



ATB
Agrartechnik Bornim

Lagerung von Holzhackschnitzeln

Experten-Workshop

18. Juni 2008

Potsdam-Bornim

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 63

Potsdam-Bornim 2008





Lagerung von Holzhackschnitzeln

Experten-Workshop

18. Juni 2008
Potsdam-Bornim

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 63

Potsdam-Bornim 2008

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

November 2008

Redaktion:

Dr. Ing. Volkhard Schloz

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert

Die in diesem Band vorliegenden Beiträge wurden anlässlich eines Workshops am 18. Juni 2008 in Potsdam-Bornim vorgestellt. Veranstalter waren das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM).

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

Inhaltsverzeichnis	Seite
	<i>page</i>
Vorwort	4
Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut <i>Drying of Wood Chips without external Energy</i> Joachim Brummack	5
Aspekte zum Einfluss der Lagerung und Trocknung von Holzhack- schnittzel auf den Betrieb von Energieanlagen <i>Aspects of the influence of storage and drying of wood chips to the operation of power plants</i> Maik Orth, Norbert Kanswohl	21
Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen am Beispiel von Kiefernholz <i>Fire prevention during biomass storage: application to pine wood chips</i> Fabio Ferrero, Marcus Malow, Anka Berger, Matthias Noll	32
Schimmelpilzentwicklung und Trockenmasseverluste in Holzhack- schnittzelhaufen <i>Moulds and dry matter losses in wood chips piles</i> Christine Idler, Volkhard Scholz, Werner Daries, Johannes Egert	45
Entwicklung von pilzlichen und bakteriellen Lebensgemeinschaften in einer Kiefernholzhalde <i>Shifts in the fungal and bacterial community structure during the storage of pine wood debris</i> Matthias Noll, Fabio Ferrero, Annette Naumann, Marcus Malow	58
Strömungsmechanisches und thermodynamisches Modell und experi- mentelle Untersuchungen zur Hackschnitzeltrocknung <i>Fluid dynamic and thermodynamic model and experiments on drying of wood chips</i> Klaus Gottschalk, Volkhard Scholz	73
Belüftete und unbelüftete Hackgutlagerung <i>Wood chips storage with and without aeration</i> Herbert Weingartmann	88

Vorwort

Der Verbrauch an Energieholz steigt seit Jahren kontinuierlich an. In diesem Zusammenhang gewinnt auch die Zwischenlagerung von Hackschnitzeln an Bedeutung.

Trotz vereinzelter Forschungs- und Entwicklungsansätze ist die Lagerung von erntefrischen Holzhackschnitzeln, wie sie im Wald und zunehmend auch auf dem Feld gewonnen werden, nach wie vor mit Problemen behaftet: Bei der Lagerung kommt es zur Erwärmung und damit unter Umständen zur Gefahr eines Brandes, die Trockenmasseverluste können bis zu 30% p. a. betragen und zudem kann die Pilzsporenbelastung eine gesundheitsgefährdende Größenordnung erreichen. Die mikrobiologischen Ursachen und die Zusammenhänge mit Holzart, Hackschnitzelformat, Feuchte, Witterung, Lagerform etc. sind nicht ausreichend geklärt und gestatten es kaum, begründete und verallgemeinerungsfähige Empfehlungen für die Praxis auszusprechen.

Vor diesem Hintergrund hatten das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) im Juni 2008 namhafte Experten zu einem Workshop nach Potsdam geladen, um den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Lagerung und Trocknung von Holzhackschnitzeln im deutschsprachigen Raum vorzustellen und zu diskutieren. Der Workshop sollte den wissenschaftlichen Austausch und die Kooperation auf diesem Gebiet befördern. Inwieweit dies gelungen ist, wird die Zukunft zeigen.

Im vorliegenden Heft sind alle Vorträge dieses Workshops, die die Referenten uns freundlicherweise in schriftlicher Form zur Verfügung gestellt haben, inhaltlich unverändert und in der Reihenfolge ihrer Präsentation aufgeführt.



Volkhard Scholz

Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut

Drying of Wood Chips without external Energy

Joachim Brummack

Technische Universität Dresden
Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Professur für thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Arbeitsgruppe Umwelttechnik
01062 Dresden

Kurzfassung

Die Trocknung von Holzhackgut stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von Holz und holzhaltigen Materialien als nachwachsende Energieträger dar. Auf Grund des vergleichsweise geringen Energiegehaltes von Holz ist der Einsatz externer Energie für eine konventionelle Trocknung auf eine Abwärmenutzung beschränkt.

Das vorgeschlagene Trocknungsverfahren basiert auf der Nutzung der Holznebenbestandteile als Energiequelle für die Trocknung. Dies stellt kein Problem dar, da die Holznebenbestandteile in jedem Fall bei Liegenlassen eines Hackgutes biologisch abgebaut werden. Die Hauptbestandteile Zellulose und Lignin werden durch das Verfahren nicht angegriffen. Ein signifikanter Verlust an Trockenmasse wird durch das Verfahren gezielt vermieden, da kurze Trocknungszeiten die Entwicklung von Holzzerstörern verhindern.

Durch spezielle Vorrichtungen, die beim Errichten eines Hackguthaufwerkes eingebaut werden, wird eine konvektiv angetriebene Durchströmung hervorgerufen, so lange die Haufwerkstemperatur höher als die Umgebungstemperatur ist. Bis auf Lufteintritts- und Abluftaustrittsöffnungen kann das gesamte Haufwerk gas- und wasserdicht abgedeckt werden. Es entsteht ein unkonventioneller Trockungsreaktor.

Nach Abschluss des eigentlichen Trocknungsprozesses kann das Hackgut noch eine begrenzte Zeit ohne Qualitätsverluste gelagert werden. Diese logistische Option ist für einen Energieträger von großer Bedeutung.

Das Verfahren ist in sehr verschiedenen Varianten ausführbar, die von einfachen ortsunabhängigen Lösungen für Kleinverbraucher bis zu ortsfesten Anlagen für Großproduzenten reichen.

Das Verfahren weist unter allen bekannten Möglichkeiten einer gezielten Trocknung von Hackgut die geringsten Kosten auf.

Abstract

Drying of wood chips is an essential prerequisite for the use of wood and woody material as renewable energy sources. Due to the comparably low energy content of wood the use of extra energy sources for conventional drying is commonly restricted to waste heat.

The suggested novel drying method is based on using minor components of wood as an energy source for the drying process. This does not cause any problems, as minor components are biologically degraded while the bulk material is mounted on a pile. The major components cellulose and lignin will not be damaged by the process. A significant loss of dry matter can be avoided by the process since short drying periods prevent the developing of wood destroying microorganisms.

Special devices which have to be installed when mounting the pile evoke a convectively driven flow of air as long as the temperature within the pile is higher than the ambient temperature. Thus, the entire pile except for the air inlet and outlet aperture can be covered gas and water proof. This is the principle of a non-conventional drying reactor.

Having finished the proper drying process the wood chips can be stored for a limited time without quality losses. For an energy source this logistic option is of considerable relevance.

The procedure can be brought to application in various forms from simple not site-dependent (mobile) solutions for small consumers up to stationary installations for large-scale producers.

Among the known technologies for the targeted drying of chipped wood the novel procedure features the lowest costs.

1 Hackgut als nachwachsender Energieträger

Mit zunehmender Verknappung der fossilen Energieträger wächst unausweichlich die Bedeutung nachwachsender Rohstoffe. Dadurch werden sowohl die effektive Erschließung bisher nur sporadisch genutzter Ressourcenanteile aus dem gegenwärtigen Dargebot an Holz und holzigen Rohstoffen als auch eine Erweiterung der Rohstoffbasis interessant, die bei diesen Materialien auch ohne zwangsläufige Kollision mit der Nahrungsgüterproduktion möglich ist.

Durch die Einführung neuer Technologien zur Produktion von Zellstoff und Papier werden zunehmend energetisch genutzte Ressourcenanteile verstärkt nachgefragt und mit einer vergleichsweise hohen Wertschöpfung und daraus resultierenden Preisgestaltung versehen. In dem Maße, wie sich dieser Trend manifestiert, werden die Verbraucher, die das Material mit festen Subventionen gestützt energetisch nutzen, zunehmend unter wirtschaftlichen Druck geraten. Sie müssen auf Ressourcenanteile ausweichen, in der die erwähnte Konkurrenz für sie günstigere Bedingungen bietet. Solche Materialien sind Landschaftspflege- und Waldrestholz. Anfallbedingt können diese neben hohen Rinden- und Jungtriebanteilen einen vergleichsweise hohen Anteil an mineralischen Beimengungen mit den bekannten negativen Auswirkungen für eine thermische Nutzung aufweisen.

Mit Kurzumtriebsplantagen (KUP) auf stillgelegten landwirtschaftlichen und anderen Flächen lassen sich gezielt für eine energetische und/oder stoffliche Nutzung vorgesehene nachwachsende Rohstoffe erzeugen. In den seit Jahren zu KUP laufenden Untersuchungen und Experimenten sind bislang noch nicht alle Aspekte abschließend geklärt. Im Bereich der Rohstoffproduktion gibt es noch eine Vielzahl von offenen Fragestellungen in Bezug auf forsthygienische, ökonomische, ökologische und rechtliche Aspekte. Unerlässlich ist jedoch eine Betrachtung der gesamten zu schaffenden Nutzungskette vom Steckling bis zum Hackgutbunker des Brennstoffnutzers. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundforschungsvorhaben AGROWOOD hat sich genau dies zum Ziel gesetzt.

2 Wassergehalt von Holzhackgut

Betrachtet man die energetische Nutzungskette etwas detaillierter, so ist eine bisher bei Weitem nicht genügend beachtete, aber entscheidende Schwachstelle zu erkennen. Sie besteht in der Tatsache, dass in jedem Fall für eine energetische Nutzung, aber gegebenenfalls auch für eine stoffliche Nutzung, nur Material geeignet ist, das einen Wassergehalt von 20 Ma.-% und weniger aufweist. Im Anfallzustand besitzen Holz und holzige Materialien jedoch Wassergehalte von bis zu 60 Ma.-%. Aus thermodynamischer und emissionsseitiger Sicht ist dieses Material für eine energetische Nutzung völlig ungeeignet. Dazu kommt, dass nasses Hackgut nicht lagerfähig ist, was eine Nutzbarkeit als flexibel einsetzbaren Energieträger ebenfalls stark beeinträchtigt.

Es wurden zwar Verbrennungsanlagen entwickelt, die auch mit Brennstoffen, die Wassergehalte von bis zu 45 Ma.-% aufweisen, betrieben werden können. Solche Anlagen sind aber wegen ihres geringen energetischen Wirkungsgrades eher als Rohstoffvernichtungsanlagen, denn als Energieerzeugungsanlagen zu bezeichnen. Am besten kann dieses Problem an dem Zusammenhang zwischen Heizwert (H) und Wassergehalt (WG) in Gleichung 1 erläutert werden.

$$\text{Gleichung 1: } H = \left[(1 - WG) * H_{TS} - WG * \Delta H_V \right]$$

In Gleichung 1 bedeuten:

H: Heizwert (früher H_u , unterer Heizwert)

WG: Wassergehalt (Masseanteil Wasser an Gesamtmasse)

H_{TS} : Heizwert der wasserfreien Trockensubstanz (materialabhängig)

ΔH_V : Verdampfungsenthalpie Wasser bei 100°C

Für eine wissenschaftlich exakte Darstellung müssten unter anderem auch noch die gegenüber Wasser geringeren Verdampfungsenthalpien flüchtiger Holznebenstoffe berücksichtigt werden. Dies ist nur möglich, wenn die genaue Zusammensetzung bekannt ist. Dazu kommt, dass selbst der Heizwert eines konkreten trockenen Rohstoffs Holz natürlichen Schwankungen unterliegt. Da man davon ausgehen kann, dass die genannten Einflüsse sich nicht signifikant auf das Ergebnis auswirken, wird darauf verzichtet.

Die entscheidende Aussage ist, dass als Heizwert eines realen Energieträgers Holz nur die Differenz zwischen dem Heizwert des trockenen Materials und der für die Verdampfung des enthaltenen Wassers benötigten Energie zur Verfügung steht. Auf Grund der relativ hohen Verdampfungsenthalpie von Wasser von $\Delta H_V = 2,26 \text{ MJ/kg}$ bei 100°C ergeben sich für ein praxisrelevantes Beispiel für den Anfallzustand eines Materials mit $WG = 50 \text{ Ma.-%}$; $H_{TS} = 16 \text{ MJ/kg}$ für Pappelholzhackgut (Annahme) mit Gleichung 1 folgende Verhältnisse:

$$H_{WG50} = \left[(1 - 0,5) * 16 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} - 0,5 * 2,26 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] = 6,87 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Die Verbrennung von Pappelholz mit einem Wassergehalt von 50 Ma.-% würde nur rund 43% der maximal möglichen Wärmeenergie freisetzen können. Geht man dann von günstigen Bedingungen nach der Ernte aus, kann sich durch die spontan ablaufenden Prozesse im Hackgut etwa bei einer Zwischenspeicherung unter Dach der Wassergehalt auf durchschnittlich 35 Ma.-% gesenkt werden. Auch hierbei könnten nur etwa 60% des maximalen Heizwertes genutzt werden. Der Heizwert stellt zwar den zentralen Aspekt für eine energetische Nutzung dar, der Einfluss des Wassergehaltes auf die Lager- und Transportfähigkeit ist jedoch ebenso zu berücksichtigen.

3 Bekannte Trocknungsverfahren für Holzhackgut

3.1 Trocknung mit Fremdenergie

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Zusammenhänge zwischen dem Wassergehalt und den sich daraus ergebenden nutzungsrelevanten Eigenschaften sind sicher unstrittig. Problematisch wird es jedoch, wenn es um die eigentliche Trocknung des Hackgutes geht. Die wenigen in Abschnitt 1 genannten Fakten belegen bereits, dass nur ein sehr geringer technologischer Spielraum für die Integration einer Trocknung in die Nutzungskette besteht. Zum einen sind es die bereits erwähnten geringen Wertschöpfungspotenziale, die den ökonomischen und damit auch den apparativen Mehraufwand in engen Grenzen halten. Zum anderen besitzt Holz einen vergleichsweise geringen Energiegehalt. Jeder zusätzliche Energie- und Materialaufwand schwächt die Habenseite einer Ökobilanz signifikant. Die negativen Erfahrungen mit der hochtechnisierten und energieintensiven Bioabfallkompostierung sollten hier Lehre genug sein.

Bis auf wenige sinnvolle Ausnahmen werden damit die bekannten Technologien bzw. Apparate für eine thermische Schüttgutrocknung wie z. B. Band- und Trommelrockner für eine massenweise Hackgutrocknung nicht in Frage kommen. Der apparative Aufwand solcher stationären Einrichtungen ist in jedem Fall hoch, als Fremdenergie für die Trocknung wäre bestenfalls sonst nicht nutzbare Abwärme akzeptabel. Aus diesen grundsätzlichen Überlegungen heraus kann somit auf eine weitere Betrachtung verzichtet werden.

3.2 Natürliche Trocknung

Große Bedeutung haben gegenwärtig die als natürliche Trocknung bezeichneten Verfahren soweit man diese überhaupt als Verfahren im technologischen Sinn bezeichnen kann, da im Wesentlichen versucht wird, spontane Prozesse zu nutzen. Zu diesen begrifflich oft als Hackgutlagerung und -trocknung bezeichneten Vorgehensweisen ist grundsätzlich festzustellen, dass diese wegen ihrer außerordentlichen Empfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen als generelle Lösung für die Schließung der Nutzungskette nicht geeignet sind. Um dies zu konkretisieren, ist es erforderlich, die bei einer Trocknung durch einfaches „Liegenlassen“ ablaufenden Prozesse etwas genauer zu betrachten.

Zur Vermeidung von Missverständnissen sind für die Erläuterung der spontan ablaufenden Prozesse in einem Hackguthaufwerk die vorliegenden Randbedingungen zu berücksichtigen. Einerseits wird frisch gehacktes Material im Sommer bei hohen Temperaturen, geringer Luftfeuchtigkeit und gehendem Wind in kleinen Haufen unter Dach abgelagert. In einem solchen Fall kann man tatsächlich von einer Trocknung mit Hilfe natürlicher Triebkräfte sprechen. Für Material aus KUP sieht dies jedoch völlig anders aus. Der Erntezeitpunkt liegt vor dem Einsetzen der Vegetationsphase. Geerntet wird ein feuchtes bis nasses, nicht lagerfähiges Material in einer kalten Jahreszeit. Hier liegen in der Regel Witterungsbedingungen vor, die extrem ungünstig für eine Trocknung mit Hilfe natürlicher

Triebkräfte sind. An Hand dieses Beispielen soll erläutert werden, welche Prozesse dann in einem Haufwerk unvermeidbar ablaufen.

Bild 1 zeigt die Phänomene an Hand von 4 Phasen, die in einem Haufwerk aus frisch geerntetem Hackgut ablaufen. Um die Darstellung zu vereinfachen, werden Wind- und Niederschlagseinfluss, die sich zusätzlich negativ auswirken würden, nicht betrachtet.

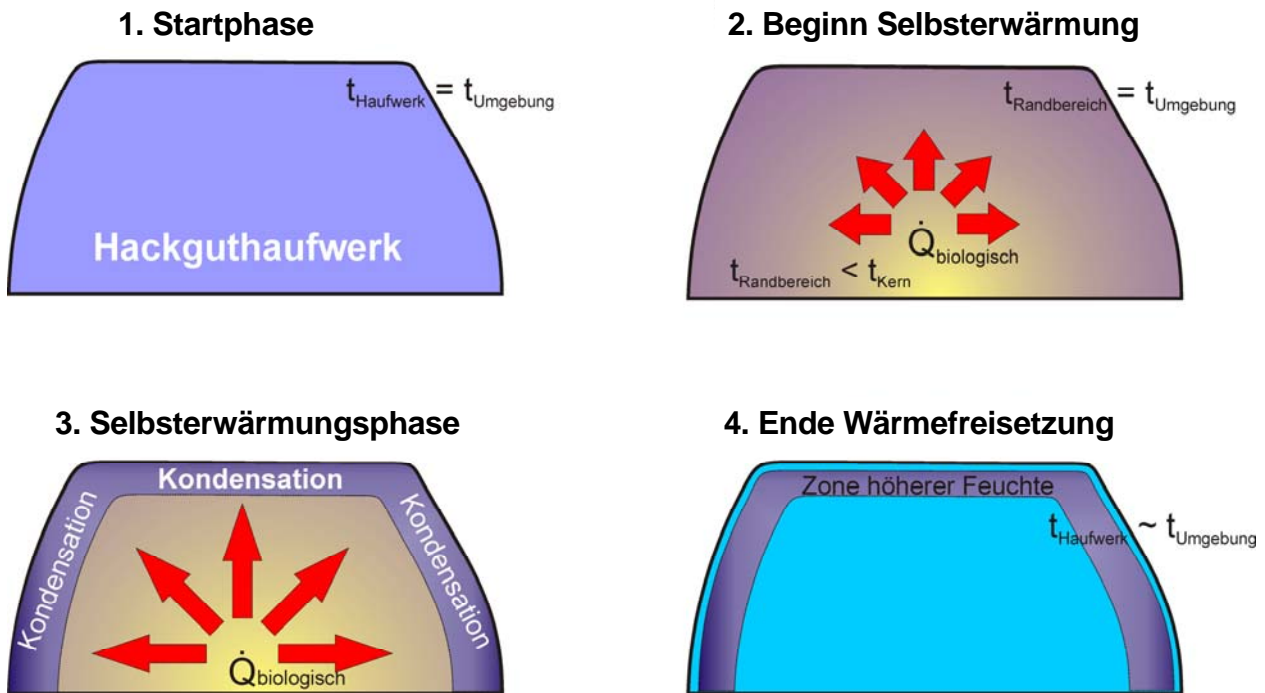


Bild 1: Phänomene in einem Hackguthaufwerk (stark vereinfachte Darstellung)

Bei Errichtung des Haufwerkes entspricht die Haufwerkstemperatur der Umgebungstemperatur (1. Startphase). Bereits nach wenigen Stunden wird sich durch die Restatmung der Parenchymzellen das Haufwerk von Kern her erwärmen (2. Beginn der Selbsterwärmung). Die Randbereiche behalten auf Grund der Wärmeverluste zunächst noch Umgebungstemperatur. Die Erwärmung im Haufwerkskern führt zu einer Veränderung der Luft-eigenschaften Dichte und Wasseraufnahmevermögen der Porenluft. Die durch die Restatmung verursachte Erwärmung des Haufwerkes bietet hervorragende Startbedingungen für den biochemischen Abbau von Holznebenstoffen durch Bakterien. Damit manifestiert sich die Selbsterwärmung (3. Selbsterwärmungsphase). Temperaturen im Haufwerksinneren von mehr als 60°C sind als normal anzusehen. Mit der verstärkten und länger andauernden Wärmeproduktion baut sich im Haufwerk eine Durchströmung auf. Im Bodenbereich tritt kalte und schwere Umgebungsluft in das Haufwerk ein und verdrängt die wärmere Porenluft. Dabei gibt diese wassergesättigte Porenluft beim Kontakt mit den kälteren Randbereichen Wasser durch Kondensation wieder ab. Nach entsprechend langer Zeit (4. Ende der Wärmefreisetzung) bleibt ein Haufwerk zurück, das über eine ausgeprägte

„nasse Hülle“ verfügt und in dem zumindest lokal „günstige“ Bedingungen für eine unerwünschte Entwicklung von Holzzerstörern vorliegen.

Das Fazit dieser einfachen Betrachtungen ist, dass eine natürliche Trocknung nur unter sehr günstigen Witterungsbedingungen erfolgen kann. Besonders problematisch ist, dass die gesamte Haufwerksoberfläche offen, also unabgedeckt sein muss. Niederschlag kann in dem Fall nur durch eine Überdachung ferngehalten werden. Insbesondere bei großen Durchsätzen ist dies ein ökonomisches Problem. Die auf dem Markt angebotenen Fliesmaterialien stellen bestenfalls einen Kompromiss dar. Sie sind relativ teuer, setzen einem Stofftransport nach außen einen erheblichen Widerstand entgegen, sind nicht vollständig regendicht und nur eine begrenzte Zeit nutzbar.

Soll Holzhackgut von einem eher alternativen Brennstoff mit allen Konsequenzen zu einem festen Bestandteil des Energieträgermixes werden, muss ein Produzent immer in der Lage sein, Lieferzeitpunkt, Qualität und Menge einzuhalten. Eine natürliche Trocknung ist dafür definitiv ungeeignet.

4 Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut

4.1 Beschreibung des Wirkprinzips

Am Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik wird seit Mitte der 1990er Jahre auf dem Gebiet der Massenbiotechnologie gearbeitet. Darunter sollen biotechnologische Verfahren verstanden werden, mit denen große Materialmengen mit Hilfe von allgegenwärtigen Mikroorganismenpopulationen behandelt werden. Bekannte Beispiele sind die biologische Behandlung von Abfällen und Abwasser sowie die Biogaserzeugung. Anders als bei der „klassischen“ Biotechnologie spielen hier Transport- und Übertragungsprozesse für Stoffe und Wärme im Makrobereich eine entscheidende Rolle. Durch ihre gezielte Gestaltung werden die komplexen biochemischen Umsetzungsprozesse je nach angestrebtem Prozessziel beeinflusst und gesteuert.

Ein für die Praxis bedeutsames Forschungsergebnis war das als Dombelüftung bezeichnete Verfahren, mit dem es erstmals großtechnisch möglich wurde, biochemisch freiwerdende Wärme für eine effektive Belüftung von Haufwerken zu nutzen. Neben der Entwicklung des eigentlichen Wirkprinzips waren umfangreiche Untersuchungen zu Stoff- und Wärmefreisetzungsprozessen erforderlich, um für den jeweiligen Anwendungszweck eine optimale Dimensionierung zu ermöglichen.

Im Folgenden soll das auf einer Modifizierung der Dombelüftung beruhende Trocknungsverfahren für Biomassen, hier speziell für die Hackguttrocknung, beschrieben werden. Das Wirkprinzip ist in **Bild 2** dargestellt.

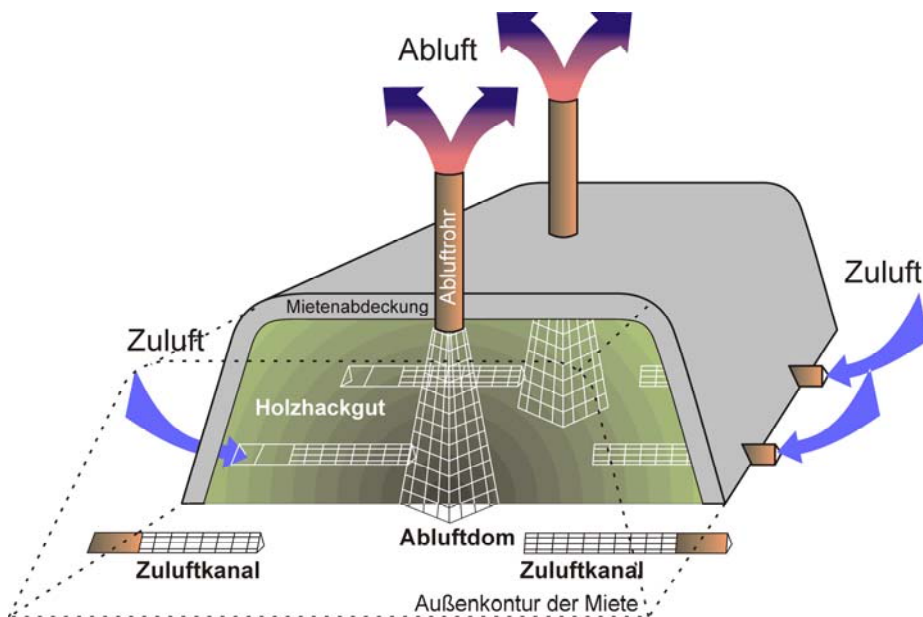


Bild 2: Wirkprinzip des Hackguttrocknungsverfahrens

Das Trocknungsverfahren nutzt für die Belüftung effektiv die bei einem aeroben biologischen Prozess freiwerdende Wärme und arbeitet somit ohne externe Energie. Lediglich zwei apparative Vorrichtungen (Systemkomponenten) sind für die Umsetzung des Wirkprinzips erforderlich:

- a) Abluftdom + Abluftrohr (kurz: Dom)
- b) Zuluftkanal (kurz: Kanal)

Der Grundgedanke besteht darin, die durch eine Wärmefreisetzung verursachte Druckdifferenz zwischen Haufwerksinnerem und Umgebung zur definierten Durchströmung und damit zur Belüftung auszunutzen. Erreicht wird dies durch die Schaffung von Hohlräumen in bestimmten Abständen auf der Haufwerkslängsachse durch den Einbau der Dome. Die Austauschflächen dieser Abluftdome bestehen aus grobschichtigen Gittern, die das Eindringen von Material in den Gasraum verhindern, einer Durchströmung jedoch keinen zusätzlichen Widerstand entgegensetzen. Die Abluft kann somit ungehindert aus dem Haufwerk in die Hohlräume eintreten. Auf die Abluftdome aufgesetzte Abluftrohre ermöglichen eine Entkopplung der verfügbaren Triebkraft von der Mietenhöhe und führen dadurch zu einer Erhöhung des Auftriebes. Die Zuführung von Frischluft erfolgt durch jeweils zwischen den Abluftdome in den Haufwerksfuß eingebaute und nach außen offene Zuluftkanäle. Eine Funktionseinheit des Verfahrens, bestehend aus einem Dom und den dazugehörigen Kanälen bzw. Zuluftöffnungen, kann beliebig oft aneinander gereiht werden, d.h. die Länge einer solchen Trockenmiete kann sehr genau an die vorliegenden Platzverhältnisse angepasst werden.

Durch die Anordnung der Systemkomponenten im Haufwerk wird folgender kontinuierlicher Durchströmungsprozess hervorgerufen:

- a) Bei Prozessbeginn sammelt sich warme Luft in den Abluftdomen.
- b) Durch die Kanäle liegt in der Haufwerksbasis sauerstoffreiche kalte Frischluft an.
- c) Zwischen Mietenbasis und Austrittsfläche des Abluftrohres bildet sich damit eine Dichtedifferenz aus, die einen Druckunterschied zur Folge hat. Dieser Druckunterschied wird so lange aufrecht erhalten wie Wärme durch die biologischen Prozesse freigesetzt wird.
- d) Der Druckunterschied verursacht eine kontinuierliche Luftströmung durch das Haufwerk. Kalte frische Umgebungsluft tritt ein, verdrängt dabei die warme Abluft und versorgt zugleich das Material mit Sauerstoff.
- e) Innerhalb bestimmter Grenzen regelt sich die Durchströmung in Abhängigkeit von der jeweils freigesetzten Wärmemenge. Dies kann für eine Trocknung günstig genutzt werden, da hiermit eine hohe Beladung der Abluft mit Wasser und damit ein schneller Trockenprozess erreicht werden kann.

Die Anordnung der Systemkomponenten und der Aufbau des Mietenkörpers beim Dombelüftungsverfahren sind in **Bild 2** dargestellt. Gleichung 2, die als Kamin- oder Schornsteingleichung bekannt ist, beschreibt die Abhängigkeit der triebkraftwirksamen Druckdifferenz Δp von der temperaturbedingten Dichtedifferenz zwischen der Abluft und der Umgebung sowie dem effektiven Höhenunterschied zwischen Frischlufteintritt und Abluftaustritt.

Gleichung 2:
$$\Delta p = \left[\rho(T_{\text{Umgebung}}) - \rho(T_{\text{Abluft}}) \right] * g * (H_{\text{Abluft}} - H_0)$$

Der durch die Druckdifferenz Δp tatsächlich hervorgerufene Gasstrom hängt vom Druckverlust ab, den die Materialschüttung einer Durchströmung entgegensetzt. Dieser kann entweder experimentell mittels einer speziellen Durchströmsäule am Material vorab oder indirekt in einem Feldversuch bestimmt werden. Der Wind hat ebenfalls einen Einfluss auf den Strömungsprozess. Bei Überströmung der Abluftrohre ab etwa 2 m/s entsteht dadurch eine zusätzliche Triebkraft. Die ausführliche theoretische Darstellung sowie die dabei entwickelten Berechnungsmethoden sind in (PAAR 2000) enthalten.

Das oben beschriebene Belüftungsverfahren wandelt das Haufwerk quasi in einen Festbettreaktor um. Damit dieser optimal arbeiten kann, muss er bis auf die für seine Funktion erforderlichen Gasein- und -austrittsöffnungen von der Umgebung durch eine gasdichte Abdeckung der gesamten freien Haufwerksoberfläche abgegrenzt werden. Eine solche Abdeckung, die einer Einhausung entspricht, unterscheidet das vorgeschlagene Trocknungsverfahren grundsätzlich von den bekannten natürlichen Trocknungsverfahren. Bei den natürlichen Verfahren muss die gesamte Oberfläche „offen“ bleiben (siehe **Bild 1**), da sie für den Feuchteaustritt benötigt wird.

Bild 3 fasst die wesentlichen Vorteile des entwickelten Trocknungsverfahrens zusammen.

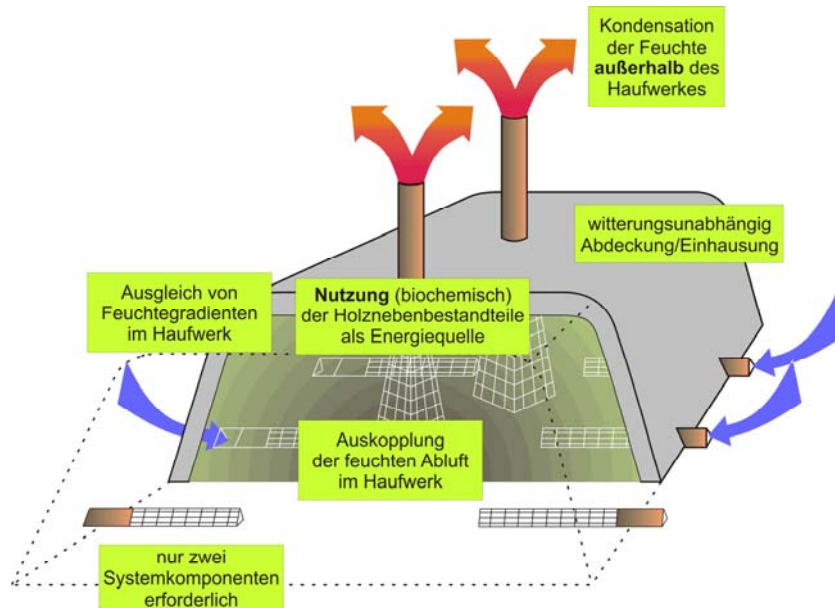


Bild 3: Vorteile des fremdenergiefreien Trocknungsverfahrens

4.2 Ausführungsvarianten

Das unter 4.1 beschriebene Wirkprinzip lässt sich auf sehr unterschiedliche Art und Weise in die Praxis umsetzen. So kann bei einem Kleinanwender, der ausschließlich Hackgut für den Eigenbedarf trocknet, eine völlig ortsunabhängige Variante gewählt werden. Das Haufwerk wird auf einer stauwasserfreien Fläche u. U. direkt mit dem Hacker errichtet und dicht mit einer Folie abgedeckt, deren windsichere Fixierung zur Vermeidung von Niederschlagswassereintritt zu beachten ist. Das **Bild 4** zeigt eine solche Trockenmiete.



Bild 4: einfache Trockenmiete (Foto: Bock 2007)

Erkennbar ist, dass eine dichte Abdeckung bei dieser Ausführung Probleme bereiten kann. Dies liegt vor allem daran, dass im Bereich der Zuluftkanäle die Abdeckung nicht

dicht anliegt und die Fixierung der Abdeckung am Boden Probleme bereitet. Trotzdem kann bei sorgfältiger Ausführung eine erfolgreiche Trocknung garantiert werden.

Bild 5 zeigt eine semistationäre Ausführung der Miete bei der Fa. Diecke, Kölsa.



Bild 5: semistationäre Trockenmiete

Im Unterschied zur einfachen Miete werden hier durch Stützwände im Bereich der Haufwerksbasis und Konturierung des oberen Teils durch Kanthölzer neben einer für den Aufbau nützlichen Vorgabe von Länge und Breite sowie den Positionen der Lüftungselemente eine fachgerechte Fixierung der Abdeckung sowie eine sichere Ableitung von Niederschlagswasser möglich.

Auf Grund der relativ hohen mechanischen Stabilität von Hackgutschüttungen können bei entsprechendem Materialbedarf auch sehr große Trockenmieten errichtet und betrieben werden. Die in **Bild 6** während des Aufbaus dargestellte Versuchstrockenmiete diente der Vortrocknung von Hackgut vor dem Stromtrockner eines Spanplattenwerkes. Die Mietenhöhe betrug 10 m. Das Aufsetzen erfolgte in zwei Schichten durch große Radlader. Zuerst wurde die untere Schicht der Trockenmiete entsprechend der Arbeitshöhe der Radlader errichtet. Diese wurde in einem zweiten Schritt dazu benutzt, die nächste Schicht zu errichten. Das vielfache Überfahren der unteren Schicht führte zu keinen negativen Folgen für die Trocknung. Die Abluftdome wurden aus Fertigungsgründen in drei Teilen hergestellt und vor Ort zusammengefügt.



Bild 6: Versuchsmiete Vortrocknung, Schütten der zweiten Schicht

Bild 7 zeigt die fertige Trockenmiete. Die Rundholzstapel wurden als Provisorium für Stützwände genutzt. Bei einer Mietenhöhe von mehr als 5 m kann wegen der sonst zu breiten Mietenbasis verbunden mit unzulässig langen Strömungswegen das Haufwerk nicht mehr im freien Schüttwinkel errichtet werden.



Bild 7: Versuchsmiete zur Hackgutvortrocknung



Bild 8: Einbau der Trockenmiete in eine Lagerhalle

Bild 8 zeigt abschließend eine weitere für die betriebliche Praxis interessante Ausführungsvariante. Die Trockenmiete wird hier in eine vorhandene Lagerhalle eingebaut. Eine Besonderheit dabei war, dass an der Bausubstanz keine Veränderungen vorgenommen werden sollten. Das Bild zeigt eine Phase aus dem Aufbau der Miete. Im Hintergrund ist eine abgedichtete Holzkonstruktion zu erkennen, die der Frischluftzufuhr von außerhalb der Halle dient. Um den notwendigen Überdruck am Mietenfuß zu erreichen, wurde in diesem Fall ein Stützgebläse eingesetzt.

Die kurzen Darstellungen zu den verschiedenen Ausführungsvarianten lassen bereits deutlich erkennen, dass sich das entwickelte Wirkprinzip sehr flexibel an vorhandene Standortbedingungen (Durchsatz, Kostenspielraum, Betriebssicherheit, vorhandene Gebäude usw.) anpassen lässt.

5 Versuchsergebnisse

In der gegenwärtigen Entwicklungsphase des Trocknungsverfahrens spielt der Feldversuch eine entscheidende Rolle. Als eine Besonderheit des Verfahrens ermöglicht er Tests im großtechnischen Maßstab unter Einbeziehung aller Einflussfaktoren. Dies macht eine meist mit Kompromissen verbundene Maßstabsübertragung von vornherein überflüssig. Ein interessierter Anwender kann mit minimiertem Aufwand, d.h. mit in der Regel 3 Funktionsbereichen das Verfahren unter seinen konkreten Standortbedingungen (Flächen, Technik, Personal) und Materialqualitäten einsetzen. Hinzu kommt, dass bereits die für den potenziellen Anwender optimale Ausführungsvariante genutzt werden kann. Daneben sind an den im Institut vorhandenen Anlagen Voruntersuchungen am Material hinsichtlich haufwerkstechnischer und biochemischer Parameter möglich. Dies ermöglicht vor allem bei Materialien, die bisher im Feldversuch noch nicht untersucht werden konnten, eine Reduzierung des Risikos.

Als problematisch erweist sich die wissenschaftliche Begleitung der Feldversuche zur Trocknung. Der dafür erforderliche personelle Aufwand ist nicht unerheblich, da eine Reihe von Parametern nicht kontinuierlich gemessen werden können. Dies trifft z.B. auf die Abluftzusammensetzung und auf die Ermittlung des Abluftstromes zu. Aus diesem Grund konnten für die meisten der durchgeführten Tests nur sporadisch Messwerte ermittelt werden. So sind die Verfahrensentwickler gegenwärtig daran interessiert, mit Partnern zusammenzuarbeiten, die eine kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung von Versuchen ermöglichen können. Ziel hierbei ist es vor allem, für die unterschiedlichen Inputmaterialien (Holzart und -zustand, Zerkleinerung) Daten zur Trocknungszeit und zum Verhalten bei der anschließenden Lagerung zu gewinnen.

Das Diagramm (**Bild 9**) zeigt einen Temperaturverlauf einer Trockenmiete, die im Rahmen des AGROWOOD-Projektes untersucht wurde.

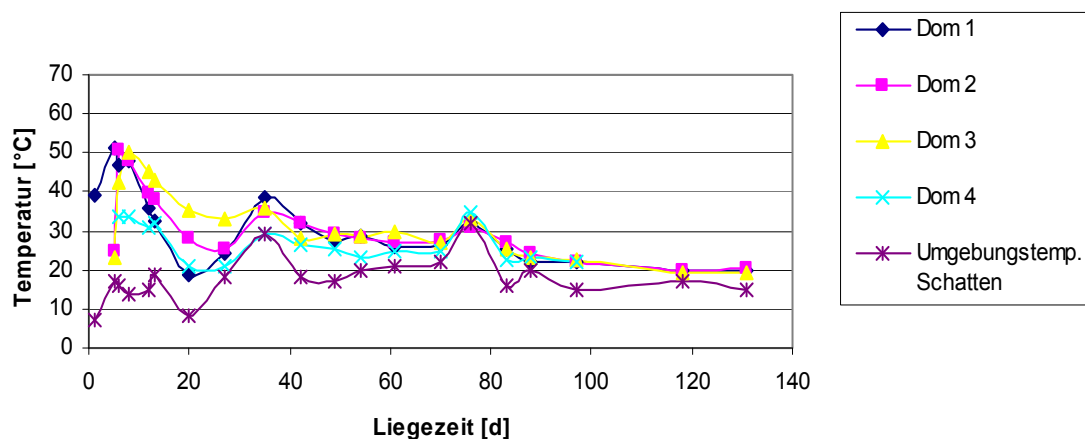


Bild 9: Temperaturverlauf in einer Trockenmiete

Gut erkennbar ist, dass sich die Temperaturen im betrachteten Beispiel nach ca. 100 Tagen der Umgebungstemperatur, wie zu erwarten ist, annähern. Damit ist im Wesentlichen die gesamte im Haufwerk gespeicherte Wärme „verbraucht“.

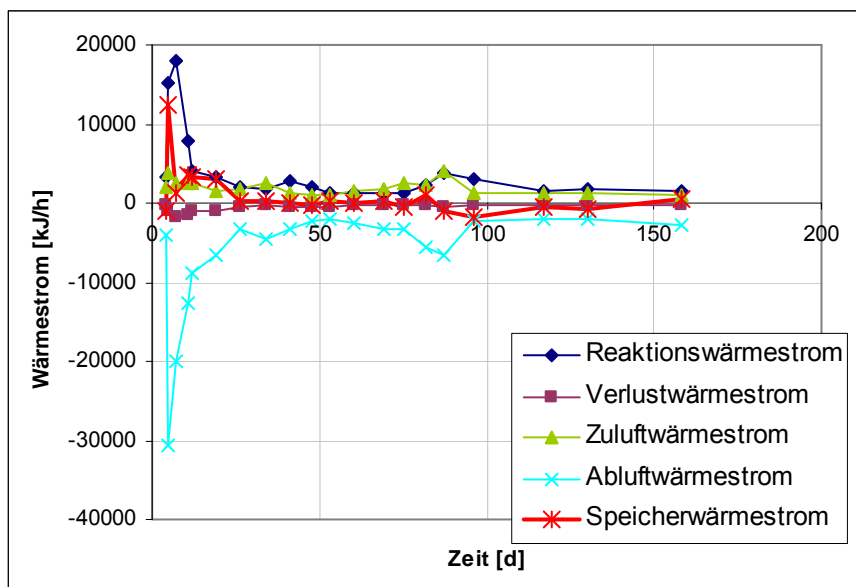


Bild 10: Wärmebilanz einer Trockenmiete (JAGIELA 2007)

Bild 10 zeigt die Wärmebilanz der gleichen Miete (**Bild 9**). Auch, wenn hierfür eine ganze Reihe noch zu präzisierender Annahmen verwendet werden musste, kann mit einer solchen Darstellung prinzipiell die Funktion gut erläutert werden. Der Wassergehalt konnte in dieser Versuchsmiete von 45 Ma.-% auf 25 Ma.-% gesenkt werden. Allerdings musste diese Miete unter relativ ungünstigen Bedingungen betrieben werden, so dass die hier benötigte Trockenzeit von mehr als 100 Tagen nicht dem Normalfall entspricht. Dies wird bereits im **Bild 9** erkennbar. Die erreichten Maximaltemperaturen liegen nach Überschreiten eines kurzzeitigen Maximums nach etwa 5 Tagen im Bereich zwischen 20 und 40°C. Die bei diesen Temperaturen transportierbare Wassermenge (Sättigungswassergehalt der Luft) ist gering. Die Ursachen lagen in überdurchschnittlich großen Wärmeverlusten. Wegen einer unzureichenden Abdeckung der Miete konnte Wind in das Haufwerk eindringen und führte dabei gleichzeitig zu einer unerwünschten Kondensation von Feuchte im Haufwerk durch Abkühlung der warmen Mietenluft. Derartige Beeinträchtigungen sind in einer Trockenmiete, wie sie in **Bild 5** dargestellt ist, mit Sicherheit auszuschließen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Trockenzeit bei unverzüglichem Einbau von frisch gehacktem Material und regelgerechter Bauausführung der Miete bei maximal 4 bis 6 Wochen liegt.

6 Kosten des Verfahrens

Eine ausreichend genaue Bestimmung der direkt dem Trocknungsverfahren zuzurechnenden Kosten ist nur möglich, wenn alle Randbedingungen bekannt sind. Die unter 4.2 angegebenen Ausführungsvarianten zeigen deutlich, mit welchem unterschiedlichem Aufwand und damit auch Kosten das Verfahren umgesetzt werden kann. Der Verfahrensentwickler

hat dazu ein internes Material entwickelt, mit dem entsprechend des aktuellen Entwicklungsstandes des Verfahrens für einen potenziellen Anwender nach dessen Vorgaben eine Kostenberechnung erfolgen kann. Nach Vorliegen ausreichender Erfahrungen wird dieses Material veröffentlicht. Die bisher untersuchten Einsatzfälle haben gezeigt, dass die verfahrensbedingten Kosten für eine einfache Trockenmiete bei etwa 4 €/ (t a) beginnen. Allerdings ist das auch nicht exakt, denn die Belüftungselemente, die die anteilig größten Kosten bei der Erstnutzung des Verfahrens verursachen, lassen sich über viele Jahre hinweg immer wieder einsetzen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgeschlagene Trocknungsverfahren weist eine Reihe von ökologischen und ökonomischen Vorteilen auf, die es für die Schließung der Nutzungskette Energieholz aus Hackgut, als zukunftsfähig ausweist. Es genügt sowohl den zunehmenden Tendenzen einer sinnvollen Dezentralisierung der Versorgung mit Energieträgern aus nachwachsenden Rohstoffen als auch dem Anspruch einer energie- und materialsparenden Technologie.

Ziele zukünftiger Untersuchungen bestehen vor allem in einer Ausweitung der Untersuchungen auf weitere wichtige Ressourcenanteile sowie auf potenzielle Nutzer mit großem Energieträgerbedarf wie Biomasseheizkraftwerke. Im Zusammenhang mit ausgesprochenen Großabnehmern kann auch die Frage einer optimierten Prozessführung durch eine rechnergesteuerte Belüftung bearbeitet werden.

8 Literatur

JAGIELA N. (2007): Energieholztrocknung mit dem Dombelüftungsverfahren. Diplomarbeit TU Dresden

PAAR S. (2000): Das Dombelüftungsverfahren. Ein Verfahren zur Belüftung offener Rottemieten unter Nutzung des thermischen Auftriebs. Dissertation. Dresdner Forschungen: Maschinenwesen; Bd. 6. Dresden: w.e.b. ISBN 3-933592-80-1

Aspekte zum Einfluss der Lagerung und Trocknung von Holzhackschnitzeln auf den Betrieb von Energieanlagen

Aspects of the influence of storage and drying of wood chips to the operation of power plants

Maik Orth¹, Norbert Kanswohl²

¹ Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.v.
Bützower Str. 1a
18239 Hohen Luckow
E-Mail: ibz@ibz-hl.de

² Institut für Nutztierwissenschaften und Technologie
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock
Justus von Liebig Weg 8
18059 Rostock
E-Mail: norbert.kanswohl@uni-rostock.de

Kurzfassung

Die Aufbereitung und Bereitstellung von Holzhackschnitzeln haben eine große Bedeutung für den wirtschaftlichen Betrieb von Bioenergieanlagen. Für die energetische Nutzung ist generell der Energiegehalt der Biomasse max. auszunutzen und möglichst wenig Energie und Kraftstoff für die Bereitstellung aufzuwenden. Der Beitrag zeigt beispielhaft mögliche Potentiale zur Optimierung der Biomassebereitstellung für eine energetische Nutzung auf. Dargestellt werden unterschiedliche Varianten der Lagerung und Trocknung.

Abstract

The preparation and delivery of wood chips have a great significance for the economics of bioenergy plants. For the energetic use the energy content of the wood chips is to be used maximally. The expenditure for energy and fuel is to be minimized. The article shows possible potentials for the optimization of the biomass preparation for an energetic use. Different variants of the storage and drying are represented.

1 Zielstellung bei der Bereitstellung von Biomasse für die energetische Nutzung

Die Biomasse hat den Vorteil, dass sie der einzige erneuerbare Energieträger ist, der in den drei Bereichen der Wärme-, Strom- und Kraftstofferzeugung einzusetzen ist und dann Nutzenergie erzeugen kann, wenn sie gebraucht wird. Da die Ressourcen begrenzt sind (ökologisch gesetzte Grenzen Wald, verfügbare Anbaufläche), besteht eine zunehmend große Konkurrenz um den verfügbaren Energieträger. Außerdem ist eine stoffliche Nutzung z.B. in Baustoffen und Fasern oder in der chemischen Industrie möglich. Die Flächenkonkurrenz wird noch verschärft, wenn landwirtschaftlich zur Nahrungsmittelproduktion einsetzbare Flächen zum Anbau von Bioenergieträgern genutzt werden.

Wo der beste Nutzen der verfügbaren Biomasse ist, kann nach verschiedenen Kriterien bewertet werden. **Bild 1** zeigt beispielsweise einen Vergleich der beiden Verwertungswege „Verbrennung“ und „Vergärung“ bezüglich der maximal möglichen Energieausbeute aus der Biomasse in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt.

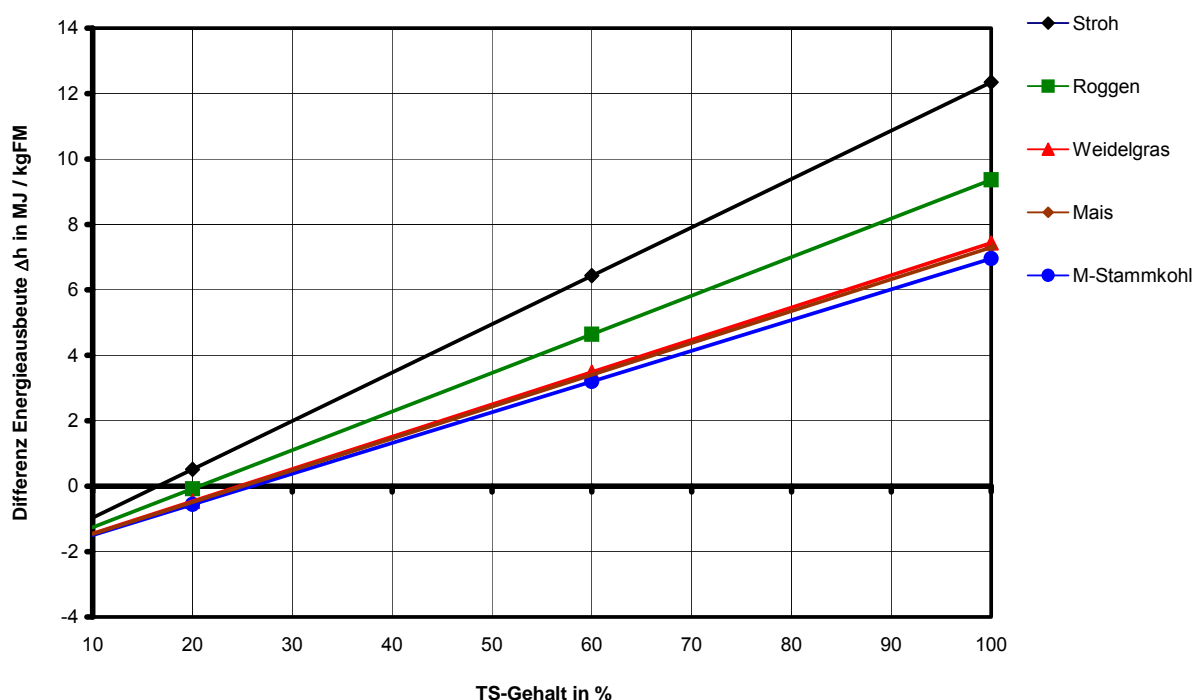


Bild 1: Vergleich der Energieausbeute bei der „Verbrennung“ und „Vergärung“ in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt (ORTH 2004)

Ein anderes Entscheidungskriterium zur Bevorzugung eines energetischen Verwertungsweges der Biomasse ist die Einordnung der energetischen Nutzung unter dem Gesichtspunkt der Mehrkosten und der Treibhausgasminde rung gegenüber fossilen Referenztechnologien (z.B. Strom aus fossilem Kraftwerkspark, Öl bzw. Gastherme, fossile Kraftstoffe) (ARNOLD 2006).

Unabhängig vom Verwertungsweg lassen sich folgende Zielstellungen bei der Nutzung von Biomasse für eine energetische Nutzung zusammenfassen:

1. max. Energieertrages pro Fläche
2. min. Energie- und Kraftstoffaufwand für die Bereitstellung der Biomasse
3. max. Ausnutzung des Energiegehaltes der Biomasse.

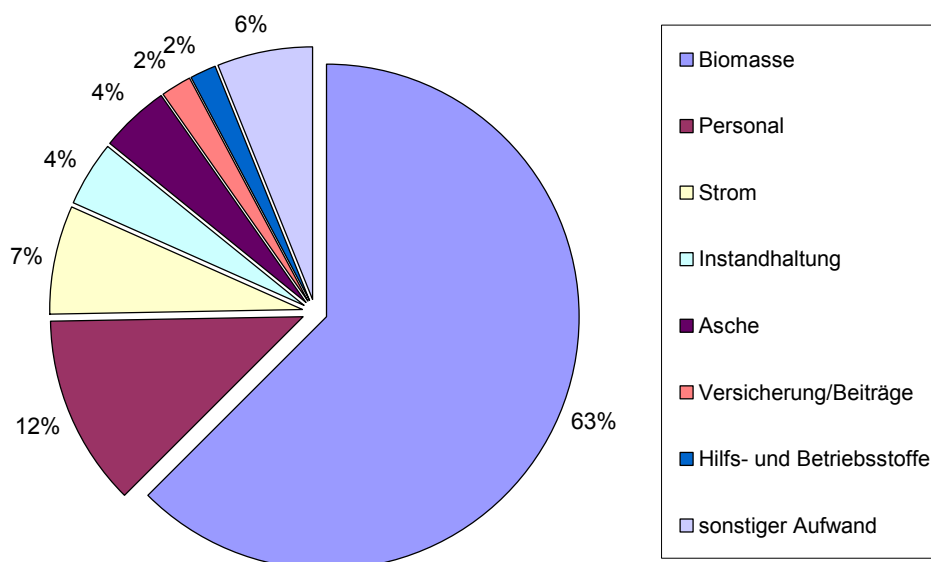


Bild 2: Kostenverteilung bei der energetischen Nutzung von Holz hackschnitzeln am Beispiel des BmHKW Demmin (ZIELONKA 2006)

Während der Energieertrag pro Fläche insbesondere abhängig von der Pflanzenauswahl und der Anbaumethode sind die anderen Punkte über die Organisation der Biomassebereitstellung zu beeinflussen. Die Bedeutung wird in **Bild 2** am Beispiel des BmHKW Demmin deutlich, bei dem für die Biomassebereitstellung 63% der Kosten anfielen (ZIELONKA 2006). Die folgenden Ausführungen gehen auf mögliche Potentiometer zur Optimierung der Bereitstellungskette ein.

2 Organisationsformen und Randbedingungen bei der Bereitstellung von Holz hackschnitzeln

Bild 3 stellt die möglichen Organisationsformen der Biomassebereitstellung dar. In der Praxis treten in Abhängigkeit von der Anlagengröße Mischformen der Organisation auf.

Betrachtet werden im Weiteren die Organisationsformen mit der Biomasseaufbereitung beim Biomasseerzeuger sowie bei der Bioenergieanlage. Dabei wird unterschieden zwischen den Varianten der Lagerung von feinen und groben Holz hackschnitzeln sowie dem Einsatz der technischen Trocknung. Zur Darstellung der Auswirkung der unterschiedlichen Varianten auf die Holz hackschnitzelbereitstellung sind verschiedene Randbedingungen zu definieren. Dies betrifft die Trockenmasseverluste und die Änderung des Wassergehaltes

bei der Lagerung und Trocknung sowie der Heizenergiebedarf bei der technischen Trocknung.

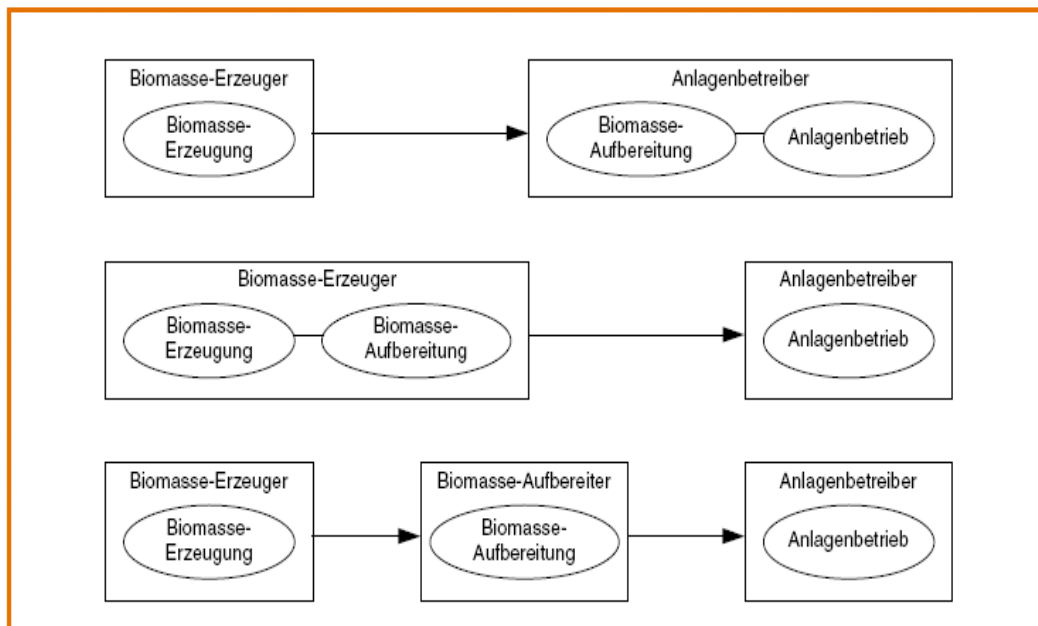


Bild 3: Organisationsformen der Biomassebereitstellung (FNR 2006)

Die folgende **Tabelle 1** stellt als ein Beispiel die Ergebnisse der Lagerung von Feinhackschnitzeln im Rahmen der Energieholzernte und Lagerung in Kuhstorf (A.F.E.R. 2000) zusammen. **Bild 4** zeigt Bilder von der Ernte und der Lagerung. Auffallend sind die hohen Trockenmasseverluste innerhalb der 5 Monate Lagerung von 20-30%. Der Wassergehalt reduzierte sich in diesem Zeitraum im Mittel von 56% auf 43-46%.

Tabelle 1: Ergebnisse bei der Lagerung von Feinhackschnitzeln (Lagerungszeit Februar-Juni) nach (A.F.E.R. 2000)

Miete	Baumart	w_a [%]	w_e [%]	ΔTM [%]
1 (belüftet/ 109t)	Pappeln	56,57	44,55	30,31
2 (unbelüftet/ 106t)	Pappeln	56,57	43,46	20,62
3 (belüftet/ 77t)	Weiden	56,66	46,71	20,36



Bild 4: Energieholzernte und Lagerung (A.F.E.R. 2000)

Gegenüber der Lagerung der Feinhackschnitzel treten bei der Lagerung von Hackschnitzeln mit einer Kantenlänge von >120 mm deutlich geringere Lagerungsverluste auf. Eigene Untersuchungen wiesen Trockenmasseverluste zwischen 10-12% auf (**Tabelle 2**).

Tabelle 2: Ergebnisse Lagerung Hackschnitzel $L=120$ mm (Lagerungszeit 500Tage) (A.F.E.R. 1999)

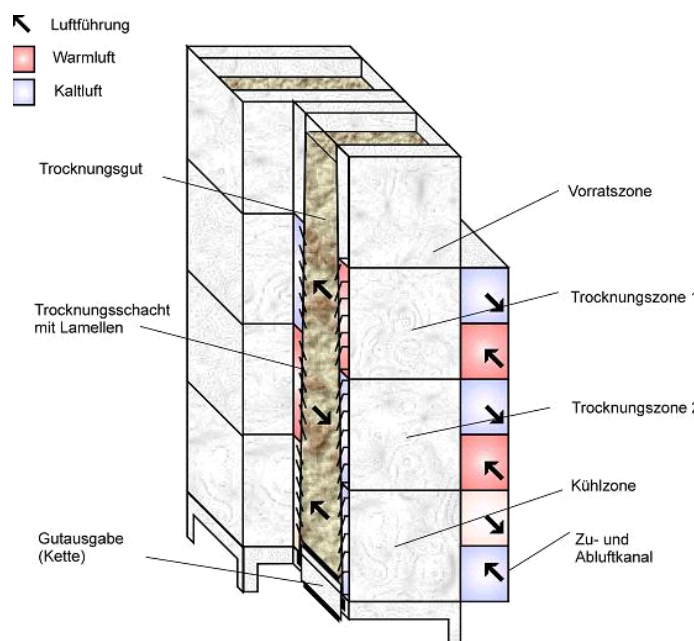
Miete	Baumart	w_a [%]	w_e [%]	ΔTM [%]
1 (belüftet/ 25,8t)	Linde/Erle	47,96	32,67 (26-53,5)	10,8
2 (unbelüftet/ 26t)	Linde/Erle	47,96	39,69 (32-57)	12,3

Für die weiteren Betrachtungen werden auf Grundlage der oben aufgeführten eigenen Untersuchungen und anderen Daten aus der Literatur (ATB 2005) die in der **Tabelle 3** zusammengefassten Daten herangezogen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der im Weiteren verwendeten Daten

Holzart		Einlagerung $w_e=50\%$		Auslagerung $w_a=20\%$		Trockenmasseverlust1 ΔTM [%]	Wasserabgabe [kg/kg _e]
		Raumgewichte [kg/m ³]	Nutzbare Energie (Heizwert) [MJ/kg]	Raumgewichte [kg/m ³]	Nutzbare Energie (Heizwert) [MJ/kg]		
HHS fein	Fichte	297	8,03	186	14,31	25 (20-30)	0,406
	Buche	459		287			
HHS Grob (HS>120)			8,03		14,31	15 (10-20)	0,394

Bei der Einlagerung von trocknen Holzhackschnitzeln kann der Trockenmasseverlust minimiert werden. Ein Weg ist der Einsatz eines technischen Trockners. Für den in **Bild 5** dargestellten Entwurf eines Trockners zeigt **Bild 6** den Trocknungsverlauf im Mollier-h; x-Diagramm und das Schaltbild der unterschiedlichen Trocknungszonen im Trockner. Für den dargestellten Trocknungsverlauf ist ein spezifischer Energieaufwand von 3522 kJ/kg_{Wasser} notwendig (ORTH 2004).

**Bild 5:** Entwurf eines Doppelschicht-Lamellentrockners

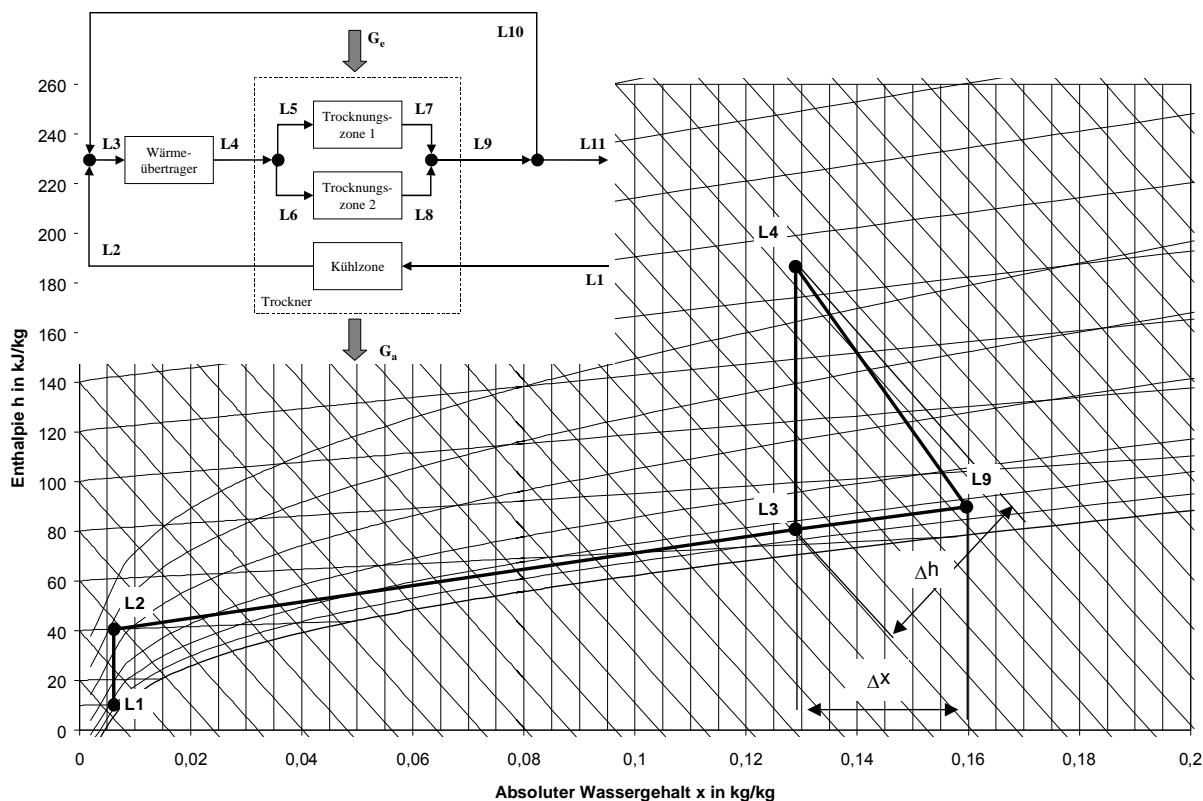


Bild 6: Beispiel für den Verlauf der technischen Trocknung (ORTH 2004)

3 Einfluss der Lagerung und Trocknung auf den Transport vom Erzeuger zur Energieanlage

Die Qualität der Holzhackschnitzel beeinflusst den Transport. Je nach Holzart, Wassergehalt, Rohdichte unterscheidet sich die zuladbare Holzmenge und damit auch die zu transportierende Energiemenge. Über eine Senkung des Wassergehaltes des zu transportierenden Gutes z.B. durch die Lagerung oder Trocknung kann die Schüttdichte gesenkt und damit das Transportvolumen besser ausgenutzt werden. Mit einem geringeren Wassergehalt erhöht sich gleichzeitig der Heizwert, so dass für den gleichen Energiebedarf eine geringere Brennstoffmenge notwendig ist.

Die **Tabelle 4** stellt der Erzeugung ohne Lagerung die Varianten einer Lagerung bzw. Trocknung von feinen bzw. groben Holzhackschnitzeln beim Erzeuger gegenüber. Deutlich werden folgende Punkte:

- durch die Lagerung und Trocknung wird der Energiegehalt pro Schüttraummeter erhöht, so dass das Transportvolumen besser ausgenutzt werden kann,
- durch die Trockenmasseverluste bei der Lagerung verringert sich trotz Heizwerterhöhung gegenüber der ursprünglich erzeugten Holzmenge der mögliche nutzbare Energieinhalt auf ca. 84% (feine HHS) bzw. ca. 95% (grobe HHS),
- durch die technische Trocknung kommt es durch die Erhöhung des Heizwertes zu einer Steigerung der nutzbaren Energie gegenüber der erzeugten Holzmenge um ca. 11%, damit wird ein Teil der zur Trocknung eingesetzten Energie „gespeichert“.

Tabelle 4: Auswirkungen der Biomasseaufbereitung beim Erzeuger auf den nutzbaren Energieinhalt sowie den Energieinhalt pro SRM

	Erzeugung (ohne Lagerung)	Lagerung HHS (fein)	Lagerung HHS (grob)	techn. Trocknung
Transportgewicht pro t Erzeugung [kg]	1000	469	531,3	625
Nutzbarer Energieinhalt [MJ/t _e]	8030	6707,8	7602,2	8943,8
Nutzbarer Energieinhalt [%]	100%	84%	95%	111%
Volumen Fichte[Srm]	3,37	2,52	2,86	3,36
Volumen Buche [Srm]	2,18	1,63	1,85	2,18
Energieinhalt/Volumen Fichte [MJ/Srm]	2384,91	2661,66	2661,66	2661,66
Energieinhalt/Volumen Buche [MJ/Srm]	3685,77	4106,97	4106,97	4106,97

Damit hat der Erzeuger über die Organisationsform der Lagerung und des Transportes Einfluss auf die mögliche nutzbare Energie pro eingesetzte Fläche und damit auch, da er nach dem Energiegehalt bezahlt wird, auf die Erlöse pro Fläche. Den möglichen Mehrerlösen bei der technischen Trocknung gegenüber der Lagerung stehen jedoch höhere Aufwendungen (Investitionen, und Energiekosten) gegenüber.

Tabelle 5: Transportaufkommen und –kosten in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Wassergehalt	Brennstoffmenge	Benötigte LKW	Transportkosten
	[t/a]	LKW/a	€/a
20%	51.314	2.332	188.671
50%	91.457	4.157	336.271
Differenz	40.143	1.825	147.600

Unabhängig ob Lagerung oder Trocknung kann die Senkung des Wassergehaltes zu einer deutlichen Reduzierung des Transportaufkommens und damit der Transportkosten führen (siehe **Tabelle 5**). Gerade auch unter dem Gesichtspunkt der derzeit steigenden Kraftstoffkosten sollte die Option einer optimierten Lagerung bzw. Trocknung beim Erzeuger berücksichtigt werden.

4 Einfluss der Brennstoffqualität auf den Betrieb der Energieanlage

Am Standort der Energieanlage wird immer ein Teil der Biomasse gelagert, um Engpässe bei der Rohstoffbereitstellung überbrücken zu können. Erfolgt eine Anlieferung von feuchten Holzhackschnitzelfraktionen kann es im Rahmen der Lagerung zu Trockenmasseverlusten kommen. Die nutzbare Energie und damit auch die Menge des erzeugten Stroms bzw. der erzeugten Wärme verringert sich.

Die **Tabelle 6** zeigt den möglichen Strom- und den Wärmeertrag der Varianten Lagerung Feinhackschnitzel, Lagerung Grobhackschnitzel und technische Trocknung im Vergleich. Dabei ist das in **Bild 7** dargestellte Schaltbild zu Grunde gelegt. Die Übersicht zeigt, dass gegenüber der Lagerung von Feinhackschnitzeln durch die geringeren Lagerungsverluste durch Grobhackschnitzel ca. 4% mehr Strom und ca. 5% mehr Wärme durch die Energieanlage pro angelieferte Menge erzeugt werden kann. Bei einer technischen Trocknung sind es sogar ca. 10% mehr Strom bzw. 14% mehr Wärme. Dabei ist jedoch zu beachten dass zur Trocknung ca. 17% der erzeugten Wärme benötigt wird. Existiert am Standort kein durchgehendes Wärmekonzept, kann die Trocknung eine Alternative sein, da pro angelieferter Rohstoffmenge mehr hochwertiger elektrischer Strom zur Verfügung gestellt wird. Ein weiterer Vorteil der technischen Trocknung ist die Reduzierung bzw. Verhinderung des Pilzwachstums und der Sporenentwicklung. Demgegenüber stehen jedoch wieder die Investitions- und Betriebskosten der Trocknung.

Tabelle 6: Erzeugter Strom und anfallende Wärme bei unterschiedlichen Varianten der Biomasseaufbereitung an der Energieanlage

Variante		Lagerung W=50%	Energieanlage W=20%	Strom	Thermische Energie Summe
Lagerung Feinhackschnitzel TM-Verluste 25%	nutzbarer Energieinhalt MJ/t _{input}	8030	6707,8125	2347,7	3353,9
	Prozent Energie	100%	84%	29,2%	41,8%
Lagerung Grobhackschnitzel TM-Verluste 15%	nutzbarer Energieinhalt MJ/t _{input}	8030	7602,1875	2660,8	3801,1
	Prozent Energie	100%	95%	33,1%	47,3%
Trocknung, TM-Verluste 0%	nutzbarer Energieinhalt MJ/t _{input}	8030	8943,75	3130,3	4471,9 davon für Trocknung: 1320 für Verkauf 3151
	Prozent Energie	100%	111%	39,0%	55,7% davon für Trocknung 16,5% für Verkauf 39,2%

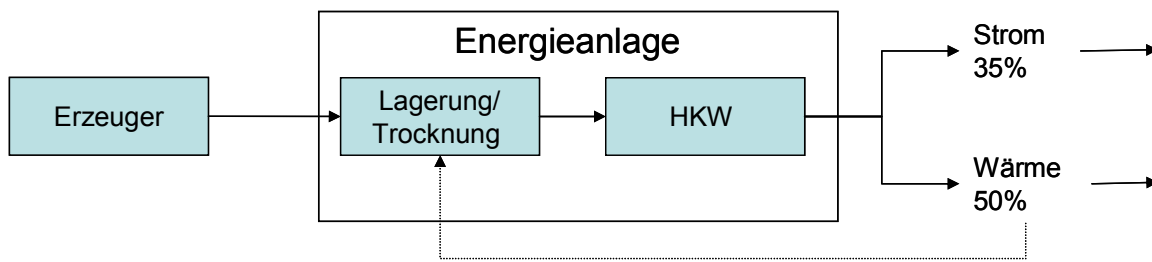


Bild 7: Flussbild bei Lagerung und Trocknung an der Energieanlage

Der Trockenmasseverlust am Standort der Energieanlage muss zur Deckung des Brennstoffbedarfes ausgeglichen werden. Dies ist mit entsprechenden zum Teil nennenswerten monetären Verlusten verbunden, wie das aufgeführte Beispiel in **Bild 8** zeigt. Dies unterstreicht noch einmal die Notwendigkeit einer optimierten Lagerung und Bereitstellung der Holzhackschnitzel z.B. durch die Gestaltung der Hackschnitzelabmessungen. Dies gewinnt an Bedeutung in Anbetracht der zunehmenden Flächenkonkurrenz bei der Erzeugung der Biomasse und den steigenden Rohstoffpreisen.

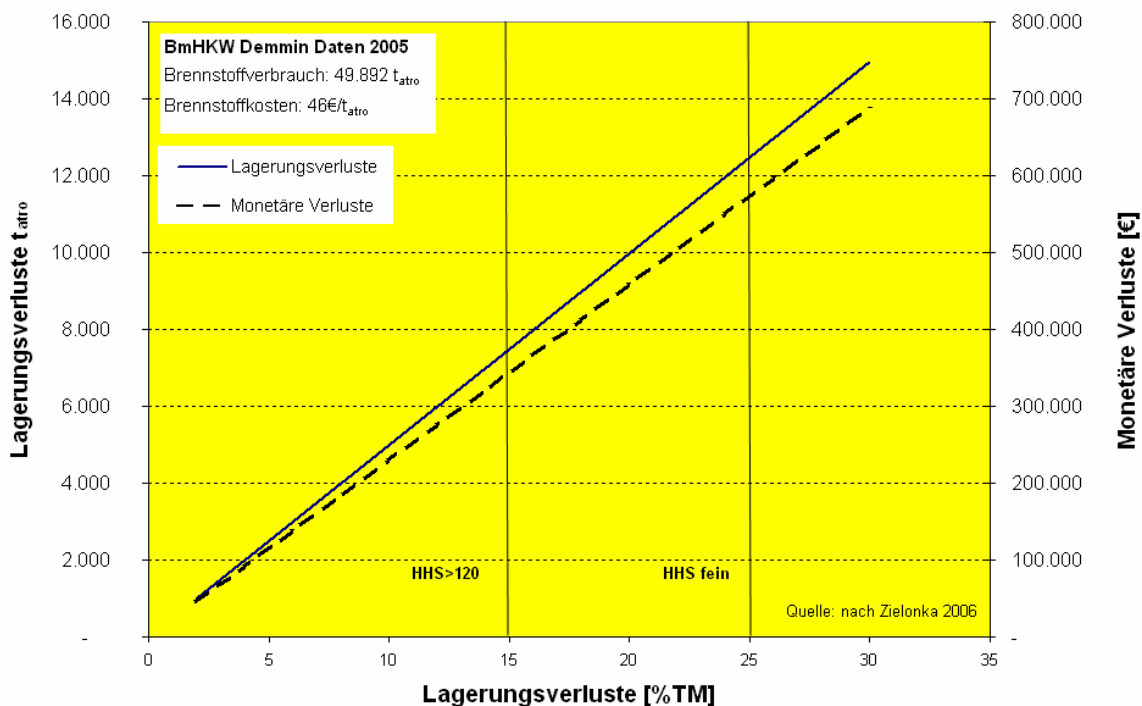


Bild 8: Monetäre Auswirkungen der Trockenmasseverluste bei der Lagerung an der Energieanlage am Beispiel des Brennstoffverbrauches des BmHKW Demmin (nach (ZIELONKA 2006))

5 Zusammenfassung

Die Brennstoffbereitstellung bietet ein großes Optimierungspotential für einen wirtschaftlichen Betrieb von Biomasseheizkraftwerken. In der Praxis wird es in Abhängigkeit von der Anlagengröße, des zur Verfügung stehenden Holzsortimentes zu einer Mischform der Or-

ganisationsstruktur kommen. Ziel war es deshalb nicht eine zu favorisierende Lösung darzustellen, sondern die Auswirkungen verschiedener Formen der Lagerung bzw. der Trocknung z.B. auf die nutzbare Energie und den Transport aufzuzeigen. Im Ergebnis der Ausführung lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

- Die Biomasse (Transport, Brennstoff) ist ein entscheidender Kostenfaktor beim Betrieb von Energieanlagen
- Die Brennstoffqualität (Wassergehalt, Hackschnitzelgröße) bietet großes Optimierungspotential für einen effektiven Einsatz der Biomasse. Es gilt dies im Rahmen der Bereitstellung und Lagerung beim Erzeuger aber auch bei der Energieanlage selbst auszuschöpfen.
- Unter den Gesichtspunkten der Lagerungsverluste und der maximalen Gewinnung hochwertiger elektrischer Energie sind die Möglichkeiten einer technischen Trocknung (Abwärmenutzung) zu überprüfen.

6 Literatur

AGRAR-FÖRDERUNG UND –ENTWICKLUNG ROSTOCK E.V.-INSTITUT (A.F.E.R. E.V.-INSTITUT) (1999): Logistik der Bereitstellung von Energieholz für die Holzvergasungsanlage in Laage-Kronskamp – Abschlußbericht; A.F.E.R. e.V.-Institut, Hohen Luckow

AGRAR-FÖRDERUNG UND –ENTWICKLUNG ROSTOCK E.V.-INSTITUT (A.F.E.R. E.V.-INSTITUT) (2000): Untersuchungen zur Auswahl eines Verfahrens zur Ernte und Bereitstellung von Energieholz für die Energieholzkulturen Kuhstorf (EHK-Ernte) – Abschlußbericht; A.F.E.R. e.V.-Institut, Hohen Luckow

ARNOLD K. (2006): Der „beste Nutzen“ des begrenzten Rohstoffs Biomasse; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; E&M

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (2006): Leitfaden Bioenergie- Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, Gülzow

INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK BORNIM E.V. (ATB) (2005): Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut, Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 39, Potsdam-Bornim

ORTH M., KIRSCHBAUM H-G. (2004): Einsatz eines neuen Verfahrens zur Trocknung von Biomasse für eine energetische Nutzung, Beiträge des IBZ Hohen Luckow, Heft 3/2004, Hohen Luckow

ZIELONKA S. (2006): Optimierung der Brennstoffbereitstellung für das Biomasseheizkraftwerk Demmin, Masterarbeit, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Institut für Nutztierwissenschaften und Technologie, Rostock

Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen am Beispiel von Kiefernholz

Fire prevention during biomass storage: application to pine wood chips

Fabio Ferrero*¹, Marcus Malow¹, Anka Berger¹, Matthias Noll²

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin, Germany

¹ Abteilung II. Chemische Sicherheitstechnik, Fachgruppe 2 Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme

² Abteilung IV. Material und Umwelt, Fachgruppe 1 Biologie im Umwelt- und Materialschutz

*Korrespondenz an: fabio.ferrero@bam.de, Tel.: +49(0)3081043419, Fax: +49(0)3081041227

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt das Problem der Selbstentzündung in gelagerter Biomasse unter besonderer Berücksichtigung von Holz. Mit dem Ziel, das Auftreten von unerwünschten Bränden zu verhindern, wurden Untersuchungen zur Selbstentzündung sowohl in Form standardisierter Labortests als auch in großtechnischem Maßstab durchgeführt. Die Ergebnisse der Labortests wurden genutzt, um die Kinetik und Stöchiometrie der Verbrennungsreaktion zu identifizieren und um vereinfachte Reaktionsmodelle zu entwickeln. Darüber hinaus erfolgte eine computerbasierte Analyse des Selbstentzündungsprozesses. Ergebnisse der Simulation der Selbstentzündungsvorgänge bei Kiefernhackschnitzeln wurden mit den Testdaten verglichen und diskutiert, um daraus geeignete Lagerbedingungen für Holzhackschnitzel und -späne abzuleiten, d. h. zur Größe des Lagerhaufens und Dauer der Lagerung, bei der es nicht zu einer Selbstentzündung kommt.

Schlüsselwörter: Selbstentzündung, Brandverhütung, Lagerung, Biomasse, Schüttgüter.

Abstract

This manuscript describes the problem of the self-ignition in stored biomass with special attention to wood. As to prevent the occurrence of undesired fires, standard laboratory and large scale investigation of the self-ignition was performed. Laboratory experimental data were used to identify kinetics and stoichiometry of the combustion reaction, as to develop simplified reaction models. Furthermore, computer-based analysis of the self-ignition process was performed. Results of simulations of the self-ignition process for pine wood chips are compared with experimental data and then discussed, in order to assess suitable storage conditions for wood chips, i.e. pile dimensions and storage times not leading to a self-ignition.

Keywords: *self-ignition, fire prevention, storage, biomass, bulk materials.*

1 Einleitung

Der jüngst zu verzeichnende Anstieg in der Nutzung erneuerbarer Energien hat zu einem exponentiellen Anstieg in der Nachfrage nach Biomasse geführt: ein Trend, der sich künftig wohl fortsetzen wird (NITSCH 2007). Speziell Alt- oder Restholz ist aktuell eine der wesentlichen Quellen für Biobrennstoffe. Auf Grund der Diskontinuität in der Rohstoffversorgung einerseits und dem kontinuierlichen Bedarf an Energieproduktion andererseits wird eine Lagerung der Brennmaterialien zur Notwendigkeit. Die Lagerung erfolgt meist in großen Haufen (mehrere tausend Tonnen Material). Diese Form der Schüttgutlagerung birgt jedoch die Gefahr der Selbstentzündung, wie zahlreiche Vorfälle belegen (ROTHENBURG 2000, TRAUNREUT 2005). Selbstentzündung und die dadurch entstandenen unerwünschten Brände sind mit erheblichen wirtschaftlichen Verlusten verbunden. Sie verursachen zudem die Emission von Kohlendioxid und gegebenenfalls auch toxischen Gasen, beispielsweise Kohlenmonoxid bei Schwelbränden. Um das Niveau der Energieproduktion zu erhalten, müssten die auftretenden Verluste an Biobrennstoffen gegebenenfalls durch fossile Rohstoffe ausgeglichen werden: Dadurch würden zusätzliche klimaschädliche CO₂-Emissionen freigesetzt werden. Die Verhütung von selbstentzündeten Bränden in gelagertem Holz ist daher ökonomisch und sicherheitstechnisch relevant.

Die Ursachen der Selbstentzündung liegen in exothermen Reaktionen wie den langsamen Oxidationen sowie der mikrobiologischen Aktivität, die in sehr großen Hackschnitzelhaufen bereits bei normalen Umgebungstemperaturen auftreten. Auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Schüttgutes kann die im Haufen entstehende Wärme nicht vollständig an die Umgebung abgeführt werden. Dadurch wird eine positive Rückkopplungsschleife initiiert, die schließlich zu einem großflächigen Brand führt.

Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit des Auftretens von Selbstentzündungen: beispielsweise physikalische und chemische Eigenschaften des

gelagerten Materials, wie Schüttdichte, Reaktionskinetik, Wärmeproduktion und Feuchtigkeitsgehalt, sowie Umweltbedingungen wie die Umgebungstemperatur, Regen und Wind. Einer der wichtigsten Parameter bei der Selbstentzündung ist vermutlich die Lagergeometrie, denn die Wärmeentwicklung tritt im gesamten gelagerten Schüttgutvolumen auf (ist daher proportional zum Volumen V , m^3), während die Wärme ausschließlich an der Oberfläche des Haufens abgeführt wird (proportional zur Fläche A , m^2). Eine Zunahme des Verhältnisses Volumen zu Fläche (V/A) resultiert in einer niedrigeren Selbstentzündungstemperatur (STEEN 2000). Die Selbstentzündungstemperatur (T_{SE}) ist definiert als die höchstmögliche Umgebungstemperatur, bei der keine Entzündung auftritt: das bedeutet für eine Umgebungstemperatur größer als T_{SE} , dass die Wärme, die durch die Reaktionen im Inneren des Haufens entsteht, größer ist als die Ableitung der Wärme in die Umgebung. Der Prozess steuert dann auf einen Brand zu. Die Abhängigkeit der T_{SE} vom Verhältnis V/A führt zu einer möglichen Selbstentzündung bei normalen Umgebungstemperaturen, wenn die Menge des gelagerten Materials ein bestimmtes Volumen übersteigt.

Standardisierte Laborversuche zur Selbstentzündung wurden nach europäischem Standard (DIN EN 15188, 2007) durchgeführt. Auch wenn diese Versuche erforderlich sind, um die T_{SE} und die kinetischen Parameter der Verbrennungsreaktion zu bestimmen, können die Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf die in der Praxis üblichen Volumengrößen extrapoliert werden.

Um diese Beschränkungen zu überwinden sind Modellierungen der gekoppelten Differentialgleichungen des Wärme- sowie des Stofftransportes erforderlich. Daher wurde ein mathematisches Modell nach KRAUSE *et al.* (2006) entwickelt, um den Selbstentzündungsprozess von Holz zu simulieren.

Das Modell wurde mit Hilfe des auf dem Markt erhältlichen Finite-Element-Code COMSOL Multiphysics gelöst, die Ergebnisse durch Laborversuche validiert und mit den Ergebnissen eines Praxisversuchs verglichen. Hierfür wurden die Temperatur und die Konzentrationen verschiedener Gase in einem 1300 m^3 großen, frisch angelegtem Kiefernholzhaufen gemessen.

Beispiele der multi-dimensionalen zeitabhängigen Berechnungen der Brandszenarien in praxisüblichen Holzlagerhaufen werden vorgestellt und mit den Versuchsdaten verglichen. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Entscheidungsunterstützungsmodell bereitzustellen für die Definition geeigneter Lagerdimensionierung und Lagerungsdauer, um letztlich selbstentzündungsfreie Lager zu bekommen.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Laborversuche

Nach europäischem Standard (DIN EN 15188, 2007) soll für Untersuchungen zur Selbstentzündung im Labormaßstab die sogenannten Warmlagerungsexperimente zur Anwen-

derung kommen. **Bild 1** zeigt den schematischen Aufbau des Tests: die Probe wird hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt, gemessen wird die Temperatur im Innern. Zunächst wird die Temperatur im Probeninnern die Umgebungstemperatur erreichen. Daraufhin, wenn die im Inneren der Probe freigesetzte Wärme größer ist als die Wärmeableitung, wird das Material sich selbst entzünden. Durch Variieren der Umgebungstemperatur können die Minimum T_{SE} (Definition siehe Einleitung) und die Induktionszeit bis zur Selbstentzündung, d. h. die Zeit ab Beginn des Versuchs bis zum exponentiellen Anstieg der Temperatur, bestimmt werden. Die Versuche werden mit Proben verschiedener Volumina wiederholt: danach werden die Werte für T_{SE} und die Induktionszeit bis zur Selbstentzündung auf größere Volumina extrapoliert, wie in **Bild 2** und **3** für feines Sägemehl und Kieferhackschnitzel dargestellt.

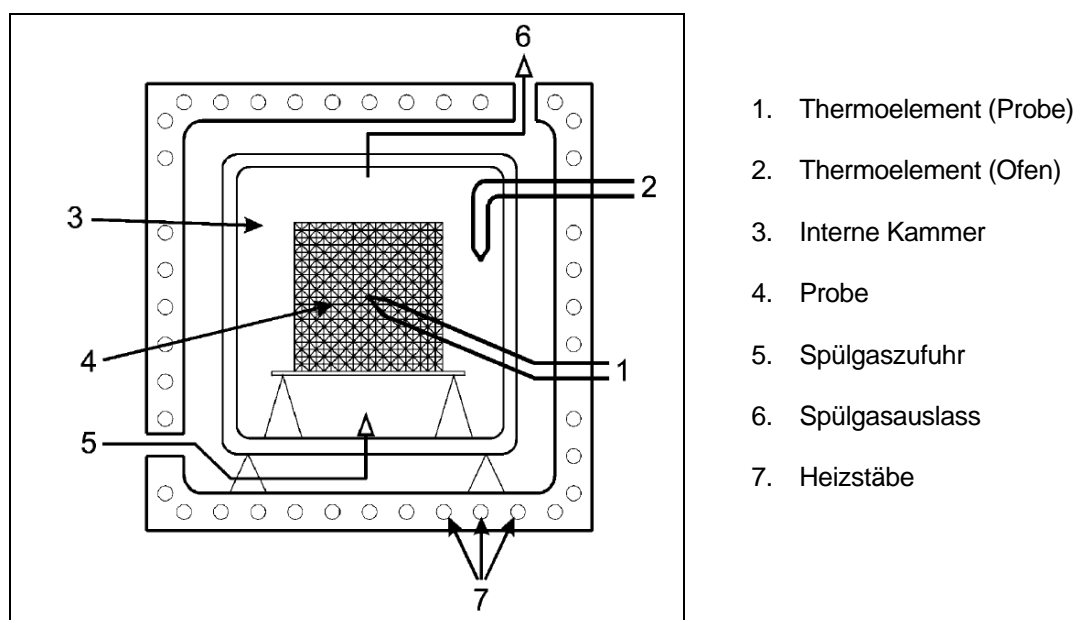


Bild 1: Aufbau des Warmlagerungsversuchs

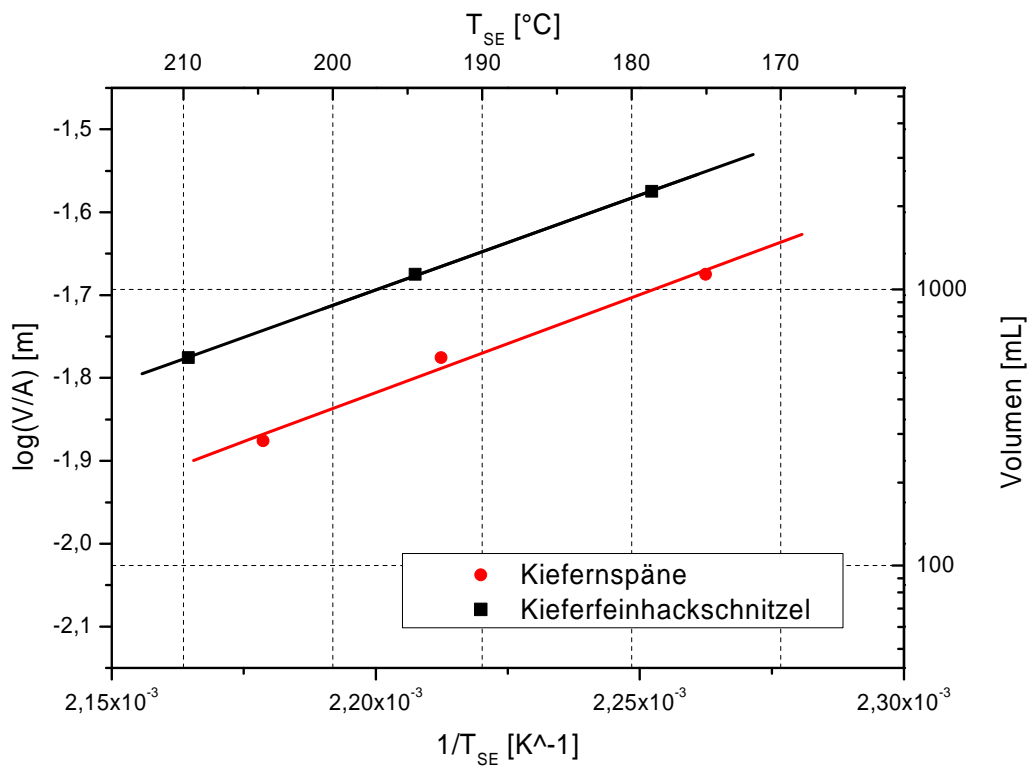


Bild 2: V/A Abhängigkeit der Selbstentzündungstemperatur für Kiefernholz

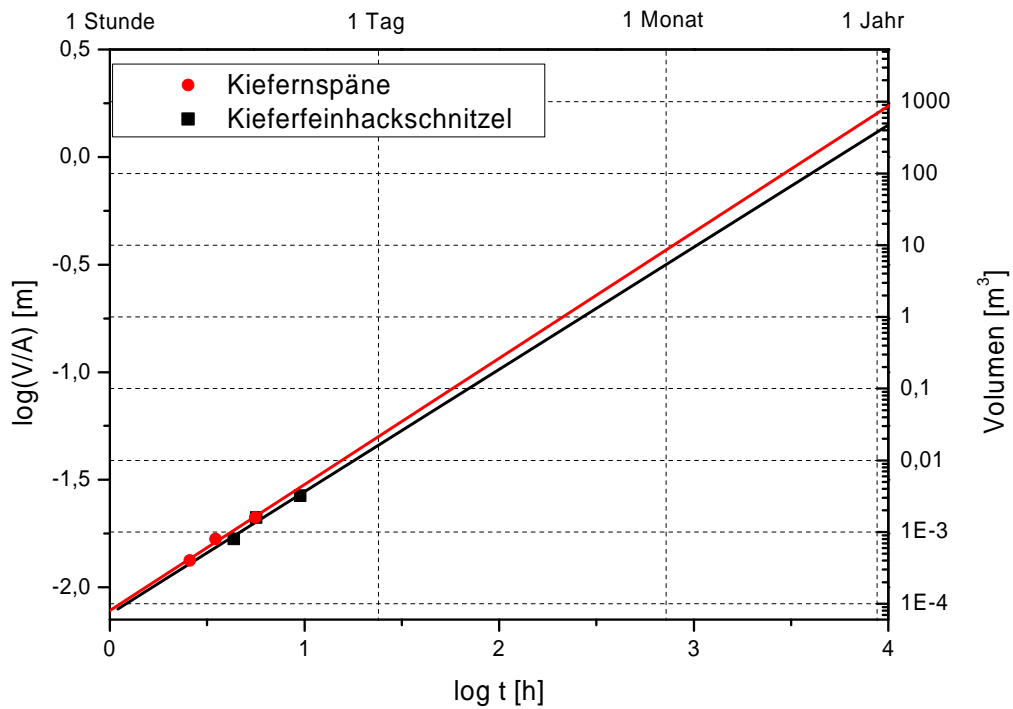


Bild 3: Extrapolation der Induktionszeit zur Selbstentzündung bei Kiefernholz

Die beiden Bilder zeigen auch, dass eine Reduzierung der Partikelgröße die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Selbstentzündung erhöht, da sowohl die T_{SE} -Werte als auch die Induktionszeiten bei Kiefernspänen (mittlere Partikelgröße 0,25 mm) deutlich geringer als bei Kiefernholzschnitzeln (mittlere Partikelgröße 10 mm) sind.

2.2 Großtechnische Versuche

Zur Bereitstellung von Daten aus großtechnischen Versuchen wurden die Temperaturentwicklung und die Gaskonzentrationen in einem 20x15x6 m großen neu errichteten Holzhackguthaufen (1300 m³ und Material von etwa 400 Tonnen Frischgewicht) über einen Zeitraum von 150 Tagen erfasst. **Bild 4** zeigt eine Aufnahme des Stapels. Als Holzart wurde Kiefer gewählt, da die Nutzung von Kiefernholz als erneuerbarer Energieträger in Deutschland weit verbreitet ist. Die Hackschnitzel wiesen eine durchschnittliche Partikelgröße von 10 mm und einen Anfangswassergehalt von 35% auf.

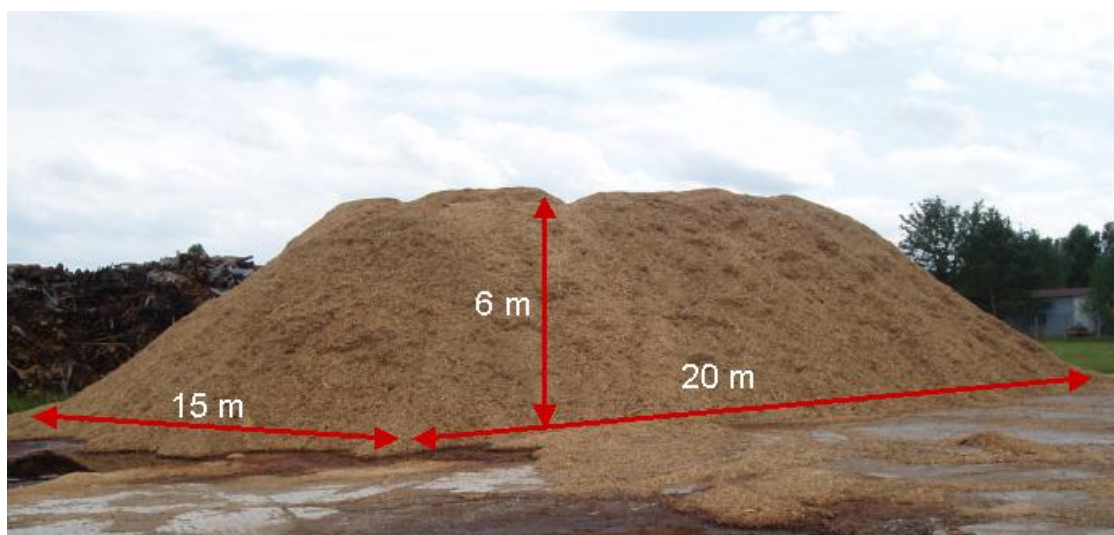


Bild 4: Bild des 1300 m³ Hackschnitzelhaufen

Die Messung der Temperatur erfolgte an zehn unterschiedlichen Stellen innerhalb des Stapels. Proben zur Messung der CO₂-, O₂-, CO- und CH₄-Konzentrationen wurden an vier repräsentativen Stellen gezogen. Die Messung der Temperatur erfolgte kontinuierlich mit Hilfe der 12 Typ K Thermoelemente, wobei zehn innerhalb des Haufens, zwei weitere außerhalb des Haufens angebracht waren, um die Umgebungstemperatur zu erfassen (davon jeweils eines zur Temperaturmessung in der Sonne bzw. im Schatten). Die Thermoelemente waren mit drei 4-Kanal-Datenloggern verbunden (Modell TL309, PCE Group), die für jeden Sensor eine Speicherung der Werte im Abstand von 30 Minuten ermöglichten. Solarzellen versorgten die Datenlogger über die gesamte Lagerperiode mit der notwendigen Energie. Zum Schutz gegen Regen oder andere Wetterunbill waren die Datenlogger in einer versiegelten Box untergebracht.

Gasmessungen erfolgten diskontinuierlich mit Hilfe eines Analysegeräts (Servomex Gasanalysator 5200) für Sauerstoff sowie eines mobilen FTIR-Spektrometers (Gasmeter Modell Dx4000N) für Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Methan. Um auch Messungen im Inneren des Haufens durchführen zu können, wurden vier Stahlröhren während der Schüttung in das Material eingebracht. Wenn keine Probennahme erfolgte, waren diese Röhren am äußeren Ende verschlossen. Für die Messungen wurden die Verschlüsse entfernt und die Öffnungen mit dem Sauerstoffanalysator sowie dem Spektrometer verbunden. Die interne Pumpe des Spektrometers stellte den Gastransport zu den Messgeräten sicher.

3 Numerisches Modell

3.1 Chemie/Physik

Das den Berechnungen zugrunde liegende Modell berücksichtigt die Effekte der Selbsterwärmung und –entzündung durch das brennbare Schüttgut. Anwendung fand die Berechnungsmethode nach KRAUSE *et al.* (2006). Zusätzliche Parameter wurden implementiert und die Methode an die Lagerung von Holzhackschnitzeln angepasst. Das Modell geht von folgenden Annahmen aus:

- Der Verbrennungsprozess kann durch eine allgemeine Gleichung beschrieben werden: die beteiligten chemischen Spezies sind Brennstoff (bestehend aus C, H, O und Feuchtigkeit), Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan, Wasser (in Form von Dampf).
- Das angewendete Gleichungssystem beinhaltet die Wärmeleitung und den diffusen Transport von bis zu 7 Reaktanten und Produkten.
- Um auch konvektive Ströme zu berücksichtigen wurden die Diffusionskoeffizienten um zwei Größenordnungen erhöht.
- Die Wärmequelle wird durch die Reaktionsenthalpie berechnet (Verbrennungswärme).
- Die Wärme aus der Adsorption/Kondensation von Wasser wurde durch die Einführung einer weiteren Gleichung in das Modell integriert, basierend auf den Arbeiten von LOHRER *et al.* (2005).
- Das Schüttgut ist homogen and isotrop.
- Die Materialeigenschaften sind zeit- und ortsunabhängig.

Temperatur und Konzentrationen stellen ein achtfach gekoppeltes, zeitabhängiges System von partiellen Differentialgleichungen dar, das mit Hilfe der Software Finite-Element-Code COMSOL Multiphysics gelöst werden konnte. Für weiterführende Informationen zum Modell verweisen wir auf LOHRER *et al.* (2005), KRAUSE *et al.* (2006) und FERRERO *et al.* (2007).

3.2 Mikrobiologie

Die in gelagertem organischen Material wie Kompost oder Holz auftretende mikrobiologische Aktivität ist in hohem Maße exotherm und kann eine wichtige zusätzliche Wärmequelle sein (WEPPEN 2001). Da es die mikrobiologische Aktivität nicht berücksichtigt, birgt das mathematische Modell nach KRAUSE *et al.* (2006) die Gefahr, die Temperatur im Holzstapel als auch die Induktionszeit bis zur Selbstentzündung zu unterschätzen.

Eine Literaturrecherche zur mikrobiologischen Aktivität in gelagertem Holz ergab, dass die intensivsten Wärmequellen in aeroben Prozessen gefunden werden, d.h. dort, wo Mikroorganismen Sauerstoff für ihren Stoffwechsel verbrauchen. Für eine Näherungsberechnung dieser weiteren Wärmequelle wurde das von TREMIER *et al.* (2005) vorgeschlagene Modell zur Prognose des aeroben Stoffwechsels in den Finite-Element-Code COMSOL implementiert. Ursprünglich für aerobe, während des Kompostierens auftretende Prozesse entwickelt, bestimmt dieses Modell die Kinetik des Sauerstoffverbrauchs, der in Relation zur mikrobiellen Wärmebildung gebracht werden kann. Die in das Modell eingehenden Parameter wurden auf Basis respirometrischer Laboruntersuchungen an die vorliegende Fallstudie mit Kiefernholz angepasst. Diese Untersuchungen, abgeleitet von einer Modifizierung des sogenannten Sturm Test (ISO 14852, 1999), erlauben über das Monitoring der CO₂-Produktion während der mikrobiologischen Respiration eine Schätzung der mikrobiellen Aktivität.

Wenn nur wenige Information über die einfließenden Parameter vorliegen, lässt sich die Wirkung einer mikrobiellen Wärmequelle simulieren, indem die Starttemperatur des Haufens auf den maximalen Wert wird, der durch die Aktivität der Mikroorganismen erreicht werden kann (etwa 80°C). Da hier keine Wärmeentwicklung von mikrobieller Aktivität herrührt, sind bei diesem Prozedere Berechnungen auf Basis des in 3.1 vorgestellten chemisch/physikalischen Modells ausreichend. Selbst wenn die Annahme einer erhöhten Initialtemperatur zu einer Überschätzung des Problems führen kann, da der Haufen in der Praxis die zugrunde gelegte Temperatur nicht erreichen würde, ist dieses Vorgehen die beste Berechnungsmöglichkeit, wenn keine Informationen über den im Haufen ablaufenden tatsächlichen mikrobiologischen Prozess verfügbar sind.

4 Ergebnisse und Diskussion

Bild 5a zeigt einen Vergleich der simulierten und der mit den Warmlagerungsversuchen experimentell ermittelten Selbstentzündungstemperatur für Kiefernholz unterschiedlicher Herkunft und/oder Partikelgrößenverteilung. Die Werte des numerisch simulierten und des experimentell ermittelten T_{SE} für die Hackschnitzel stimmen weitgehend überein. Es zeigte sich, dass in allen Fällen die aus der Simulation stammenden Werte etwas unter den experimentell ermittelten lagen. Dieses Ergebnis entspricht einer konservativen Schätzung.

Während der Versuchsdurchführung lag die Umgebungstemperatur der Probe über 80°C , also der Temperatur, bei der die mikrobielle Aktivität zum Erliegen kommt. Da keine mikrobielle Wärmeentwicklung vorlag, wurde bei der Berechnung (**Bild 5**) nur das chemisch/physikalische Modell zugrunde gelegt.

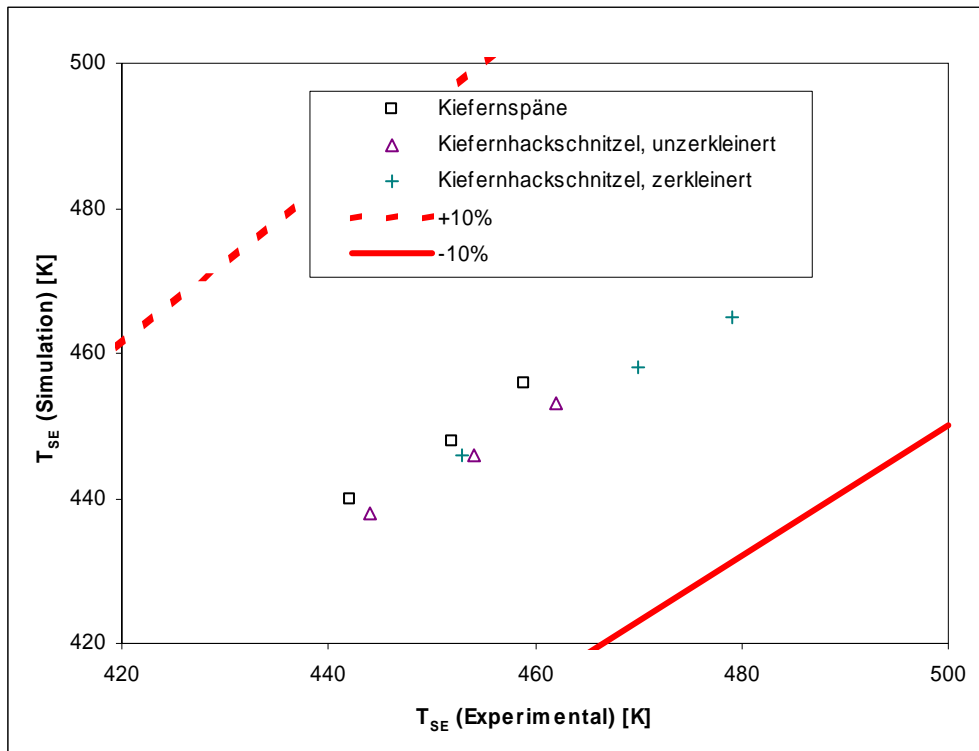


Bild 5: Vergleich zwischen der simulierten und der experimentell ermittelten Selbstentzündungstemperaturen für die untersuchten Holzsorten

In einem großen Holzhaufen allerdings, wo die T_{SE} unter 80°C liegen kann, kann die Wärmeentwicklung durch mikrobielle Prozesse bedeutend sein und T_{SE} induzieren. Mit dem Ziel, den Effekt mikrobieller Aktivität als Wärmequelle in einem realen Szenario zu untersuchen, wurden Temperatur- und Gasmessungen in einem 1300 m^3 großen Holzhaufen durchgeführt. Während der ersten 10 Tage der Lagerung stieg die Temperatur im Zentrum des Haufens rasch an und lag bis zu 25°C über der Umgebungstemperatur (**Bild 6**). In Entsprechung zum Temperaturanstieg erhöhte sich die Sauerstoffkonzentration, während die Kohlendioxidkonzentration deutlich abfiel (**Bild 7**). Weder der rasche Temperaturanstieg noch das Konzentrationsverhalten kann durch das rein chemisch/physikalische Modell abgebildet werden. Starke exotherme Wärmeentwicklung als Ergebnis der mikrobiellen Respiration ist stets an den Sauerstoffverbrauch und die Bildung von Kohlendioxid gekoppelt (AULENTA *et al.* 2002). Die mikrobielle Aktivität muss folglich in das Modell integriert werden.

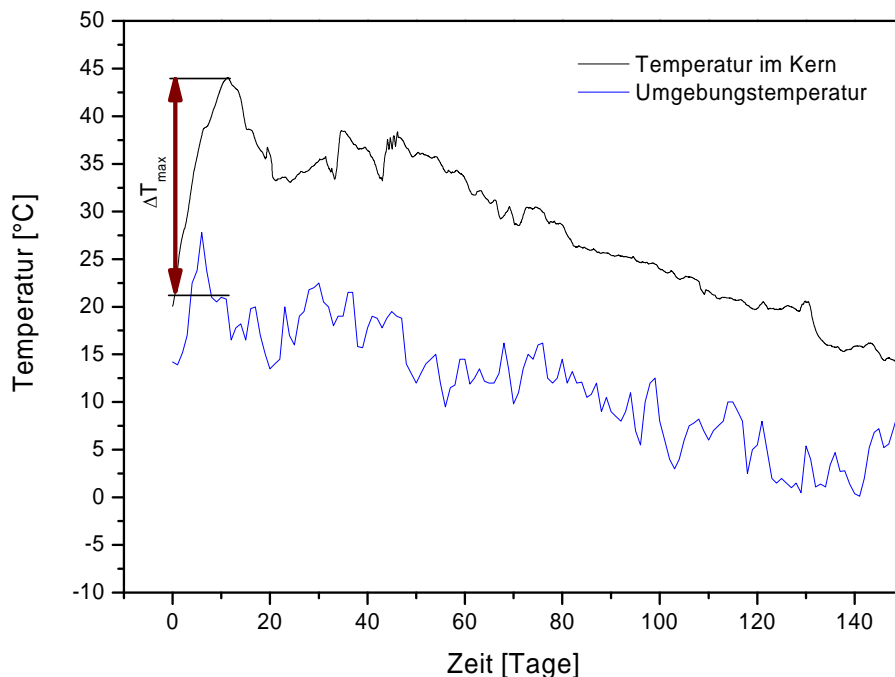
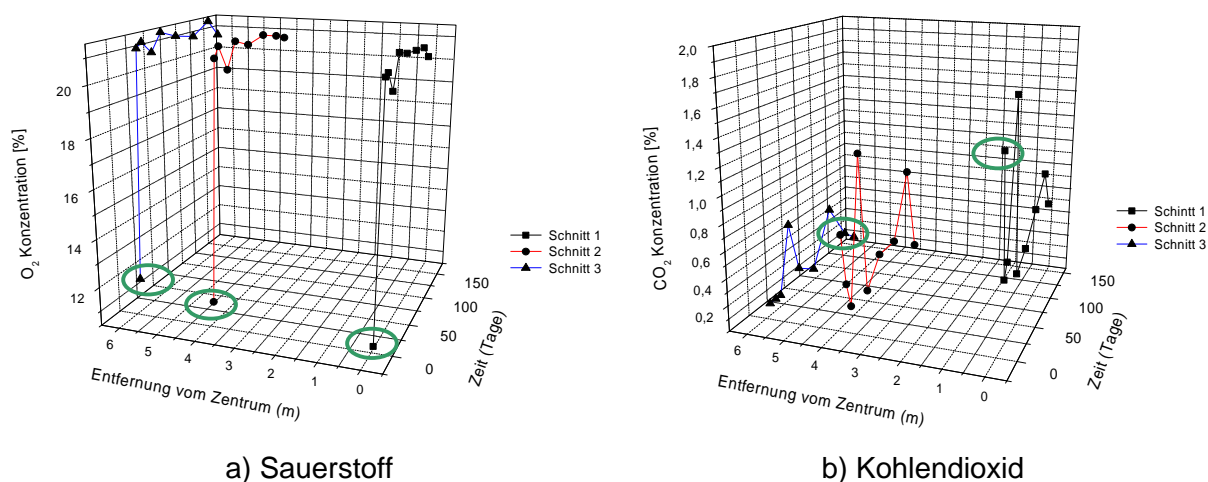


Bild 6: Temperaturentwicklung innerhalb des Haufens und mittlere Umgebungstemperatur



a) Sauerstoff

b) Kohlendioxid

Bild 7: Konzentrationen von Sauerstoff und Kohlendioxid innerhalb des Haufens bei unterschiedlichen Entfernungen vom Haldenkern (Gasmessung in 1,8 m Höhe)

Es wurde eine Berechnung der Selbstentzündung des Hackschnitzelhaufens durchgeführt, sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der mikrobiellen Aktivität als Wärmequelle. Der untersuchte Haufen hatte eine Höhe von 6 m und eine Breite von 30 m. Das Material lagerte auf einem Zementboden, einem in der Praxis üblichen Untergrund. Um die Da-

tenverarbeitung zu vereinfachen wurde eine nur zweidimensionale Berechnung durchgeführt, ausgehend von der Annahme, dass die Länge des Haufens die Breite deutlich übersteigt. Des Weiteren wurde wegen der Symmetrie des Lagers nur eine Hälfte des Querschnitts betrachtet. Die Verarbeitung der Daten erfolgte unter Einsatz eines engmaschigen Netzes mit etwa 4000 finiten Elementen. Als Eingangsparameter wurden die Initialtemperatur des Holzhaufens und die Temperatur des Zementbodens auf 15°C gesetzt. Die Umgebungstemperatur wurde ohne Berücksichtigung der Tag-Nacht-Schwankungen konstant auf 15°C gesetzt.

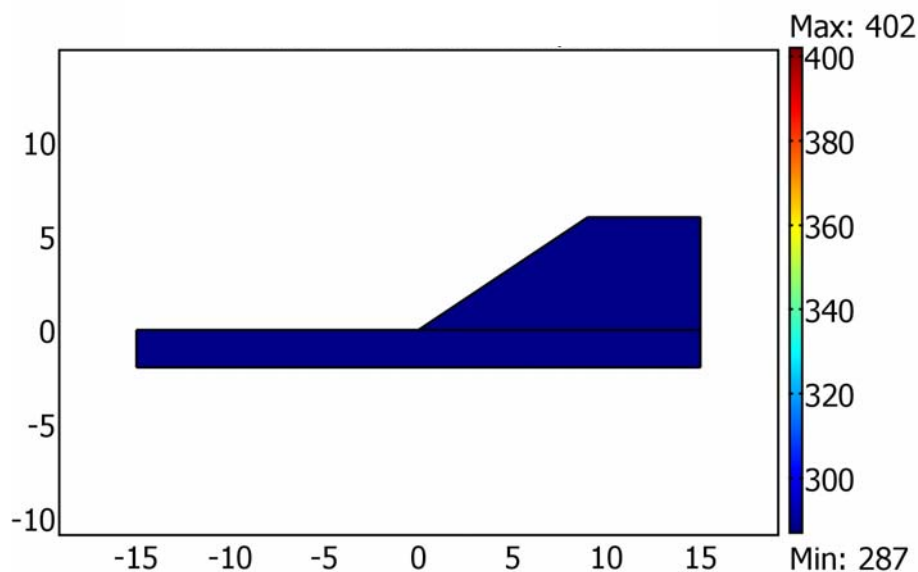


Bild 8: Berechnung der Selbsterwärmung einer Holzhalde ohne Berücksichtigung der mikrobiellen Aktivität (Lagerung des Materials bei einer Umgebungstemperatur von 15°C)

Bild 8 zeigt die berechnete Temperaturverteilung im Haufen nach sechs Monaten ohne Berücksichtigung der mikrobiellen Prozesse: Nach dieser Kalkulation erfolgt keine Selbstentzündung, da die Temperatur innerhalb des Haufens nur unwesentlich ansteigt. Werden dagegen die mikrobiologischen Prozesse auf Basis des von TREMIER *et al.* (2005) adaptierten Modells berücksichtigt, wird deutlich, dass es bereits innerhalb kurzer Zeit (etwa nach 80 Tagen, **Bild 9**) im Haufen zu einer Selbstentzündung kommen kann.

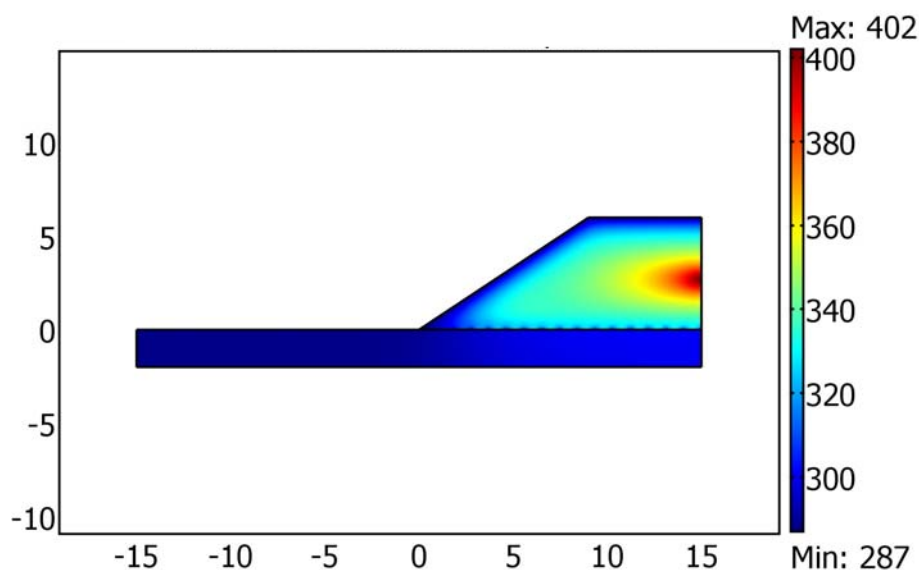


Bild 9: Berechnung der Selbsterwärmung einer Holzhalde unter Berücksichtigung der mikrobiellen Aktivität (Lagerung des Materials bei einer Umgebungstemperatur von 15°C)

5 Fazit

Die vorliegende Studie umreißt die Problematik der Selbstentzündung in gelagerten Kiefernholz-Hackschnitzeln. Darüber hinaus werden die im Labormaßstab durchführbaren Standard-Untersuchungsmethoden beschrieben und die Ergebnisse zur Selbstentzündungstemperatur für verschiedene Holzmaterialien vorgestellt. Außerdem werden die experimentell ermittelten Daten mit Berechnungen auf Basis eines selbstentwickelten Modells verglichen. Das Modell besteht aus einem System gekoppelter Differentialgleichungen zum Wärme- und Massentransport. Es beinhaltet die Effekte der Selbsterwärmung durch chemische Wärmebildung, Evaporation und Kondensation von Wasser, berücksichtigt jedoch nicht die mikrobiellen Prozesse. Die Prognosen des Modells, die mit Hilfe des Finite-Element-Code COMSOL Multiphysics berechnet wurden, zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den in Laborstandarduntersuchungen experimentell ermittelten Werten, da bei den hohen Temperaturen während der Versuchsdurchführung eine exotherme mikrobielle Aktivität nicht auftritt.

Ein Versuch im technischen Maßstab mit einem 1300 m³ großen Holzhaufen ergab jedoch, dass die exothermen mikrobiellen Prozesse in der Praxis eine große Rolle spielen. Das mathematische Modell wurde deshalb verbessert, um diesen mikrobiellen Prozessen Rechnung zu tragen. Multidimensionale und zeitabhängige Berechnungen zeigen, dass mikrobielle Prozesse die Wegbereiter für die Selbstentzündung in Biomasselagern im Freien sein können. Dieses Ergebnis ist bedeutend für die Bestimmung sicherer Lagerungsbedingungen für Kiefernholzschüttgüter.

6 Literatur

- AULENTA F., BASSANI C., LIGTHART J., MAJONE M., TILCHE A. (2002):** Calorimetry: a tool for assessing microbial activity under aerobic and anoxic conditions. *Water Research* 36, 1297-1305
- DIN EN 15188 (2007):** Determination of the spontaneous ignition behaviour of dust accumulations, Beuth Verlag, Berlin
- FERRERO F., MALOW M., BERGER A., KRAUSE U. (2007):** Modelling the coupled heat and mass transfer during fires in stored biomass, coal and recycling deposits. 1st European COMSOL Conference. Grenoble, France 23-24 October 2007, p. 538-543
- ISO 14852 guideline (1999):** Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium – Method by analysis of evolved carbon dioxide
- KRAUSE U., SCHMIDT M., LOHRER C. (2006):** A numerical model to simulate fires in bulk materials and dust deposits. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, 218-226
- LOHRER C., SCHMIDT M., KRAUSE U. (2005):** A study on the influence of liquid water and water vapour on the self-ignition of lignite coal - experiments and numerical simulations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18, 167-177
- NITSCH J. (2007):** Ausbaustrategie Erneuerbare Energien, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050. Pilot Study, German Federal Environment Ministry, 99 pp
- ROTHENBURG, 2000:** www.faktuell.de/Hintergrund/Background48.shtml
- STEEN H. (2000):** Handbuch des Explosionsschutzes. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 761 pp
- TRAUNREUT, 2005:** <http://www.kreisfeuerwehrverband-traunstein.de/17.09.05.html>
- TREMIER A., DE GUARDIA A., MASSIANI C., PAUL E., MARTEL J.L. (2005):** A respirometric method for characterising the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted. *Bioresource Technology* 96, 169-180
- WEPPEN P. (2001):** Process calorimetry on composting of municipal organic wastes. *Biomass and Bioenergy* 21, 289–299

Schimmelpilzentwicklung und Trockenmasseverluste in Holz-hackschnitzelhaufen

Moulds and dry matter losses in wood chips piles

Christine Idler¹, Volkhard Scholz¹, Werner Daries¹, Johannes Egert²

¹ Leibniz-Institut für Agrartechnik e.V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100

² Büro für Holzschutz und Wohnraumhygiene, 14471 Potsdam, Forststr. 101

Kurzfassung

Aus den Ergebnissen der seit 1998 durchgeführten Lagerungsversuche im halb- und großtechnischen Maßstab kann ein dominierender Einfluss der Hacklänge auf die untersuchten Parameter festgestellt werden. Sie bestimmt die Temperatur in einer Schüttung und damit Schimmelpilzentwicklung, Trocknungsverlauf sowie Lager- und Energieverluste. Während die mittlere Haufentemperatur eine statistisch relativ gut gesicherte Korrelation zur Hacklänge aufweist, zeigt die Anzahl der Pilze eine deutlich höhere Streuung. Die Ursachen werden vornehmlich in der Stochastik des Pilzbefalls vermutet. Während der Gehalt an thermophilen Schimmelpilzen eine sehr enge Korrelation zum Hackformat und damit von der Temperatur aufweist, ist die Anzahl der mesophilen Pilze nahezu unabhängig von der Hacklänge.

Die Trockenmasseverluste zeigen in Abhängigkeit von der Hacklänge einen unerwarteten Verlauf. Zwar sind sie bei kleinen Hackschnitzeln < 60 mm deutlich höher als bei großen Hackstücken > 120 mm, doch überschreiten sie bei sehr feinen Hackschnitzeln < 20 mm nicht 30% p.a.

Für die Praxis ist weniger der Trockenmasseverlust als vielmehr der Verlust an technisch nutzbarer Energie maßgebend. Sofern keine Brennwerttechnik eingesetzt wird, ergibt sich dieser aus dem Trockenmasse- und Wasserverlust sowie aus der Änderung des unteren Heizwertes, der sich bei Langzeitlagerung jedoch nur wenig verändert. Bei Feinhackschnitzeln ist der Energieverlust nahezu mit dem Trockenmasseverlust identisch und beträgt etwa 20 bis 30% p.a., bei groben Hackstücken > HS 120 dagegen liegt er aufgrund der geringen Trockenmasseverluste und aufgrund des geringen End-Wassergehaltes im Bereich von - 5% bis + 5% p.a.

Abstract

Results of storage experiments carried out since 1998 on semi- and large-scale showed a dominating effect of wood chip size on the parameters under examination. The length of chips influenced temperature within the pile and thus the development of moulds, the drying as well as the dry matter and energy losses. While mean pile temperature reveals a statistically firm correlation with chip length, the number of fungi shows considerable higher distribution. It is assumed that this is caused by the stochastics of the fungi infection. While the occurrence of thermophilic fungi is closely correlated with chip format and, thus, with temperature, the number of mesophilic fungi is largely not related to the length of the wood chip.

Dry matter losses reveal an unexpected development depending on chip length. Although losses in chip fractions smaller than 60 mm are higher than in chips larger than 120 mm, they do not exceed 30% p. a. even in very small fractions of < 20 mm.

In practice dry matter losses are not as relevant as the loss of technically useable energy. As far as no calorific value technology is being used, loss is composed by loss of dry matter and water content as well as by alteration of the net calorific value, which is not changing largely under long-term storage conditions. In very small chip fractions energy losses are largely coinciding with losses of dry matter amounting to 20 to 30% p. a. In chip fractions larger than 120 mm losses range from -5% to 5% p.a. only, due to little dry matter losses and the low final water content.

1 Einleitung

Die Nachfrage nach Holzhackschnitzeln ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen. Selbst im walddreichen Bundesland Brandenburg übersteigt der prognostizierte Bedarf der geplanten Holzheizkraftwerke das Potenzial an nachhaltig nutzbarem Waldholz (FISCHER & DAHLE 2005). Um diesen Bedarf langfristig decken zu können, bietet sich der Anbau von schnellwachsenden Baumarten, wie Pappeln und Weiden, auf landwirtschaftlichen Flächen an (SCHOLZ *et al.* 2004, SCHOLZ & GRUNDMANN 2004). Für die Ernte dieser Feldgehölze wird die Schüttgutlinie favorisiert, bei der die Bäume in einem Arbeitsgang gefällt und gehackt werden (BURGER & SCHOLZ 2004). Die so produzierten Hackschnitzel sind aufgrund des hohen Wassergehaltes von 50 bis 60% allerdings nur begrenzt lagerfähig. Bei der Lagerung in unbelüfteten Schüttungen verursachen Mikroorganismen, insbesondere Schimmelpilze, innerhalb weniger Tage hohe Temperaturen und dadurch wirtschaftlich relevante Masse- und Energieverluste. Außerdem können Schimmelpilze eine arbeitshygienisch bedenkliche Größenordnung erreichen.

Der natürliche Holzabbau erfolgt durch verschiedene Mikroorganismen sowie deren Enzyme, welche die Holzbestandteile zu löslichen Produkten abbauen. Der Beitrag der Bakterien wird kontrovers diskutiert. Sicher scheint, dass ihr Anteil durch Lignin limitiert

wird. Im Vergleich zu den Pilzen verläuft der Holzabbau durch Bakterien zudem wesentlich langsamer (CRAWFORD 1975). Insgesamt sind die Verluste durch Bakterien eher selten, während Pilze imstande sind, Lignin oder Cellulose oder beide Zellbestandteile zugleich abzubauen.

Am Holzabbau sind sowohl holzerstörende Pilze (Braunfäule-, Weißfäule- und Moderfäulepilze) als auch Schimmelpilze beteiligt. Mycelwachstum, Sporenbildung und Sporenkeimung hängen in hohem Maße von der Feuchtigkeit des Substrates, der Temperatur und dem pH-Wert ab. Ausschlaggebend ist der Gehalt an frei verfügbarem Wasser auf dem Substrat (REIß 1997). Als Substrate werden von den Schimmelpilzen vor allem Cellulose und andere Kohlenhydrate sowie Fette abgebaut. Der Abbau von Lignin ist nur bei einigen wenigen Vertretern der Ascomyceten und Deuteromyceten bekannt. Diese Pilze werden unabhängig von ihrer systematischen Stellung zu den Weiß- oder Moderfäulepilzen gezählt. Weitere Ligninabbauer sind u.a. *Aspergillus fumigatus* und *Paecilomyces sp.* Zum Umfang des Substanzabbaus durch Pilze wurden insbesondere im vergangenen Jahrzehnt verschiedene Untersuchungen durchgeführt, und zwar um das Holz einerseits aufzuschließen und andererseits die Lagerverluste zu bestimmen (SCHOLZ & IDLER 2000). Verschiedene Autoren (MARUTZKY & KESERUE 1982, BRUSCHE 1983, LAUER & BERGMAYER 1986, MITCHELL *et al.* 1988, WAGENFÜHR 1988, WEINGARTMANN 1991, BRUNNER & OBERNBERGER 1997, RINK 1997, STOCKINGER & OBERNBERGER 1997, 1998, KIRSCHBAUM 1998, WEBENAU *et al.* 1999) ermittelten dabei Trockenmasserverluste von 0,5% bis 10% pro Monat.

Zu den wichtigsten der auf Holz anzutreffenden Schimmelpilze gehören Vertreter der Gattungen *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Rhizopus*, *Mucor*, *Botrytis*, *Cladosporium* und *Paecilomyces*. In diesen Gattungen sind insbesondere thermophile Spezies vertreten, also Pilze, die bei der Körpertemperatur günstige Wachstumsbedingungen finden.

2 Methoden

2.1 Hackschnitzel

Für die Lagerversuche wurden motormanuell gefällte 2 bis 8-jährige Kurzumtriebspappeln (Japan 105, NE 42, UNAL VII) und Weiden (*Salix viminalis* 83/21/12) bis zu einem Brusthöhendurchmesser von 120 mm verwendet. Zur Ernte hatte das Holz einen Wassergehalt von 50 bis 60%. Das Hackgut wurde mit vier verschiedenen Hackern erzeugt und hatte eine mittlere Länge (Median) von 16 bis 156 mm (HS 16 bis HS 156), was einer mittleren Sieblochweite von 10 bis etwa 80 mm entspricht. Die Zeitdauer zwischen Ernte, Hacken und Einlagerung betrug maximal 2 Tage. (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Mittlere Länge der verwendeten Hackgut-Klassen

Hackgut	Hacker	Medianwert	
		Siebloch- weite mm	Reale Länge mm
Feinhackschnitzel	Scheibenradhacker Frami CH 150	10...11	16...23
Mittelhackschnitzel	Schneckenhacker Laimet HP 21 / 65 ¹⁾	15...19	36...46
Grobhackschnitzel	Schneckenhacker Laimet HP 21 / 110 ¹⁾	26...30	56...63
Hackstücke	Kurzholz-Scherhacker Diemer MSK 25-15	48...82	120...156

¹⁾ Steigung der Schnecke in mm

2.2 Lagerungsformen

Entsprechend der verschiedenen Versuchsanstellungen wurden auch unterschiedliche Lagerungsformen verwendet:

- Modelsilos ($V = 5 \text{ dm}^3$), bestehend aus zylindrischen Acrylglas mit luftdurchlässigen Böden
- Lagersilos ($V = 1,5 \text{ m}^3$), bestehend aus zylindrischen PU-Hartschaumdämmkörpern mit dichtem bzw. luftdurchlässigem Boden und Regenschutzhaube
- Lagerboxen ($V = 10 \text{ m}^3$), bestehend aus quaderförmig angeordneten, wärmeisolierten Betonplatten mit festem bzw. luftdurchlässigem Boden und einem abnehmbaren Regenschutzdach
- Lagerhaufen ($V = 18 \dots 2.000 \text{ m}^3$), bestehend aus frei aufgeschütteten Dreiecksmieten ($h = 3 \dots 6 \text{ m}$, $b = 4 \dots 15 \text{ m}$) z.T. mit Regenschutzdach und horizontalem Luftkanal

2.3 Analysen

Temperatur

Die Messung der Temperatur in den verschiedenen Schüttungen erfolgte jeweils in 4 bis 5 Höhen mit mehreren Vierdraht-PT100-Fühlern in den Lagersilos und mit 1,20 m langen elektronischen Mietenthermometern in den Boxen und Haufen sowie teilweise mit Temperatur-Minidataloggern der Fa. Gemini Data Loggers Ltd. Die Messintervalle lagen im Bereich von 20 Minuten bis zu 7 Tagen.

Trockenmasseverlust

Die Trockenmasseverluste wurden mit Hilfe von Bilanzbeuteln ermittelt, wie sie zur Bestimmung von Silierverlusten in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Es sind engmaschige Kunststoff-Netze, die jeweils mit 500 g bis 1000 g Versuchsmaterial gefüllt werden. Vor der Einlagerung in das Gutbett und nach der Auslagerung wurden Masse und Wassergehalt des Beutelinhalts bestimmt. Aus der Differenz errechnet sich der Trockenmas-

severlust. Je Lagertyp wurden insgesamt bis zu 66 Bilanzbeutel in 3 bis 6 Ebenen angeordnet.

Schimmelpilze auf dem Holz

Die Bestimmung der Zahl der Schimmelpilze erfolgte nach der indirekten Methode zur Keimzahlbestimmung. Dazu wurden 20 g keimarm zerkleinerte Holzstücke (ca. 1 cm³) in 180 ml Ringerlösung 30 Minuten ausgeschüttelt, dekadisch verdünnt und auf Malzextraktagar mit 0,01% Chloramphenicolzusatz sowie auf DG 18 Agar aufgespatelt. Die DG 18 Platten wurden nach 7-tägiger Inkubation bei 20°C (mesophile Pilze) - abweichend von der TRBA 430 (2001) (25°C) - ausgewertet und die Malzextrakt-Platten nach 1 bis 2-tägiger Inkubation bei 37°C (thermophile Pilze). Die gewachsenen Kolonien wurden gezählt und morphologisch unterschiedliche Kolonien identifiziert. Dazu wurden die Bestimmungsschlüssel von PITT & HOCKIN (1979), SAMSON *et al.* (2000) und HOOG *et al.* (2000) herangezogen.

Pilzsporenmessung in der Luft

Die Messung der Konzentration der Schimmelpilzsporen in der Luft erfolgte in Anlehnung an die Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe TRBA 430 (2001). Die Proben wurden mit dem Luftkeimsammelgerät MD 8 (Fa. Sartorius, Göttingen) genommen. Dabei wurden die Pilzeinheiten auf einem Gelatinemembranfilter mit einer Porengröße von 3 µm und einem Durchmesser von 80 mm (Gelatine-Einweegeinheiten, Sartorius) abgeschieden. Für Langzeitmessung (2 Messungen pro Messpunkt) wurde mindestens 1 m³ Luft angesaugt. Die Einstellung am MD 8 lag dabei nicht höher als 5 m³/h. Die beaufschlagten Filter wurden in 10 ml physiologische Kochsalzlösung (0,9 %iges NaCl mit 0,01% Tween 80, 35 - 40°C) verbracht, ca. 30 Minuten bei 30 bis 40°C geschüttelt und vor der Entnahme „gevortext“. Die Suspensionen wurden dekadisch verdünnt und ein Aliquot auf Kulturplatten mit DG 18 Agar mit 0,01% mit Chloramphenicolzusatz und Malzextrakt-Agar ausgespatelt. Die Kultivierung der Nähragarplatten erfolgte wie bei der Schimmelpilzbestimmung auf Holz bei 20°C bzw. 37°C.

Datenauswertung

Die Daten wurden mittels Varianzanalyse Modell 2 mittels SAS, Version 9.0 statistisch ausgewertet (SAS 2002).

3 Ergebnisse

3.1 Temperaturverlauf

Unmittelbar nach der Einlagerung steigt die mittlere Temperatur sprunghaft an und erreicht nach 10 bis 50 Tagen ihren Maximalwert von $\leq 60^{\circ}\text{C}$, dessen Höhe im Wesentlichen von Schüttvolumen, Oberfläche, Umgebungs- bzw. Oberflächentemperatur und ins-

besondere von der Hackschnitzelgröße bestimmt wird. Örtlich kann die Temperatur in der Schüttung bis auf 65°C ansteigen. 100 bis 150 Tage nach der Einlagerung (Ende Januar) erreicht sie ein deutlich niedrigeres Niveau von $\leq 25^\circ\text{C}$ bis 35°C und fällt danach sukzessive auf Umgebungstemperatur ab (**Bild 1**).

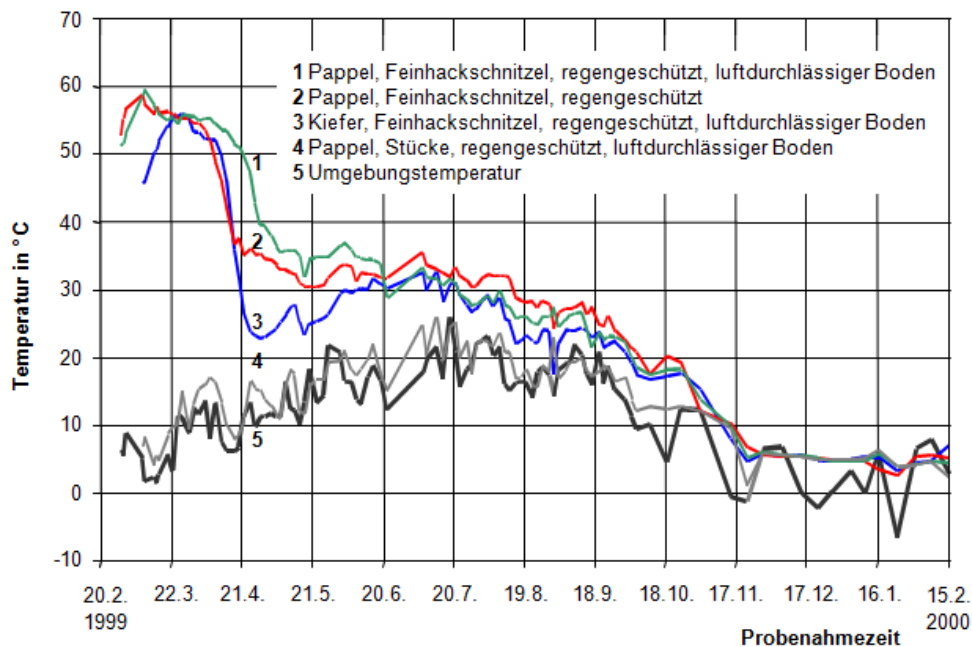


Bild 1: Typische Temperaturverläufe unterschiedlicher Holzfallschnitzelformate während einer einjährigen Lagerung in 10 m^3 Schüttung

Eine der Ursachen der Temperaturerhöhung ist die Wärmeentwicklung infolge der Atmung noch nicht abgestorbener Splintholzzellen ($< 40^\circ\text{C}$) und infolge der Aktivität von Mikroorganismen, insbesondere von Pilzen ($< 60^\circ\text{C}$) und Bakterien ($< 70^\circ\text{C}$). Bei Temperaturen um 60°C wird das Wachstum der Pilze gehemmt, so dass sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen Stoffwechselaktivität und Temperatur der Haufen nicht weiter erwärmt.

Innerhalb der Schüttung bildet sich insbesondere bei Feinhackschnitzeln ein ausgeprägter Temperaturgradient über der Höhe aus. Die höchsten Temperaturen treten meist in den mittleren Schichten auf und können um mehr als 30 K über denen der Deckschicht liegen. Wie Messungen mit Einstichthermometern und mit einer Thermografie-Kamera belegen, können die Temperaturen in großvolumigen Schüttungen in gleicher Höhe örtlich um mehr als 25 K differieren. Dies ist offenbar auf die Ausbildung von sogenannten Schloten zurückzuführen, also vertikalen Zonen, in denen eine verstärkte Wärmekonvektion erfolgt (SCHOLZ *et al.* 2005)

3.2 Trocknungsverlauf

Die Trocknung der Holzhackschnitzel ist wesentlich vom Anfangswassergehalt, der Temperaturentwicklung und der Hackschnitzelgröße abhängig. Sowohl bei Fein- als auch bei

Grobhackschnitzeln und sogar bei ganzen Bäumen ($\varnothing < 80$ mm) ist die Trocknung nach 100 bis 150 Tagen, also mit dem Ende der Hochtemperaturphase in den Schüttungen, im Wesentlichen abgeschlossen. In Folge des hohen Strömungswiderstandes, der hohen Temperatur und der dadurch verursachten Kondensation unter der Haufenoberfläche trocknen Feinhackschnitzel innerhalb eines Jahres kaum unter 30% ab (**Bild 2**). Selbst Mittelhackschnitzel unterschreiten nur selten diesen Wert. Erst ab Hackschnitzellängen über 60 mm werden Wassergehalte unter 30% erreicht. Niederschläge bewirken eine Erhöhung des Wassergehaltes, die von Form und Größe der Hackschnitzel und des Haufens abhängig ist sowie von der Temperatur im Haufen. In der Hochtemperaturphase wird eindringendes Niederschlagswasser schneller verdunstet als in der kühlen Phase. Innerhalb der Schüttung bilden sich in Abhängigkeit von der Hackschnitzellänge typische Feuchteprofile aus. Während bei groben Hackschnitzeln der Wassergehalt über der Höhe relativ gleichmäßig verteilt ist und ein geringes Maximum im unteren Bereich aufweist, nimmt mit kleiner werdenden Hackschnitzeln der Wert des Maximums zu und wandert nach oben. Gleichzeitig bildet sich am Boden ein zweites Feuchtemaximum aus.

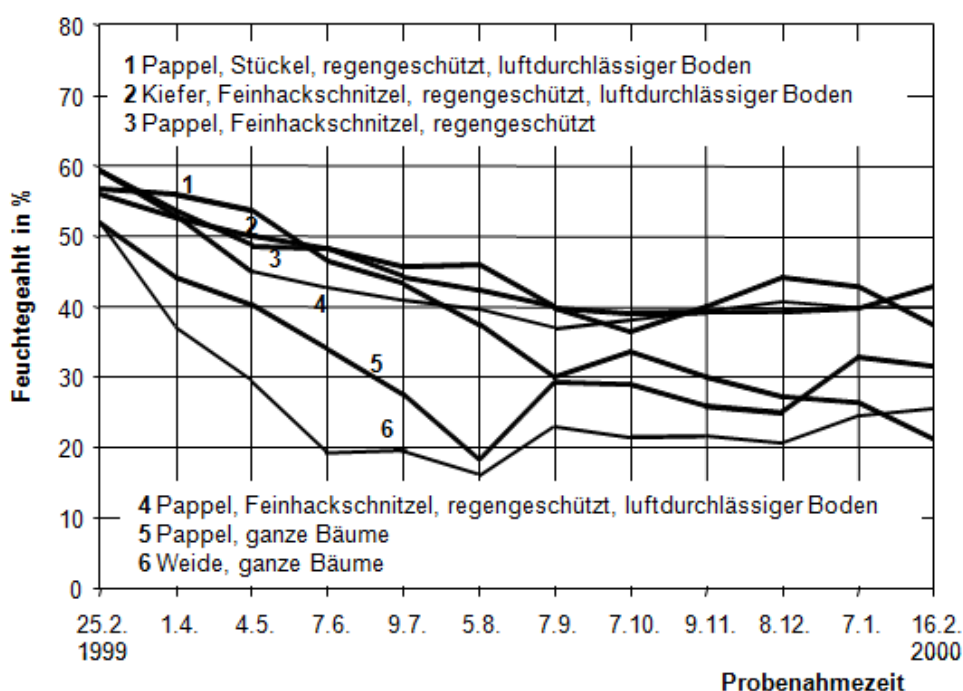


Bild 2: Typische Trocknungsverläufe in Schüttungen aus unterschiedlich zerkleinertem Pappel- und Kiefernholz

Ein luftdurchlässiger Spaltenboden oder Luftkanal kann zumindest in den angrenzenden Zonen zu verbesserten Trocknungsbedingungen führen, der Effekt auf den Wassergehalt der Gesamtschüttung scheint sich jedoch in Grenzen zu halten. Bei 2 m hohen Schüttungen aus Feinhackschnitzeln bewirkt ein hölzerner Spaltenboden bei Feinhackschnitzeln HS 16 eine Verringerung des mittleren Wassergehaltes nach einjähriger Lagerung von 43% auf lediglich 38%. Dessen ungeachtet, könnte ein mit geringem Überdruck beaufschlagter Luftkanal bzw. -boden einen erheblichen Trocknungseffekt bewirken, insbeson-

dere während der Hochtemperaturphase (SCHOLZ *et al.* 2005). Allerdings würde dies zusätzliche technische und finanzielle Aufwendungen erfordern.

3.3 Schimmelpilzentwicklung auf dem Holz

Pilze gelten mit als Verursacher für Trockenmasseverluste. Ihre Entwicklung weist enge Wechselwirkungen zur Temperatur im Holzhackschnittelhaufen auf. Die Anzahl der mesophilen Schimmelpilze steigt analog der Temperatur in den ersten 10 bis 30 (100) Tagen auf Maximalwerte von etwa 10^6 bis 10^8 Koloniebildende Einheit je g Frischmasse (KbE/g FM) an, bleibt danach jedoch im Gegensatz zur Temperatur mehr oder weniger konstant und fällt meist nur geringfügig ab. Die Anzahl mesophiler Schimmelpilze ist im Bereich von 10°C bis 50°C nicht oder nur geringfügig von der mittleren Haufentemperatur abhängig. Im Gegensatz dazu nehmen thermophile Schimmelpilze mit steigender Temperatur signifikant zu und erreichen zwischen 20 und 35°C eine ähnliche Größenordnung wie die der mesophilen Pilze. Hierbei ist jedoch eine deutliche Abhängigkeit vom Hackformat zu erkennen (**Bild 3**).

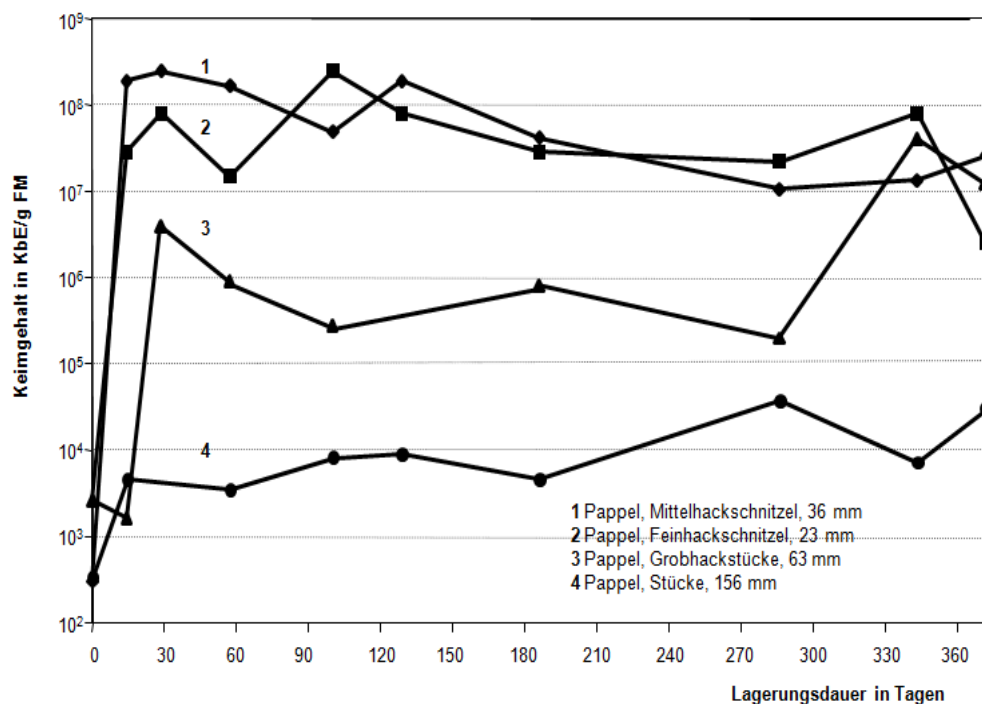


Bild 3: Entwicklung von thermophilen Schimmelpilzen in 10 m^3 -Schüttungen aus Pappelhackgut unterschiedlicher Hacklänge

Das heißt, bei der Lagerung von Holzhackgut sind die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Bildung mesophiler Schimmelpilze begrenzt, das erhöhte Auftreten der thermophilen, also der vorwiegend potenziell humanpathogenen Arten kann jedoch durch Vermeidung von Temperaturen über im Mittel 20°C bzw. maximal 35°C verhindert werden.

Für die Beurteilung der Wirkung von Schimmelpilzen ist nicht nur die Anzahl, sondern auch die Spezies von Interesse. Von insgesamt jeweils 6 bis 8 identifizierten thermophi-

len Pilzarten wurden bei Feinhackschnitzeln 4 bis 8 und bei Grobhackstücken 2 bzw. 4 potenziell humanpathogene, toxische und/oder allergene Arten festgestellt, die während der einjährigen Lagerung zumindest zeitweilig auftraten. Der Pilz mit der höchsten humanpathogenen Potenz, *Aspergillus fumigatus*, trat während des gesamten Lagerzeitraums auf. In Fein- und Mittelhackschnitzeln wurde er in 93% und bei Grobhackschnitzeln und -stücken in 76% der insgesamt 756 diesbezüglich analysierten Proben nachgewiesen.

3.4 Pilzsporen in der Luft

Die Verbreitung der Sporen, also der luftgetragenen vermehrungsfähigen Keimzellen der Schimmelpilze, ist von zahlreichen Faktoren abhängig, insbesondere jedoch von Pilzbesatz und Luftgeschwindigkeit. Die unmittelbar über den vier 10 m³-Pappelhackgut-Boxen gemessenen Sporenkonzentrationen in der Luft bestätigen, dass mit wachsender Anzahl der Schimmelpilze auf dem Holz die mittlere Anzahl der Sporen in der Luft progressiv zunimmt und bei etwa 10⁷ KbE/g FM auf dem Holz Werte von nahezu 10⁴ KbE/m³ Luft erreicht.

Die bei ungestörten Hackgut-Schüttungen in unterschiedlichen Entfernungen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelte Sporenkonzentration in der Luft liegt im Bereich von 10¹ bis 10⁴ KbE/m³ (**Bild 4**). Damit werden die in der Umgebungsluft gemessenen Werte von 5·10¹ bis 5·10² KbE/m³ für mesophile und von 0 KbE/m³ für thermophile Pilzsporen um etwa ein bis zwei Zehnerpotenzen überschritten. Wie auf dem Holz dominiert auch in der Luft die thermophile Pilzspezies, *Aspergillus fumigatus*. Über Schüttungen aus Grobhackschnitzeln und -stücken (HS 63 und HS 156) ist seine Sporenkonzentration in Abhängigkeit von der Lagerzeit bis zu zwei Zehnerpotenzen geringer als über Feinhackschnitzeln (HS 23) (SCHOLZ *et al.* 2005).

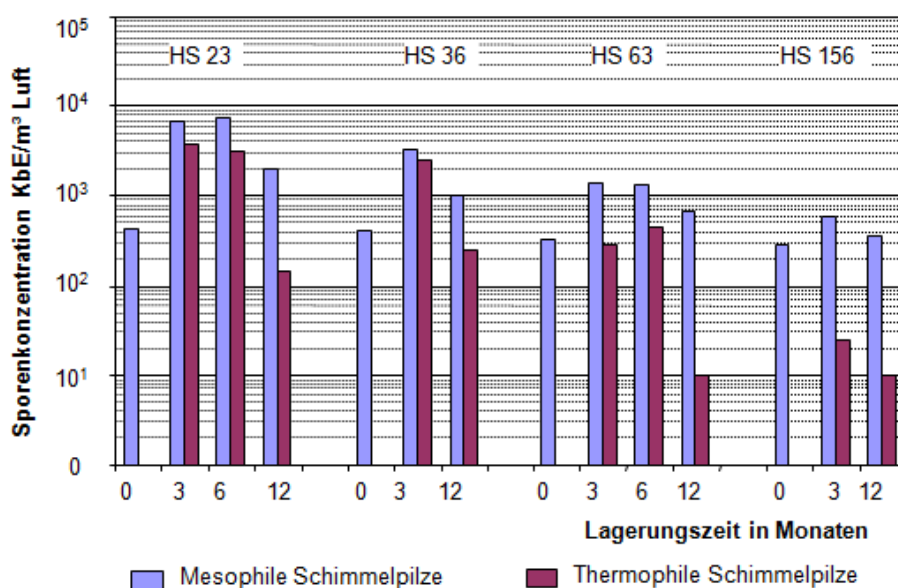


Bild 4: Sporenbelastung der Luft über unterschiedlich aufbereitetem Pappelholz, Lagerung in Boxen

Wird die Haufenstruktur gestört, wie es z.B. bei der mechanischen Aus- und Umlagerung des Hackgutes erforderlich ist, kann die Sporenkonzentration in der Luft in Abhängigkeit von der Entfernung kurzzeitig auf Werte von 10^5 bis 10^8 KbE/m³ ansteigen. Damit wird beispielsweise der technische Kontrollwert (TKW) für biologische Abfallbehandlungsanlagen von $5 \cdot 10^4$ KbE/m³ für mesophile Schimmelpilze überschritten (TRBA Nr. 211 2001). Dieser Kontrollwert, der für Holzlager keine gesetzliche Verbindlichkeit hat, gilt für die Kontrolle von Schutzmaßnahmen für das Personal in Kabinen, Steuerständen u. ä. in o.g. Anlagen. Der Arbeitgeber ist zur Ermittlung und Einhaltung dieses Wertes verpflichtet.

3.5 Trockenmasseverluste

Bei der Lagerung von Holzhackgut treten Verluste auf, deren Ursache überwiegend den Pilzen zugeschrieben wird. Wie die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, liegen die mittleren Trockenmasseverluste von unbelüfteten Schüttungen aus erntefrischem Hackgut zwischen 10% und 30% pro Jahr. Örtlich, insbesondere in den Randzonen, können sogar Höchstwerte von über 40% p.a. auftreten. Eine statistisch gesicherte Korrelation zwischen Schimmelpilzbesatz und Trockenmasseverlust ist jedoch nicht ableitbar.

Aufgrund der Abhängigkeit der Schimmelpilzentwicklung von der Wasseraktivität wird der Trockenmasseverlust auch vom Wassergehalt des Hackgutes beeinflusst. Hohe Wassergehalte führen in der Regel zu hohen Trockenmasseverlusten (**Bild 5**). Bei den Mittelwerten der verschiedenen Schüttungen ist dieser Zusammenhang allerdings weniger deutlich ausgeprägt.

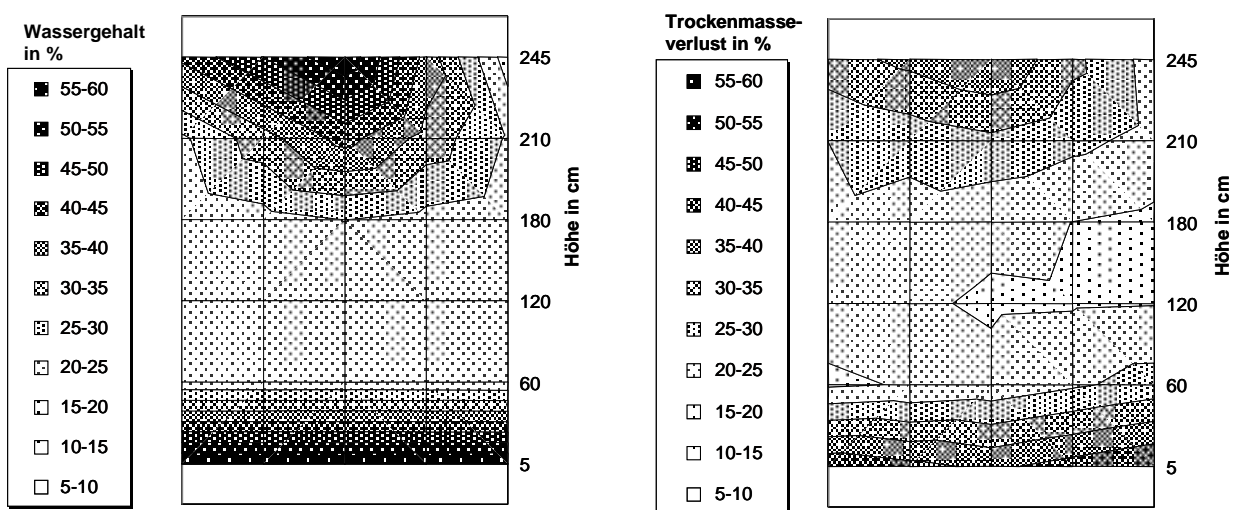


Bild 5: Typische Profile des Wassergehaltes (links) und des Trockenmasseverlustes (rechts) in 10 m³-Schüttungen aus Pappel-Mittelhackschnitzeln nach einjähriger Lagerung

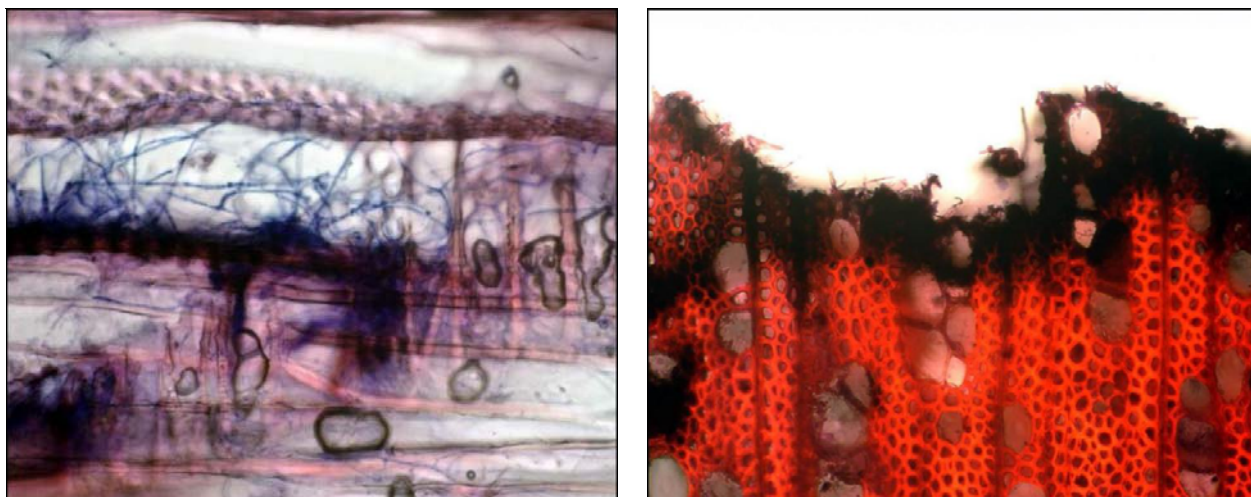


Bild 8: In einjährig gelagerte Hackschnitzel eingewachsene Hyphen (blau), von holzerstörenden Pilzen (links) Hackschnitzelquerschnitt: Befall durch holzverfärbende und -zerstörende Pilze, beginnend im Außenbereich der Hackschnitzel (rechts), Aufnahmen: Institut für Holztechnik Dresden 2008

Die in Laborversuchen untersuchten Einflussgrößen auf die Trockenmasseverluste (Holzart, Temperatur, Luftfeuchte, Rindenanteil, Schnittflächenbeschaffenheit, Zeitabhängigkeit, Sterilität) sowie erste Beimpfungsversuche mit Schimmelpilzen bestätigen die bisher gewonnenen Erkenntnisse. Die Quantifizierung von Trockenmasseverluste durch Beimpfung mit Pilzen, die einen effektiveren Holzabbau betreiben (Holzerstörer), bleibt weiteren Versuchsanstellungen vorbehalten. Der mikrobiologische und molekulargenetische Nachweis des Auftretens von Basidiomyceten indessen ist bereits gelungen (**Bild 6**).

4 Zusammenfassung

Es kann festgestellt werden, dass bei der Lagerung von Feldholzhackgut in unbelüfteten Haufen zwar Trockenmasseverluste und Schimmelpilze nicht gänzlich vermieden werden können, die Energieverluste und die Bildung gesundheitsgefährdender Pilzspezies können jedoch auf ein vertretbares Minimum reduziert werden. Die Hackschnitzel bzw. Hackstücke sollten hierfür jedoch eine mittlere Länge von mindestens 100 mm aufweisen (entsprechend einer Sieblochweite von ca. 40 bis 50 mm), also im oberen Bereich der größten Hackschnitzelklassen der bestehenden österreichischen und der im Entwurf befindlichen europäischen Norm liegen. Grobhackschnitzel von etwa 60 mm Länge (Median) verursachen Energieverluste von über 10% pro Jahr und häufig mehr als 10^5 koloniebildende Einheiten thermophiler Pilze pro Gramm Frischmasse. Feinhackschnitzel unter 30 mm bewirken noch deutlich höhere Verluste und Pilzbelastungen. Um bei Fein- und Mittelhackschnitzeln (< 50 mm) die Pilzbelastung in Grenzen zu

halten, sollten in unbelüfteten Haufen Lagerzeiten von 1 bis 2 Wochen nicht überschritten werden.

Nach einem Jahr Lagerung liegen die mittleren Wassergehalte der Schüttungen zwischen 20% bei Grobhackstücken und bis zu 50% bei Feinhackschnitzeln. Ein Regenschutz kann insbesondere bei Fein- und Mittelhackschnitzeln die Trocknung verbessern und Pilzbesatz und Verluste senken. Dies ist jedoch von Hacklänge, Witterungsverlauf, Haufenform u.a. abhängig. Ein Spaltenboden oder Luftkanal verbessert ebenfalls die Lagerbedingungen, ist aber nur für Hacklängen ab ca. 30 mm effektiv.

Zum Einfluss der Holzart auf Schimmelpilzbesatz und Verluste von Hackschnitzeln können aus den durchgeführten Untersuchungen keine gesicherten Aussagen abgeleitet werden. Der augenscheinlich deutlich geringere Pilzbesatz bei Kiefer gegenüber Pappel konnte analytisch nicht bestätigt werden.

Weiterführende Untersuchungen sollten u.a. dem letzten Problem nachgehen, also Lagerverluste und Schimmelpilzwachstum für andere Holzarten klären. Darüber hinaus sollten Pilzsporenmessungen in Praxisanlagen durchgeführt werden, um das reale Gefährdungspotenzial abzuschätzen, sowie ingenieurtechnisch und mikrobiologisch begründete Dimensionierungsgrundlagen für Holzhackschnitzellager entwickelt werden.

In gezielten Laborversuchen sollten die Abbauraten von Schimmelpilzen auf Holz ermittelt werden und dabei auch holzerstörende Spezies mit einbezogen werden. Ferner sollten auch Bakterien in die Untersuchungen einbezogen werden.

6 Literatur

- BRUNNER T., OBERNBERGER I. (1997):** Trocknung von Biomasse – Grundlagen und innovative Technik. In: Tagungsband der 3. Internat. Fachtagung „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, Freiberg, S. 86-94
- BRUSCHE R. (1983):** Verfahren zur Bergung, Lagerung und Trocknung von Hackschnitzeln aus Schwachholz Dissertation, Universität Kiel
- BURGER F., SCHOLZ V. (2004):** Stand der Technik bei der Ernte von Energiewäldern. Holz-Zentralblatt Nr. 46, S. 610-611
- CRAWFORD R.L. (1975):** Mutualistic of the lignin model compound veratrylglycerol- β -(o - methoxyphenyl) ether by bacteria. Can. J. Microbiol. 21, 1654 – 1657
- FISCHER A., DAHLE S. (2005):** Persönliche Mitteilung. ZAB Brandenburg und IHK Potsdam, 2.5.2005
- HOOG G.S., GUARRO J., GENE J., FIGUERAS M.J. (2000):** Atlas of clinical fungi. 2nd edition, Centraalbureau voor Schimmelcultures, Universität Rovira I Virgil
- KIRSCHBAUM H.-G. (1998):** Lagerung von Holzhackschnitzeln für eine energiewirtschaftliche Nutzung. In: Beiträge des IBZ Hohen Luckow e.V. 4, S. 159-171
- LAUER M., BERGMAYER M. (1986):** Einfache Methode zur natürlichen Trocknung von Hackgut und Rinde für kleine und mittlere Feuerungsanlagen bis 500 kW. Institut für Umweltforschung, Graz

- MARUTZKY R., KESERUE G. (1982):** Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. 3. Mitt. Einfluss der Lagerung auf die Qualität der Holzspanplatten, Holz-Zentralblatt 108, Nr.7, S. 81-82
- MITCHELL C.P., HUDSON J. B., GARDENER D., STORRYP A. (1988):** Comparative Study of Storage and Drying of Chips and Chunks in the United Kingdom, Produktion, Storage and Utilization of Wood Fuels. The Swedish University of Agricultural Sciences, Research Notes 134, Schweden
- PITT J.I., HOCKIN A.D. (1997):** Fungi and Food Spoilage. Blackie Academic & Professional, 2. Auflage, 1997
- REIB J. (1997):** Schimmelpilze-Lebensweise, Nutzen Schaden Bekämpfung. 2. Aufl. Springer-Verlag
- RINK H. (1997):** Trocknung von Holzhackschnitzel durch freie Konvektionslüftung. Diplomarbeit, Universität Rostock
- SAMSON R.A., HOEKSTRA E.S., FRISVAD J.C., FILTENBORG O. (2000):** Introduction to food-and air-borne fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures Baarn/ Delft, 6. Auflage
- SAS INSTITUTE INC. 2002.** SAS OnlineDoc® 9. Cary, NC: SAS Institute Inc
- SCHOLZ V., GRUNDMANN P. (2004):** Energiepflanzen im Vergleich – Energiegewinn und Produktionskosten (Teil II). Energiepflanzen V, S. 13-16
- SCHOLZ V., HELLEBRAND H.J., HÖHN A. (2004):** Energiepflanzen im Vergleich – Ertrag und Umweltverträglichkeit (Teil I). Energiepflanzen IV, S. 13-16
- SCHOLZ V., IDLER C. (2000):** Loss Reduced and Human Hygienic Storage of Field Wood Chips. In: Proceedings of 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry in Sevilla, 5./9.6.2000
- SCHOLZ V., IDLER C., DARIES W., EGERT J., GOTTSCHALK K. (2005):** Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 39, ATB Potsdam-Bornim
- STOCKINGER H., OBERNBERGER I. (1999):** Logistik der Brennstoffversorgung von Biomasse-Nahwärmanlagen. Report for the FWF research project P10669-ÖTE, TU Graz
- STOCKINGER H., OBERNBERGER I. (1998):** Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, TU Graz
- TRBA Nr. 430:** Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - Verfahren zur Bestimmung der Schimmelpilzkonzentrationen in der Luft am Arbeitsplatz. Bundesarbeitsblatt 8/2001
- WAGENFÜHR A. (1988):** Praxisrelevante Untersuchungen zur Nutzung biotechnologischer Wirkprinzipien bei der Holzwerkstoffherstellung. Dissertation, Technische Universität Dresden
- WEBENAU B., KRAUSENBOECK B., GÖLDNER A. (1999):** Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Bericht, Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Freising
- WEINGARTMANN H. (1991):** Hackgut-Trocknung, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, ISBN 3-9005-3478-0, S. 81
- WEINGARTMANN H., PRANKEL H. (1994):** Hackguttrocknung Wippenham. unveröffentl. Bericht, BOKU Wien

Entwicklung von pilzlichen und bakteriellen Lebensgemeinschaften in einer Kiefernholzhalde

Shifts in the fungal and bacterial community structure during the storage of pine wood debris

Matthias Noll^{1*}, Fabio Ferrero², Annette Naumann³, Marcus Malow²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Fachgruppe IV.1 „Biologie im Umwelt- und Materialschutz“, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin, Deutschland

² Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin, Deutschland

³ Georg-August-Universität Göttingen, Abteilungen Molekulare Holzbiotechnologie und technische Mykologie; Forstbotanik und Baumpyhsologie, Büsgenweg 2, D-37077 Göttingen

* Korrespondenz an: matthias.noll@bam.de; Tel.: 030 / 81043835; Fax.: 030 / 81041417

Kurzfassung

Das Interesse für erneuerbare Energieträger ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Im Bereich Biomasse als erneuerbarer Energieträger wird besonders Holz ein großes Wachstum auf dem Energiesektor prognostiziert (NITSCH 2007). Die Speicherung dieser Energie erfolgt meist durch Holzhackschnitzelhalden in der Umwelt. Um ein tieferes Verständnis der in der Halde ablaufenden mikrobiologischen Prozesse erhalten zu können, wurden in einer neu aufgebauten Kiefernholzhackschnitzelhalde mit den Ausmaßen 15 m x 20 m x 6 m folgende Messungen durchgeführt: a.) Messung der Gaskonzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid als auch der Temperaturentwicklung innerhalb der Halde; b.) Messung der Veränderung der Holzzusammensetzung innerhalb der Halde über die Zeit; c.) Charakterisierung der Veränderung der Zusammensetzung der bakteriellen als auch der pilzlichen Lebensgemeinschaften über die Zeit; d.) Charakterisierung von dominanten Vertretern der bakteriellen als auch der pilzlichen Lebensgemeinschaften. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Funktion und die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften über die Dauer der Holzhackschnitzellagerung ändern, und dass diese Änderungen nur zum Teil mit den Prozessen bei Kompostierungsanlagen vergleichbar sind.

Schlüsselwörter: Pilzliche und bakterielle Lebensgemeinschaften, *Ascoymceten*, *Pseudomonas*, *Bakterien*, *Pilze*, Temperatur

Abstract

In recent years, interest in renewable energy resources has considerably increased. Among other renewable energy sources, such as biomass, in particular wood, is projected to accelerate in importance to the energy sector (NITSCH 2007). Storage of this type of energy source is commonly realized in outdoor wood chip piles. In order to gain a more profound understanding of the microbial processes within the pile, in a newly constructed pine wood debris with a size of 15 m x 20 m x 6 m the following measurements were carried out over time: a.) measurement of temperature as well as of oxygen and carbon dioxide concentration inside the pile; b.) assessment of the chemical composition of the wood chips inside the pile; c.) characterisation of shifts in the bacterial and fungal community structure; d.) characterisation of dominating members of the bacterial and fungal community, respectively. Results show that structure and function of both communities are shifting along the storage of the wood chips. These shifts, however, are only to some extent transferable to well-known composting processes.

Keywords: *Fungal and bacterial communities; Ascomycetae; Pseudomonas; Bacteria; Fungi; temperature*

1 Einleitung

Bei der Holzhacklagerung laufen aus der mikrobiologischen Sichtweise vom Prinzip ähnliche Prozesse ab, wie sie bei der Kompostierung bereits eingehend studiert worden sind. Die Kompostierung erfolgt unter aeroben Bedingungen und wird durch den charakteristischen Temperaturverlauf häufig in vier aufeinanderfolgende Phasen beschrieben (**Bild 1**):

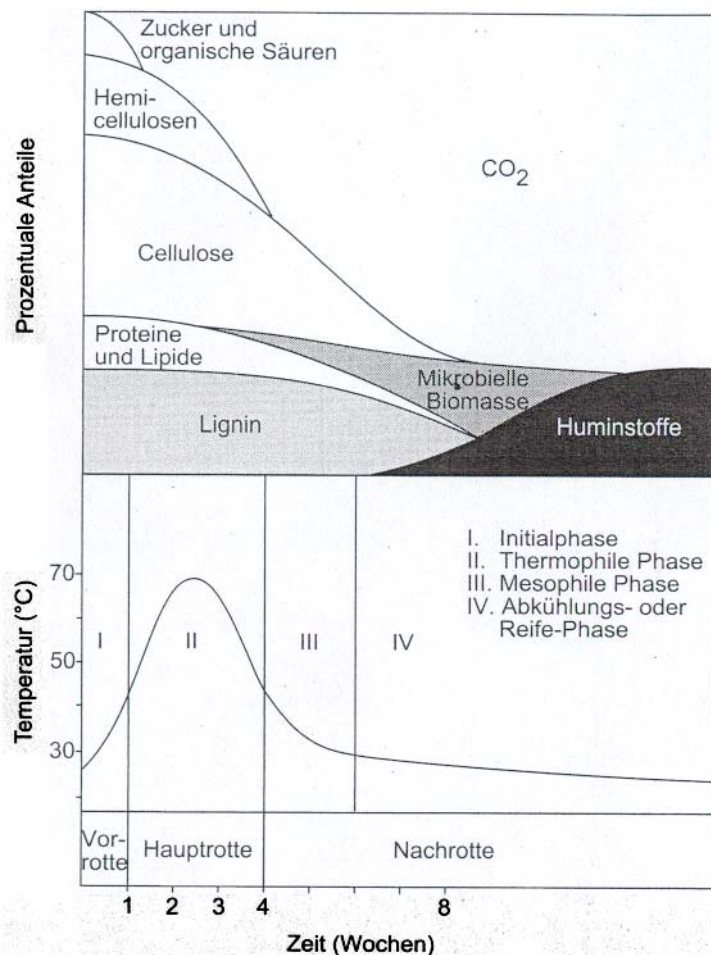


Bild 1: Genereller Verlauf des Kompostierungsprozesses. Die Komponenten der Biomasse werden je nach Abbaubarkeit verschieden schnell mikrobiell mineralisiert und assimiliert. Der schwer abbaubare Ligninanteil wird zu Aromaten depolymerisiert und zusammen mit anderen Abbauprodukten in Huminstoffen transformiert. Die Dauer der einzelnen Phasen ist stark von den Kompostierungsbedingungen abhängig

1. **Anfangs- oder Initialphase** gekennzeichnet durch eine mikrobielle Anpassung und Aufbau der Mikroflora. Die im Substrat vorkommenden Mikroorganismen vermehren sich stark. Die leicht abbaubaren Komponenten werden assimiliert und mineralisiert, die organische Substanz nimmt etwa um die Hälfte ab.
2. **Thermophile Phase** gekennzeichnet durch eine intensive Umsetzung von Substrat in Biomasse. Die hohe Stoffwechselaktivität führt zu einer Erwärmung von der mesophilen Phase (20 - 40°C) zu einer thermophilen Phase (40 – 75°C). Ist die Luftzufuhr unzureichend, so kommt es in dieser Phase zu Gärungen, bei denen auch unange-

nehm riechende Gärungsprodukte freigesetzt werden. Bei Kompostierungssystemen verändert sich besonders unter anaeroben Bedingungen der pH-Wert in den sauren Bereich. In der thermophilen Phase geht die Gesamtkeimzahl pro Gramm Trockengewicht zurück.

3. **Mesophile Phase** gekennzeichnet durch abnehmende mikrobielle Aktivität. Nach dem Verbrauch der schnell verwertbaren Substrate werden die Stoffwechselaktivität und damit die Wärmeproduktion reduziert.

4. **Abkühlungs- oder Reifephase** gekennzeichnet durch sehr geringe, mikrobielle Umsatzaktivitäten. Beginn von Humifizierungsprozessen.

In Holzhacklagerung ist vor allem ein großes Spektrum an schwer abbaubaren Substanzen, wie Lignin, Hemizellulose und Zellulose in dem Hackgut vorhanden. Die leicht und mäßig abbaubaren Bestandteile der Biomasse werden schnell assimiliert und zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert, während die schwer abbaubaren Substanzen nach teilweisem Abbau in Huminstoffe transformiert werden. Diese Transformationsprozesse sind für die beteiligten Mikroorganismen energetisch aufwendig, so dass diese Organismen zum einen an das Substrat und die Habitatbedingungen gut angepasst sind und zum anderen diese Prozesse im Vergleich zum Kompost voraussichtlich sehr langsam durchführen.

2 Material und Methoden

Es wurde eine Kiefernholzhalde mit den Ausmaßen 15 m x 20 m x 6 m (Breite x Länge x Höhe) aus frisch gehacktem Kiefernholz in Brandenburg errichtet. Die Holzhackschnitzel hatten im Durchschnitt eine Größe von bis zu 10 mm und einen Wassergehalt von ca. 35%. An der Halde wurde an 10 verschiedenen Punkten die Temperatur kontinuierlich gemessen, während die Gase CO₂, O₂, CO und CH₄ periodisch gemessen wurde. (für Details siehe Publikation von FERRERO *et al.* 2008 in diesem Heft). Zu den Gasmessungszeitpunkten (Haldenaufbau, 7, 14, 21, 35, 63, 84, 112, 147, 175, 203, 246, 280 und 330 Tage nach Haldenaufbau) wurden 0,5 m und 2,0 m in der Halde Hackschnitzelproben in fünf Replikaten entnommen. Von diesen Holzhackschnitzelproben wurde der Wassergehalt bestimmt und danach in feines Holzmehl gemahlen, um eine homogene Probe zu erhalten. Darauf wurde von ausgewählten Proben der Gesamtkohlenstoff, -stickstoff, -wasserstoff und -schwefelgehalt mittels Elementaranalysator (vario Macro, Fa. Elementar) nach Herstellerangaben bestimmt. Die chemische Zusammensetzung des Holzmehls wurde mittels Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Spektroskopie (Equinox 55, Bruker Optics, Ettlingen) in Kombination mit einer ATR-Einheit (ATR: abgeschwächte Totalreflexion, DuraSamplIR, SensIR Europe, Warrington, England) nach NAUMANN *et al.* (2007) untersucht.

Um die mikrobielle Lebensgemeinschaften in der Holzhalde beschreiben zu können, wurden von beiden Probeentnahmetiefen (0,5 m und 2,0 m) und von allen Probenentnahme-

zeitpunkten die Gesamtnukleinsäuren mit dem PowerSoil DNA-Isolationskit (Mo Bio Laboratories, US) nach Herstellerangaben extrahiert. Anschließend wurde mittels Polymerasekettenreaktion (PCR) und mit Domänen-spezifischen Oligonukleotid-Primern bakterielle und pilzliche genomische Abschnitte amplifiziert. Zur Charakterisierung der bakteriellen Diversität wurde das Primerpaar 27F und 907r verwendet (NOLL *et al.* 2005), während für die pilzliche Diversität das Primerpaar ITS1F (GARDES & BURNS 1993) und ITS4 (WHITE *et al.* 1990) verwendet wurde. Die Primer 27F, ITS1F waren für die anschließende terminale Restriktionsfragmenten-Längenpolymorphismus-Analyse (T-RFLP) mit 5'-6-carboxy-fluorescein (FAM) markiert, während der ITS4 Primer mit 5'-hexachlorofluorscein (HEX) markiert war. Die verwendeten PCR-Bedingungen für die bakterielle Lebensgemeinschaft sind bei NOLL *et al.* (2005) sowie für die pilzliche Lebensgemeinschaft bei GARDES & BURNS (1993) beschrieben. Die statistische Auswertung der T-RFLP Profile wurde nach NOLL *et al.* (2008) durchgeführt.

Zur phylogenetischen Charakterisierung von repräsentativen bakteriellen als auch pilzlichen Vertretern einer Gemeinschaft wurde ein Klonierungs- und Sequenzierungsansatz gewählt, so wie dies unter NOLL *et al.* (2008) beschrieben ist. Für diesen Ansatz wurden jeweils fünf unterschiedliche DNA-Proben von 0,5 m und von 2,0 m Tiefe in die Halde nach 7 Tagen sowie nach 175 Tagen vereinigt und eine PCR durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Primer (siehe oben) ohne Fluoreszenzmarkierung verwendet. Die phylogenetische Einteilung der Umweltsequenzen wurden mittels einer im Internet verfügbaren Datenabgleich mit allen öffentlich verfügbaren Sequenzen durchgeführt (NCBI GenBank; nucleotide blast, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Details dieses Sequenzdatenvergleiches und dessen Genauigkeit werden unter der gleichen Internetadresse erläutert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Veränderung Holzhackschnitzel innerhalb der Halde über die Lagerungsdauer

Während der Lagerung der Holzhackschnitzel bildete sich bereits nach kurzer Zeit ein räumlicher Gradient mit unterschiedlichen Wassergehalten innerhalb der Halde (**Bild 2**). Zwischen 0,2 m bis 0,7 m, je nach Lage innerhalb der Halde auch in tieferen Bereichen der Halde, entstand eine Zone mit erhöhtem Wassergehalt, während der Kern der Halde durch geringere Wassergehalte gekennzeichnet war (**Tabelle 1**). Über die Zeit veränderte sich der Wassergehalt innerhalb einer Zone nicht wesentlich, so dass man von einer gleichbleibenden Wasserverfügbarkeit ausgehen kann. Aus diesem Grund sind Unterschiede in den wasserabhängigen mikrobiellen Prozessen zwischen den Proben aus 0,5 m und 2,0 m innerhalb der Halde anzunehmen. Um den Gesamteffekt dieser mikrobiellen Prozesse abschätzen zu können, haben wir den Gesamtkohlenstoff, -stickstoff, -schwefel und -wasserstoffgehalt gemessen. Als Ergebnis konnte ermittelt werden, dass der Gesamtkohlenstoffgehalt in den Proben von 0,5 m innerhalb der Halde über die Haldenlagerungsdauer abnahm, während in den Proben von 2,0 m innerhalb der Halde keine

Änderung festgestellt werden konnten (Tabelle 1). Dieses Ergebnis ist ein Hinweis, dass kohlenstoffhaltige Holzbestandteile insbesondere in den Proben aus 0,5 m innerhalb der Halde abgebaut worden sind. Der Gesamtstickstoffgehalt nimmt in den Proben von 0,5 m innerhalb der Halde über die Zeit schneller zu als in den Proben von 2,0 m innerhalb der Halde. Eine mögliche Erklärung für einen erhöhten Stickstoffgehalt in der Halde könnte durch atmosphärische Deposition erklärt werden. Diese Erklärung ist allerdings aus mehreren Gründen relativ unwahrscheinlich. Die Stickstoffdeposition in unserem Testfeld ist mit 10-20 kg/ ha pro Jahr eher gering (UMWELTBUNDESAMT 2007). Atmosphärisch eingetragene Stickstoffverbindungen sind in der Regel relativ leicht bioverfügbar, so dass diese bereits in der äußeren Schicht der Holzhalde von der mikrobiellen Gemeinschaft konsumiert werden wird. Ein schneller Verbrauch ist besonders in stark stickstofflimitierten Umwelten, wie z. B. Holz oder Holzhalden, anzunehmen. Ein weiterer Grund ist, dass eine Zunahme in 2,0 m innerhalb der Halde einen sehr weiten nicht auf Feuchtigkeit basierten Transport der Stickstoffverbindungen bedeuten würde, der physikalisch nicht erklärbar ist. Daher nehmen wir an, dass diese Verdoppelung des Gesamtstickstoffes über die Zeit auf mikrobielle Biomasseproduktion zurückzuführen ist. Die dafür notwendige Stickstoffakquisition kann durch mikrobielle Prozesse, wie z. B. der atmosphärischen Stickstofffixierung, bewältigt worden sein. Die höheren Gesamtstickstoffgehalte in den Proben 0,5 m innerhalb der Halde im Vergleich zu den Proben 2,0 m innerhalb der Halde, sind durch den höheren Wassergehalt zu erklären. Mikrobielle Biomasseproduktion, insbesondere von Pilzen, ist stark von der Wasserverfügbarkeit abhängig und hat ihr Optimum bei einem Wassergehalt zwischen 40 – 80 Massenprozent.



Bild 2: Hackschnitzelhalde nach ca. einem Jahr Lagerung. Die äußere Schicht (0,2 – 0,7 m in die Halde) hatte eine dunkle Verfärbung aufgrund des erhöhten Wassergehaltes. Innerhalb der Halde (> 0,7 m in die Halde) waren die Wassergehalte niedriger als in der äußeren Schicht

Tabelle 1: Wassergehalt, Gesamtstickstoff, -kohlenstoff, -schwefel und Wasserstoffkonzentration in Massenprozent von Holzhackschnitzelproben aus zwei Haldenpositionen über die Lagerungszeit

Zeit	0.5 m innerhalb der Holzhalde						2.0 m innerhalb der Holzhalde					
	Temperatur (°C)	Wassergehalt (in Prozent)	N (in Prozent zur Gesamtmasse)	C (in Prozent zur Gesamtmasse)	S (in Prozent zur Gesamtmasse)	H (in Prozent zur Gesamtmasse)	Temperatur (°C)	Wassergehalt (in Prozent)	N (in Prozent zur Gesamtmasse)	C (in Prozent zur Gesamtmasse)	S (in Prozent zur Gesamtmasse)	H (in Prozent zur Gesamtmasse)
Haldenaufbau		37.2 ± 3.1	0.191 ± 0.01	50.27 ± 0.159	0.089 ± 0.107	5.98 ± 0.012		37.2 ± 3.1	0.191 ± 0.01	50.27 ± 0.159	0.089 ± 0.107	5.98 ± 0.001
105 Tage nach Aufbau	11.7	60.2 ± 2.8	0.229 ± 0.02	49.11 ± 0.860	0.107 ± 0.01	5.92 ± 0.126	13.8	22.96 ± 3.1	0.184 ± 0.021	51.03 ± 0.159	0.259 ± 0.114	5.60 ± 0.126
140 Tage nach Aufbau	4.8	59.4 ± 3.3	0.420 ± 0.05	49.8 ± 2.046	0.102 ± 0.01	5.30 ± 0.234	6.1	24.46 ± 3.7	0.324 ± 0.054	51.08 ± 0.260	0.069 ± 0.008	6.00 ± 0.066
154 Tage nach Aufbau	6.7	53.9 ± 2.3	0.477 ± 0.03	48.75 ± 0.319	0.954 ± 0.01	5.46 ± 0.437	9.4	28.26 ± 6.0	0.369 ± 0.007	51.63 ± 0.490	0.084 ± 0.005	6.02 ± 0.093
330 Tage nach Aufbau	20.5	52.1 ± 5.3	0.422 ± 0.05	50.68 ± 1.612	0.1 ± 0.210	6.00 ± 0.152	23.3	23.95 ± 3.6	0.393 ± 0.03	51.30 ± 0.721	0.138 ± 0.06	6.00 ± 0.109

Um Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Hackschnitzel zu untersuchen, wurden FTIR-Analysen durchgeführt (**Bild 3**). Die Maxima der FTIR-Spektren beruhen auf der Absorption infraroter Strahlung durch bestimmte chemische Bindungen in der Probe und lassen sich tendenziell den Hauptkomponenten von Holz (Lignin, Cellulose, Hemicellulose etc.) zuordnen (**Tabelle 2**). Ligninabbau durch holzersetzende Mikroorganismen würde insbesondere zu einer Verringerung der Höhe der Maxima 5, 6, 7 und 10 führen. Dies ist hier nicht zu erkennen. Folglich hat in der Zeit von Juli bis Dezember 2007 kein nennenswerter Ligninabbau stattgefunden. Auch Cellulose wurde in diesem Zeitraum nicht abgebaut, denn das für Cellulose charakteristische Maximum (13) ist im Dezember im Vergleich zum Juli nicht deutlich vermindert.

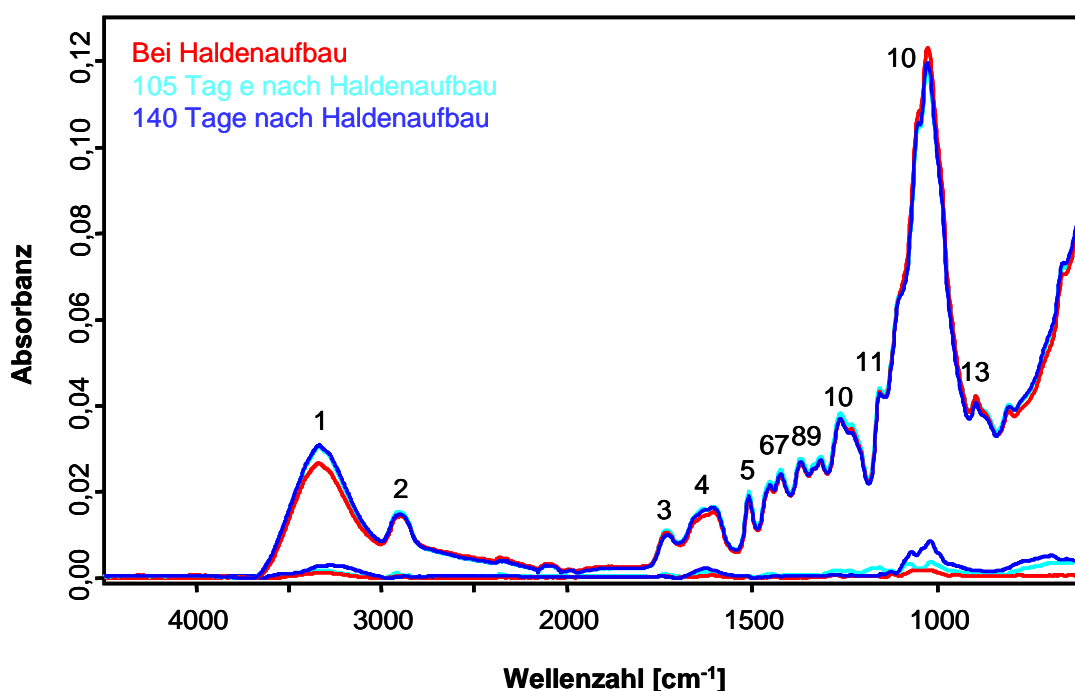


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der chemischen Zusammensetzung der Hackschnitzel mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (Zuordnung der Nummerierung siehe Tabelle 2)

Übereinstimmend mit dem zunehmenden Gesamtstickstoffgehalt ist von Juli bis Dezember eine leichte Zunahme des Maximums 4 zu beobachten, das charakteristisch für stickstoffhaltige Amidbindungen von Proteinen ist. Auch Maximum 1 nimmt mit der Zeit zu. Bei dieser Wellenzahl absorbieren OH-Bindungen, die in vielen Holzkomponenten vorkommen und deshalb unspezifisch sind.

Tabelle 2: FTIR Banden (Wellenzahl-Maxima) von pulverisierten Holzhackschnitzeln und Zuordnung zu möglichen Holzkomponenten entsprechend der Nummerierung in Bild 3 (nach FAIX 1991, PANDEY & PITMAN 2003, LABBÉ *et al.* 2005)

Wellenzahl [cm ⁻¹]	Nummer in Bild 3	Zuordnung
3337	1	OH-Bindungen
2901	2	C-H (Methyl-Bindungen)
1729	3	C=O in Xylan (Hemicellulose)
1647/1606	4	O-H und C=O (Lignin/Protein)
1509	5	Aromatische Ringschwingung (Lignin)
1451	6	C-H (Lignin)
1423	7	C-H (Lignin/Kohlenhydrate)
1369	8	C-H (Cellulose/Hemicellulose)
1316	9	C-H und C-O (Cellulose/Lignin)
1263	10	Ringschwingung und C=O (Lignin/Xylan)
1155	11	C-O-C (Cellulose/Hemicellulose)
1027	12	C-O (Cellulose/Hemicellulose)
897	13	C-H (Cellulose)

3.2 Temperatur und Gasentwicklung über die Lagerungsdauer

Bereits kurz nach dem Aufbau der Holzhackschnitzelhalde stellte sich im Kern der Halde eine 20°C – 25°C höhere Temperatur im Vergleich zu der Außentemperatur ein (**Bild 4**). Diese erhöhte Temperatur konnte ebenfalls bei den Probennahmen festgestellt werden, da die Proben von 2,0 m innerhalb der Halde immer wärmer waren als die Proben von 0,5 m innerhalb der Halde (Tabelle 1).

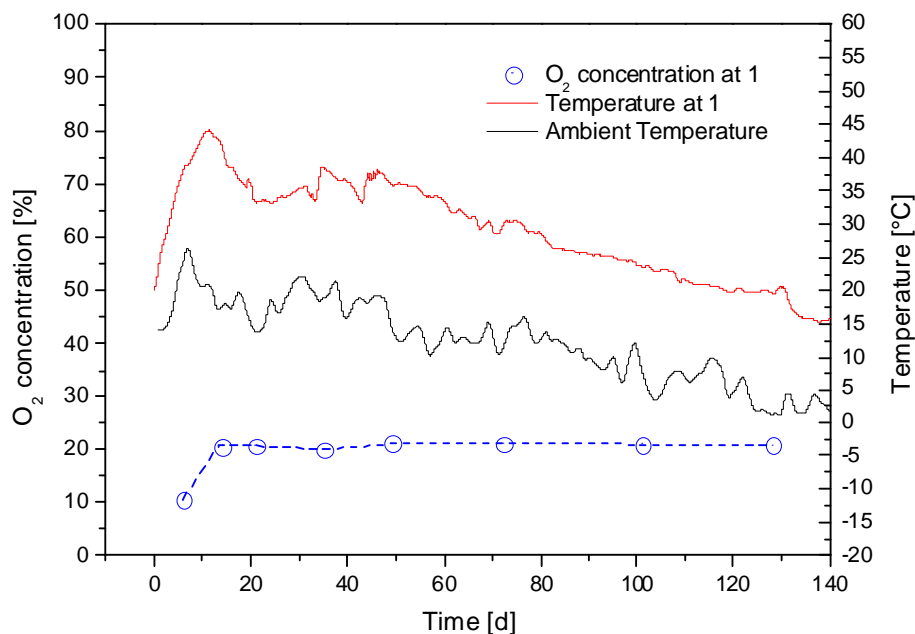


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration im Zentrum der Hack-schnitzelhalde

Zeitgleich zur frühen Temperaturentwicklung fanden nach einer Lagerungsdauer von 7 Tagen eine starker Sauerstoffverbrauch (Bild 4) und eine Kohlendioxidemission (**Bild 5**) statt. Diese Veränderungen in den Gaskonzentrationen lassen sich durch den starken Anstieg von aerobem, mikrobiellem Abbau der organischen Substanz erklären. Im Prinzip wird bei dem aeroben Abbau das organische Substrat mit Sauerstoff von den Mikroorganismen oxidiert und es entstehen mikrobielle Biomasse, Abbauprodukte und als Endabbauprodukt entsteht Kohlendioxid. Aus dieser Gleichung folgt, dass Sauerstoffverbrauch und Kohlendioxidemission nicht in einem Konzentrationsgleichgewicht sein müssen (REVSBECH & JØRGENSEN 1986). Ein solches „steady state“- Gleichgewicht stellt sich meist erst nach dem Verbrauch von leicht abbaubaren Substraten ein (siehe auch Bild 1), wenn in gleichen Anteilen Substrat oxidiert und das Endabbauprodukt Kohlendioxid produziert wird. Der Sauerstoffgehalt war nach 7 Tagen Lagerung im Kern der Halde für die restliche Lagerungsdauer auf Umgebungskonzentration angestiegen (Bild 4). Im Gegensatz dazu konnte bei der Kohlendioxidkonzentration neben einem Peak nach 7 Tagen auch nach 35 Tagen eine erneute, erhöhte Konzentration gemessen werden (Bild 5). Dieser zweite Anstieg in der Kohlendioxidkonzentration ist durch den mikrobiellen Abbau von Abbauprodukten der Ausgangssubstrate der Holzhackschnitzel zu erklären.

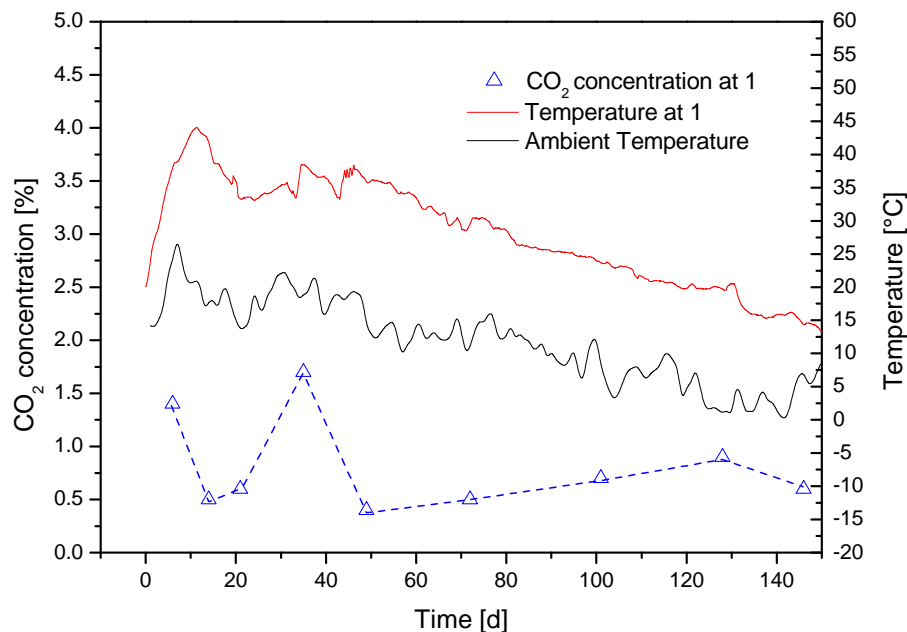


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der Kohlendioxidkonzentration im Zentrum der Hackschnitzelhalde

3.3 Mikrobielle Lebensgemeinschaft

In den Proben 0,5 m innerhalb der Halde konnten bereits nach kurzer Haldenhackschnitzzellagerungsdauer makroskopisch sichtbare Pilzhyphen und Biofilmformationen entdeckt werden. Um einen Einblick in die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften zu erhalten, haben wir von allen Proben, die wir aus der Hackschnitzelhalde entnommen hatten, die DNA extrahiert und diese mit molekulargenetischen Methoden charakterisiert. Anhand von molekulargenetischen Methoden konnten im Vergleich zu nicht molekulargenetischen Untersuchungen des gleichen Habitates eine um 3 bis 4 Zehnerpotenzen höhere mikrobielle Diversität in Boden unterschieden werden (TORSVIK *et al.* 1994). Als molekulargenetische Methode zur Charakterisierung der Zusammensetzung der bakteriellen und pilzlichen Gemeinschaft hatten wir die T-RFLP Methodik verwendet. Bei dieser Methodik werden universelle Genabschnitte aus der extrahierten Umwelt-DNA mit bakterien- bzw. pilzspezifischen Primern mit einer Fluoreszenzmarkierung mittels PCR amplifiziert. Das PCR-Produkt wird durch ein Restriktionsenzym, das relativ häufig in der amplifizierten DNA schneidet, inkubiert, und das Gemisch von entstandenen, gespaltenen PCR-Produkten, den sogenannten Restriktionsfragmenten, des mutmaßlich heterogenen PCR-Produktes elektrophoretisch aufgetrennt (NOLL *et al.* 2005). Bei der Messung des fluoreszierenden Lichtes nach Abscannen mit einem Laser werden nur die Banden der terminalen Restriktionsfragmente sichtbar, weil nur diese aufgrund des markierten Primers einen Fluoreszenzfarbstoff tragen. Die Länge dieser terminalen Restriktionsfragmente

(T-RFs) kann genau bestimmt werden und ist nur abhängig von der Sequenz, dem verwendeten Primer und den verwendeten Restriktionsenzym. Deshalb kann man anhand der Primersequenz und der Erkennungssequenz des Restriktionsenzymes für das spezifische Gen in den weltweitverfügbaren und den aus den Hackschnitzelproben gewonnenen Sequenzdatenbanken Rückschlüsse ziehen, von welchen Organismen ein solches T-RF resultieren könnte. Änderungen in dem Vorhandensein und der relativen Höhe von T-RFs zwischen zwei T-RFLP Profilen, geben den Hinweis, dass sich die Zusammensetzung der Gemeinschaft geändert hat. Dabei kann man unterscheiden, ob andere Mitglieder der Gemeinschaft hinzugekommen sind (weitere T-RFs entstehen) oder ob sich innerhalb einer Gemeinschaft einzelne Vertreter im relativen Verhältnis verändert haben (gleiche Anzahl an T-RFs mit sich unterscheidenden Fluoreszenzintensitäten). Eine Woche nach Haldenaufbau konnte man bereits eindeutige Unterschiede sowohl in der Zusammensetzung der pilzlichen als auch in der bakteriellen Lebensgemeinschaft zwischen den Proben 0,5 m und 2,0 m innerhalb der Halde erkennen (vergleiche **Bild 6 A** mit **B** und **6 E** mit **G**). Mit der Haldenlagerungsdauer wurden sich sowohl die bakteriellen als auch die pilzlichen Lebensgemeinschaften von den Proben 0,5 m und 2,0 m innerhalb der Halde ähnlicher (vergleiche **Bild 6 C** mit **D** und **6 F** mit **H**). Dieses Ergebnis ist im Einklang mit den Gas- und Temperaturmessungen (Bild 4 und 5), bei denen die größten Änderungen direkt nach Haldenaufbau entstanden sind und mit der Lagerungsdauer abnehmen.

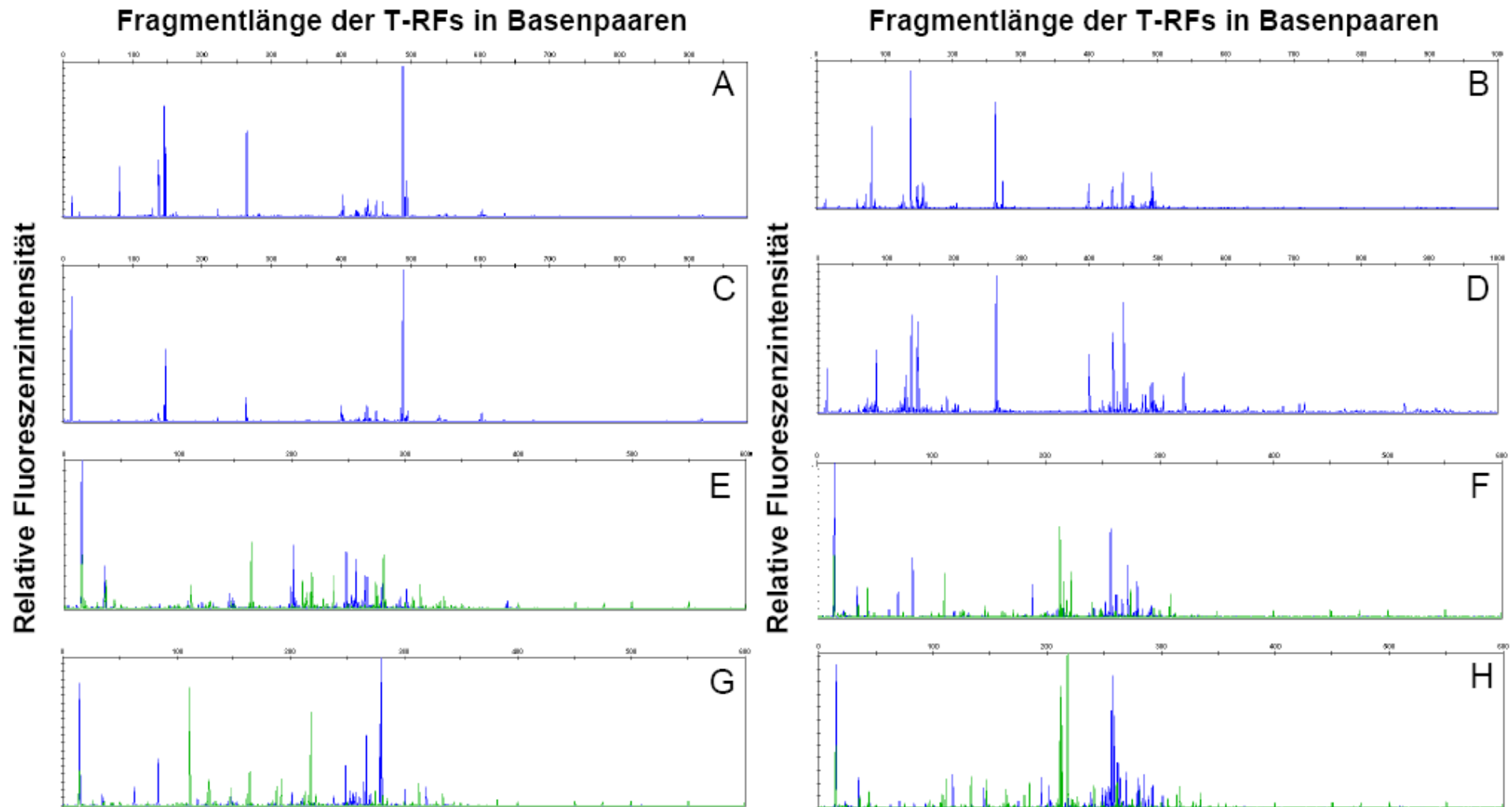


Bild 6: Charakteristische T-RFLP Profile der Zusammensetzung der bakteriellen (A, B, C, D) und pilzlichen Lebensgemeinschaften (E, F, G, H) von Hackschnitzelproben aus 0,5 m (A, B, E, F) und 2,0 m (C, D, G, H) innerhalb der Halde. Die korrespondierenden Probenentnahmezeitpunkte, aus denen die T-RFLP Profile generiert worden waren, waren 7 Tage (A, B, E, G) und 175 Tage (C, D, F, H) nach Haldenaufbau

3.4 Eigenschaften von bekannten Vertretern der Sequenzen, die in der Holzhalde detektiert worden sind

Der Klonierungs- und Sequenzierungsansatz der pilzlichen Gemeinschaft in der Holzhackschnitzelhalde war in der frühen Phase durch eine hohe Diversität an Vertretern der Klasse der *Schlauchpilze* (*Ascomyceten*) und der Klasse der *Ständerpilze* (*Basidiomyceten*) gekennzeichnet. Es ist anzunehmen, dass die initiale, pilzliche Lebensgemeinschaft bereits auf dem lebenden Kiefernholz vorhanden war und nach dem Hackprozess in die Halde eingetragen worden ist. Über die Haldenlagerungsdauer konnten sich dann solche Vertreter der pilzlichen Lebensgemeinschaft durchsetzen, die optimal an die Lebensbedingungen der Holzhalde angepasst waren. Diese späte Phase der Holzhaldenlagerung wurde vornehmlich von Vertretern der Klasse der *Schlauch-* und *Schimmelpilzen* charakterisiert. Bei Kompostsystemen treten in der Nachrotte (siehe Bild 1) ebenfalls eine Vielzahl von *Schlauch-* und *Schimmelpilzen* auf, bei denen es sich vorwiegend um *Penicillium*-, *Aspergillus*-, *Mucor*- und *Geotrichum*-Arten handelt. Diese Arten sind dafür bekannt, eine Vielzahl von Substraten und vor allem von Abbauprodukten zu dem Endabbauprodukt Kohlendioxid verwerten zu können.

Die bakterielle Gemeinschaft wurde in der frühen Phase der Halde durch Vertreter der Klasse der *Gammaproteobakterien* dominiert. Diese Gruppe von zumeist aeroben Bakterien ist physiologisch sehr divers und vereint eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Stoffwechselltypen. Diese physiologische Flexibilität ermöglicht eine schnelle Reaktion auf eine Vielzahl von Substraten, auch wenn diese nur kurzfristig verfügbar sind. Die hohe Kohlendioxidemission in der frühen Phase (Bild 4) deutet ebenfalls daraufhin, dass unter anderem (wie z. B. die Pilze) auch die Vertreter der *Gammaproteobakterien* in dieser Phase eine hohe Stoffwechselaktivität hatten. Bei Kompostanlagen sind üblicherweise in der thermophilen Phase (Bild 1) vor allem *Bacillus*-Arten (Klasse der Bacilli) detektiert worden, die in der nachfolgenden mesophilen Phase und Reifephase von *Actinomyceten* und *Pilzen* abgelöst werden. Da in der untersuchten Holzhalde in der frühen Phase im Vergleich zu Kompostsystemen eine sich unterscheidende Lebensgemeinschaft detektiert worden ist, kann angenommen werden, dass sich die Gemeinschaften aufgrund eines unterschiedlichen Substratspektrums bzw. dessen unterschiedlicher Bioverfügbarkeit etabliert haben.

Die späte Phase in der Holzhaldenlagerung ist durch eine breite Diversität von bakteriellen Gattungen gekennzeichnet, bei denen Vertreter des Phylums *Acidobakterien* hervorzuheben sind. Vertreter der *Acidobakterien* sind meist an ihre Umwelt und das dort vorhandene Substratspektrum optimal angepasst, so dass diese sich gegenüber physiologisch vielseitigen aber energetisch ineffizienten Gattungen durchsetzen können (ANDREWS & HARRIS 1986). Die Verschiebung von schnell reagierenden bakteriellen Gattungen zu Gattungen, die an die Habitatbedingungen optimal angepasst sind, ist im Einklang mit publizierten Sukzessionsstudien sowohl aus Modellökosystemen (NOLL *et al.* 2005) als auch aus Freilandflächen (NOLL & WELLINGER 2008)

4 Literatur

- ANDREWS J.H., HARRIS R.F. (1986):** r- and K-selection and microbial ecology. *Advances in Microbial Ecology* 9: 99-147
- Faix O. (1991)** Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. *Holzforchung* 45: 21–27.
- FERRERO F., MALOW M., BERGER A., NOLL M. (2008):** Fire prevention during biomass storage: Application to wood chips. ATB Tagungsband "Workshop Hackschnitzzellagerung"
- GARDES M., BURNS T.D. (1993):** ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes – application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Molecular Ecology* 2: 113-118
- LABBÉ N., RIALS T.G., KELLEY S.S., CHENG Z.-M., KIM J.-Y., LI Y. (2005):** FT-IR imaging and pyrolysis-molecular beam mass spectrometry: new tools to investigate wood tissues. *Wood Science and Technology* 39: 61-77
- NAUMANN A., PEDDIREDDI S., KÜES U., POLLE A. (2007):** Fourier transform infrared microscopy in wood analysis. In: Kües, U. (Ed.), *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts*. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen: 179-196
- NITSCH J. (2007):** Ausbaustrategie erneuerbare Energie, Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050. Leitstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- NOLL M., FRENZEL P., CONRAD R. (2008):** Selective stimulation of type I methanotrophs in a rice paddy by urea fertilisation revealed by stable isotope probing. *FEMS Microbiology Ecology* 65: 125-132
- NOLL M., MATTHIES D., FRENZEL P., DERAKSHANI M., LIESACK W. (2005):** Succession of bacterial community structure and diversity in a paddy soil oxygen gradient. *Environmental Microbiology* 7: 382-395
- NOLL M., WELLINGER M. (2008):** Changes of the soil ecosystem along a receding glacier: Testing the correlation between environmental factors and bacterial community structure. *Soil Biology & Biochemistry* (in press)
- PANDEY K.K., PITMAN A.J. (2003):** FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation* 52: 151-160
- REVSBECH N.P., JØRGENSEN B.B. (1986):** Microelectrodes – their use in microbial ecology. *Advances in Microbial Ecology* 9: 293-352
- TORSVIK V., GOKSØR J., DAAE F.L., SØRHEIM R., MICHALSEN J., SALTE K. (1994):** Use of DNA analysis to determine the diversity of microbial communities In: RITZ K., DIGHTON J., GILLER K.E. (eds.) *Beyond the Biomass: Compositional and functional analysis of soil microbial communities*. British society of soil science, John Wiley. Chichester England: 39-48
- UMWELTBUNDESAMT (2007):** Nationale Umsetzung EU- NEC-Richtlinie / CAFE-Strategie, Abschlußbericht 2007
- WHITE T. J., BURNS T., LEE S., TAYLOR J. (1990):** Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: INNIS M.A., GELFLAND D.H., SININSKY J.J., WHITE T.J. (eds.) *PCR protocols: a guide to methods and applications*. San Diego, Ca. USA: Academic Press: 315-322

Strömungsmechanisches und thermodynamisches Modell und experimentelle Untersuchungen zur Hackschnitzeltrocknung

Fluid dynamic and thermodynamic model and experiments on drying of wood chips

Klaus Gottschalk, Volkhard Scholz

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. ATB,
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Deutschland
kgottschalk@atb-potsdam.de

Kurzfassung

Der Feuchtegehalt von Holzhackschnitzel beeinflusst die Lagerfähigkeit im starken Maße. Weitere Einflussfaktoren sind Masseverlust durch mikrobielle Umsetzungsvorgänge und die Entwicklung von pathogenen Schimmelpilzen, was hygienische Probleme verursacht, wenn der Lagerhaufen über die vorgeschriebenen Grenzwerte kontaminiert ist. Der Trocknungsverlauf der Holzhackschnitzel im Haufen ist stark von der Korngröße und von der Korngrößenverteilung abhängig.

Holzhackschnitzel aus Pappel mit grob (24 mm), mittel (14 mm) und fein (8,5 mm) sortierten mittleren Korngrößen wurden unter Zwangsbelüftung getrocknet. Die Trocknungszeit betrug bei groben Holzhackschnitzeln ca. 7 Tage bei einer Endfeuchte von 10%. Bei den mittleren Korngrößen betrug die Trocknungszeit 15 Tage, wobei die Oberfläche des Haufens feucht blieb. Die Trocknung bei den feinen Korngrößen führte nicht zu der angestrebten Endfeuchte innerhalb sinnvoller Zeit. Das beste Ergebnis konnte bei groben Holzhackschnitzeln mit homogener Korngrößenverteilung erreicht werden. Ein thermodynamisches Modell der Trocknungsvorgänge zeigt die Temperaturverläufe und Feuchteverläufe im Haufen unterschiedlicher Korngrößen.

Schlüsselwörter: Holzhackschnitzelschüttung; Holzhackschnitzeltrocknung; Holzhackschnitzellagerung, Modellierung

Abstract

Moisture content significantly influences the storability of wood chips. Other factors are mass loss due to microbial metabolic processes and the development of pathogenic moulds causing hygienic problems if the contamination of the pile exceeds critical quantities. The drying process of the wood chips in the pile largely depends on particle size and particle size distribution.

Wood chips from poplar sorted to particle sizes of 24 mm, 14 mm and 8,5 mm on average were dried using forced ventilation. Drying time to a final moisture content of 10% for large particle fractions was approx. seven days. For medium sized fractions the drying time was 15 days while the surface of the pile still remained moist. Drying of the small sized chips did not result in satisfying final moisture content within reasonable time. Best results were obtained for large sized wood chips with homogeneous particle size distribution.

A thermodynamic model of the drying processes shows the development of temperature and moisture content in piles of different heights.

Keywords: *wood chips; bulk; wood chip drying; wood chip storage; modelling*

1 Einleitung

Die Gewinnung von Biofestbrennstoffen erlangt zunehmende Bedeutung, um alternative Energiegewinnungsverfahren und Anbaumöglichkeiten (z.B. auf Stilllegungsflächen) für Landwirte zu schaffen. Hackschnitzel von Feldholz ermöglichen eine vollautomatische Beschickung und Steuerung von Verbrennungsanlagen. Eine vorhergehende Trocknung erhöht den Heizwert des Biofestbrennstoffes und verbessert dessen Lagerfähigkeit. Bei der Gewinnung größerer Mengen von Holz als Biofestbrennstoff wird nur die Hackschnitzeltechnologie angewandt, da das Holz als Schüttgut umgeschlagen werden kann. Da Holz als Brennstoff in Konkurrenz zu fossilen Energieträgern steht, sind die Verfahren zur Gewinnung von brennfähigen Holzhackschnitzeln insgesamt derart zu rationalisieren, dass gute Absatzerlöse erlangt werden (SCHOLZ 2004).

Der Feuchtegehalt von Holzhackschnitzel beeinflusst die Lagerfähigkeit im starken Maße. Der Trocknungsverlauf der Holzhackschnitzel im Haufen ist stark von der Korngröße und von der Korngrößenverteilung abhängig. Weitere Einflussfaktoren sind Masseverlust durch mikrobielle Umsetzungsvorgänge und die Entwicklung von pathogenen Schimmelpilzen, was hygienische Probleme verursachen kann.

Feldholz (Pappel und Weide) aus Kurzumtriebs-Plantagen wurden zu Hackschnitzeln aufbereitet und anschließend in Versuchen durch Zwangsbelüftung mit erwärmter Luft getrocknet. Auf Grundlage der Temperaturverläufe in den Schüttungen für die verschiedenen Varianten wurde ein thermodynamisches Modell angepasst, um die Temperaturverläufe in der Simulation berechnen zu können.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die Feldhölzer Pappel (Sorte: Japan 105) und Weide (*Salix viminalis*) stammen von Versuchsfeldern (Energieplantage) des ATB. Die Pappel wurde als Grobhackschnitzel (mittl. Korngröße ca. 20 mm) und als Feinhackschnitzel (mittl. Korngröße ca. 10 mm) mit einem Anbauhacker mit jeweils verschiedenen Maschineneinstellungen gehackt (**Bild 1**). Weide wurde nur mit einer Maschineneinstellung grob gehackt. Die Weiden-Hackschnitzel sind länglich und faserig ausgefallen. Drei weitere Proben an Pappel-Hackschnitzel wurden aus dem Grobhackgut mit einem Siebfraktionierer (Siebgrößen 12 mm und 20 mm) in drei Größenklassen fraktioniert, um zusätzliche Varianten hinsichtlich Korngrößen zu erhalten (**Bild 2**). An Pappel-Holzhackschnitzel standen somit 5 Größenvarianten, an Weide eine Größe zur Verfügung. Die damit gewonnenen unterschiedlichen Größenverteilungen sollten unterschiedliche Trocknungsbedingungen ermöglichen. Die Größenverteilungen wurden durch Siebklassierung jeder Probe (Pappel) ermittelt.



Bild 1: Proben von Pappel als unfraktionierte Hackschnitzel



Bild 2: Proben von Pappel als fraktionierte Hackschnitzel

Im Trocknungsversuch wurde Außenluft von einem Radiallüfter gefördert, nachfolgend durch eine Heizung mit stufenlos regelbarer Heizleistung erwärmt und dem Trockenraum zugeführt. Die Lüfterdrehzahl ist stufenlos einstellbar. Der Trockenraum wurde in 6 gleich große Kisten mit den Abmaßen (B × T × H) = (0,42 m × 0,52 m × 1,4 m) = 0,305 m³ und je einer Grundfläche von 0,22 m² aufgeteilt, die alle gleichzeitig mit der aufbereiteten Zuluft belüftet wurden. Die Luftraten stellten sich für jede der befüllten Kisten aufgrund der unterschiedlichen Strömungswiderstände jeder Schüttung unterschiedlich ein.

Die Luftraten durch die Schüttungen konnten nur für alle Proben insgesamt durch Festlegung der Lüfterdrehzahl eingestellt werden. Zur Erfassung der Luftzustände wurden Messfühler für Temperatur und relative Feuchte in der Belüftungstrecke angeordnet, und zwar jeweils für den Außenluft-, Zuluft- und Abluftbereich. Je 5 Temperaturfühler wurden in verschiedenen Höhen innerhalb jeder Schüttung platziert.

3 Trocknungsphysikalische Eigenschaften

Durch die Erwärmung der Zuluft lässt sich die Trocknungsgeschwindigkeit erhöhen, weil sich bei der Erwärmung die relative Luftfeuchte verringert. Die Temperatur der Zuluft wurde mittels einer geregelten Heizung auf 20°C konstant gehalten.

Die Strömungswiderstände der Schüttungen in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit w durch die Schüttungen wurden für jede der 5 Varianten (Pappel) in separaten Messungen untersucht. Gemäß

$$\frac{\Delta p}{h} = \alpha \cdot w^\beta \quad (\text{Druckverlust } \Delta p \text{ in der Schüttung durch Schütthöhe } h) \quad (1)$$

wurden die Parameter α , β bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten w für die verschiedenen Korngrößen ermittelt (**Tabelle 1, Bild 3**).

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Holzhackschnitzel-Varianten

	Pappel unfraktioniert		Pappel fraktioniert		
	grob g	fein f	grob fg	mittel fm	fein ff
Mittlere Korngröße [mm]	19,5	9,3	23,7	13,6	8,5
Schütthöhe [m]	1,1	1,25	1,05	1,18	1,25
Frischmasse FM [kg]	58,05	68,4	56,09	58,37	55,31
Volumen FM [m ³]	0,34	0,39	0,33	0,37	0,39
Schüttdichte FM [kg · m ⁻³]	169	175	171	159	142
Schüttdichte tr. ¹⁾ [kg · m ⁻³]	89,04	116,31	89,38	81,16	84,77
Trockensubstanz ²⁾ TS [%]	48,5	46,7	50,9	51,0	47,8
Porosität [-]	0,74	0,66	0,74	0,76	0,75
Schwund [%]	47,4	33,7	47,8	48,8	40,2
Luftrate [10 ⁻⁶ m ³ · s ⁻¹ · kg ⁻¹]	115	51,5	650	700	210
Luftgeschwindigkeit durch Schüttung [m · s ⁻¹]	0,01...0,02	0,005..0,010	0,07...0,10	0,09...0,10	0,02...0,03
α ³⁾	900	1000	300	550	1500
β ³⁾	1,43	0,87	1,74	1,43	0,75

Anm: ¹⁾ nach Trocknungsversuch; ²⁾ vor Trocknungsversuch; ³⁾ gemäß Glg. (1)

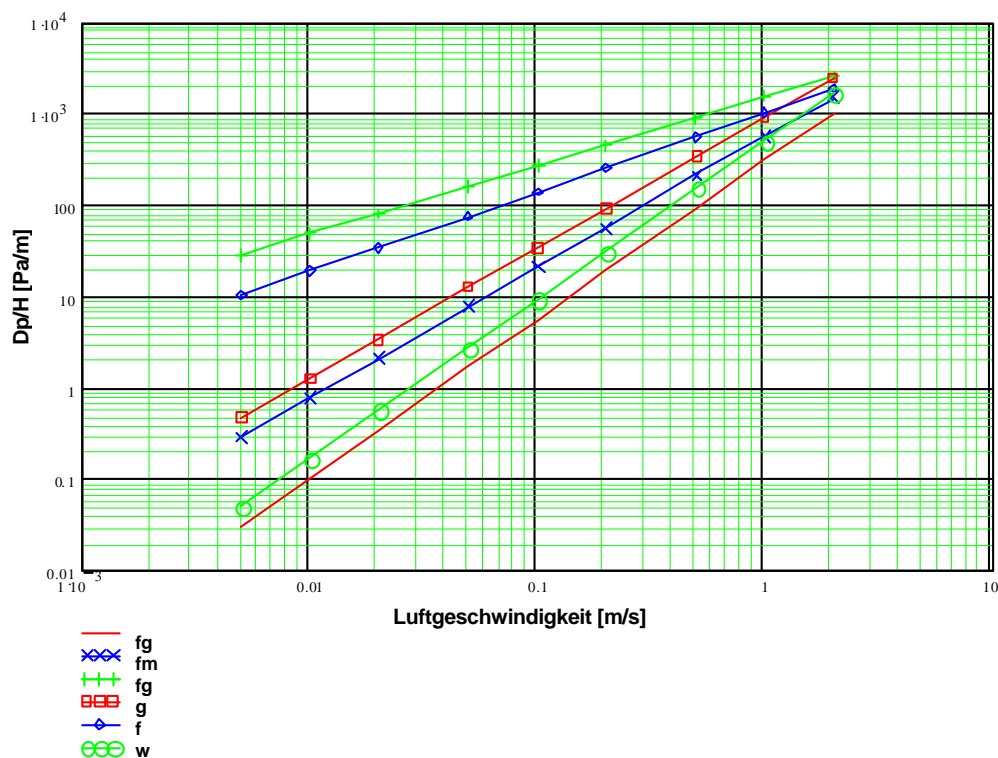


Bild 3: Druckverluste in der Schüttung verschiedener Korngrößen

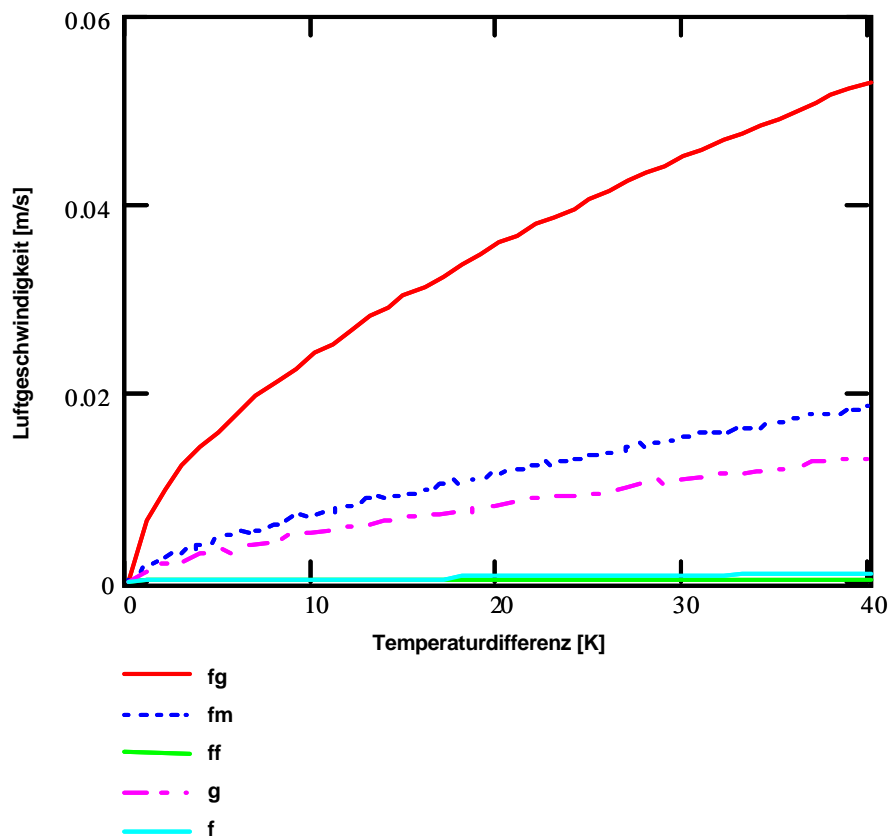


Bild 4: Luftgeschwindigkeiten in der Schüttung verschiedener Korngrößen bei freier konvektiver Strömung verursacht durch Temperaturdifferenzen

4 Belüftungsversuche

An Holzhackschnitzeln standen insgesamt 6 Proben zur Verfügung, und zwar an Pappel 5 Proben unterschiedlicher Größenverteilung (fein f, grob g, fraktioniert grob fg, fraktioniert mittel fm, fraktioniert fein ff) und an Weide 1 Probe (w), die alle gleichzeitig belüftet wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Größenverteilungen der einzelnen Proben (Varianten) bestanden unterschiedliche Belüftungsbedingungen hinsichtlich der Luftraten, Schüttdichten (Tabelle 1), Strömungswiderstände und Feuchtegehalte (entspr. der Frischmasse FM). Insbesondere die Luftraten bzw. die Luftgeschwindigkeiten durch die Schüttungen, ließen sich nicht unabhängig voneinander für jede Schüttung separat einstellen, sondern stellten sich entsprechend der unterschiedlichen Strömungswiderstände unterschiedlich ein (Tabelle 1).

Die Anfangsfeuchte zum Zeitpunkt am Beginn des Trocknungsversuchs betrug für Pappel ca. 52% und für Weide ca. 48%. Die Trocknungsverläufe zeigen für Pappel fraktioniert grob (fg) eine Trocknungszeit von ca. 7 Tagen. Nach diesem Zeitraum sind die Temperaturen in allen Schichten der Schüttung angeglichen (entspr. der Zulufttemperatur). Es wurde eine Endfeuchte unter 10% erreicht. Nach weiterem Verlauf des Trocknungsversuchs trat (nach 15 bis 17 Tagen) eine Wiederbefeuchtung ein. Die Trocknungszeit für Pappel fraktioniert mittel (fm) betrug ca. 15 Tage. Danach trat auch hier eine Wiederbefeuchtung auf.

Der Trocknungsverlauf war für Weide (w) und Pappel grob (g) ähnlich wie für Pappel fraktioniert mittel (fm). Am Temperaturverlauf bei Pappel grob (g) (**Bild 5b**) ist jedoch zu sehen, dass die oberste Schicht der Schüttung noch nicht durchgetrocknet ist und demnach die Trocknung auch nach 18 Tagen noch nicht abgeschlossen war. Die Proben Pappel fein (f) und fraktioniert fein (ff) zeigten erst nach ca. 18 Tagen einen Feuchteverlust von 10%. Der Trocknungsverlauf fiel für Feingut (f und ff) unbefriedigend aus (**Bild 8b**). Außerdem trat bei Pappel fraktioniert fein (ff) eine Temperaturinversion innerhalb der Schüttung auf, was auf eine Eigenerwärmung schließen lässt, die sich nicht genügend abführen ließ. Die Gegenüberstellung zeigt demnach, dass grobes Hackgut mit möglichst homogener Verteilung (wie bei der fraktionierten Probe fg) die besten Trocknungsergebnisse ergab. Dieses Resultat ist auch durch die hohe Luftrate bei Pappel fraktioniert grob (fg) bedingt. Die Strömungswiderstände von Pappel fraktioniert grob fg und Weide w sind etwa gleich groß, dennoch fielen die Luftraten für fg und w deutlich unterschiedlich aus ($650 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ gegenüber $170 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). Die Weide trocknet demzufolge schneller.

Die Korngrößenverteilung von Holzhackschnitzeln beeinflusst entscheidend den Trocknungsverlauf der Schüttung. Die Größenverteilung ist zudem wichtig für die Handhabung der Hackschnitzeln im Heizwerk. Hackschnitzeln mit inhomogener Verteilung mit breiter Streuung führt zu Brückenbildungen im Förderbereich (SUADICANI 1993). Eine inhomogene Korngrößenverteilung führt weiterhin zu ungünstiger Durchströmung der Schüttung und zu ungleichmäßiger und langsamer Trocknung. Zu feine Hackschnitzeln verringern die Luftdurchlässigkeit und damit die Trocknung, was zur Eigenerwärmung führt. Aus den Trocknungsversuchen geht hervor, dass grobe Hackschnitzeln mit mittlerer Korngröße von ca.

25 mm mit möglichst homogener Verteilung die höchste Trocknungsgeschwindigkeit aufweist. Übergroße Hackschnitzel können allerdings Probleme im Transportsystem des Heizwerks verursachen (GÜRTNER 1992, EBERT 1989).

5 Modell der Wärme- und Stoffübergänge

Bei freier konvektiver Belüftung stellt sich durch Temperaturdifferenzen innerhalb der Schüttung und durch Temperaturdifferenzen der Schüttung gegen der Umgebungsluft eine Strömung ein, die durch den Strömungswiderstand (Glg. (1)) begrenzt wird. Eine Gegenüberstellung der sich einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Schüttung wird in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen in **Bild 4** gezeigt.

Das thermodynamische Modell besteht aus einem System von Differenzgleichungen, in dem der Wärme- und Stoffaustausch zwischen durchlüftetem porösem Gut und durchströmender Luft berechnet wird. Das Modell ist eindimensional, d.h. es wird ein Luftstromfaden angenommen, der die Schüttung geradlinig (etwa von unten nach oben) durchströmt. Während jedes Zeit- und Orts-Inkrementes wird der Wärme- bzw. Stoff- (d.h. Wasser-) austausch durch die Grenzschicht jeder Schüttgutschicht gegen die Luft berechnet. In dem Modell wird der Trocknungsvorgang zeitabhängig entlang der durchströmten Schüttgutschichten berechnet.

Bei der Aufstellung der Bilanzgleichungen wurden folgende physikalische Gegebenheiten berücksichtigt:

- Berechnung des Stoffübergangs
- Berechnung des Wärmeübergangs
- Berechnung der Verdampfungsenthalpie
- Berechnung des Eigenwärmeentwicklung
- Berücksichtigung der Korngrößen
- Einbezug der Schütthöhe
- Berücksichtigung des Druckverlusts in der Schüttung (Glg. (1))
- Berechnung der Temperatur der Luft
- Berechnung der Geschwindigkeit der Luft
- Berechnung der Feuchtebeladung der Luft
- Berechnung des Feuchtegehalts der Hackschnitzel

Es wurden folgende vereinfachende Modellannahmen getroffen: Die Schüttung ist homogen verteilt, Stoff- und Wärmeübergänge finden an diskreten Schichten der porös angenommenen Schüttung statt, die Zuluftbedingungen (Randbedingungen) sind konstant, die physikalischen Parameter sind konstant, die Schütthöhe ist konstant (d.h. Schwund ist noch nicht berücksichtigt).

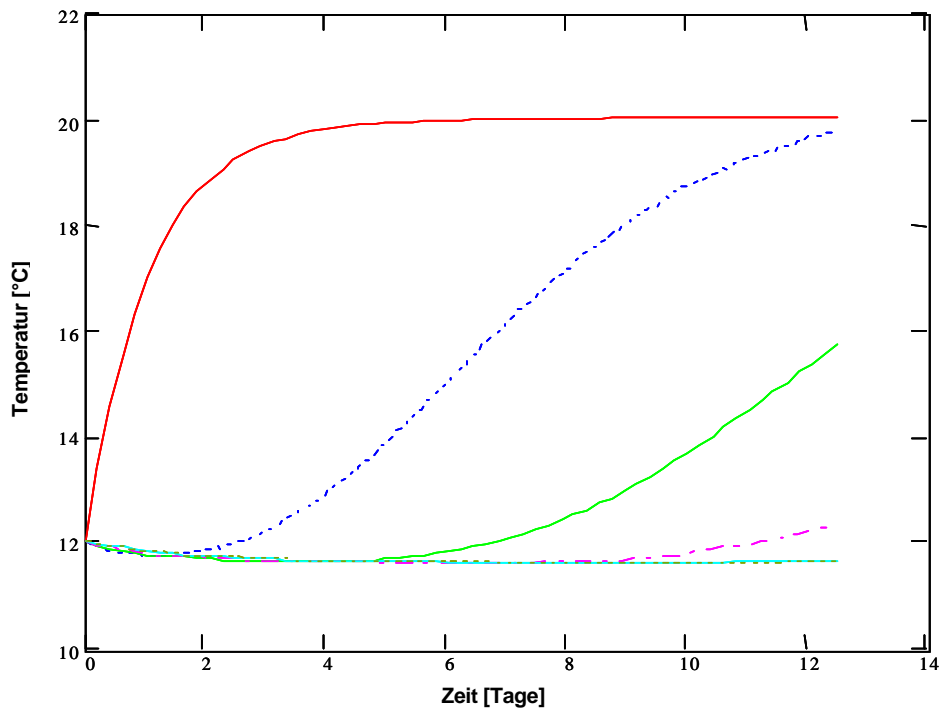


Bild 5a: Modellrechnung für Holz hackschnitzel Pappel unfraktioniert grob

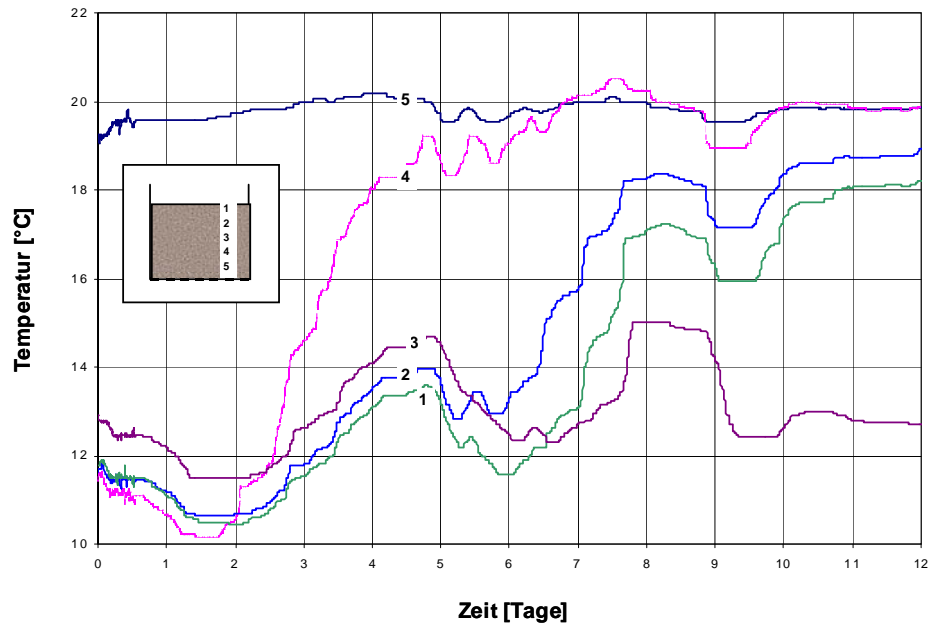


Bild 5b: Messungen für Holz hackschnitzel Pappel unfraktioniert grob

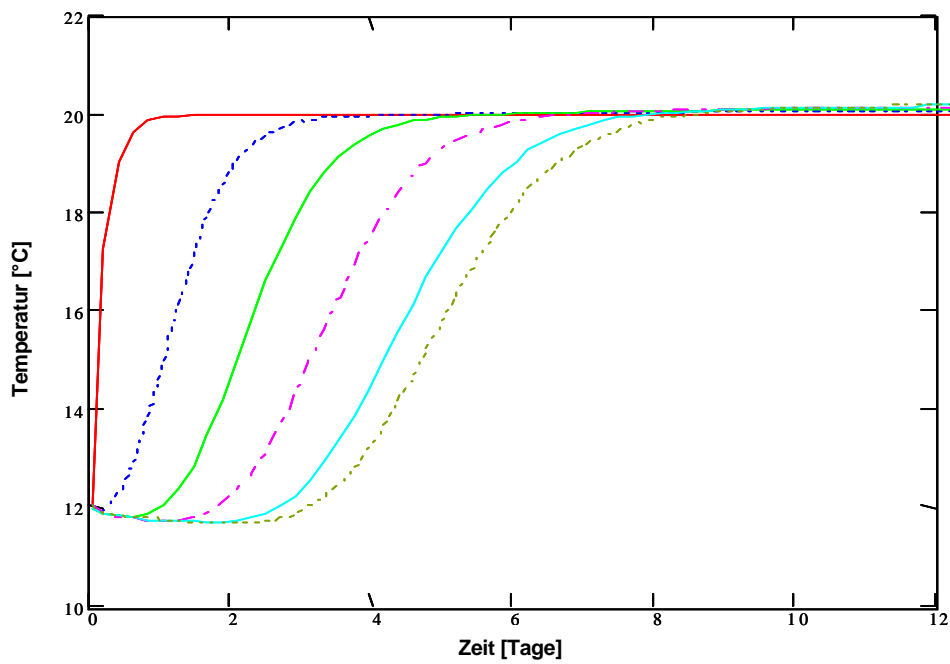


Bild 6a: Modellrechnung für Holzhackschnitzel Pappel fraktioniert mittel

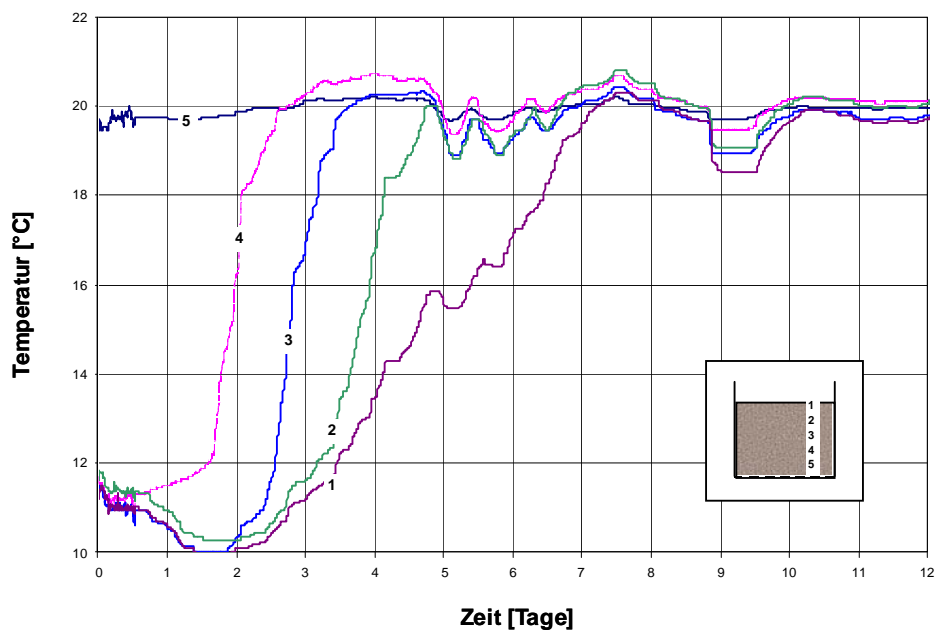


Bild 6b: Messungen für Holzhackschnitzel Pappel fraktioniert mittel

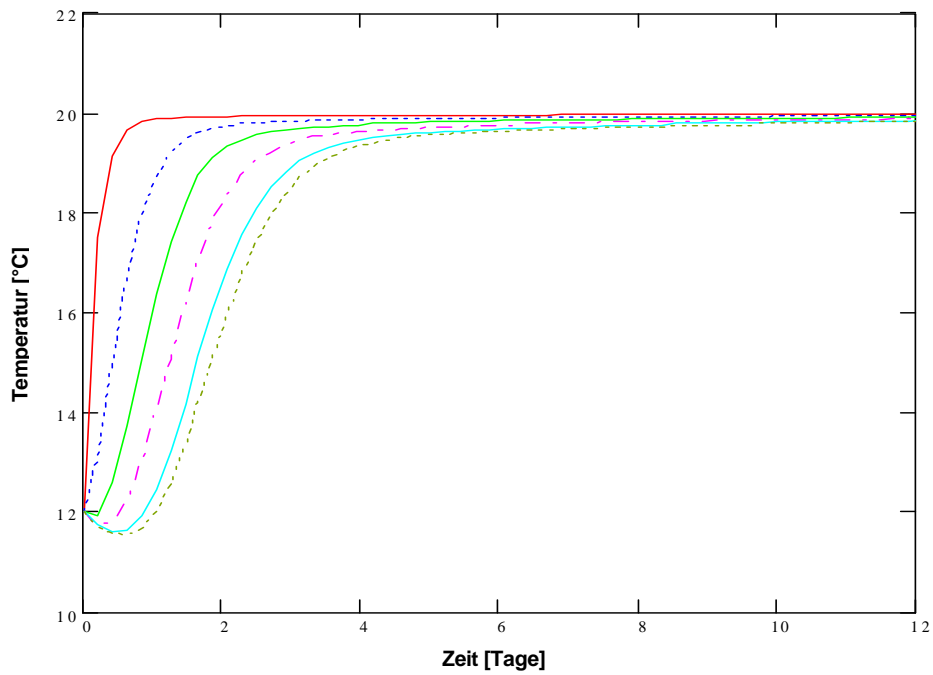


Bild 7a: Modellrechnung für Holzhacksnitzel Pappel fraktioniert grob

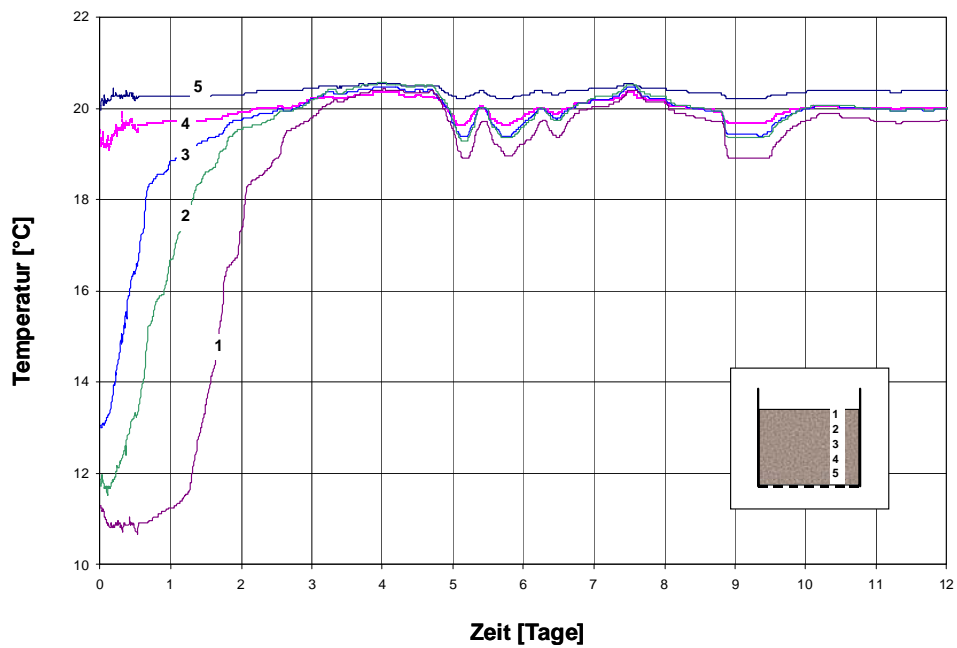


Bild 7b: Modellrechnung für Holzhacksnitzel Pappel fraktioniert grob

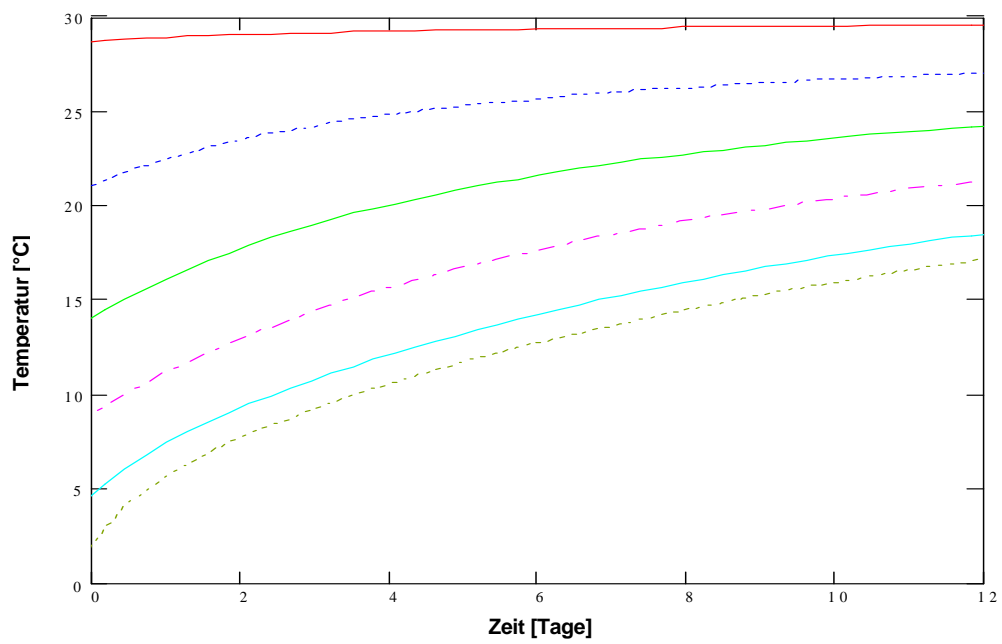


Bild 8a: Modellrechnung für Holzhackschnitzel Pappel fraktioniert fein

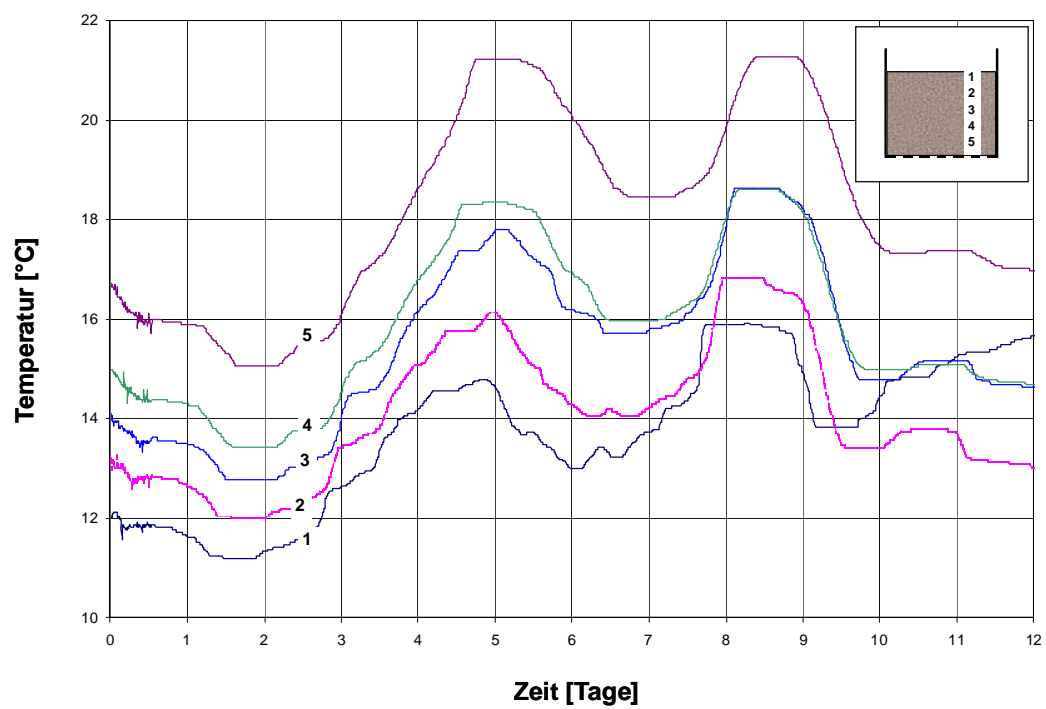


Bild 8b: Messungen für Holzhackschnitzel Pappel fraktioniert fein

6 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen dienen zur Parameteranpassung des Modells. Für die verschiedenen Varianten an Korngrößen konnten qualitativ brauchbare Übereinstimmungen gefunden werden (**Bild 5a** bis **Bild 8a**). Für Weide wurde keine Modellrechnung durchgeführt. Für Holzhackschnitzel ‚Pappel fraktioniert fein‘ (**Bild 8a, b**) konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem Modell derzeit nur konstante Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben werden können. Eine Erweiterung der Numerik um transiente Vorgaben, d.h. zeitlich variable Temperaturen für die Randbedingungen, könnte bessere Übereinstimmungen ermöglichen. Die oben erwähnte Temperaturinversion konnte jedoch modelliert werden. Das Modell kann dennoch für Vorhersagen der Trocknungsverläufe für verschiedene Varianten an Holzhackschnitzel-Korngrößen und verschiedene Lüftungsbedingungen herangezogen werden. Als Beispiel sind die Feuchtegehalte von ‚unfraktioniert fein‘ und ‚unfraktioniert grob‘ gegenübergestellt (**Bild 9**).

Die Trocknung von Hackschnitzeln erhöht deren Heizwert. Weiterhin ist die Trocknung zur Herstellung der Lagerfähigkeit und zur Minderung des Mikroben- bzw. des Schimmelpilzwachstums sowie zur Unterdrückung des biologischen Abbaus erforderlich. Schließlich verhindert feuchtes Holz teilweise die vollständige Verbrennung und erhöht dadurch die Rauchgasemissionen.

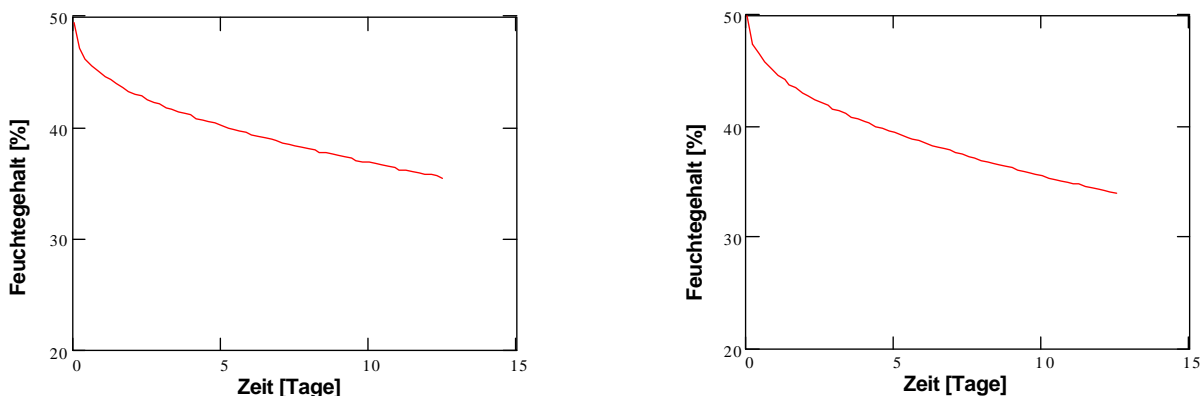


Bild 9: Modellrechnung der Trocknungszeit bei Kaltbelüftung 5°C, 60% rel. Feuchte für Holzhackschnitzel Pappel unfraktioniert fein (links), unfraktioniert grob (rechts)

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Als ‚optimal‘ wird ein Endfeuchtegehalt für lagerfähige getrocknete Hackschnitzel von 20% betrachtet (EBERT 1989), was in den Versuchen für grobes Pappel-Hackgut und Weide im gegebenen Trocknungszeitraum unterschritten wurde. Grobe Hackschnitzel mit möglichst homogener Größenverteilung, d.h. mit geringen Beimengungen feiner Anteile erzielten die beste Durchströmung der Schüttung und die höchste Trocknungsgeschwindigkeit.

Modellrechnungen erlauben den Trocknungsverlauf zu simulieren; der Abgleich mit experimentellen Werten zeigt annehmbar gute Übereinstimmungen mit den berechneten Verläufen.

Das Modell wird es in einer weiteren Entwicklung zulassen, variable Randbedingungen und variable Parameter, sowie den Schwund zu berücksichtigen. Dies erfordert weitere experimentelle Untersuchungen für eine Parameteridentifikation.

8 Literatur

EBERT H.-P. (1989): Heizen mit Holz in allen Ofenarten, Staufeu b. Freiburg/i.Br.

GÜRTNER M. (1992): Energie aus dem Wald. Fachtagung „Energetische Nutzung von Biomasse“, Freising, 27.-28.4.1992, S. 190 – 192

SCHOLZ V. (2004): Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 35, Potsdam, S. 138

SUADICANI K. (1993): Verhältnisse bei der Lieferung von Hackschnitzeln. Bericht: „Holz als Energieträger – Technik, Umwelt und Ökonomie“. Center für Biomasse-Technologie. Hrsg.: Dänische Energiebehörde, Kopenhagen

Belüftete und unbelüftete Hackgutlagerung

Wood chips storage with and without aeration

Herbert Weingartmann

Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nachhaltige Agrarsysteme,
Institut für Landtechnik
Peter Jordan Straße 82, A-1190 Wien

Kurzfassung

Lagerungsversuche mit Hackgut aus identischem Material in 4 Versuchsvarianten wurden durchgeführt. Feinhackgut (G30) und Mittelhackgut (G50) wurde jeweils ca. 4 Monate lang in Boxen (48m³) je einmal unbelüftet und einmal belüftet gelagert. Mittels Temperatursonden wurde der Temperaturverlauf in der Schüttung registriert. Mittels luftdurchlässiger Bilanzsäcke wurde der Trockenmasseverlust während der Lagerung bestimmt.

Eine wesentliche Selbsterwärmung bis nahezu 60°C konnte nur in der unbelüfteten Feinhackgut-Variante festgestellt werden. In der belüfteten Feinhackgut-Schüttung konnte sich keine Selbsterwärmung aufbauen, das Mittelhackgut erwärmte sich weder in der unbelüfteten noch in der belüfteten Variante wesentlich. Im belüfteten Feinhackgut konnte gegenüber der belüfteten Variante durch Verlustminderung mehr Energie eingespart werden als der Gebläsebetrieb erforderte. Im Mittelhackgut war die Belüftung in Bezug auf die Verlustvermeidung unwirksam.

Schlüsselwörter: Energiehackgut, Lagerung, Belüftungskühlung, Lagerungsverluste, Energiebedarf

Abstract

Storage trials with wood chips from identical material were carried out in four different experimental layouts. Small (G30) and medium sized (G50) chips were stored during four months in boxes (48 m³) with and without aeration. By means of temperature sensors temperature development within the bulk was measured. Using balance bags permeable to air dry matter loss was assessed during storage.

Significant self heating up to 60°C occurred only in the non ventilated small sized chip pile. In the ventilated small chip fraction self heating could not develop. Medium sized particles did heat up considerably neither with nor without aeration. In contrast to the non ventilated pile, in ventilated fine wood chips the resulting reduction in losses could compensate for more energy than was required by operation of the air blower. In medium sized chips aeration did not contribute to reduce losses.

Keywords: energy wood chips, storage, aeration, storage losses, energy demand

In den Jahren 2003 und 2004 wurden auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Oberösterreich Lagerungsversuche mit Energiehackgut durchgeführt. Ausgangspunkt war die Vermutung, dass sich mit größerem Hackgut gegenüber Feinhackgut Lagerungsverluste bzw. Lüftungsaufwand senken lassen. Damit könnte sich die gesamte Bereitstellungskette energetisch günstiger gestalten lassen.

1 Material und Methoden

1.1 Versuchsfragen

- (1) Kann grobes Hackgut (Mittelhackgut G50 gem. ÖNORM M7133) unbelüftet verlustarm gelagert werden?
- (2) Kann eine Belüftungskühlung (= intermittierende Belüftung nach Selbsterwärmung) Trockenmasse-Verluste vermeiden und ist auch ein wesentlicher Trocknungseffekt zu erzielen?
- (3) Wie hoch ist der Energiebedarf – inklusive Trockenmasse-Verlusten – für das jeweilige Verfahren?
- (4) Welchen Einfluss hat die Stückgröße (G50 vs. G30) auf das Lagerungsverhalten?

1.2 Versuchsdesign

Parallel zu den Versuchen mit „Mittelhackgut“ wurde auch „Feinhackgut“ (G30 gem. ÖNORM 7133) mit der gleichen Versuchsanstellung untersucht. Auf eine Variante Feinhackgut ohne Belüftung wurde deshalb nicht verzichtet, da diese in der Praxis doch weit verbreitet ist, obwohl sie nachgewiesenermaßen nicht ausreichend sicher funktioniert (PRANKL & WEINGARTMANN 1994). Auf einer zweiten Ebene wurden aus den Ergebnissen der Belüftungsvarianten Anhaltspunkte für die Optimierung des Belüftungsregimes erwartet.

Folgende 4 Versuchsvarianten wurden in 4 Durchgängen mit je ca. 4 Monaten Lagerungsdauer (2003/04) durchgeführt (**Bild 1**):

- Feinhackgut (G30) – unbelüftet
- G30 – intermittierend belüftet
- Mittelhackgut (G50) – unbelüftet
- G50 – intermittierend belüftet

Das Material war in allen Versuchsdurchgängen Hackgut von Stammholz und Derbholz mit sehr geringem Feinanteil und ohne Laub- und Nadelanteil. Die Schüttdichte auf Trockenmasse bezogen betrug im Mittel 158 kg TM/m³ bei G30-Material und 128 kg TM/m³ bei G50-Material.

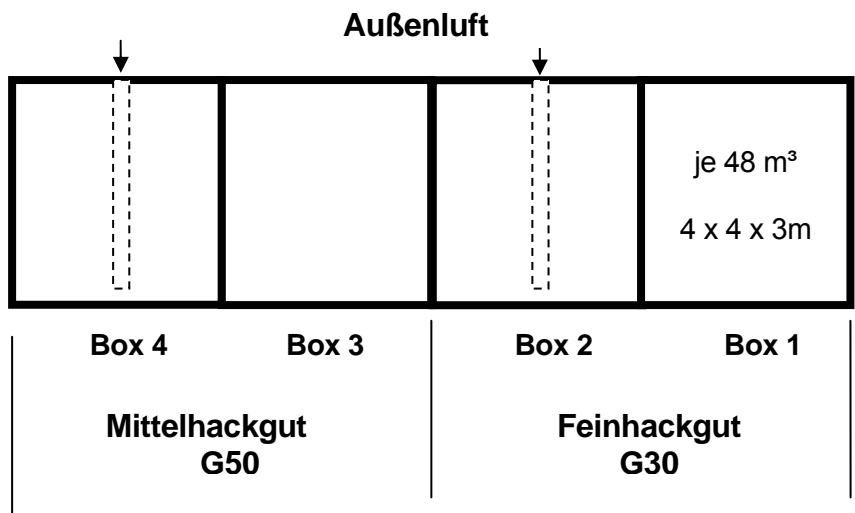


Bild 1: Grundriss der Versuchsanlage. Die 4 Boxen mit je ca. 48m³ Volumen wurden auf 3 Seiten durch Holzwände gebildet, die Rückwand war eine Betonwand. Die Boxen 2 und 4 waren durch je einen Bodenkanal von außen belüftbar

Im Zentrum jeder Box wurde eine Messsäule mit je 4 in etwa gleichen Abständen angeordneten Temperatursensoren (Pt100) eingesetzt. Wichtig war, dass die beiden mittleren Messstellen das Volumen drittelten. In unmittelbarer Nähe zu diesen Temperaturmessstellen wurden auch die Bilanzsäcke (zu je ca. 8 kg Einwaage) eingelegt. Zielsetzung dieser Anordnung war, bei der unvermeidlichen Schüttkegelbildung jedenfalls die Bedingungen im Zentrum der Schüttung erfassen zu können. Die Temperaturwerte wurden laufend mittels Daten-Recorder abgefragt und von einem PC gespeichert bzw. für die Belüftungssteuerung verarbeitet.

Die Belüftung erfolgte mit zwei Mitteldruckgebläsen mit 800 W Nennleistung bei einem Luftdurchsatz von ca. 900 bis 1000 m³/h. Zu den Ergebnissen des Gebläsebetriebes siehe **Tabelle 1**.

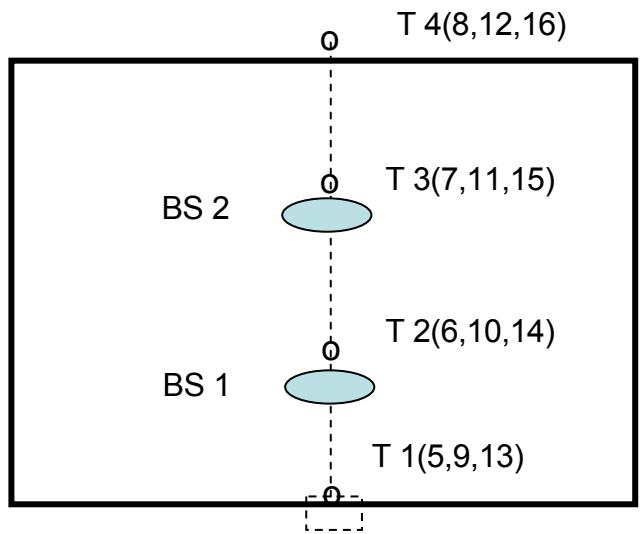


Bild 2: Boxen-Aufriss mit Messstellenverteilung
T = Temperaturmessstelle, BS = Bilanzsack

Folgende Messgrößen wurden erfasst:

- Temperaturen:
 - Außentemperatur
 - Taupunkttemperatur der Außenluft
 - Temperaturen in der Schüttung: 4 Schichten je Box
- Druck: p_{stat} in der Gebläse-Druckleitung, p_{bar}
- Energiebedarf: Stromzähler
- Wassergehalt: bei Einlagerung und bei Auslagerung
- Brennwert: bei Einlagerung und bei Auslagerung
- Trockensubstanzverluste: 2 Bilanzsäcke je Box
- Siebanalysen, Schüttdichte: wurden von der FJ-BLT Wieselburg durchgeführt.
- Pilzsporenbelastung: mittels Bio-Check der Fa. Dräger (Erbrachte keine aussagekräftigen Ergebnisse).

2 Versuchsergebnisse

2.1 Temperaturverläufe

In der Folge seien einige Temperaturverläufe gezeigt, die sich bei allen Versuchsdurchgängen in sehr ähnlicher Weise wiederholten.

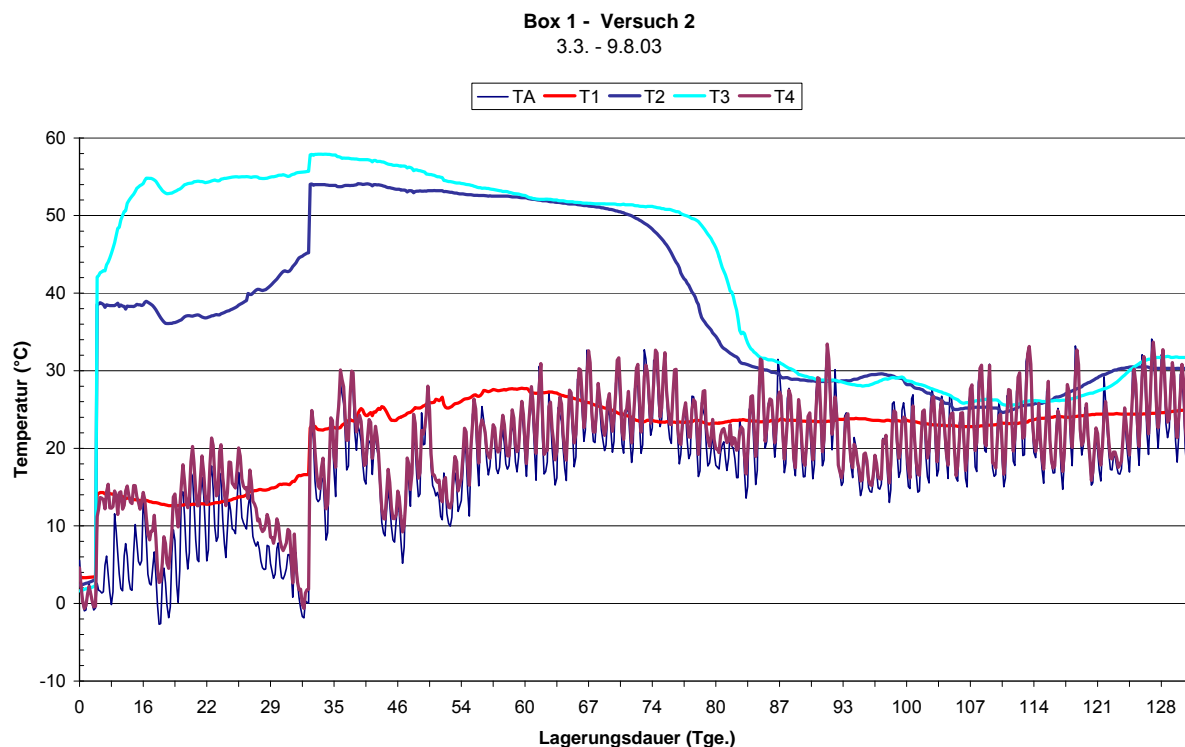


Bild 3: Temperaturverlauf in der Box 1 über die gesamte Lagerungsdauer. Buche + Esche, G30 unbelüftet, Einlagerungsfeuchte 41,1% (MW)

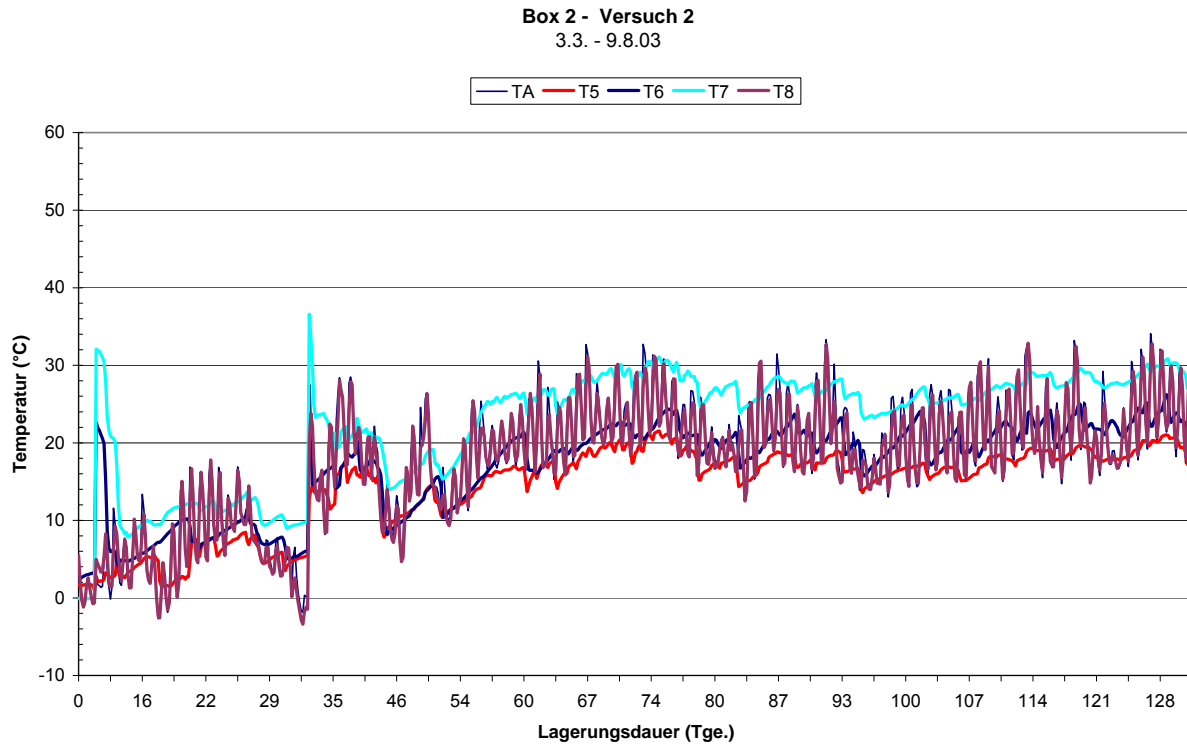


Bild 4: Temperaturverlauf in der Box 2 über die gesamte Lagerungsdauer Buche + Esche, G30 belüftet. Einlagerungsfeuchte 41,1% (MW)

Aus den Darstellungen wird deutlich, dass vor allem das obere Drittel der Schüttung durch höhere Temperaturen gekennzeichnet ist. Dies gilt auch für die belüftete Variante, obwohl das Temperaturniveau durch die Belüftung wesentlich niedriger liegt als in der unbelüfteten Schüttung. Während in der unbelüfteten Variante (**Bild 3**) die beiden mittleren Temperaturen (T2 und T3) über 80 Tage lang anscheinend unbeeinflusst von der Außentemperatur (TA) auf sehr hohem Niveau blieben, folgten jene in der belüfteten Variante (**Bild 4**) nach sehr kurzer Zeit in zeitlich gedämpfter Form dem Verlauf der Außentemperatur. Die Belüftung hat jedenfalls den Zweck der Kühlung der Schüttung nachdrücklich erreicht.

Im 3. Versuchsdurchgang wurde Material mit wesentlich niedrigerem Wassergehalt (28,3%) eingelagert. Erstaunlich war, dass in der Schüttung der Box 1 (**Bild 5**) ebenfalls Temperaturen gegen 60°C erreicht wurden (T2, T3), allerdings nur etwa 12 Tage lang. In der belüfteten Variante (**Bild 6**) war eine deutliche Temperaturerhöhung nur innerhalb der ersten 2 Tage festzustellen.

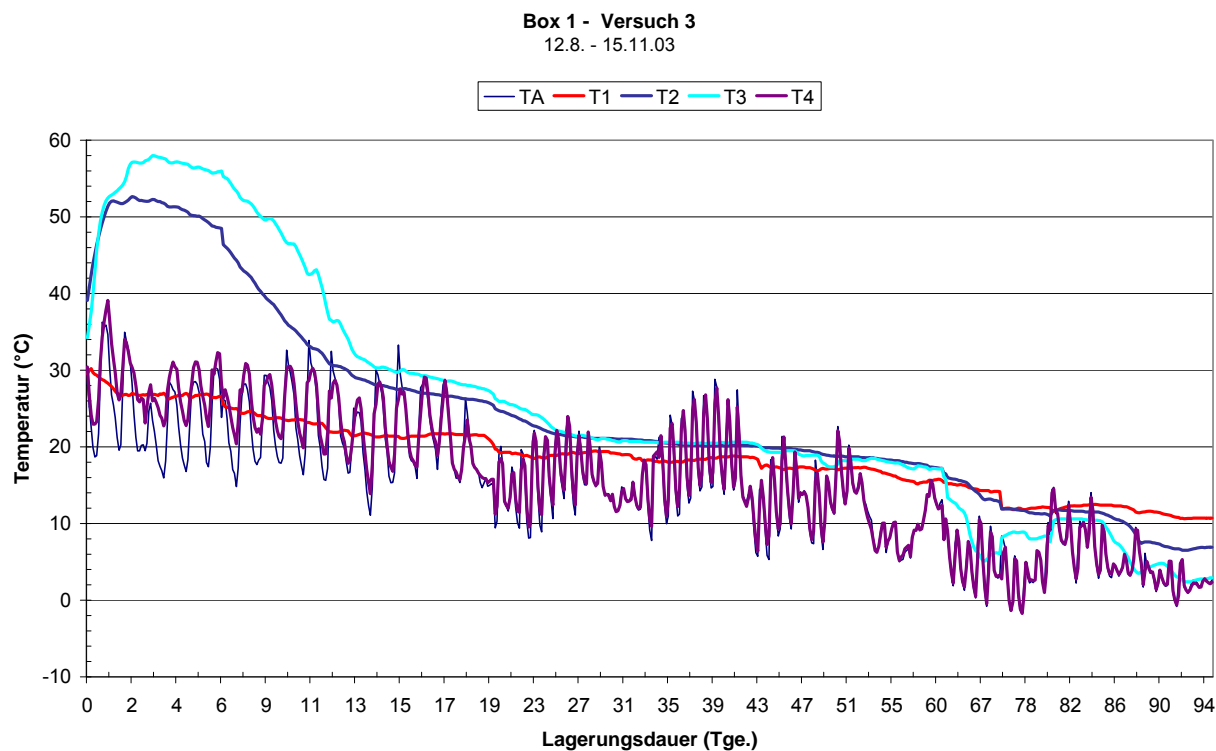


Bild 5: Temperaturverlauf in der Box 1. Fichte, G30, unbelüftet. Einlagerungsfeuchte 28,3% (MW)

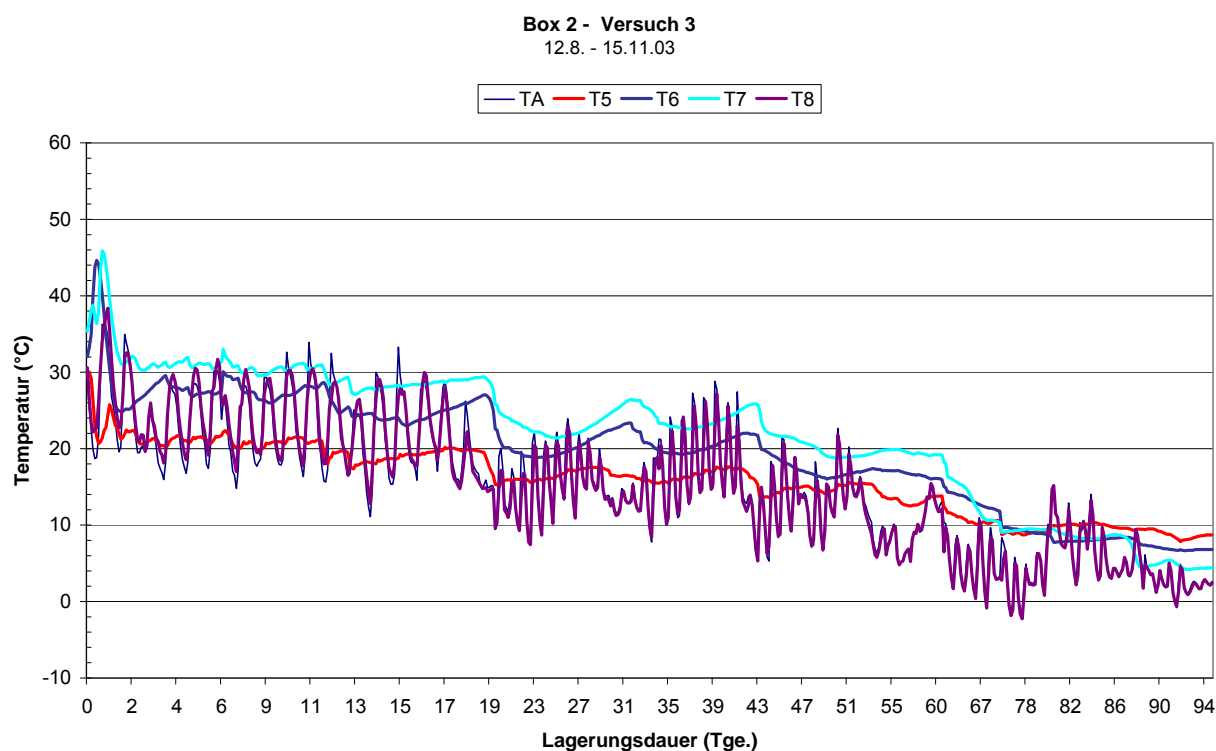


Bild 6: Temperaturverlauf in der Box 2. Fichte, G30, belüftet. Einlagerungsfeuchte 28,3% (MW)

Beispiele für den Temperaturverlauf im G50-Hackgut sind in den **Bildern 7** und **8** gezeigt: Der Temperaturverlauf ist verglichen mit den Bildern 3 und 4 völlig anders. Es gab auch in

der unbelüfteten Box 3 keine nennenswerte Selbsterwärmung. Der Einfluss der Belüftung ist daher auch nicht erkennbar.

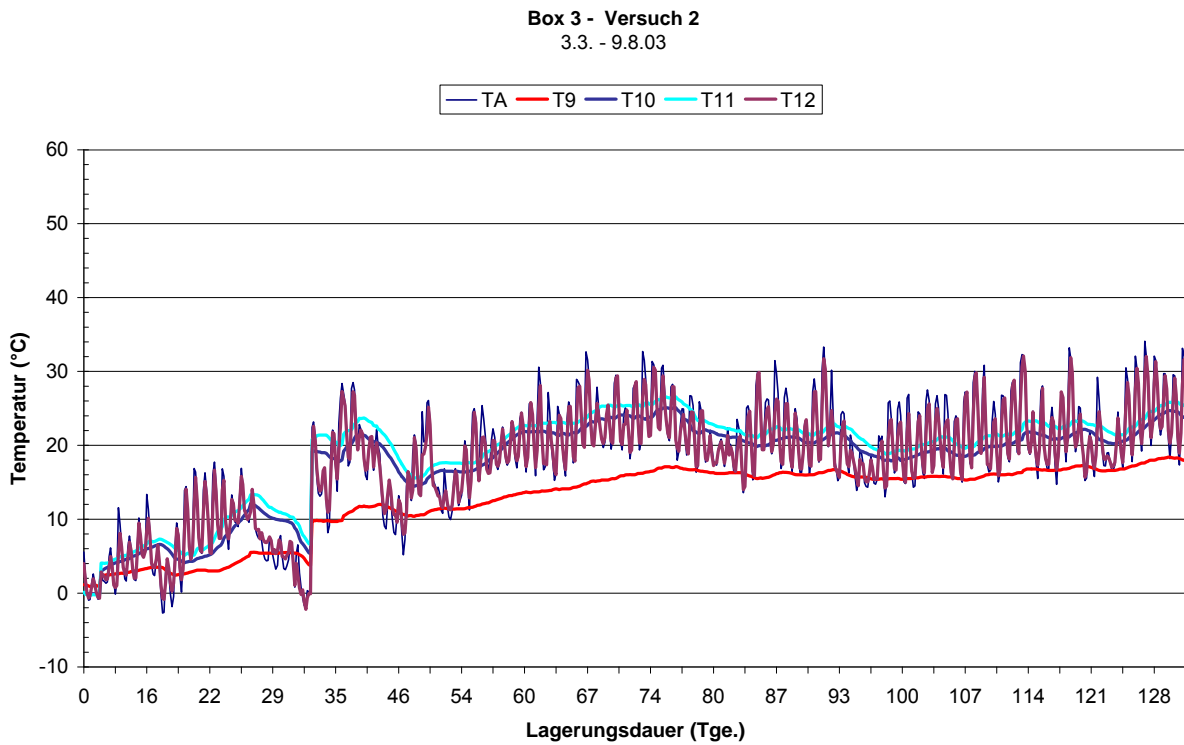


Bild 7: Temperaturverlauf in der Box 3. Buche + Esche, G50, unbelüftet. Einlagerungsfeuchte 41,1% (MW)

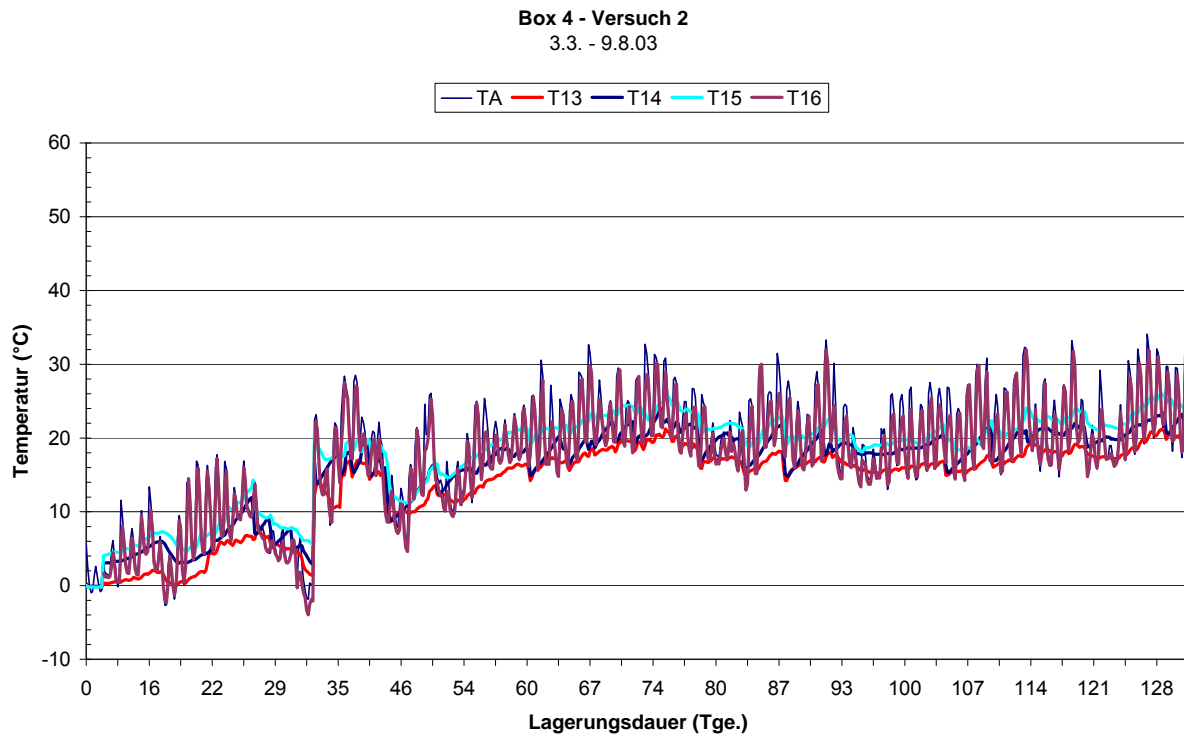


Bild 8: Temperaturverlauf in der Box 3. Buche + Esche, G50, belüftet. Einlagerungsfeuchte 41,1% (MW)

2.2 Wassergehalte

Tabelle 1: Mittelwerte der Wassergehalte der drei ausgewerteten Versuchsdurchgänge. FE% ist Einlagerungsfeuchte, FA% = Auslagerungsfeuchte, jeweils auf Gesamtmasse berechnet (w.b.). $\Delta F\%$ = Feuchteänderung während der Lagerung, auf Trockenmasse berechnet (d.b.)

	FE%	FA%					$\Delta F\%$ (d.b.)
		Ges.	B.1+B.3	B.2+B.4	G30	G50	
Vers. 1	43,4	41,1	43,0	39,2	43,0	39,2	6,8
Vers. 2	41,1	31,0	31,4	30,7	28,5	33,5	24,6
Vers. 3	28,3	24,3	24,1	24,6	17,6	24,6	7,3

Wie die Tabelle 1 zeigt, war der Trocknungseffekt der Lagerung eher bescheiden, trotz der Belüftung der Boxen 2 und 4. Nur im zweiten Versuchsdurchgang war ein wesentlich höherer Trocknungseffekt zu verzeichnen (24,6% d.b.), auf die Belüftung war dieser aber auch nicht eindeutig zurückzuführen, obwohl der Aufwand für die Lüftung in diesem Versuchsdurchgang wesentlich höher war als in den beiden anderen (s. **Tabelle 2**).

2.3 Belüftungsdaten

Die Steuerung der Belüftung wurde täglich zur Mittagszeit fix 30 Minuten eingeschaltet, eine zusätzliche Belüftungszeit wurde mit der Temperaturdifferenz in der Schüttung geschaltet. Aus diesem Grund sind die Belüftungszeiten sehr unterschiedlich und immer in der Box 2 höher als in der Box 4. Dementsprechend ist auch der Energiebedarf (E. in Tabelle 2) jeweils für Box 2 höher und insgesamt im Versuch 2 um ein Vielfaches höher als in den übrigen Durchgängen.

Tabelle 2: Betriebsdaten für die Belüftung der Boxen 2 und 4 während der drei ausgewerteten Versuchsdurchgänge

Größe	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	Gebälse 1 (Box 2)	Gebälse 2 (Box 4)	Gebälse 1 (Box 2)	Gebälse 2 (Box 4)	Gebälse 1 (Box 2)	Gebälse 2 (Box 4)
pstat (Pa)	641	570	618	571	550	492
pges (Pa)	967	943	952	932	875	900
VL (m ³ /h)	860	914	896	934	1045	999
VLspez (m ³ /m ³ /h)	18	19	19	20	22	21
mL (kg/h)	1097	1183	1082	1116	1308	1185
Betriebsdauer (h)	111	85	543	399	142	67
E. (kWh/Box)	89	68	435	319	114	53
E. (kWh/m ³)	1,8	1,4	9,1	6,6	2,4	1,1

2.4 Massen- und Energiebilanz

Wesentliche Fragen der Versuchsanstellung waren jene nach der Höhe der Verluste und was die Lagerung energetisch kostet. Hierzu wurde die Methode der Bilanzsäcke herangezogen. Es wurden dafür sehr gut luftdurchlässige Säcke verwendet. Die festgestellten Trockenmasseverluste wurden mit dem mittleren Brennwert aller Proben (5,55 kWh/kg TM) auf „Energieaufwand“ umgerechnet. Die Verwendung des einheitlichen Brennwertes schien gerechtfertigt, da erwartungsgemäß während der viermonatigen Lagerung keine Änderung im Brennwert festzustellen war. Der Energieaufwand für die Belüftung wurde dem Energieaufwand aus den Trockenmasseverlusten zugeschlagen. Um der höheren Wertigkeit der elektrischen Energie gerecht zu werden wurde zusätzlich zur Äquivalenzmethode auch die Substitutionsbetrachtung zur Berechnung herangezogen (s. **Tabelle 3**). Die Umrechnung auf die Primärenergieebene erfolgte mit einem für Österreich zutreffenden Umwandlungswirkungsgrad von 65%. An der Grundaussage hat sich damit aber nichts geändert.

Tabelle 3: Massen- und Energiebilanz der drei Versuchsdurchgänge

TM –Verlust (%)		Box 1	Box 2	Box 3	Box 4	$\Delta F\%$ (d.b.)
	Vers.1	3,6	2,0	10,8	*	6,8
	Vers.2	5,0	1,4	1,9	4,8	24,6
	Vers.3	4,3	4,3	0,8	2,0	7,3
	Mittel/Box	4,3	2,6	4,5 (1,35*)	3,4	12,9
ΔTM abs.	kg TM/Box	326	197	83*	209	
ΔE TM - Verl.	kWh/Box	1810	1094	460	1159	
ΔE Bel./Äqu.	kWh/Box	0	164	0	105	
ΔE Bel./Subst.	kWh/Box	0	252	0	161	
„Nutzen“ der Belüftung	kWh/B. (Äqu.)		552		-804	
	kWh/B. (Subst.)		463		-861	

Der mit * gekennzeichnete Versuchsteil war nicht auswertbar, daher beziehen sich die so gekennzeichneten Werte nur auf die Versuche 2 und 3.

„Äqu.“ = Äquivalenzmethode: Elektrische Energie zu TM -Energie 1:1

„Subst.“ = Substitutionsmethode: Elektrische Energie zu TM -Energie 1:0,65

Die Werte der Trockenmasseverluste erscheinen in diesen Versuchen relativ niedrig. In früheren Versuchen bei unbelüfteter Lagerung (PRANKL & WEINGARTMANN 1994) wurden Werte von 5 bis 15% gefunden, allerdings bei nahezu doppelter Lagerungsdauer und Einlagerungsfeuchten um 50%. Der in den erwähnten Versuchen sehr ausgeprägte positive Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung, Trocknungseffekt und Trockenmasseverlusten war hier nur angedeutet (s. Versuch 2, Tabelle 3). Mit der Bewertung „Nutzen der Belüftung“ ist unterstellt, dass eine Verringerung der Trockenmasseverluste in der be-

lüfteten Box allein auf die Belüftung zurückzuführen sei. Im Falle der Box 2 ergibt sich damit je nach Berechnungsmethode eine positive Energiebilanz für die Belüftung von ca. 550 kWh bzw. ca. 460 kWh je Box und Versuchsdurchgang. Für die Box 4 dagegen (G50 – Material) führt die Belüftung sehr deutlich in eine negative Energiebilanz für die Belüftungsvariante.

3 Schlussfolgerungen

Aus den vorgestellten Versuchen konnten nicht alle vorher gestellten Fragen beantwortet werden. Einiges war jedoch daraus zu lernen:

- a. Durch eine Belüftung mit niedriger Luftrate kann der Temperaturenbau in G30-Schüttungen wirkungsvoll vermieden werden. In einer G50 Schüttung kommt es auch ohne Belüftung zu keinem solchen.
- b. Wenn man einen Zusammenhang zwischen Selbsterwärmung und Trockenmasseverlusten herstellen kann, dann gilt dies nur für Feinhackgut. Eine Belüftung vermindert die Trockenmasseverluste in einem Ausmaß, dass die benötigte Belüftungsenergie überkompensiert wird. Bei gröberem Hackgut – von G50 aufwärts – ist eine geringfügige Belüftung nicht notwendig bzw. sie hilft nicht wesentlich gegen Trockenmasseverluste. Es liegt der Schluss nahe, dass im Ursachenkomplex für den Substanzabbau die Temperatur bzw. die Selbsterwärmung nur ein Faktor ist und gar nicht der Wichtigste.
- c. Eine verlustfreie Lagerung ist nur bei niedrigem Wassergehalt möglich, welcher einen Trocknungsprozess voraussetzt. Die Wirksamkeit einer Belüftungskühlung als Trocknungsverfahren ist demnach differenziert zu beurteilen. Sie setzt Material voraus, das ausreichende Selbsterwärmung zulässt, und eine Luftrate, die einen ausreichend raschen Wasserdampftransport ermöglicht. Eine trockenungswirksame Luftrate müsste etwa den fünf- bis zehnfachen Wert des in Tabelle 2 angeführten spezifischen Luftdurchsatzes aufweisen (WEINGARTMANN 1991). Mittel- und Grobhackgut dürfte für eine Trocknung durch Belüftungskühlung nicht in Frage kommen.
- d. Die Ergebnisse aus den vorgestellten Versuchen können auf relativ kurzfristige Lagerungsaufgaben ohne Anspruch auf einen wesentlichen Trocknungsprozess angewendet werden. In diesem Rahmen gesehen kann Mittel- und Grobhackgut ohne erzwungene Durchlüftung gelagert werden, bei Feinhackgut hilft eine geringfügige Belüftung die Trockenmasseverluste in Grenzen zu halten.

4 Literatur

ÖNORM M7133 (1988): Energiehackgut. Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

PRANKL H., WEINGARTMANN H. (1994): Hackguttrocknung Wippenham. BLT Wieselburg

WEINGARTMANN H. (1991): Hackguttrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Landtechnische Schriftenreihe 178, Wien

**In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern	
	Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006

Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007
Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €