

Solarer Tunneltrockner für Früchte, Gemüse und Gewürze

Solare Trocknung

In tropischen und subtropischen Regionen tragen Früchte, die von den Kleinbauern entweder für den Eigenverbrauch oder zum Verkauf auf den lokalen Märkten produziert werden, zu einem beachtlichen Teil zur Nährstoffversorgung der ländlichen Bevölkerung bei. Bei saisonaler Überproduktion treten jedoch enorme Verluste auf, da die Bauern aufgrund der meist unzulänglichen Produktqualität und dem Mangel an geeigneten Vermarktungs- und Verteilungsstrukturen weder Zugang zu den Märkten in größeren Städten noch zum internationalen Handel haben /1/. Als Alternative zur Frischvermarktung produzieren die Kleinbauern Trockenfrüchte.

Die Verbrauchernachfrage nach getrockneten Früchten, insbesondere als Snackartikel, ist vor allem außerhalb der Erntesaison sehr groß. Die Qualität der Trockenfrüchte bezüglich Farbe, Textur und Geschmack entspricht jedoch kaum den Anforderungen der Konsumenten auf den kaufkräftigen städtischen Märkten und besonders nicht denen des internationalen Marktes.

Weiterhin sind die Trockenfrüchte meist mit Insekten und Mikroorganismen, teilweise sogar mit hochtoxischen Mykotoxinen kontaminiert. Die Verbraucher in den Industrieländern erwarten hygienisch einwandfreie Produkte ohne chemische Konservierungsstoffe. Dieser Aspekt bedarf besonderer Beachtung im Hinblick auf die angestrebte Ausweitung der Produktion von Trockenfrüchten in Entwicklungsländern.

Die traditionelle Sonnentrocknung ist verfahrensbedingt kein geeigneter Prozeß zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Trockenprodukte. Eine Verbesserung der Produktqualität, eine Verminderung der Verluste sowie eine nennenswerte Reduzierung der Trocknungsdauer und des Arbeitszeitbedarfs kann nur durch die Einführung von geeigneten Trocknungsverfahren realisiert werden.

Die in den Industrieländern zur Trocknung von Früchten eingesetzten Warmlufttrockner können aufgrund der hohen Investitionskosten und des Bedarfs an fossilen Energieträgern in Entwicklungsländern nur bei kommerziellen Anlagen wirt-

schaftlich eingesetzt werden /2/. Der am *Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim* entwickelte und in Zusammenarbeit mit der *Innotech Ingenieurgesellschaft* in Leonberg zur Serienreife weiterentwickelte solare Tunneltrockner ist hingegen eine kostengünstige Alternative zur Produktion qualitativ hochwertiger Produkte.

Modularer Aufbau

Der solare Tunneltrockner besteht im wesentlichen aus einem Luftkollektor, einem dahinter angeordneten Tunneltrockner, in dem das zu trocknende Gut in dünner Schicht ausgebreitet und von der Trocknungsluft umströmt wird, sowie mehreren Axialventilatoren (Abb. 1). Luftkollektor und Trockner sind 2 m breit bei einer Länge von jeweils 10 m. Kollektor und Trockner werden auf einer Unterkonstruktion in Arbeitshöhe installiert, um das Be- und Entladen des Trockners zu erleichtern.

Der Trockner ist modular aufgebaut, wodurch der Transport und der Aufbau wesentlich vereinfacht werden. Der Boden des Tunneltrockners besteht aus Wärmedämmpaneelen, die mit einem Nut und Federsystem sowie einem verzinkten Metallrahmen verbunden sind. Luftkollektor und Trockner werden mit einer 0,2 mm starken UV-stabilisierten PE-Folie überspannt, die mit einem Klemmprofil am Rahmen befestigt wird. Zur effizienten Umwandlung der Solarstrahlung in Wärme ist der Boden des

Kollektors und Trockners mit schwarzem Solarlack gestrichen.

Aufgrund der in tropischen Ländern häufigen und heftigen Niederschläge wird die Trocknungsanlage mit der Abdeckfolie dachförmig überspannt, wodurch Überfluten oder Eindringen von Wasser verhindert wird. Die Luftansaugseite der Ventilatoren und der Luftaustritt am Ende des Trockners sind mit einem feinmaschigen Kunststoffgewebe überdeckt, so daß ein Eindringen von Insekten verhindert wird. Zur Erleichterung des Befüllens und Entleerens des Trockners läßt sich die Abdeckfolie mit einer Wickelwelle aufrollen /3/.

Um einen ganzjährigen Einsatz des Trockners auch während länger andauernder Regenperioden zu ermöglichen, kann eine Zusatzheizung, bestehend aus einer Expansionskammer und einem Gasluftheritzer, zwischen Kollektor und Trockner eingebaut werden.

In Regionen, in denen Elektrizität aus dem Netz verfügbar ist, werden netzbetriebene Ventilatoren eingesetzt, die einen konstanten Luftdurchsatz erzeugen. Aufgrund des äußerst geringen elektrischen Leistungsbedarfs des solaren Tunneltrockners kann die zum Antrieb der Ventilatoren notwendige Energie in Gegenden ohne oder mit nur unzuverlässiger Elektrifizierung auch durch einen PV-Antrieb wirtschaftlich bereitgestellt werden: Hierfür ist lediglich ein 50 W_p-Solarmodul erforderlich. Durch die Integration des Solarmoduls in den Luftkollektor wird das Modul auf Umgebungstemperatur abgekühlt und somit Leistungsverluste verhindert.

Versuche unter verschiedenen klimatischen Bedingungen

In Marokko und in Thailand wurde die solare Tunneltrocknungsanlage bei der Trocknung von Aprikosen und Bananen unter ariden und humiden Bedingungen untersucht. Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind im folgenden kurz dargestellt.

Das Fassungsvermögen der Trocknungsanlage wird vor allem durch das zu

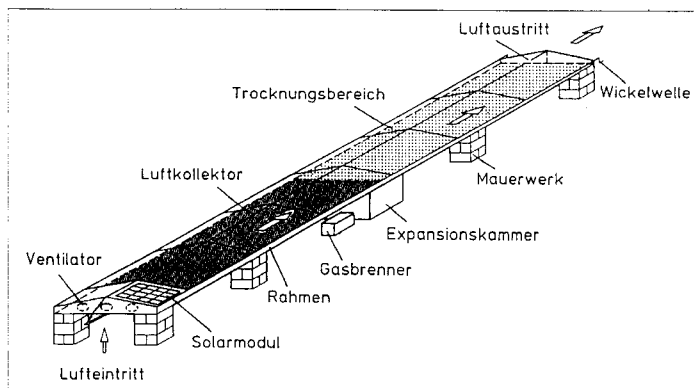


Abb. 1: Solarer Tunneltrockner für landwirtschaftliche Produkte /1/

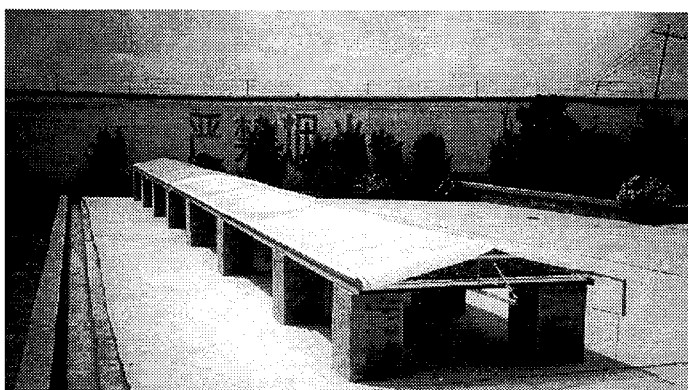


Abb. 2: Einsatz in China zur Chili-Trocknung



Abb. 3: Trocknung von Aprikosen in Marokko

trocknende Produkt bestimmt. Bei Obst wie z. B. Aprikosen oder Mangofrüchten, die meist in geschnittener Form getrocknet werden, liegt die Füllmenge bei ca. 250 kg, bei Produkten wie z. B. Trauben oder Feigen mit einer hohen Belegdichte von bis zu 25 kg/m² kann bei der Trocknerfläche von 20 m² ein Fassungsvermögen von bis zu 500 kg erreicht werden. In Regionen mit hoher Einstrahlung, wie beispielsweise in Marokko oder der Türkei, kann durch Verlängerung des Trockners auf eine Länge von 30 m die Trocknerfläche auf 40 m² vergrößert werden, wodurch sich das Fassungsvermögen des solaren Tunnelrockners im Vergleich zur Standardversion verdoppelt.

Untersuchungen sowohl an ariden als auch an humiden Standorten haben gezeigt, daß ein Luftdurchsatz von 800 bis 1.000 m³ Luft ausreicht, um die Produkte auf lagerfähigen Zustand zu trocknen, bevor Mikroorganismenwachstum bzw. biochemische Reaktionen zu einer Qualitätsverminderung führen. Bei diesem Luftdurchsatz stellt sich im Luftkollektor eine maximale Temperatur von 60 °C ein, welches die optimale Temperatur für die Trocknung von Früchten darstellt /5/.

Durch eine systematische Untersuchung von Gleichstrommotoren und Ventilatorlaufrädern und durch eine Verminderung des Strömungswiderstandes in der Anlage konnte der elektrische Leistungsbedarf von anfänglich 250 W bei ersten Prototypen auf 20 W bei der serienreifen Trocknungsanlage reduziert werden.

Der äußerst niedrige Leistungsbedarf ermöglicht den Einsatz eines photovoltaischen Antriebssystems. Die hohen Kosten für den Solargenerator und dessen Wirkungsgrad von lediglich 10 bis 12 % erfordern allerdings eine sorgfältige Anpassung von Solargenerator und Ventilator. Da die Solarstrahlung eine stark fluktuierende Energiequelle darstellt, muß insbesondere das Teillastverhalten von Motor und Ventilatorlaufrad beachtet werden.

4 % erreicht werden. Eine andere wichtige Vorbedingung für den Einsatz von PV ist ein niedriges Startmoment des Ventilators. Konventionelle Systeme starten erst bei Einstrahlungswerten zwischen 300 und 400 W/m², während bei dem optimierten System nur 120 W/m² zum Anlaufen der Ventilatoren notwendig sind. Da bei der überwiegenden Zahl der Trocknungsprodukte eine Belüftung während der Nacht nicht erforderlich ist, kann der Gleichstrommotor des Ventilators direkt an das PV-Modul angekoppelt werden.

Der Trocknungsprozeß

Laborversuche haben gezeigt, daß die Trocknungsdauer und die Produktqualität im wesentlichen von der Gutart und der Temperatur der Trocknungsluft beeinflusst wird. Im Vergleich zur Temperatur ist der Einfluß von relativer Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit von untergeordneter Bedeutung. Um die Leistungsfähigkeit der Trocknungsanlage optimal zu nutzen, muß der Trockner bei der maximal zulässigen Trocknungstemperatur des jeweiligen Produktes betrieben werden, bei der gerade noch keine Qualitätsverminderung eintritt. Laborversuche haben gezeigt, daß nahezu alle Früchte bei einer Temperatur von 60 °C ohne wesentliche Beeinträchtigung der Produktqualität getrocknet werden können. Höhere Temperaturen führen zu Bräunungsreaktionen und zu einer Oberflächenverhärtung. Dies bedeutet, daß der Luftdurchsatz in dem Solartrockner so hoch eingestellt werden muß, daß die zulässige Temperatur auch bei maximaler Einstrahlung nicht überschritten wird.

Am Anfang des Trocknungsprozesses, wenn ein große Menge an Wasser verdunstet, nimmt die Temperatur der Trocknungsluft im Tunnelrockner ab. In der zweiten Phase des Trocknungsprozesses ist der zusätzliche Wärmegewinn, der durch die Absorption der Sonnenstrahlung am Trocknungsgut selbst entsteht, ausreichend, um die Temperatur

Konventionelle PV-Antriebe weisen einen maximalen Tageswirkungsgrad von 0,5 bis 1 % auf. Durch die systematische Auswahl der Komponenten und eine sorgfältige Anpassung der Kennlinien an die Anlagenkennlinie des solaren Tunnelrockners konnte ein Tageswirkungsgrad von bis zu

im Tunnelrockner nahezu konstant über der Länge zu halten. Die Wärmeverluste, die durch das Verdunsten der Feuchtigkeit entstehen, werden durch den zusätzlichen Wärmegewinn bei der Absorption der Strahlung auf dem Trocknungsgut ausgeglichen, so daß eine nahezu gleichmäßige Trocknung über der gesamten Trocknerlänge erreicht wird.

Beim Einsatz eines netzversorgten Ventilators ergibt sich aufgrund des konstanten Luftdurchsatzes ein Temperaturprofil am Kollektorauslaß, das dem Verlauf der Globalstrahlung entspricht, da der Kollektor eine niedrige Wärmespeicherkapazität aufweist. Dies bedeutet, daß am Morgen und am Spätnachmittag die Kollektoraustrittstemperatur nur geringfügig höher als die Umgebungstemperatur liegt. Dies ist allerdings nicht ausreichend, um den Trocknungsprozeß zu beschleunigen. Die Forderung nach einer nahezu konstanten Kollektoraustrittstemperatur kann wesentlich besser mit einem photovoltaisch angetriebenen Ventilator erfüllt werden. Die Temperatur der Trocknungsluft wird in diesem Fall automatisch auf eine bestimmte maximale Temperatur eingestellt. Während Perioden geringer Einstrahlung führt der sich einstellende niedrige Luftdurchsatz zu einer relativ großen Temperaturerhöhung. Hohe Einstrahlungswerte verursachen dagegen einen hohen Luftdurchsatz, der wiederum zu einem relativ niedrigen Temperaturanstieg führt.

Im Vergleich zur Sontrocknung führt die Erwärmung der Trocknungsluft in dem Luftkollektor zu einer deutlich höheren Produkttemperatur, die wiederum eine deutlich höhere Trocknungsrate bewirkt.

Der Vorteil der Solartrocknung gegenüber der traditionellen Sontrocknung wird besonders in der letzten Phase des Trocknungsprozesses deutlich, in der die Sontrocknung noch einige Tage benötigt, um auf den gewünschten Feuchtegehalt zu trocknen, während die solare Trocknung den Vorgang beschleunigt. Dadurch wird die Trocknungsdauer merklich vermindert.

Zahlreiche Untersuchungen mit verschiedenen Produkten haben gezeigt, daß im allgemeinen die Trocknungsdauer durch die Solartrocknung auf die Hälfte reduziert wird. Je nach zu trocknendem Produkt und der zur Verfügung stehenden Einstrahlung beträgt die Trocknungsdauer zwischen einem und acht Tagen. Vorteilhaft hinsichtlich der Lagerung ist die gleichmäßige Trocknung in dem solaren Tunnelrockner. Eventuell noch vorhandene Feuchteunterschiede können ausgeglichen werden, in dem die Produkte nach der Trocknung für einige Tage in einem Behälter gelagert werden.

Hohe Qualität der Produkte

Während der Trocknung sind die Produkte vor Witterungseinflüssen, Insekten, Vögeln, Nagetieren und Staub geschützt. Insekten, die beim Befüllen des Trockners mit dem Trocknungsgut in die Anlage kommen, werden bei den während der Mittagszeit im Trockner herrschenden Temperaturen von ca. 60 °C abgetötet. Bei Bedarf können durch ein kurzzeitiges Abstellen des Luftstromes auch Temperaturen über 80 °C erreicht werden, die ausreichen, um pathogene Keime abzutöten. Die Versuche an ariden und humiden Standorten haben gezeigt, daß mit dem solaren Tunneltrockner hygienisch einwandfreie und qualitativ hochwertige Trockenprodukte hergestellt werden können, welche die internationalen Qualitätsstandards erfüllen.

Lokale Produktionsstätten

Der solare Tunneltrockner wird als Baukastensystem in Deutschland produziert und zu Preisen von ca. 8.000 DM angeboten. Bedingt durch den modularen Aufbau kann der Trockner von zwei Arbeitskräften in einem Tag auf einer vorhandenen Unterkonstruktion aufgebaut werden. In der Türkei, Sri Lanka und Thailand wird der solare Tunneltrockner bereits lokal produziert, in Brasilien und Indonesien befindet sich eine lokale Fertigung im Aufbau. Der solare Tunneltrockner wird zu Preisen zwischen 1.500 und 3.000 DM in Sri Lanka und der Türkei sowie für ungefähr 4.500 DM in Thailand einschließlich der Zusatzheizung gebaut. Wirtschaftlichkeitsberechnungen haben gezeigt, daß die Amortisationszeit entsprechend den Investitionskosten, der jährlichen Auslastung, den Witterungsbedingungen und der Preisdifferenzierung zwischen einem und fünf Jahren liegt.

Der solare Tunneltrockner kann nur dann wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn der Bauer bzw. die Genossenschaft für eine bessere Qualität einen höheren Preis erhält, oder wenn Abfallprodukte durch Trocknung in ein vermarktungsfähiges Produkt verwandelt werden können. Eine weitere Voraussetzung für eine erfolgreiche Markteinführung des solaren Tunneltrockners ist die Produktion ausreichend großer Mengen gleicher Qualität, wie sie von den Importeuren von Trockenfrüchten gefordert werden. Weitere Einschränkungen ergeben sich bei der Trocknung lichtempfindlicher Produkte. Um Farbveränderungen zu vermeiden, muß entweder der Trockner mit einem lichtundurchlässigen Material abgedeckt werden, oder der Luftkollektor mit einem konventionellen Horden- bzw. Satzrockner gekoppelt werden, der in einem Gebäude untergebracht ist.

Weltweite Verbreitung

Die Verminderung der Nachernteverluste und die Verbesserung der Produktqualität gehören zu den großen Herausforderungen der Zukunft. Die solare Trocknung kann hierzu einen nicht zu unterschätzenden Beitrag leisten. Trotz erheblicher Anstrengungen seitens Universitäten, Entwicklungshilfeorganisationen, Organisationen der technischen Zusammenarbeit, Firmen sowie privaten Initiativen hat die solare Trocknung weltweit immer noch nicht die Bedeutung erlangt, die ihr eigentlich zukommen könnte und müßte, um das weltweite Problem der Ernährungssicherung zu entschärfen.

Dies trifft selbst auf Länder mit einem ausreichenden Angebot an Sonnenenergie und gleichzeitigem Mangel an fossilen Energieträgern zu. Gründe hierfür sind darin zu sehen, daß es weltweit sehr wenig solare Trocknungsanlagen gibt, die die Anforderungen der Nutzer hinsichtlich Trocknungskapazität und Wirtschaftlichkeit erfüllen.

Untersuchungen mit den verschiedensten Produkten an Standorten mit den unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen haben gezeigt, daß der an der *Universität Hohenheim* entwickelte solare Tunneltrockner technisch ausgereift sowie sehr gut an die Bedürfnisse von Bauern und Genossenschaften angepaßt ist. Etwa 500 solare Tunneltrockner werden mittlerweile in 35 Ländern zur kommerziellen Produktion von Trockenprodukten wie Früchten, Gemüse, Gewürzen, Fleisch und Fischen eingesetzt. Alleine in der Türkei wurden mit den dort mittlerweile über 100 installierten solaren Tunneltrocknern mehr Trockenfrüchte hergestellt, als mit allen anderen in Mitgliedsstaaten der EU aufgestellten Solar-trocknern zusammen /8/.

Der solare Tunneltrockner hat des weiteren bei einem 1995 in Almeria durchgeführten Trocknervergleichstest die be-

ste Bewertung aller untersuchten Solar-trockner erhalten /9/.

Albert Esper, Werner Mühlbauer

Literatur

- /1/ A. Esper u. W. Mühlbauer: Solar tunnel drier for fruits: Plant Research and Development, Bd. 44 (1996), S. 61-80.
- /2/ W. Mühlbauer, A. Esper u. J. Müller: Solar energy in agriculture. Tagungsband des ISES Solar World Kongresses, Bd. 8, Biomass, Agriculture, Wind, Budapest (Ungarn), S. 13-27.
- /3/ A. Esper: Solarer Tunneltrockner mit photovoltaischem Antriebssystem. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Frankfurt, Nr. 264, 1995.
- /4/ P. Schirmer, S. Janjai, A. Esper, R. Smitabindu u. W. Mühlbauer: Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. Renewable Energy Bd. 7 (1996) Nr 2, S 119-126.
- /5/ FAO: Assessment collection of data on post-harvest food-grain losses. Econ. Social. Dev. Paper, 13, S. 1-70, 1980.
- /6/ W. Eissen: Trocknung von Trauben mit Solarenergie. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Frankfurt, Nr 85, 1984.
- /7/ M. Häuser: Trocknung von Aprikosen mit Solarenergie. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Frankfurt, Nr 273, 1995.
- /8/ Anonym: Solar drying of agricultural produce in Europe: Thermie programme action no SE 22, European Commission, Directorate General for Energy, Brussels, 1996.
- /9/ M. Grupp, H. Bergler, M. Owen-Jones u. G. Schröder: Comparative test of solar dryers. Technology Demonstration Centre (TDC) Serial Report 2/95, Almeria (Spanien), 1995.

Über die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Werner Mühlbauer ist Leiter des Instituts für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim. *Dr.-Ing. Albert Esper* ist sein Stellvertreter.



Abb. 4: Gewürztrocknung in China