

Solare Heutrocknung – Tag und Nacht?

Technisch machbar, wirtschaftlich fragwürdig

Jürg Baumgartner, Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Die laufend erweiterte Schlagkraft bei der Welkheuernte stösst vermehrt an die Grenzen der Heubelüftung. Eine Erweiterung der Trocknungskapazität über die Vergrößerung der Heustockfläche wäre denkbar, in vielen Fällen aber mit erheblichem Bauaufwand verbunden.

Es bieten sich dagegen Zusatzeinrichtungen wie Sonnenkollektoren, Wärmepumpen oder Warmluftöfen an.

Luftentfeuchter-Wärmepumpen bringen im Minimum eine Verdoppelung des Elektrizitätsverbrauchs für die Heutrocknung und erfordern hohe Anschlusswerte (FAT-Bericht Nr. 370). Warmluftöfen verbrauchen viel Heizöl bei einem tiefen Wirkungsgrad. Die beiden Verfahren erlauben den Trocknungsbetrieb über 24 Stunden.

Heubelüftungsanlagen mit Sonnenkollektoren weisen an Schönwetter-

tagen bis zu zwölf Betriebsstunden auf. Eine weitere Steigerung der Trocknungskapazität läuft auf eine Verlängerung des Betriebes in die Nachtstunden hinaus. Es wurde untersucht, wieweit ein zugeschalteter Kieswärmespeicher hier einen Beitrag leisten könnte.

Die Resultate zeigen, dass überschüssige Energie des Sonnenkollektors tatsächlich gespeichert und für die Erweiterung der Trocknungskapazität verwendbar ist.

Wirtschaftlich ist dieses Verfahren aber auf der Basis des handgesteuerten Kieskoffers nicht vertretbar. Das Be- und Entladen des Speichers benötigt viel Umstell- und Kontrollarbeit. Eine Automatisierung würde das Verfahren zusätzlich verteuern.

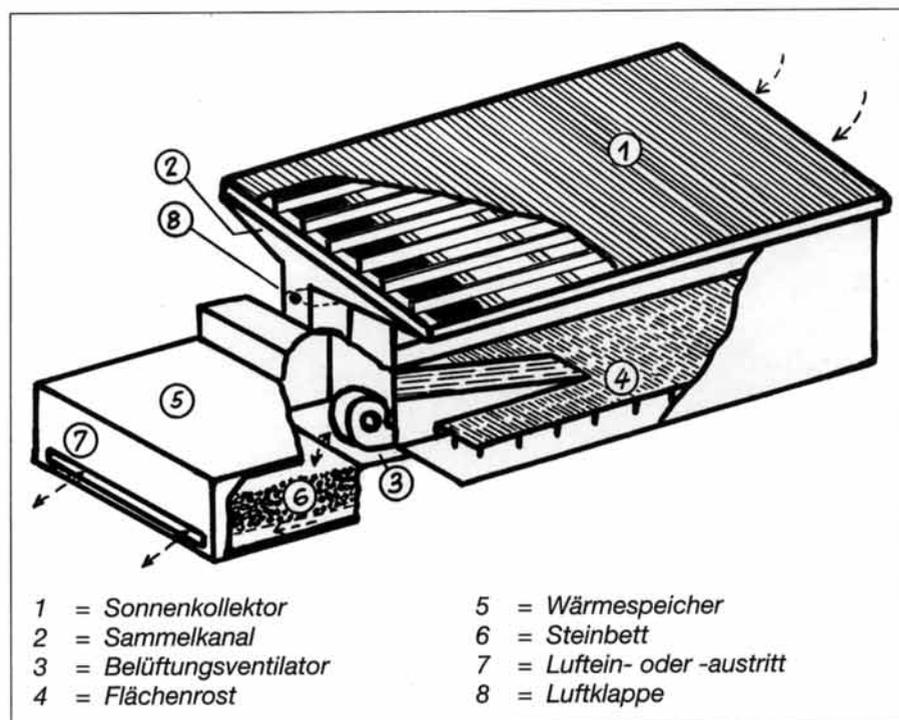


Abb. 1: Prinzipschema einer Heubelüftungsanlage mit Sonnenkollektor und Wärmespeicher.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Der Wärmespeicher	2
Resultate	4
Ziele erreicht?	4
Investitionsbedarf	4
Schlussfolgerungen	5

Problemstellung

In der Regel steigt die relative Luftfeuchtigkeit (r. F.) am Abend auf über 90%. Mit solcher Luft lässt sich kein Heu trocknen. Im Gegenteil: Bereits angetrocknetes Heu wird sich wieder befeuchten.

An jedem schönen Belüftungstag nimmt das sich im Stock befindende Heu (Trockenmasse und gebundenes Wasser) Wärme aus der Trocknungsluft auf. Diese gespeicherte Energie dient am Abend beim Einsetzen des Taus zur Luftanwärmung (= Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit). Die Betriebszeit einer Belüftung verlängert sich je nach Stockvolumen um eine bis drei Stunden nach Erreichen von 90% r. F. der Aussenluft. Diese Beobachtung bestätigt sich besonders bei Anlagen mit Sonnenkollektoren.

Der Gedanke liegt nahe, mit Hilfe von Sonnenkollektoren Wärme in einem speziellen Speicher einzulagern und für eine Heutrocknung während der Nacht bereitzustellen. Mit diesem an der FAT realisierten Steinspeicher setzten wir folgende Ziele:

- Überschüssige Kollektorwärme speichern
- Die Trocknungskapazität vergrössern
- Konservierungsverluste vermindern
- Billigen Nachtstrom nutzen.

Der Wärmespeicher

Die Planung und Erstellung des Speichers erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit (A. Elheggach, Stockage de la chaleur solaire, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique). Nach der Literatur besteht ein Planungsrichtwert von 0,15 bis 0,25 m³ Speicher pro m² Kollektorfläche. Nachdem die Kollektorfläche 96 m² beträgt, wurden 20 m³ Kies als Speicher-material gewählt (= 0,21 m³/m² Kollektorfläche).

Technische und physikalische Daten des Speichers:

Abmessungen:

Länge:	5 m
Breite:	4 m
Fläche:	20 m ²
Höhe:	1 m
Volumen:	20 m ³
Gewicht:	36 000 kg
Schüttgewicht:	1800 kg/m ³
Raumgewicht:	2800 kg/m ³
Porenvolumen:	zirka 35% bei Stein-grösse 32 bis 40 mm
Wärmeinhalt:	0,88 kJ/kg·°C

Eine Hülle aus einer Sandwichkonstruktion (2 cm Spanplatte, 15 cm Steinwolle, 2 cm Spanplatte, berechnete Wärmeleitung = 0,258 W/m²·°K oder 0,93 kJ/m²·°K·h) umgibt das Steinbett. Das Bett lagert auf einem Gitterrost mit Tragbalken. Unter- und oberhalb der Steine sind 20 cm Leer-raum zum Verteilen und Sammeln der Luft.

Aufladen des Wärmespeichers

(Abb. 2)

Ungefähr ab 10 Uhr erfolgt ein manueller Start des Hilfslüfters (2). Dieser saugt einen Teilstrom von zirka 5 m³/s vom Kollektor (1) an und drückt ihn durch das Steinbett (6). Über den Git-

terrost (5) verlässt die Luft über Öffnungen (7) den Speicher. Klappen (3 und 8) sowie die gute Isolation (4) verhindern einen starken Wärmeverlust nach der Aufladung. Den Ladevorgang steuert ein Gerät mit der Messung der Luft je am Speicher-eingang und -ausgang (9). Der Hilfslüfter bleibt so lange in Betrieb, bis sich die Ausgangstemperatur des Speichers derjenigen des Eingangs annähert.

Wie erfolgt der Nachtbetrieb?

(Abb. 3)

Ab 22 Uhr, nach Umschaltung des Stromnetzes auf Niedertarif, wurde die Belüftung manuell gestartet. Der normale Heubelüftungsventilator (10) saugte zunächst alle Luft durch die Öffnungen (7) über das warme Steinbett an. Dies bewährte sich nicht, weil sich so der Wärmespeicher innert zwei bis drei Stunden entleerte. Durch eine gesteuerte Aussenluft-Beimischung mittels einer Regelklappe (11) (Abb. 4) lässt sich die Anwärmung der Trocknungsluft mit dem Steuergerät (Abb. 5) nach Wunsch von 1 bis 10°C regeln. Neben der Öffnung des Hilfslüfters (2) besteht eine zweite Öffnung (3) zur Minderung des Druckverlustes. Je nach Luftmenge verursacht das Ansaugen über das Steinbett einen Druckverlust nach Abbildung 6.

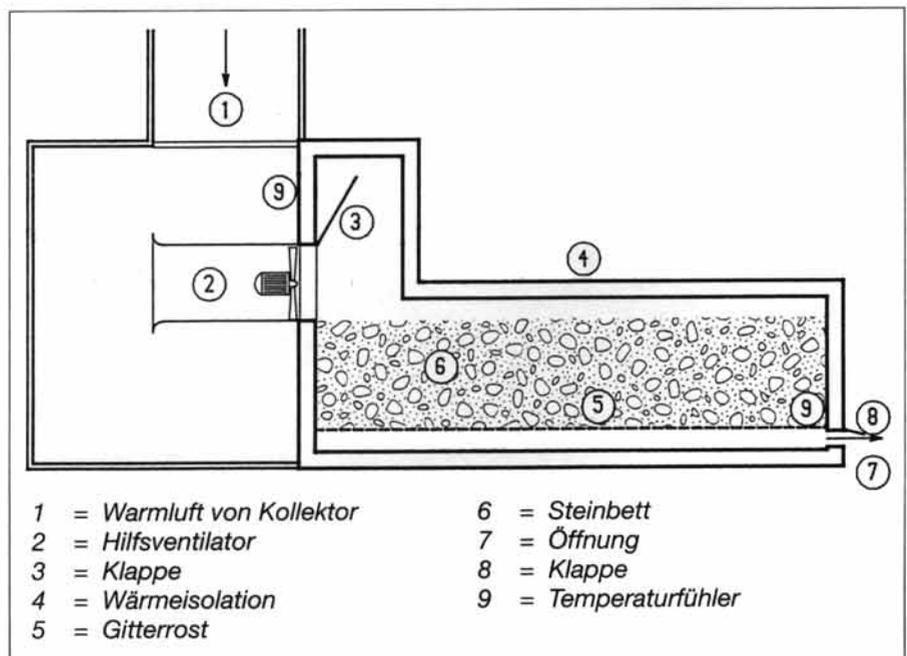


Abb. 2: Schnitt durch den Speicher beim Laden.

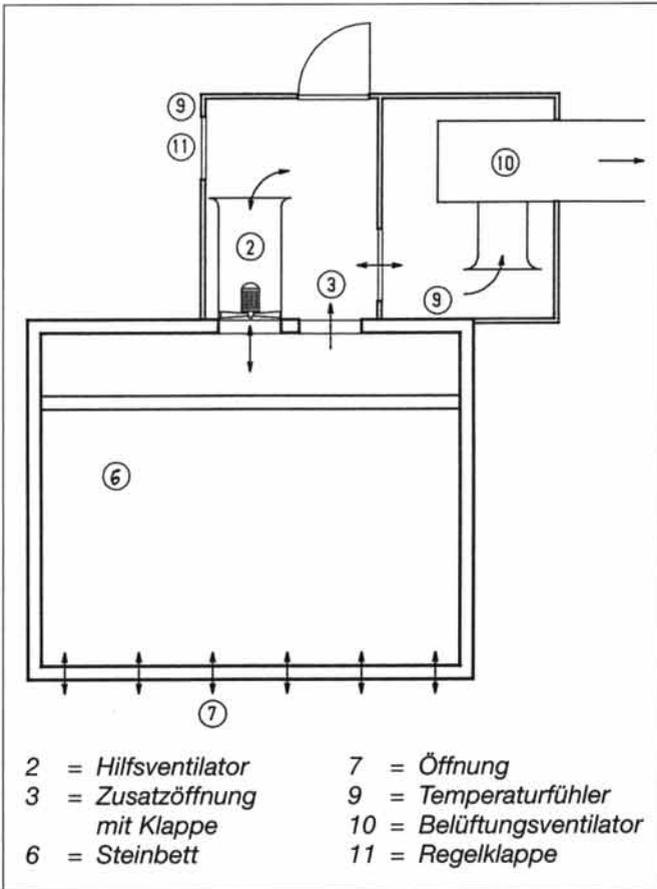


Abb. 3: Aufsicht auf den Speicher beim Entladen.

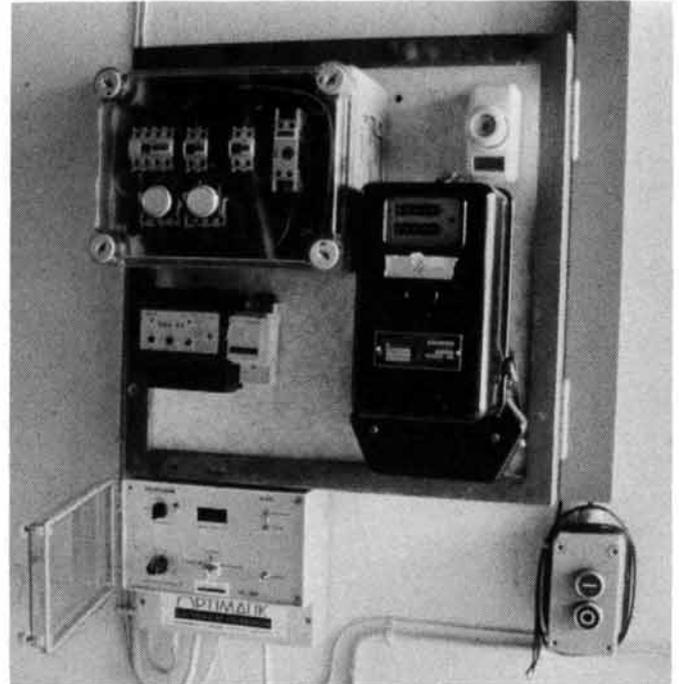


Abb. 5: Kombi-Steuergerät für das Laden und Entladen des Wärmespeichers. Ein Standard-Steuergerät stand nicht zur Verfügung. Deshalb liess die FAT ein spezielles Steuergerät entwickeln.

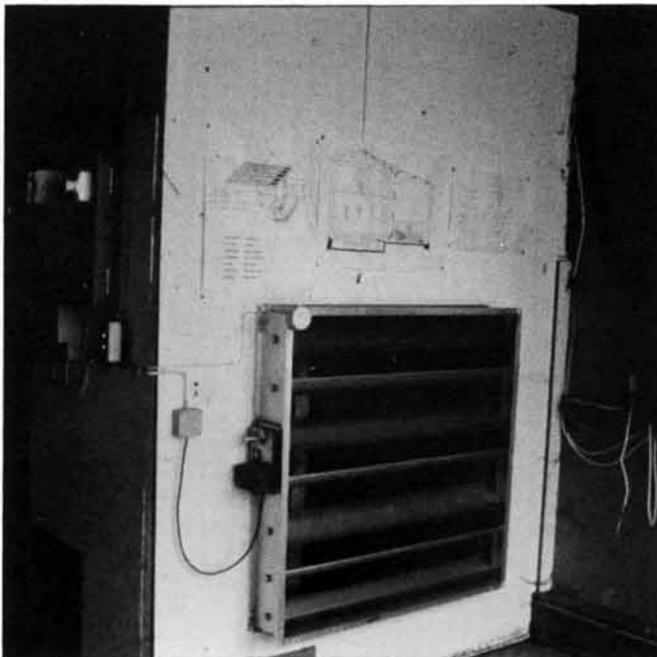


Abb. 4: Regelklappe mit Motorantrieb
In Verbindung mit einem Steuergerät sorgt die Klappe, dass sich der Wärmespeicher nicht zu rasch abkühlt. Leider verursachen Klappe und Steuerung einen Investitionsbedarf von rund Fr. 3000.-, unabhängig von der Grösse des Speichers bzw. der Heubelüftungsanlage.

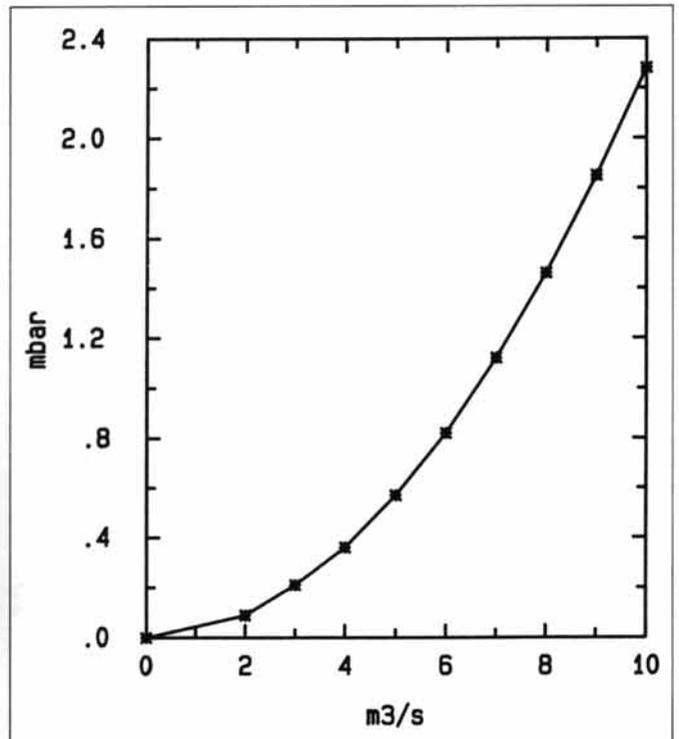


Abb. 6: Das Durchblasen von Luft durch das 1 m hohe Steinbett erfordert einen bestimmten Druck (mbar) je nach Luftmenge (m³/s).

Resultate

Das Laden des Speichers dauert im Durchschnitt 4,7 h. Je nach Restwärme des Speichers und der Lufttemperatur des Kollektors schwankt die Zeit für das Laden von 2,0 bis 7,3 h.

Im Durchschnitt verbraucht der Hilfslüfter 14,3 kWh elektrische Energie. Bei einem Arbeitspreis von Fr. 0,18 pro kWh Hochtarif kostet dies Fr. 2.55.

Für den Betrieb mit Sonnenkollektor am Tag, mit Wärmespeicher in der Nacht (Arbeitspreis Fr. 0,11 pro kWh von 22 bis 6 Uhr) und in der Endtrocknung von zirka 85 bis 88% TS-Gehalt gibt Tabelle 1 Auskunft.

Obwohl die Stromkosten in der Nacht nur 66% oder Fr. 3.45 für die gleich lange Belüftungszeit wie am Tag betragen, ist der Entzug pro kg Wasser 30% oder 0,9 Rappen teurer. Am Tag ist die Trocknungskapazität durchschnittlich doppelt so hoch als in der Nacht.

Ziele erreicht?

Überschüssige Wärme einlagern

Die Wärmemenge, die eingelagert werden kann, hängt von der Temperaturdifferenz der Steine und der vom Kollektor kommenden Luft ab. Diese beträgt zirka 10 bis 15°C. Tabelle 2 zeigt in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz die entsprechenden Wärmemengen und der umgerechneten Heizölmenge.

In der Zeit der Heuernte steigt die Speichertemperatur bis zu 32°C an, wenn der Kollektor nicht gleichzeitig durch

Tabelle 2: Wärmeaufnahmevermögen von 20 m³ Kies

Temperaturdifferenz °C		5	10	15	20	25
Wärmemenge MJ		158	317	475	634	792
Heizölmenge l		4,4	8,8	13,2	17,7	22,1

die Heubelüftung benötigt wird. Leider hat zu Beginn der Nachttrocknung die Aussenluft immer noch mehr als 20°C, so dass die Temperaturdifferenz bei der Entladung klein bleibt.

Im Herbst erreicht die Speichertemperatur noch maximal 25°C, und die Nachttemperatur fällt auf zirka 15°C. Nur in seltenen Ausnahmefällen gibt es eine Temperaturdifferenz von mehr als 20°C.

Die Trocknungskapazität vergrössern

Im Durchschnitt nimmt die Luft während der Nacht 140,9 kg Wasser auf. In etwa der gleichen Trocknungszeit über den Tag verdunsten durchschnittlich 256,0 kg oder 82% mehr. Pro m³ Trocknungsluft resultiert eine Verdoppelung der Trocknungskapazität gegenüber den Nachtstunden, weil der spez. Wasserentzug 2,20 statt 1,10 g/m³ erreicht.

Konservierungsverluste vermindern

Der Dauerbetrieb einer Heutrocknung mit angewärmter oder entfeuchteter Luft verursacht einen Konservierungsverlust von 1 bis 2%. Bei der Heubelüftung mit Sonnenkollektoren finden wir 2 bis 3% Verluste. Mit der zusätzlichen Belüftung in der Nacht verringern sich die Konservierungsverluste nur in sehr kleinem Masse.

Tabelle 1: Versuchswerte bei Tag- und Nachttrocknung

	Dauer h	Stromverbrauch kWh	Stromkosten Fr.	Wasserentzug kg	Stromkosten/kg Wasser Rp./kg	Spez. Wasserentzug g/m³
∅ tags	7,5	29,3	5,25	256,0	3,0	2,20
± ¹⁾	4,2	16,3	2,95	184,2	2,8	1,35
min.	1,6	5,0	0,90	15,0	0,7	0,35
max.	12,0	50,0	9,00	704,0	13,2	5,35
∅ nachts	7,5	31,5	3,45	140,9	3,9	1,10
± ¹⁾	3,6	15,3	1,70	144,0	2,9	0,85
min.	0,2	1,0	0,10	- 42,0	0,9	- 0,40
max.	11,9	51,0	5,60	532,0	12,2	3,2
∅ Endtrocknung	44,5	178,0	32,05	294,0	7,8	0,65

¹⁾ = Standard-Abweichung

Billigen Nachtstrom nutzen

Am Standort der FAT kostet die kWh am Tag 18 Rp. und 11 Rp. in der Nacht (von 22 bis 6 Uhr). Mit diesem Tarif kommt 1 kg oder 1 l Wasserentzug tags auf 3,0 Rp. und nachts auf 3,9 Rp. zu stehen. Trotz Niedertarif verteuert sich die Trocknung über Nacht um 0,9 Rp. pro kg Wasserentzug oder um 30%.

Investitionsbedarf

Der Investitionsbedarf setzt sich aus den Materialkosten und den Arbeitskosten zusammen:

Material:

Hilfslüfter (Occasion) war vorhanden
 Holz und Isolation Fr. 4400.-
 Gitterrost 20 m² Fr. 3000.-
 Sickerkies 20 m³ Fr. 1100.-
 Steuerung und Elektromontage Fr. 500.-

Fr. 9000.-
 Kombisteuerung und Motorklappe Fr. 3000.-
Total Fr. 12 000.-

Arbeitszeit:

Schreiner inkl. versuchsbedingtem Mehraufwand 242 h
 Kies einfüllen 10 h
Total 252 h

Arbeitskosten:

252 h x Fr. 20.- = rund Fr. 5000.-

Total Investitionsbedarf: Fr. 17 000.-

Für die Berechnung der Fixkosten betragen die Sätze: 4% für die Amortisation, 3,8% für die Verzinsung des durchschnittlich gebundenen Kapitals, 1,5% für Reparaturen und 0,1% für Versicherungen. Dies ergibt total 9,4% oder Fr. 1598.-.

Schlussfolgerungen

Der an der FAT realisierte Wärmespeicher für die Heubelüftung erfüllt teilweise seine Ziele, überschüssige Kollektorwärme zu speichern und die

Trocknungskapazität der Belüftungsanlage zu vergrössern. Beim Speicherbetrieb in der Nacht erhöhen sich die Energiekosten pro kg entzogenes Wasser. Hinzu kommt ein Investitionsbedarf von Fr. 17 000.–. Dieser verursacht Fixkosten von Fr. 1598.–, die nicht durch Energieeinsparungen, tiefere Trocknungskosten oder kleinere Kon-

servierungsverluste abgegolten werden können.

Das Be- und Entladen des Speichers benötigt viel Umstell- und Kontrollarbeiten. Ein Steuergerät für die Heubelüftung ist Voraussetzung für den Nachtbetrieb, ein zweites für die Wärmespeicherung und -abgabe.