

3 Lagerung und Trocknung von Waldhackschnitzeln

"Waldfrische" Hackschnitzel haben Wassergehalte von etwa 50%. In der Regel sind bei einer Verbrennung Wassergehalte von 30 - 40% erforderlich, um die emissionsrechtlichen Vorschriften einzuhalten. Eine Trocknung ist deshalb unbedingt erforderlich. Trockene Hackschnitzel haben darüber hinaus folgende Vorteile:

bessere technologische Eigenschaften als Brennstoff durch höheren Energiegehalt

geringere gesundheitliche Belastung durch Pilzsporen beim Umgang mit Hackschnitzeln [Weingartmann 1991]

geringere Transportkosten auf Grund geringeren Gewichts.

3.1 Physikalische Zusammenhänge der Trocknung von Hackschnitzeln

Im Trocknungsvorgang unterscheidet man zwischen rein physikalischen und durch Mikroorganismen verursachten Vorgängen. Diese laufen sowohl parallel als auch zeitlich versetzt ab.

3.1.1 Einflussfaktoren auf die Trocknung

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Holz Trocknung, v. a.:

Trocknungsdauer

Wassergehalt des Holzes und der Luft

Qualität der Holzhackschnitzel.

Die Trocknungsdauer ist jahreszeitlich unterschiedlich. Dies ist zurückzuführen auf unterschiedliche Wassergehalte im Holz zwischen der Saftzeit im Sommer und der Ruhezeit im Winter sowie auf jahreszeitlich stark unterschiedliche Wassersättigungsraten der Luft. Nachfolgend ist der Trocknungszeitbedarf über die Jahreszeiten dargestellt.

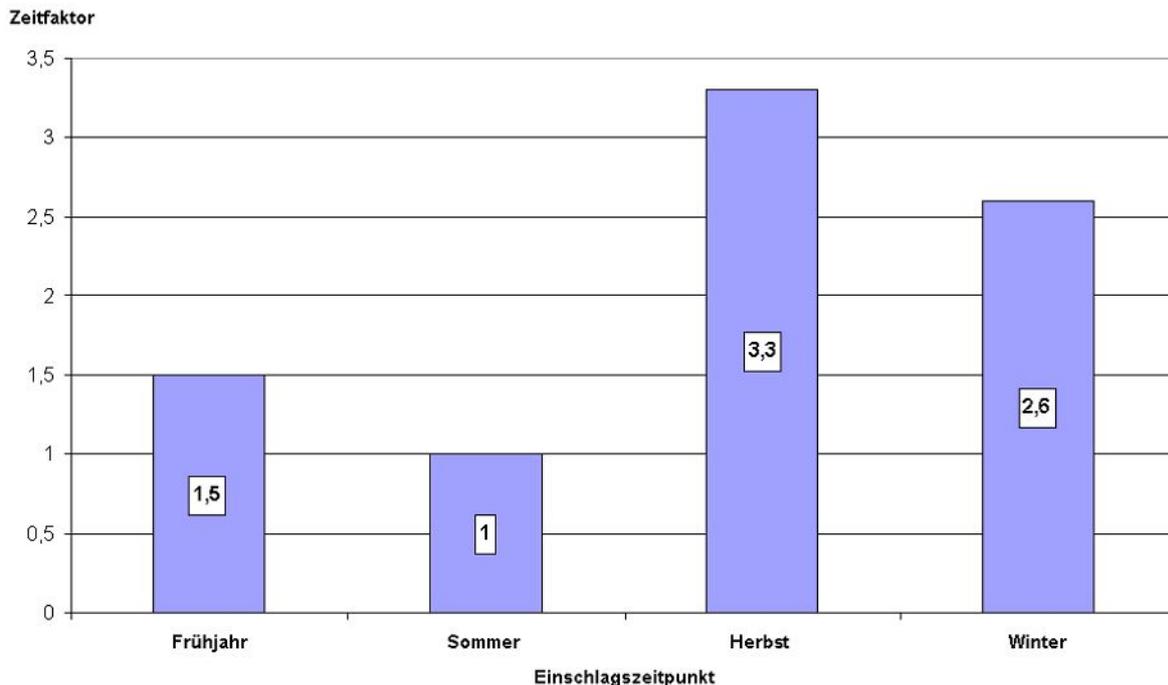


Abb. 17: Jahreszeitlicher Trocknungszeitbedarf bezogen auf eine angenommenen Einschlagszeitpunkt im Sommer (verändert n. Brusche [1983])

Neben jahreszeitlich schwankenden Wassergehalten gibt es unterschiedliche Wassergehalte im Stammverlauf (Splint, Kern) und zwischen den Baumarten. Die Wassergehalte unserer wichtigsten Baumarten sind nachstehend wiedergegeben.

Tab. 9: Wassergehalt verschiedener Baumarten (waldfrisch) (verändert n. Bellmann [1987], Bues u. Schulz [1989, 1990])

Wassergehalt (von - bis [in%])			
Splint	Kern	Gesamt	
Fichte	57 - 64	16 - 30	45 - 46
Tanne	58 - 67	23 - 33	55
Kiefer	51 - 68	18 - 33	48
Lärche	50 - 60	21 - 35	37
Strobe	68	28	48
Douglasie	54	22 - 27	-
Buche	50	50	40
Eiche	46	45	46

Die Qualität der Hackschnitzel bestimmt sich u. a. aus der Größenverteilung sowie dem Grünmasse- und Rindenanteil. Je größer die einzelnen Hackschnitzel sind, desto leichter kann Luft in der Schüttung zirkulieren. Grobe Hackschnitzel trocknen dadurch schneller ab als Feine. Mikroorganismen zersetzen Blätter, Nadeln und Rinde leichter als Holz. Je höher deren Anteil, desto aktiver sind Mikroorganismen. Diese bauen Substanz ab und führen zu einer Erwärmung der Schüttung. Einerseits verlieren die Hackschnitzel dadurch an Energiegehalt, andererseits führt die höhere Temperatur zu einer stärkeren Luftkonvektion und stärkeren Trocknung.

3.1.2 Die Bedeutung des Wassergehaltes bei der Trocknung

Wasser liegt im Holz in freier und gebundener Form vor. Der Fasersättigungspunkt kennzeichnet den Übergang von freiem zu gebundenem Wasser. Je nach Baumart variiert dieser zwischen 18% und 26% Wassergehalt. Freies Wasser befindet sich in Zellhohlräumen des Holzes und lässt sich leicht durch trockene Luft entziehen.

Gebundenes Wasser wird durch molekulare Bindungskräfte in den Holzzellen festgehalten. Es kann dem Holz nur durch aufwendige technische Trocknungsverfahren vollständig entzogen werden. Sie sind für Energiehackschnitzel zu teuer. Allein durch optimale Lufttrocknung können bereits Wassergehalte von 15 - 20% erreicht werden.

3.1.3 Der Trocknungsprozess

Im Verlauf der Trocknung wird das Wasser vom flüssigen in einen gasförmigen Aggregatzustand überführt. Dieser Vorgang heißt Verdunstung. Voraussetzungen für die Verdunstung sind nach Häckel [1990]:

- Das Wasser darf nicht durch molekulare Bindungskräfte festhalten werden.
- Die zur Verdunstung benötigte Energie stammt aus dem Wärmeverrat der Luft.
- Die Luft muss ein Sättigungsdefizit aufweisen. Nur in diesem Zustand kann sie dem Holz Wasser entziehen und abtransportieren.

Je mehr Wasser verdunstet, desto schneller nimmt die Lufttemperatur und damit das Wasserhaltevermögen der Luft ab. Wird der Taupunkt erreicht, kondensiert Wasserdampf zu flüssigem Wasser. Ein Kondensieren des Wasserdampfes an den Randbereichen des Hackschnitzelhaufens führt zu einer verstärkten Aktivität der Mikroorganismen. Insbesondere der Sporenausstoß der Schimmelpilze birgt dann gesundheitlichen Risiken beim Umgang mit Holzhackschnitzeln.

Die Luftzirkulation in der Schüttung entsteht auf Grund einer natürlichen Konvektionsströmung. Sie führt

Frischlufte zu und wassergesättigte Luft ab. Die Trocknungsgeschwindigkeit kann durch einen höheren Luftdurchsatz (z.B. künstlichen Luftstrom) erhöht werden. Dadurch laufen die Verdunstungsvorgänge und der Abtransport des Wassers schneller ab. Eine weitere Möglichkeit, die Trocknungsgeschwindigkeit zu erhöhen, besteht darin, die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft durch eine Erwärmung zu erhöhen. Auf natürlichem Weg geschieht dies durch die Selbsterhitzung (Mikroorganismen) oder durch Sonneneinstrahlung. Es sind aber auch technische Möglichkeiten denkbar, wie etwa der Einsatz eines Warmluftgebläses.

3.2 Biochemische und mikrobielle Vorgänge bei der Trocknung und Lagerung

Während der Lagerung und Trocknung von Biomasse bauen Mikroorganismen und Pilze Trockensubstanz ab. Dies betrifft Laubholz auf Grund der höheren Anteile lebender Zellen im Holz etwas stärker als Nadelholz. Blatt-, Nadel- und Rindenanteile in den Hackschnitzeln begünstigen ebenfalls die Entwicklung der Mikroorganismen. Im Durchschnitt werden 0,5 - 4% Trockensubstanz pro Lagerungsmonat zersetzt (Tab. 10). Als Abbauprodukte entstehen Wasser und Kohlendioxid. Je nach Einlagerungswassergehalt und Lagerungsart ergeben sich unterschiedliche Abbauraten.

Der Wassergehalt und pH-Wert der Hackschnitzel sowie die Temperatur in der Schüttung verändern sich während der Lagerung. Ursachen dafür sind zum einem physikalische Prozesse, zum anderem die Tätigkeit der Mikroorganismen selbst. Mikroorganismen und Pilze passen das Ausmaß ihrer biologischen Aktivitäten ihren Lebensbedingungen an. Pilze können nur bei Wassergehalten über 18% wachsen [Kollmann 1982]. Die Aktivitäten der Mikroorganismen bewirken einen starken Temperaturanstieg im Hackschnitzelhaufen während der ersten 40 - 60 Tage. Es besteht dann ein deutliches Temperaturgefälle vom Inneren zum Außenbereich der Schüttung. Mit der Abnahme der Aktivitäten der Mikroorganismen bei sinkenden Wassergehalten geht die Temperatur langsam wieder zurück. Oftmals bilden sich an "Konvektionsschloten" Schimmelpilzkolonien. Hier kondensiert Wasser der wassergesättigten Luft in den kühleren Randbereichen und begünstigt das Pilzwachstum.

Der für Mikroorganismen optimale pH-Wert liegt bei ca. 4,5. Einige Pilzarten können sich aktiv das für sie ideale Säuremilieu schaffen [Marutzky 1982].

Ab einer Lagerungsdauer von mehr als sechs Monaten nimmt die Sporenbelastung durch Pilze deutlich zu. Allergische Reaktionen und Atemwegserkrankungen können auftreten [Thörnquist et al. 1982]. Desweiteren steigt der Stickstoffanteil mit Zunahme der Lagerungsdauer.



Abb. 18: Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen auf die Mikroorganismen-tätigkeit

3.3 Hackschnitzellagerungs- und Trocknungsverfahren

Es existieren eine Reihe von Verfahren zur Lagerung und Trocknung von Holzhackschnitzeln. Nach Art der erzeugten Trocknungsluft kann folgende systematische Einteilung vorgenommen werden (Stampfer et al. [1997]; Krausenboeck [1995]; Weingartmann [1991]; Lauer et al. [1986]).

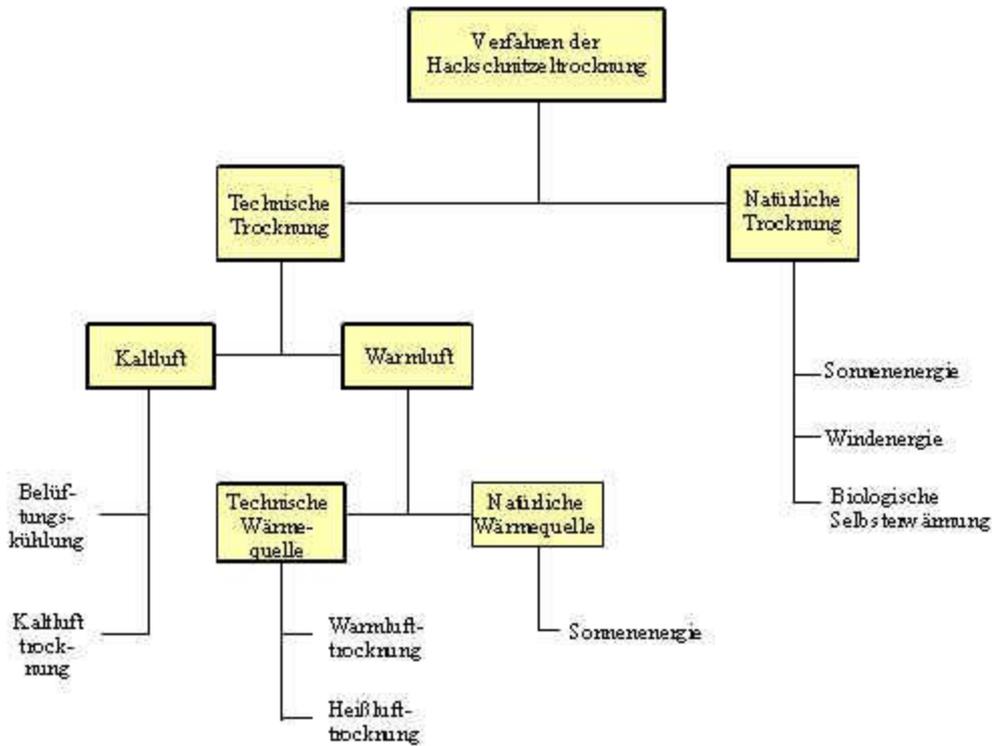


Abb. 19: Verschiedene Verfahren der Hackschnitzeltrocknung

Nachfolgend werden verschiedene Verfahren der Trocknung und Lagerung nach einheitlichen Kriterien bewertet. Als Ergebnis wird eine Empfehlung für Anlagenbetreiber ausgesprochen.

Tab. 11: Kriterien zur Beurteilung der verschiedenen Trocknungsverfahren

Kriterium	klein	mittel	groß
Finanzieller Aufwand			
Technischer Aufwand			
Trocknungsdauer			

Trockensubstanzabbau			
Sporenbildung			
Anlagengröße			

3.3.1 Verfahren der natürlichen Trocknung und Lagerung

Die natürliche Trocknung nutzt die Konvektionsströmung der Luft. Diese entsteht durch das Bestreben der Luft, Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede auszugleichen. Die Trocknung findet ohne Zufuhr von technisch erzeugter Wärme statt. Zu den natürlichen Wärmequellen für die Trocknung zählen Sonne, Wind und Wärme aus biologischen Umsetzungsprozessen.

Auf Grund der klimatischen Witterungsbedingungen in Mitteleuropa mit längeren, kühlen Perioden und relativ hohen Niederschlägen scheidet eine Lagerung im Freien in der Regel aus. Die witterungsbedingte Wiederbefeuchtung wirkt den Trocknungsvorgängen entgegen. Deshalb werden Verfahren behandelt, die eine Lagerung unter Dach oder zumindest einen Schutz der Hackschnitzel vor Witterungseinflüssen vorsehen. Eine Lagerung unter Dach führt jedoch zu einer Steigerung der Kosten pro Schüttraummeter Hackschnitzel. Wird auf ein Lager verzichtet, so können sich die Kosten um ca. 30% pro Schüttraummeter reduzieren [Hänger et. al. 1987].

Trocknung durch Sonnenenergie

Arbeitsprinzip

Eine bis zu 5 cm mächtige Hackschnitzelschicht wird großflächig ausgebracht. Bei starker Sonneneinstrahlung kann die Trocknung innerhalb eines Tages abgeschlossen sein. Das Verfahren ist sehr von der Witterung abhängig.

Anlagenbeschreibung

Es sind keine besonderen technischen Einrichtungen notwendig. Eine befestigte Fläche und die erforderlichen Arbeitsmittel sind in der Regel auf landwirtschaftlichen Höfen vorhanden.

--	--	--	--	--	--

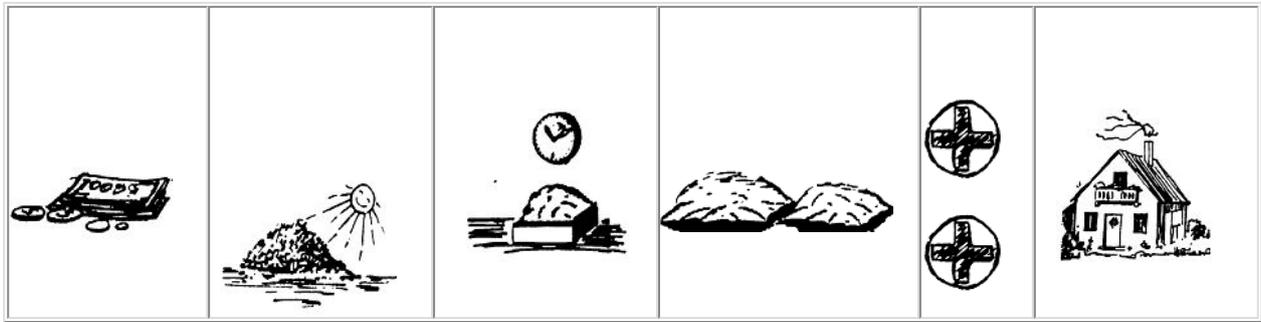


Abb. 20: "Trocknung durch Sonnenenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Dieses Verfahren zeichnet sich durch einfache Handhabung und geringe bauliche Kosten aus. Die Hackschnitzel können innerhalb kurzer Zeit allein durch Sonneneinstrahlung trocknen. Der hohe manuelle Arbeitsaufwand, der große Bedarf an befestigter Fläche und die Witterungsabhängigkeit beschränken dieses Trocknungsverfahren aber auf kleinere Mengen. Das Verfahren eignet sich vor allem für Kleinanlagen.

Trocknung durch Windenergie (und Sonne)

Arbeitsprinzip

Die Hackschnitzel werden in einem nach oben abgeschlossenen, luftdurchlässigen Behälter gelagert. Durch Zusammenwirken von Wind und Sonne trocknen sie ab.

Anlagenbeschreibung

Der technische und bauliche Aufwand ist gering. Es handelt sich um eine luftdurchlässige Gitterbox. Sie soll etwa einen Meter tief sein und kann beliebig hoch gebaut werden.



Abb. 21: "Trocknung durch Windenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Die Handhabung ist sehr einfach, die Anlage deswegen preiswert. Unabhängig von den wechselnden Witterungsverhältnissen trocknen die Hackschnitzel, auch im Winter, in vier bis sechs Monaten ab. Auf Grund der langen Trocknungszeit sind meist nur zwei Umläufe pro Jahr möglich.

Trocknung durch biologische Selbsterwärmung (System Bioconvert)

Arbeitsprinzip

Das Verfahren macht sich die biologischen Umsetzungsprozesse durch Mikroorganismen zunutze. Ein 40 - 60-tägiger starker Temperaturanstieg bewirkt eine Absenkung des Wassergehaltes auf 16 - 18%.

Anlagenbeschreibung

Die siloartigen Anlagen sind relativ einfach konstruiert. In einem allseitig geschlossenen Lagerraum von 12 -

15 m³ Größe werden zusätzlich Belüftungsschächte eingerichtet. Nach dem Anlaufen biogener Umsetzungsprozesse entweicht die feuchte Luft auf Grund der Konvektionsströmung nach außen. Die Beschickung und Entnahme ist technisch aufwendig und erfordert entsprechendes landwirtschaftliches Arbeitsgerät. In der Regel ist der Maschinenpark landwirtschaftlicher Unternehmen aber mit diesen Geräten ausgestattet.

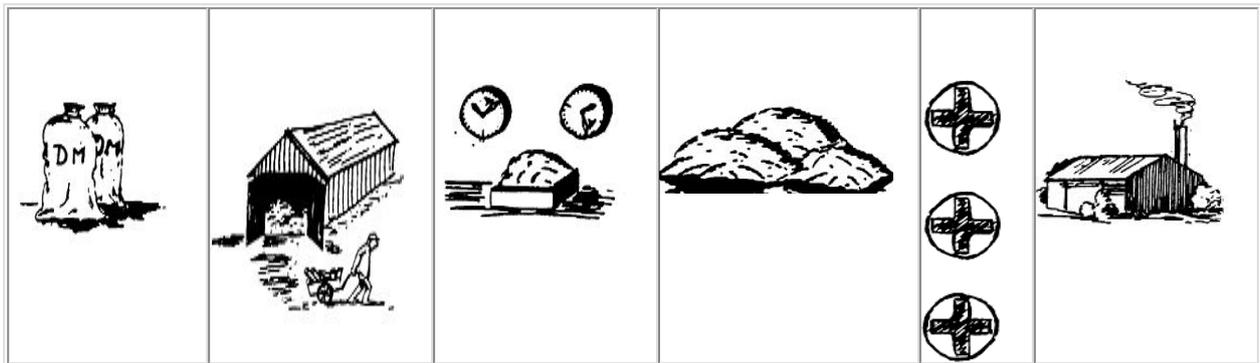


Abb. 22: "System Bioconvert" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Dieses Verfahren besteht durch seine Einfachheit. Es nutzt die Wärme aus den mikrobiellen Umsetzungsprozessen zur Trocknung aus. Auch größere Mengen können innerhalb von 40 - 60 Tagen einen Wassergehalt von 16 - 18% erreichen. Nachteilig sind die möglichen gesundheitlichen Belastungen durch Pilzsporen. In einem Jahr sind bis zu fünf Umläufe möglich. Bisher sind allerdings keine praktischen Erfahrungen aus einem langfristigen Betrieb vorhanden.

3.3.2 Verfahren der technischen Trocknung und Lagerung

Die technische Trocknung beruht auf der maschinellen Erzeugung eines Luftstromes. Zum einen kann die Luft erwärmt werden (Belüftungstrocknung), zum anderen kann sie kalt durch den Holzhackschnitzelhaufen hindurch geblasen werden (Belüftungskühlung). In der Regel werden dabei die Hackschnitzel unter Dach gelagert, um sie gegen die Wiederbefeuchtung durch Regen und Schnee zu schützen.

Kaltbelüftung

Arbeitsprinzip

Außenluft wird durch die Hackschnitzel geblasen. Für die Trocknung ist dabei die relative Feuchtigkeit der Trocknungsluft wichtig. Sie sollte unter 90% liegen. Wie in Kapitel 4.1.3 erläutert, ist das Sättigungsdefizit der Luft für die Trocknungsgeschwindigkeit entscheidend.

Anlagenbeschreibung

Die Holzhackschnitzel werden unter Dach gelagert. Durch ein Gebläse gelangt die Kaltluft über ein Leitungssystem in die Schüttung.

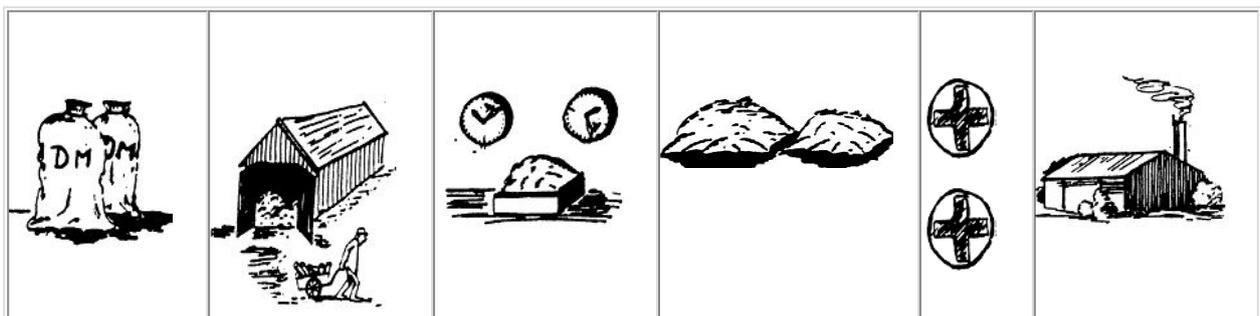


Abb. 23: "Kaltbelüftung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau,

Empfehlung

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im gebremsten Ablauf der Umsetzungsprozesse. Damit bilden sich weniger Pilzsporen und verlangsamt sich der Trockensubstanzabbau. Diese Art der Trocknung und Lagerung kann nur in den wärmeren Monaten des Jahres durchgeführt werden, da niedrige Temperaturen den Trocknungsfortschritt begrenzen. Im Winter sind Sättigungsdefizit und Wasserhaltevermögen der Luft für eine effektive Trocknung zu niedrig.

Beim Einblasen zu kalter Außenluft kann es auch zum Gefrieren der Hackschnitzel kommen. Die lange Trocknungszeit ermöglicht nur ein bis zwei Umläufe im Jahr. Das Verfahren ist nur bedingt empfehlenswert. Der finanzielle und technische Aufwand ist groß und steht einem nur bescheidenen Nutzen gegenüber.

Belüftungskühlung

Arbeitsprinzip

Durch den Wechsel von Kaltbelüftung und Belüftungspausen wird bei diesem Verfahren zusätzlich zur reinen Kaltluft die im Hackschnitzelhaufen entstehende Wärme zur Trocknung genutzt. Die Belüftungsintervalle bestimmen den Trocknungsverlauf.

Anlagenbeschreibung

Ähnlich wie bei der Kaltbelüftung erfolgt die Lagerung der Hackschnitzel unter Dach. Damit der Effekt der biologischen Selbsterwärmung genutzt werden kann, muss die Schüttung eine Mindestgröße von etwa 15 Smr besitzen. Die Steuerung des Gebläses über eine Zeitschaltuhr stellt die Einhaltung der Belüftungsintervalle sicher.



Abb. 24: "Belüftungskühlung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Diese Trocknungsvariante arbeitet witterungsunabhängig und nutzt die Wärme aus den Umsetzungsprozessen. Dadurch kann sie auch im Winter genutzt werden. Die Belüftung mit kalter Luft senkt die Temperatur in der Schüttung und verlangsamt die von den Mikroorganismen ausgelösten Umsetzungsprozesse. In einem Jahr sind bis zu vier Umläufe möglich.

Trocknung durch Solarenergie

Arbeitsprinzip

Von der Sonne erwärmte Luft wird durch den Hackschnitzelhaufen geblasen und entzieht dabei dem Hackgut die Feuchtigkeit.

Anlagenbeschreibung

Die Hackschnitzel werden unter Dach auf einem befestigten Untergrund gelagert. Die über Sonnenkollektoren erwärmte Luft wird durch ein mit einem Luftleitungssystem verbundenes Gebläse in den Hackschnitzelhaufen eingeblasen. Diese Methode hat ihren Ursprung aus der in der Landwirtschaft bekannten Heutrocknung. Als Alternative zu den Sonnenkollektoren bietet sich die Nutzung eines Lagers

mit einem durchsichtigem Dach an. Die Luft darunter erwärmt sich mit Hilfe der Sonneneinstrahlung.

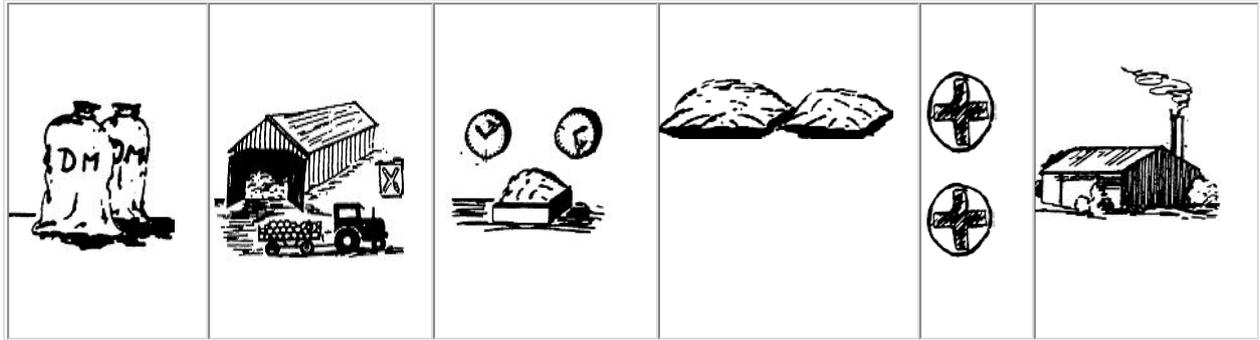


Abb. 25: "Technische Trocknung unterstützt durch Solarenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Diese Art der Trocknung kann als Zusatzmethode eingesetzt werden. Die Anzahl der Sonnentage reicht nicht aus, um die Hackschnitzel allein durch Sonnenenergie zu trocknen. Bedingt durch die hohen Investitionskosten für Sonnenkollektoren ist diese Form der Hackschnitzeltrocknung in der Regel unwirtschaftlich.

Die Variante der Lufterwärmung mittels eines Glasdaches ist effektiver, so dass auf diese Weise größere Hackschnitzelmengen getrocknet werden können. Es sind bis zu vier Umläufe im Jahr möglich.

Verfahren mit künstlicher Wärmequelle

Arbeitsprinzip

Bei dieser Trocknungsmethode werden die Hackschnitzel mit angewärmter, trockener Luft durchblasen. Der grundlegende Unterschied zu den anderen Verfahren besteht in der höheren Arbeitstemperatur und der Geschwindigkeit der Hackschnitzeltrocknung. Je nach System liegt die Temperatur zwischen 40 und 130 °C bei der Warmlufttrocknung sowie 600 – 1000°C bei der Heißlufttrocknung. Auf diese Weise können in sehr kurzer Zeit große Wassermengen entzogen werden. In der Regel dauert das Trocknen einer Hackschnitzelladung von 10 Schüttraummetern je nach verwendetem System 10 - 120 min [Strehler 1984].

Anlagenbeschreibung

Anlagen dieser Art werden in der Landwirtschaft bereits stationär oder mobil zur Getreidetrocknung eingesetzt. Die Warmluft wird aktiv von sehr leistungsfähigen Wärmequellen erzeugt.



Abb. 26: "Warm- und Heißlufttrocknung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

Empfehlung

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Trocknungsgeschwindigkeit und dem damit möglichen hohen Durchlauf. Sie ist auf die Bewältigung großer Hackschnitzelmengen ausgelegt. Diese Anlagen erfordern einen hohen finanziellen, technischen und organisatorischen Aufwand.

3.4 Lager- und Trocknungsversuch von Waldhackschnitzeln

3.4.1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs war es, den zeitlichen Trocknungsverlauf von waldfrischen, unter Dach eingelagerten Hackschnitzeln zu dokumentieren sowie die Trocknung beeinflussende Faktoren zu ermitteln. Ein praxisnahes, kostengünstiges und lagertechnisch möglichst einfaches, natürliches Trocknungssystem für Grobhackschnitzel sollte wissenschaftlich begleitet werden.

3.4.2 Material und Methoden

Zwischen März und August 1998 wurde ein Trocknungsversuch in einer Halle nahe bei Freising durchgeführt. Die eingelagerten Grobhackschnitzel wurden mit Hilfe eines Schneckenhackers (Laimet HP 25 M) aus frischen Fichtenkronen (mit Nadeln) gewonnen. Bei Versuchsbeginn betrug der Ausgangswassergehalt 41%, der Grünanteil (Nadeln) lag bei ca. 10% der Trockenmasse.

Die in Holzbauweise erstellte Lagerhalle ist nach Westen hin offen. Etwa 2 cm breite Spalten zwischen den Brettern der Seitenwände sowie der aus Rundholzbohlen hergestellte Boden, unter dem sich eine Maschinenhalle befindet, gewährleisten eine allseitige Durchlüftung. Die Halle (L: 25 m, B: 12 m, H: 3,5 m) besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 1.000 Schüttraummetern (Srm).



Abb. 27: Mit Hackschnitzeln befüllte Lagerhalle

Um repräsentative Stichproben gewinnen zu können, wurden vor Versuchsbeginn grobmaschige Kartoffelsäcke (ca. 20 l) mit Hackschnitzeln gefüllt und 80 cm unter dem Kronenniveau der Schüttung plaziert (vgl. Stockinger [1998]). Eine ausreichend lange, an den Säcken befestigte Schnur ermöglichte die späteren Probenahmen. Versuche, die Säcke tiefer zu positionieren, scheiterten an dem zu großen Gewicht der darüberliegenden Schnitzel.

Zur Dokumentation des Trocknungsverlaufes wurden nach der Bestimmung des Einlagerungswassergehaltes alle vier Wochen Proben entnommen, gewogen und im Trockenofen bei 104°C ca. 18 Stunden lang bis zur Gewichtskonstanz gedarrt (vgl. Önorm G 1074). Aus der Differenz des Gewichtes vor und nach der Trocknung wurde der Wassergehalt bestimmt.

Eine in der Lagerhalle installierte Messanlage erfasste Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Drei vertikal angeordnete Fühler (Abstand vom Lagerhallenboden: 0,7 m; 1,5 m; 2,2 m) ermittelten den Temperaturverlauf im Hackschnitzelhaufen im 30-Minutentakt. Der etwa einen Meter über der Hackschnitzelschüttung angebrachte Thermo- und Hygrograph lieferte in identischen Intervallen Informationen über Temperatur und Feuchte der Raumluft. Die Daten wurden elektronisch gespeichert und alle zwei Wochen abgerufen.

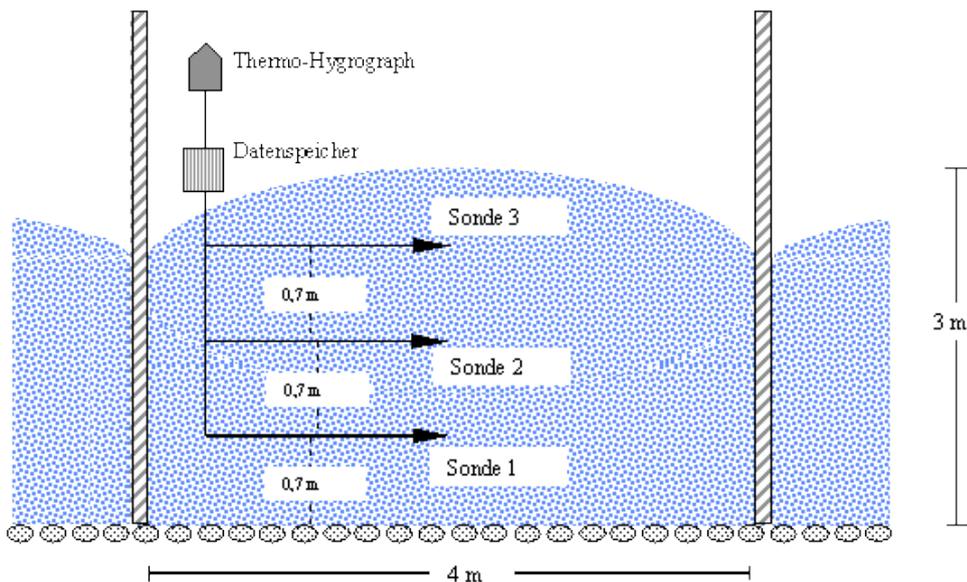


Abb. 28: Hackschnitzelschüttung und Messeinrichtungen im Querschnitt

3.4.3 Ergebnisse des Trocknungsversuches

Temperaturverlauf im Hackschnitzelhaufen

Da die Hackschnitzel zu Versuchsbeginn schon 14 Tage eingelagert waren, hatten bereits biologische Aktivitäten und damit eine Erwärmung des Ausgangsmaterials eingesetzt. Für den Zeitraum zwischen Einlagerung und Versuchsbeginn können daher keine Aussagen getroffen werden. Für die weiteren Betrachtungen ist das Datum des Versuchsbeginns, der 25.03.98 (Einlagerungstermin plus zwei Wochen), ausschlaggebend.

Der Einbau der Versuchsanlage führte zu Störungen im ursprünglichen Gefüge der Schüttung. Als Folge davon war zu Beginn der Messreihe eine Abnahme der Temperatur festzustellen. Nach drei Tagen erreichte sie das frühere Niveau wieder und es begann ein acht Tage andauernder starker Temperaturanstieg auf 27,8°C (Mittelwert der drei Messsonden). Die niedrigste Temperatur wurde an der Messsonde 1 mit 23,5°C erreicht. Die Werte der Sonden 2 und 3 lagen mit 29,2°C und 30,8°C deutlich höher. In den ersten acht Tagen nach der Normalisierung der gestörten Temperaturverhältnisse erwärmte sich die Schüttung um durchschnittlich 2,7°C je Tag. An den einzelnen Sonden ergaben sich Temperaturerhöhungen zwischen 1,0 und 5,3°C je Tag. Eine wesentlich stärkere durchschnittliche Temperatursteigerung in den ersten Tagen dokumentierte Muellerbuchhof [1993]. Bei einem Freilagertrocknungsversuch von Holz hackschnitzeln aus Kiefernganzbäumen wurde in den ersten zehn Tagen eine Temperaturerhöhung von ca. 5,9 °C/Tag beobachtet. Temperaturanstiege bis zu 13 °C je Tag maßen Stockinger und Obernberger [1998] bei der Lagerung von Rinde unter Dach. Prankl und Weingartmann [1994] ermittelten bei der Trocknung von Weichlaubholz hackschnitzeln in einem siloartigen Lagerraum sogar Werte von 6 °C je Stunde. Bei unserem Versuch lagen die maximalen Temperatursteigerungen je Stunde bei 1,5 °C. Einen Überblick über die gemessenen Temperaturextrema liefert Tabelle 12.

Im Anschluss an einen kurzzeitigen Rückgang erreichte die Temperatur in der Hackschnitzelschüttung zwischen dem 34. und 50. Tag ihr höchstes Niveau. Der höchste gemessene Temperaturwert lag bei 35,4 °C, die maximale Tagesdurchschnittstemperatur bei 34,5 °C. Nach erneutem Absinken auf 16 bis 19 °C folgten weitere "Zwischenhochs" mit Tagesdurchschnittstemperaturen von 25 bis 30 °C. Insgesamt lag das hier erreichte Temperaturniveau sehr niedrig. In den Versuchen von Muellerbuchhof [1993], Prankl und Weingartmann [1994] sowie Stockinger und Obernberger [1998] stiegen die Temperaturen binnen der ersten Wochen auf 60 bis 80°C. Nach diesen Hochtemperaturphasen pendelten sich die Werte um 25 °C [Muellerbuchhof 1993], 55 °C [Prankl; Weingartmann 1994] und 40 °C [Stockinger; Obernberger 1998] ein, oder blieben nach der "Aufheizphase" über die gesamte Versuchsdauer mit 60 bis 70 °C nahezu konstant [Stockinger; Obernberger 1998].

Temperatur in °C

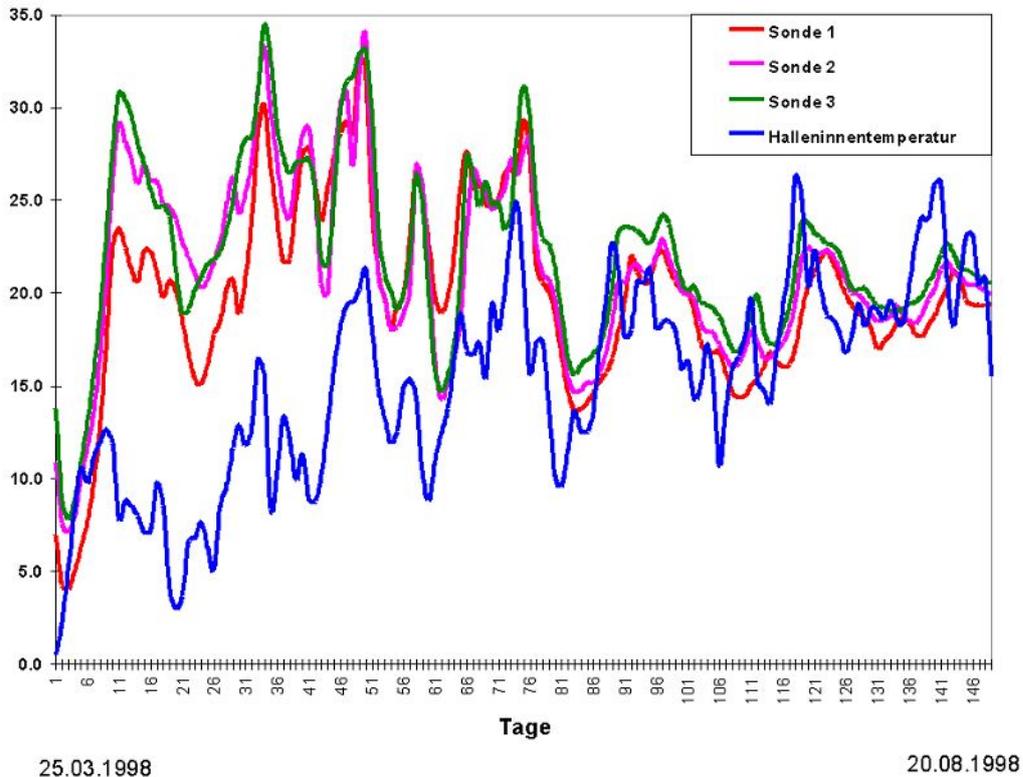


Abb. 29: Temperaturgänge der Sonden 1, 2 und 3 sowie der Halleninnentemperatur

Bei Grobhackschnitzeln ist mit einer maximalen Temperaturentwicklung von 30 bis 40°C zu rechnen [Wippermann 1985; 1987 a]. Die Ergebnisse der vorliegende Studie bestätigen diese Angaben. Charakteristisch für die von allen Messsonden aufgezeichneten Temperaturverläufe waren zeitlich leicht versetzte Schwankungen mit einer sich stetig reduzierenden Amplitude (vgl. Muellerbuchhof [1993]). Unabhängig von der Lage im Hackschnitzelhaufen ergaben sich gleichgerichtete Temperaturgänge. Nahezu identische Temperaturen wurden zwischen dem 50. und 80. Tag seit Versuchsbeginn an den drei Sonden registriert.

Hackschnitzelqualität (Fraktion, Grünanteil)

In Anhalt an ÖNORM M 7133 wurde eine Siebanalyse mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

Häufigkeit in %

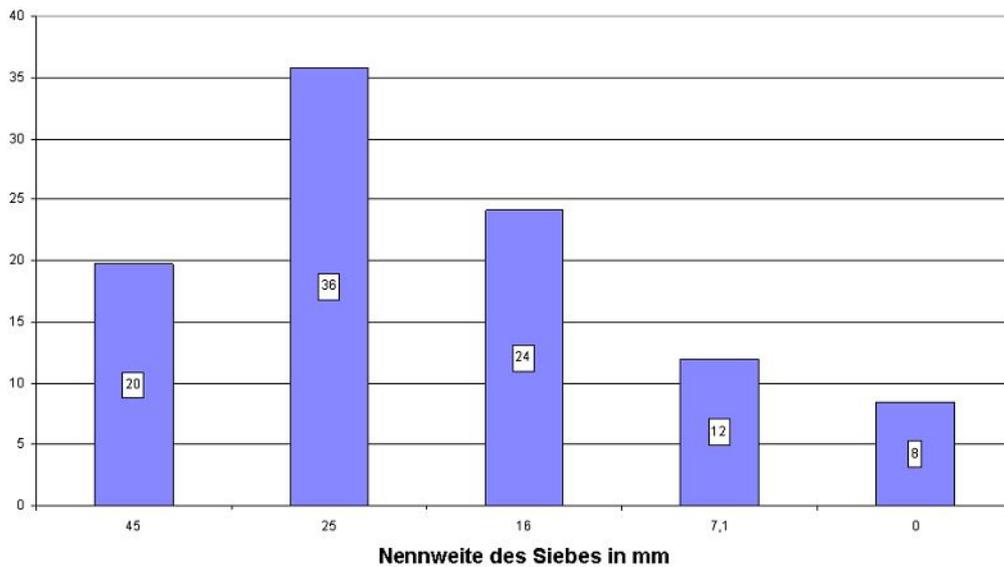


Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der Rückstände auf den einzelnen Sieben

Die Hackschnitzel sind in Anlehnung an ÖNORM M 7133 als Grobhackschnitzel zu klassifizieren.

Trocknungsverlauf

Innerhalb von 50 Tagen nach Versuchsbeginn verringerte sich der Wassergehalt auf 23,9%. Dieser Wert entspricht etwa der Hälfte des Ausgangswassergehaltes (41,2%). Die durchschnittliche Trocknungsleistung, bezogen auf den Einlagerungstermin Ende März, lag demnach bei ca. 0,9%/Tag. Die folgende 90tägige Lagerung bewirkte nur noch eine geringfügige weitere Reduktion des Wassergehaltes. Er betrug bei Versuchsende 20,5% (vgl. Abb. 31).

Temperatur in °C / Wassergehalt in %

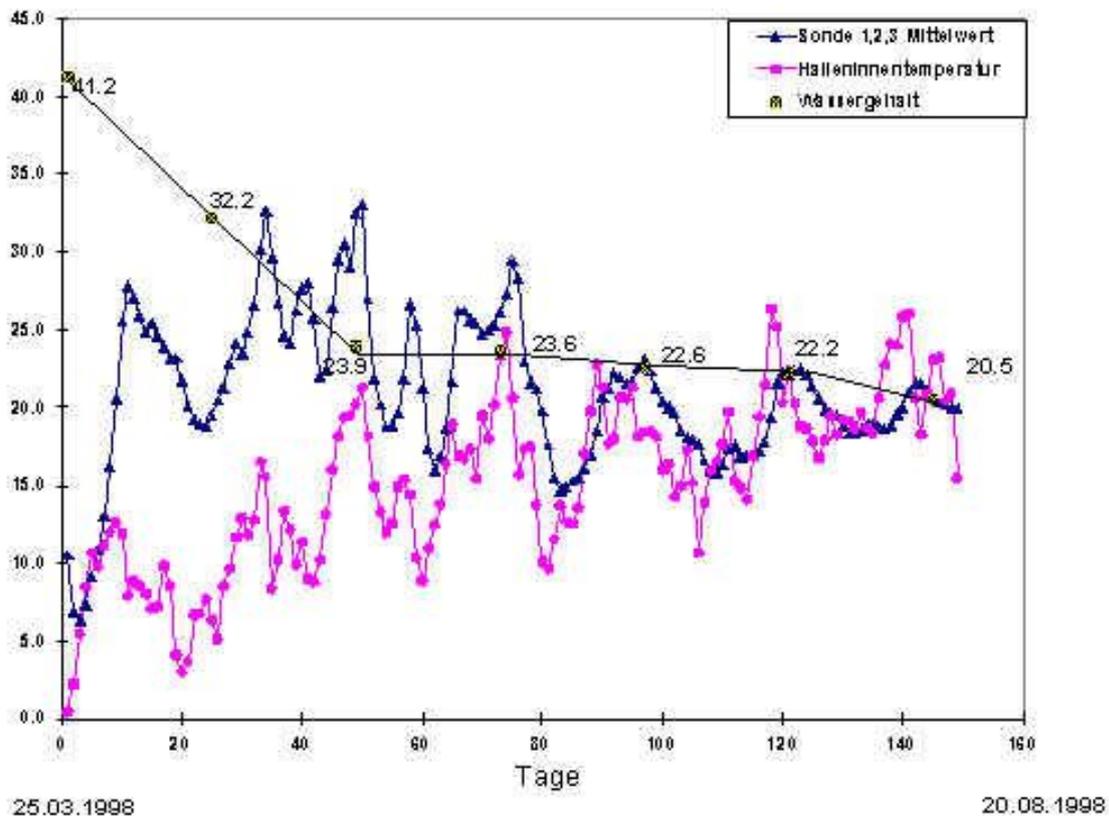


Abb. 31: Verlauf der Schüttungs- und Halleninnentemperatur sowie Wassergehalt der Hackschnitzel

Für die Praxis genügt folglich eine etwa zweimonatige Lagerung, um ausreichend trockenes Material zu erzeugen. Erfahrungswerte des Betreibers der untersuchten Anlage lassen den Schluss zu, dass der Trocknungsprozess während der kalten Wintermonate (Dezember bis Februar) noch effektiver ist. Grund dafür ist wohl ein noch stärkeres Temperaturgefälle vom Inneren der Schüttung zur Raumluft.

Eine ähnlich rasche Wassergehaltsabnahme fand Muellerbuchhof [1993] bei im Freien gelagerten Hackschnitzeln. Der Anfangswassergehalt sank nach 1 monatiger Lagerung von 40 auf 30%. Nach drei Monaten war ein Wassergehalt von 25% erreicht. Die Trocknungsleistung belief sich auf durchschnittlich 0,5%/Tag. Stockinger und Obernberger [1998] stellten in einem sechsmonatigen Trocknungsversuch von Rinde unter Dach eine Verringerung des Wassergehaltes von 59 auf 30% fest. Dies entsprach einer Trockenleistung von ca. 0,4% /Tag (die baulichen Anlagen beschränkten sich auf eine einfache Überdachung). Prankl und Weingartmann [1994] beobachteten während einer sechsmonatigen Einlagerung von

Hackschnitzeln in einem siloartigen Lagerraum ein Abtrocknen von 53 auf 37%. Hier wurde eine Trocknungsleistung von ca. 0,2%/Tag erreicht. Verglichen mit dem hier untersuchten Verfahren sind die baulichen Anforderungen (Lüftungsschächte, luftdichte Seitenwände) aber wesentlich höher.

Äußere Einflussfaktoren

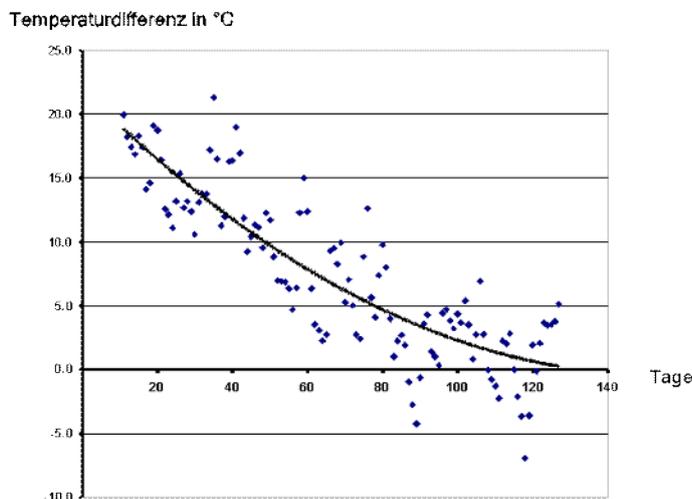


Abb. 32: Differenz von Schüttungs- und Halleninnentemperatur

(Regression: $y = 0.001x^2 - 0.29x + 21.938$; $r^2 = 0.75$)

Vergleicht man den Temperaturverlauf in der Hackschnitzelschüttung mit dem der Halleninnentemperatur, so erkennt man einen deutlichen Zusammenhang. Mit ein- bis zweitägiger Verzögerung folgte die Temperatur in der Schüttung den Änderungen der Raumtemperatur. Mit zunehmender Lagerdauer verringerte sich diese Differenz (Abb. 32).

Während zu Beginn des Trocknungsprozesses in der Schüttung noch ca. 20 °C höhere Temperaturen herrschten, war ab dem 120. Tag das Niveau der Raumtemperatur erreicht. Etwa seit dem 90. Tag wurden sogar niedrigere Tagesdurchschnittstemperaturen als außerhalb gemessen. Hierin kommt deutlich die gute Durchlüftbarkeit von Grobhackgut zum Ausdruck. Die Beschaffenheit der Grobhackschnitzel sowie die konstruktiven Merkmale der Lagerhalle garantierten einen ständigen Luftstrom durch den Hackschnitzelhaufen. Ein unmittelbarer Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit in der Lagerhalle auf Temperaturverlauf und Trocknungsvorgang ließ sich nicht feststellen.

Eine vergleichende Auswertung der Tagesdurchschnittstemperaturen der Waldklimastation Freising (Entfernung Standort - Trocknungsversuch: ca. 30 km Luftlinie) ergab nahezu identische Tagesgänge. Im Mittel lagen die Temperaturen in der Lagerhalle nur 1 °C höher. Ein Einfluss der "Wärmequelle Hackschnitzelhaufen" auf die Raumtemperatur konnte daher ausgeschlossen werden.

Muellerbuchhof [1993], Prankl [1994] und Stockinger [1998] konnten dagegen keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Lagerhallentemperatur und der Innentemperatur der Schüttung nachweisen.

Begleitumstände des Trocknungsverlaufs

Während die mikrobielle Tätigkeit vor allem durch die Temperaturerhöhung zum Ausdruck kam, konnten nach etwa einem Monat Lagerdauer erste Veränderungen auf der Schüttungskrone beobachtet werden. Dort bildeten sich einzelne deutlich abgrenzbare "Kondensationsschlote". Sie maßen im Durchmesser etwa 20 bis 30 cm und verursachten an diesen Stellen ein verstärktes Pilzwachstum, das mit zunehmender Lagerungsdauer und Abtrocknen dieser Stellen

wieder abklang. Beim Ausbau der Versuchsanlage wurde in den oberen 10 bis 20 cm der Haufenkrone ein "Kondensationsband" beobachtet.



Abb. 33: Kondensationsband im Bereich der Schüttungskrone

Kosten der Hackschnitzeltrocknung

Nach Angabe des Unternehmers lag der Investitionsbedarf für die Lagerhalle bei ca. 30.000,- DM (ohne Grundstück). Den Abschreibungszeitraum veranschlagte er mit 25 Jahren (1.200,- DM/Jahr), den Aufwand für Einlagerungs- und Wartungsarbeiten mit ca. 2.000,- DM (30 Stunden je 65,- DM für einen Schlepper inklusive Fahrer). Daraus ergeben sich für eine einmalige Einlagerung jährliche Gesamtkosten von 3.200,- DM. Bei zwei Trocknungszyklen pro Jahr liegen die Kosten bei 5.200,- DM. Bei einem Volumen von 1.000 Kubikmetern errechnen sich bei einmaliger Einlagerung Kosten von 3,20 DM/Srm. Da die Trocknung im Wesentlichen bereits nach drei Monaten abgeschlossen ist, ließen sich ohne weiteres zwei Trocknungszyklen je Winterhalbjahr realisieren. Dadurch könnte der Aufwand um rund 20% auf 2,60 DM/Srm gesenkt werden.

Die in der Literatur gefundenen Werte bewegen sich in der Regel auf einem wesentlich höheren Niveau. Danach ist je nach Lagervariante und eingesetztem Kapital für bauliche Einrichtungen mit Kosten von 7,- bis 40,- DM/Srm zu kalkulieren (vgl. hierzu Lauer et al. [1986]; Zeilinger [1992]), um Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von weniger als 25% zu erzeugen. Lediglich der erfolgreiche Freilagertrocknungsversuch von Muellerbuchhof [1993] lässt noch kostengünstigere Ergebnisse erwarten, da neben einem befestigten Untergrund keinerlei bauliche Anlagen nötig waren. Hierbei gilt jedoch zu bedenken, dass andere Untersuchungen zur Freilandlagerung durchaus kontroverse Ergebnisse lieferten. Die ständige witterungsbedingte Wiederbefeuchtung verhinderte eine Trocknung weitgehend und forcierte zudem den Abbau biotischer Substanz [Stockinger u. Oberberger 1998; Jonas 1983 b].

3.5 Hackgutlagerung im Rahmen der beiden Arbeitsstudien

Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss der am Lagerplatz herrschenden Witterungsbedingungen, insbesondere der Besonnung, auf das Abtrocknungsverhalten von Hackgut aufzuzeigen. Zur Ermittlung des Wassergehaltes wurden nach dem polterweisen Hacken repräsentative Stichproben gewonnen, gewogen und 18 Stunden im Trockenofen bei 104 °C bis zur Gewichtskonstanz gedarrt (vgl. ÖNORM G 1074). Aus der Differenz der Gewichte konnte der Wassergehalt bestimmt werden.

Ergebnisse im Verfahren "Würzburg"

Der Großteil der Polter befand sich auf einer baumfreien Fläche. Das restliche Holz war entlang der Waldstraße im Schatten gelagert.

Während der 20-wöchigen Lagerzeit (Anfang Februar bis Ende Juni 1998) führte die Sonneneinstrahlung auf der Freifläche zu einer Reduktion des Wassergehaltes. Die Wassergehaltsdifferenz zu den im Schatten gelagerten Poltern betrug zum Zeitpunkt des Hackens Ende Juni 10%. Das auf der Freifläche gepolterte Hackgut enthielt im Durchschnitt 41%, das beschattete 51% Wasser.

Ergebnisse im Verfahren "Neustadt"

Gepoltert wurde ausschließlich entlang der Waldstraße. Nach einer knapp 16-wöchigen Lagerung (Mitte Februar bis Ende Mai) lag der durchschnittliche Wassergehalt aller Polter bei 41%. Im Schatten des Bestandes lagernde Polter enthielten zum Zeitpunkt des Hackens 44% Wasser. Sonnenexponiertes Hackgut wies dagegen mit nur noch 37% einen 7% niedrigeren Wassergehalt auf.