die Trocknungsfläche wird weder betreten noch befahren.
- Die Anlagenteile sind robust und der Bedienungsaufwand durch Automatisierungsprogramme gering.
- Abwärme von Biogasanlagen oder Heizkraftwerken können mit verschiedenen Methoden ausgenützt werden, wie Warmluftgeräte und Bodenheizung.

In Europa sind schon einige solare Klärschlamm-trockner in Betrieb, daher liegen die ersten Betriebsergebnisse vor:

- Der jährliche Wasseraustrag liegt in Mitteleuropa zwischen 650 und 1000 kg/m² Grundfläche, je nach Standort und gewünschten Trocknungsgraden werden die Beträge errechnet.
- Der Endtrocknungsgrad ist abhängig von der Aufenthaltsdauer und den örtlichen Witterungsbedingungen. Im Sommer sind 90%TS erreichbar.
- Der Energiebedarf je Tonne Wasseraustrag liegt um 30 kWh und ist äußerst gering.

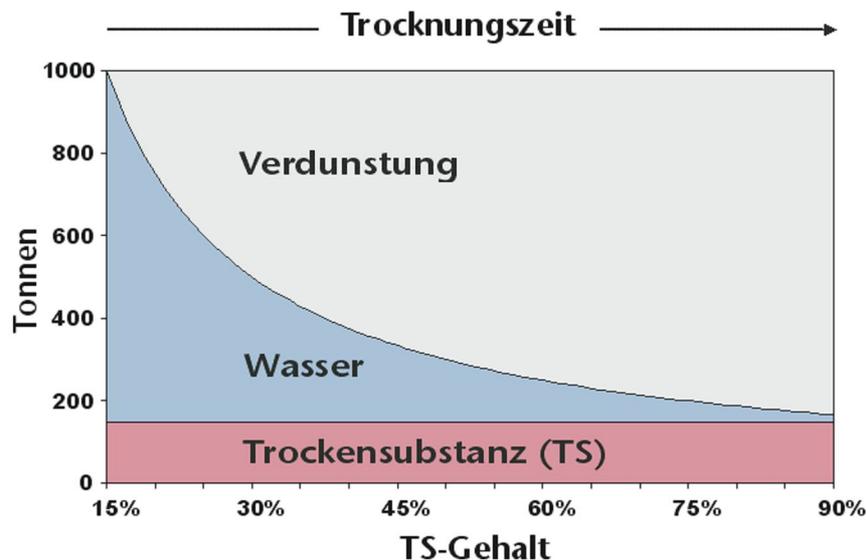


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Trocknungszeit und Feuchte

Dieses für die Abwasserbranche entwickelte Verfahren ist auch für Landwirte von Interesse, die ihr vergorenes Substrat der Biogasanlage oder Hackschnitzel trocknen wollen.

Solarer Aufwindtrockner

Der Ansatz für diesen Trocknertyp besteht darin, dass warme Luft bekanntlich nach oben strömt. Die einfache Ausnutzung liegt darin, dass man mit der Solarstrahlung Warmluft erzeugt und zwischen Eintritt und Austritt eines Tunnels oder eines Zeltes einen Höhenunterschied ausnützt. Dieser kann etwa durch den Bau eines einfachen Gewächshauses mit schwarzer Bodenfolie an einem Hang erreicht werden oder aber durch den Anbau eines Kamins (siehe Abbildung 7). Je nach Produkt kann dann das zu trocknende Gut entweder direkt dem Sonnenlicht ausgesetzt werden oder muss im Schatten, also in einer nachgeschalteten Trocknungskammer in der Warmluft trocknen. Thermodynamisch vorteilhaft ist es, wenn das zu trocknende Gut direkt von der Strahlung erwärmt wird, also als Absorber fungiert. Bei den meisten landwirtschaftlichen Erntegütern führt dies aber zu einer Zerstörung von Vitaminen mit gleichzeitiger Verfärbung, was meistens mit weiteren Schädigungen einher geht. Diese einfache Form kann im Selbstbau errichtet werden, bedarf aber einer intensiven Betreuung während der Trocknung. Der nächtliche Temperaturabfall kann mit massiven Rückwänden oder mit einfachen Wassersäcken verbessert werden.

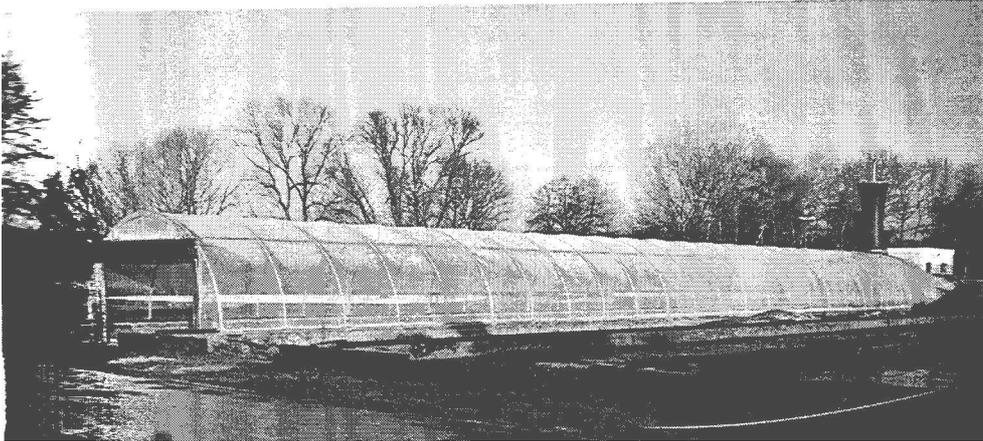


Abbildung 7: Solarer Aufwindtrockner, rechts der Kamin, der für den Höhenunterschied zuständig ist, und die Trocknungskammer

Solarunterstützte Kräutertrocknung

Bei der solarunterstützten Trocknung übernimmt die Solaranlage in der Regel nur eine Vorerwärmung der Trocknungsluft. Die restliche Wärme wird mit konventionellen Lufterwärmern, die mit fossilen Energieträgern wie Erdgas, Heiz- oder Rapsöl oder mit regenerativen wie Holzhackschnitzeln oder –pellets befeuert werden, erzeugt. Dadurch wird die Trocknung Wetter unabhängig und kann auch in den Abendstunden noch arbeiten.

Eine kommerzielle Anlage kann beispielsweise aus einer Gutaufbereitungsanlage, einem Bandtrockner und einer Absackanlage mit Sortiersieben bestehen. Zur Einsparung von fossiler Energie wird die Dachfläche der Trocknungsanlage mit Luftkollektoren belegt. Die Kollektoren ersetzen die übliche Dacheindeckung (siehe Abbildung 8).

Das erntefrische Gut wird auf das Vorrats- und Dosierband abgelegt und kontinuierlich dem Schneidorgan zugeführt. Dieses hat die Aufgabe, die minderwertigen Stängel und die inhaltsstoffreichen Blätter schonend zu zerschneiden. In einer nachgeschalteten Sortiermaschine werden die Stängel abgetrennt. Die Blätter werden auf das oberste Trocknungsband, das sich mit einer Geschwindigkeit von wenigen Metern pro Stunde bewegt, abgelegt. Auf dem Band liegt das Trockengut in einer Schütthöhe von 10 - 15 cm. Vom oberen Band wird das vorgetrocknete Gut auf das darunter liegende geschüttet.

Die heiße Trocknungsluft (40 - 100 °C) wird von unten eingeblasen (Kreuzstrom von Trocknungsluft und Trocknungsgut). Die Unterschiede in der Betriebstemperatur ergeben sich aus der Art des Trocknungsgutes. Pfefferminze beispielsweise verträgt nur Temperaturen bis 60 °C, da die ätherischen Öle bei höheren Betriebstemperaturen verloren gehen. Der Luftstrom muss in Abhängigkeit vom Trocknungsgut so eingestellt werden, dass im unteren Band keine Untertrocknung stattfindet und durch Zumischen von kühlerer Umgebungsluft die dem Gutzustand entsprechende Trocknungstemperatur angeboten werden kann.

Die feuchte Abluft wird über Kamine abgeführt.

Das Kollektorfeld muss über einen verschließbaren Kamin verfügen. Ist die Trocknungsanlage nicht in Betrieb, wird dieser geöffnet. Die Warmluft kann entweichen. Dadurch wird eine Überhitzung des Kollektors vermieden.

Kommerzielle landwirtschaftliche Trockner haben eine stündliche Trocknungsleistung von 60 - 100 kg Trockengut bei 10 - 12 % Restfeuchte und sind geeignet für schütt- und rieselfähige Güter.

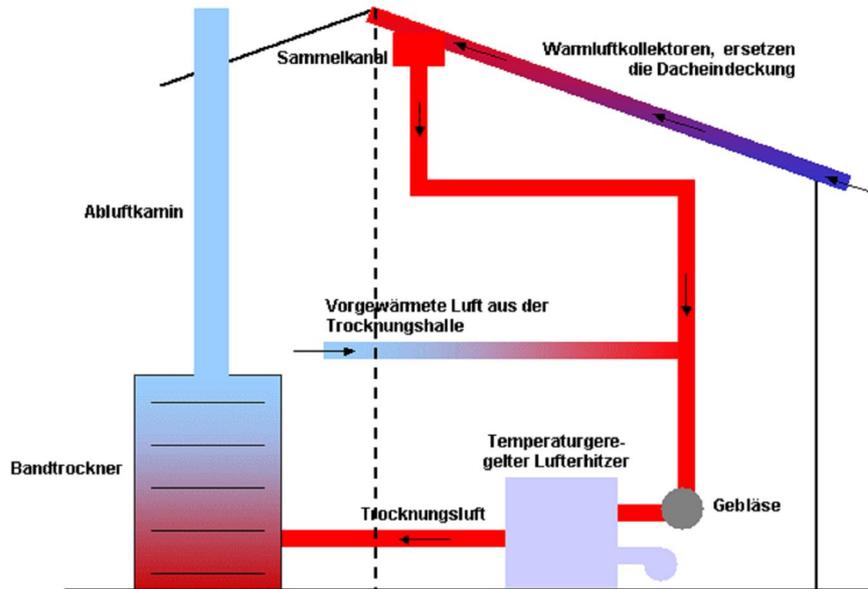


Abbildung 8: Schemazeichnung einer solarunterstützten Trocknungsanlage

Wie ein Energieflussdiagramme zeigt (Abbildung 9), kann mit einer Solaranlage mit 530 m² Fläche an einem Tag 800 bis 900 kWh Wärme eingespart werden. Mit einem durchschnittlichen Kesselnutzungsgrad von 75 % ergibt sich ein Brennstoffeinsatz von 1.000 bis 1.200 kWh oder 100 bis 120 Liter Heizöl pro Tag. Über einen längeren Trocknungszeitraum (Mai bis Oktober) relativiert sich der Sonnenenergieanteil auf 180 kWh pro Tag (konventionelle Energie 830 kWh pro Tag). In diesem Zeitraum würde die Solaranlage rd. 4.320 Liter Heizöl einsparen.

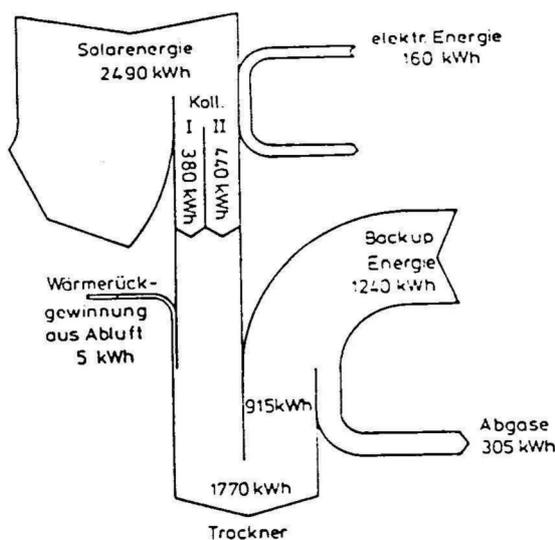


Abbildung 9: Energieflussdiagramm einer Trocknungsanlage mit 530 m² Kollektorfläche

Solare Warmluftkollektoren

Wie gezeigt werden konnte, hat die solare oder solarunterstützte Trocknung viele Facetten. Eine Komponente wurde bisher noch gar nicht angesprochen: der Luftkollektor. Er kann aus einem Gewächshaus bestehen (Abbildungen 5 und 7) oder ein industriell gefertigtes Produkt sein. Es gibt mittlerweile Warmluftkollektoren, die ein PV-Modul integriert haben. Je nach Sonneneinstrahlung wird der Durchsatz durch den Kollektor gesteuert.

Wie Abbildung 10 zeigt, können Luftkollektoren auch im Selbstbau erstellt werden. Ausführliche Bauanleitungen liegen vor. Der Selbstbau bietet sich gerade in der Landwirtschaft an.

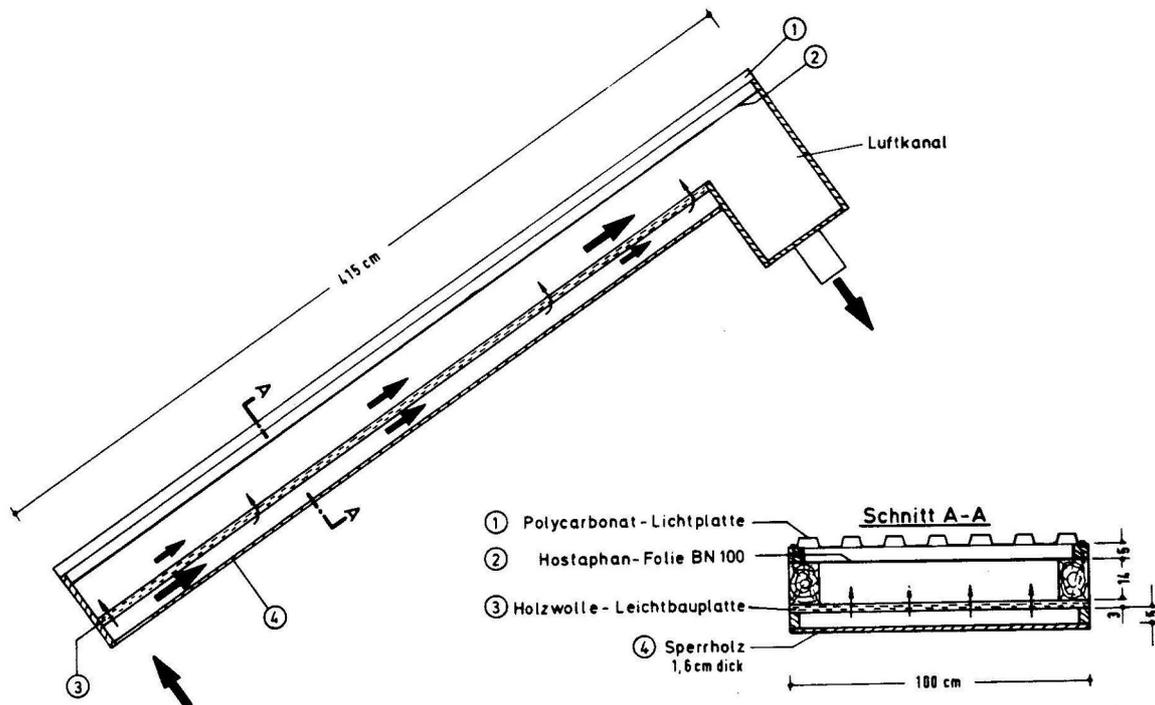


Abbildung 10: Schemazeichnung eines Selbstbau-Durchströmkollektors; Quelle: Landtechnik Weihenstephan