

Schlussbericht, 31. Dezember 2015

Vorprojekt

«Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln»



energie schweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

Datum: 31.12.2015

Ort: Bern

Auftraggeberin: Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmerin:

Energie & Holz GmbH, Gregor Lutz/Andreas Keel, Neugasse 6, 8005 Zürich

BFE-Bereichsleitung: Binggeli, Daniel (Holz)

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/401763-01, 132063922

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch

Titelbild

Kreuzweise geschichteter Energierundholzpolter (Photo Gregor Lutz)

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage und Zielsetzung	8
2 Methodische Bemerkungen	10
3 Allgemeine Hinweise zur Schnitzelqualität	11
4 Anforderungen der Feuerungssysteme	14
4.1 Feingutanteil.....	14
4.1.1 Schnitzelsilo und Schnitzellagerhalle	14
4.1.2 Austragungs- und Transportanlagen	14
4.1.3 Feuerung	15
4.2 Wassergehalt	16
4.2.1 Schnitzelsilo und Schnitzellagerhalle	16
4.2.2 Austragungs- und Transportanlagen	16
4.2.3 Feuerung	16
4.3 Grobanteil.....	18
4.4 Aschegehalt	18
4.5 Stickstoffgehalt.....	18
4.6 Fremdstoffanteil	18
5 Einflussfaktoren	20
5.1 Feingutanteil.....	20
5.2 Wassergehalt	20
5.3 Grobanteil.....	21
5.4 Aschegehalt	21
5.5 Stickstoffgehalt.....	21
5.6 Fremdstoffanteil	21
5.7 Maschinenbedingte Einflussfaktoren	22
6 Substanzverlust bei natürlicher Trocknung	23
7 Lagerung von Holzschnitzeln	30
7.1 Allgemeine Grundsätze.....	30

7.2	Lagerung im Freien	33
7.3	Holzschnitzel-Lagerhallen	35
8	Vortrocknung in ungehacktem Zustand	38
9	Abdecken von Energieholz in ungehacktem Zustand	42
10	Technische Schnitzeltrocknung	43
10.1	Vorbemerkungen	43
10.2	Bandtrockner	43
10.3	Trommeltrockner	44
10.4	Containertrockner	44
10.5	Wirtschaftliche Aspekte	45
11	Aussiebung von Feingutanteil	47
11.1	Rüttelsieb	47
11.2	Trommelsieb	48
11.3	Sternsieb	48
11.4	Zeitpunkt des Siebens	48
12	Logistik als Qualitätsfaktor	49
13	Nutzung von Schlagabraum	52
14	Emissionsmessungen	53
15	Qualitätskontrolle	54
16	Vorschlag Klassifizierung Holzschnitzel	56
17	Offene Fragen	57
18	Quellenverzeichnis	58

Zusammenfassung

Für einen emissions- und wartungsarmen Betrieb von automatischen Holzfeuerungen ist die Qualität der eingesetzten Holzschnitzel von entscheidender Bedeutung. Gemäss Einschätzung [34] kam es bei einem Viertel bis einem Drittel aller installierten Anlagen schon zu Problemen, weil der verwendete Brennstoff nicht mit den Anforderungen der Feuerungsanlage übereinstimmte. Viele Schnitzelhersteller, Waldbesitzer, Planer und Anlagenbetreiber sind sich des grossen Potenzials zu wenig bewusst, welches die Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln hinsichtlich eines schadstoffarmen und störungsfreien Betriebs der Anlagen darstellt.

Der vorliegende Bericht (Vorprojekt) stellt eine «Auslegeordnung» im Hinblick auf ein späteres Umsetzungsprojekt dar. Zu diesem Zweck werden die wichtigsten Grundlagen zum Thema zusammengetragen und ausgewertet.

Folgende Parameter beeinflussen die Qualität von Holzschnitzeln: Feingutanteil, Wassergehalt, Grobanteil, Aschegehalt, Stickstoffgehalt, Fremdstoffanteil und Energieinhalt. Praxiserfahrungen zeigen, dass der Feingutanteil und der Wassergehalt die grösste Bedeutung haben, insbesondere dann, wenn beide Parameter gleichzeitig hohe Werte aufweisen. Vor allem bei kleinen Feuerungen bis 200 kW Leistung («Seriengeräte») beeinträchtigt ein hoher Feinanteil insbesondere die Verbrennungsqualität, aber auch das Fliessverhalten und damit die Qualität der Austragung. Solche Anlagen benötigen Qualitätsholzschnitzel.

Für die Höhe des Feingutanteils ist die Qualität des Ausgangsmaterials entscheidend. Das entsprechende Hackgut der Qualitätsholzschnitzel darf keine Blätter und Nadeln und nur wenig Rinde enthalten. Deshalb ist eine Unterteilung in Energierundholz für gute Schnitzelqualitäten und Waldrestholz für schlechte Qualitäten zweckmässig. Aus minderwertigem Ausgangsmaterial lassen sich keine Qualitätsholzschnitzel herstellen.

Durch die Trocknung von Holzschnitzeln reduziert sich deren Wassergehalt und der Heizwert pro kg Holzsubstanz nimmt zu. Gleichzeitig findet aber bei einem Wassergehalt von mehr als 30% ein beträchtlicher Substanzverlust statt. In ungedeckten Schnitzellagern kann so in einem Jahr bis zu 30% der Masse verloren gehen. Der Substanzverlust ist umso grösser, je schlechter die Qualität (hoher Wassergehalt, hoher Feinanteil, hoher Anteil an Blättern und Nadeln) der gelagerten Schnitzel ursprünglich war. Bei der Lagerung von Holzschnitzeln im Freien empfiehlt sich die Abdeckung mit diffusionsoffenen Vliesen.

Bei der Lagerung der Holzschnitzel unter Dach (Lagerhalle) konnten nach 6 Monaten Wassergehalte von unter 30% gemessen werden, und der Substanzverlust lag bei ca. 13% an Trockenbiomasse. Der «Rekordwert» von knapp 16% Wassergehalt wurde in einer Lagerhalle oberhalb des St. Galler Rheintals nach einer längeren Föhnperiode gemessen. Wichtige Faktoren sind eine gute Durchlüftung der Halle und genügend Freiheit zwischen dem Schnitzelhaufen und dem Hallendach. Zudem sollte die Lagerdauer möglichst kurz (3 Monate) bemessen sein. Ein sehr geringer Feingutanteil ist für die optimale Durchströmung der Trocknungsluft wichtig.

Werden Schnitzel mit hohem Wassergehalt eingelagert, sollte dies unbedingt im Frühsommer erfolgen. Bei später im Jahr eingelagerten Holzschnitzeln ist darauf zu achten, dass eine Vortrocknung in ungehacktem Zustand erfolgen konnte.

Die Vortrocknung in ungehacktem Zustand ist eine einfache, kostengünstige und effiziente Massnahme zur Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln. Je nach Holzarten liessen sich Wassergehalte von unter 35% erzielen. Unter optimalen Bedingungen bei heisser Witterung und optimaler Durchlüftung wurden gar Werte von 25% gemessen. Der Substanzverlust bei der Vortrocknung in ungehacktem Zustand ist mit rund 6% in 6 Monaten deutlich geringer als bei der Schnitzellagerung und –trocknung.

Entscheidend für eine effiziente Vortrocknung in ungehacktem Zustand ist die richtige Wahl des Polterstandorts. Ideal sind windexponierte, besonnte Kuppenlagen auf gut durchlässigen Böden mit ausreichend Bodenfreiheit (Unterlage aus Querhölzern). Ein trockener Untergrund des Energieholzpolters ist für die Vortrocknung entscheidend.

Weichhölzer erreichen den tiefsten Wassergehalt nach etwa 3 Monaten und sollten dann entweder mit Vliesen abgedeckt oder gehackt werden. Bei Harthölzern (Buche) dauert es länger (ca. 6 Monate).

Eine weitere Möglichkeit zur Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln ist die technische Trocknung durch aktive Zuführung von Wärme. Dadurch verkürzt sich die Trocknungszeit gegenüber der natürlichen Schnitzeltrocknung massiv, und der Substanzverlust fällt deutlich geringer aus. Im Vordergrund stehen Bandrockner, Trommeltrockner und Containertrockner. Entscheidend für die technische Schnitzeltrocknung sind einerseits eine günstige Wärmequelle, andererseits die Möglichkeit, die Holzschnitzel nach dem Trocknen unter Dach zu lagern oder in die Heizungen zu führen.

Eine der wichtigsten Massnahmen im Hinblick auf einen emissions- und wartungsarmen Betrieb der Anlagen und Geräte ist die Reduktion des Feingutanteils durch Aussieben der Holzschnitzel. Dafür gelangen meistens Rüttelsiebe, Trommelsiebe oder Sternsiebe zum Einsatz. Idealerweise werden die Holzschnitzel sowohl vor als auch nach der Trocknung ausgesiebt.

Am Beispiel des «Holzkreislaufs Liechtenstein» wird gezeigt, wie die Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln bereits bei der Energieholzlogistik beginnt. Bereits bei der Polterung im Wald wird unterschieden zwischen Energierundholz für kleinere und ältere Anlagen und Waldrestholz für grosse Vorschubrostfeuerungen. Auch hier wird das grosse Potenzial der Vortrocknung in ungehacktem Zustand optimal ausgenutzt.

Für die Qualitätskontrolle werden unter Hinweis auf aktuell laufende Projekte in der Schweiz und in Deutschland Kriterien für eine einfache Sichtkontrolle vorgeschlagen. Zudem wird auf der Basis der neusten europäischen Normen EN ISO 17225-1 und 17225-4 eine konkrete, die Feuerungssysteme berücksichtigende Klassifizierung von Holzschnitzeln vorgeschlagen.

Im Kapitel 16 finden sich offene Fragen mit entsprechendem Handlungsbedarf auf den Ebenen Grundlagen, Betrieb und Controlling, welche vorliegend lediglich angeschnitten werden konnten und im Rahmen eines späteren Projektes einer vertieften Abklärung bedürfen.

In diesem späteren Projekt wird es vornehmlich darum gehen, das zusammengetragene bzw. noch zu ergänzende Wissen umzusetzen und der Praxis zugänglich zu machen. Die dafür vorgesehenen Massnahmen sind im letzten Kapitel beschrieben und verursachen - über 2 Jahre hinweg verteilt - Kosten von insgesamt Fr. 150'000.-.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Seit 1990 hat die Nutzung von Energieholz von 3.2 auf fast 5 Millionen Kubikmeter (Festmeter) pro Jahr zugenommen. Rund zwei Drittel davon werden in Form von Holzschnitzeln in insgesamt rund 11'000 grossen und kleinen Heizungen genutzt. Auch die Technologie der automatischen Holzschnitzelheizungen hat sich ständig weiterentwickelt. Heute gibt es Anlagen aller Alters- und Grössenklassen mit ganz unterschiedlichen Anforderungen an die Brennstoffqualität. Mit zunehmender Verbreitung der Schnitzelheizungen und sich ständig weiter ausbreitender Wohngebiete ist das nachbarschaftliche Störungspotenzial der Holzenergieanlagen grösser geworden, und die Anwohnerinnen und Anwohner sind heute viel stärker sensibilisiert gegenüber Immissionen.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Brennstoffqualität ein wichtiger qualitätsbildender Faktor darstellt. Die Firma Haller Feuerungs- und Haustechnik GmbH in Rifferswil besorgt die Kaminfege- und die Feuerungskontrolle in den Zürcher Gemeinden Horgen, Hirzel, Aeugst am Albis, Kappel am Albis, Hausen am Albis und Rifferswil und ist dort für rund 70 Schnitzelheizungen zuständig. Der Geschäftsführer schätzt, dass ursprünglich rund ein Drittel aller Anlagen Probleme wegen schlechter Holzschnitzelqualität hatten. Hauptprobleme waren zu hohe Wassergehalte der Holzschnitzel in kleinen Anlagen (< 150 kW) sowie der Umstand, dass viele Anlagenbetreiber die Schnitzel selbst herstellten und dafür schlechte Hacker einsetzten. Mittlerweile hat sich die Situation stark verbessert. Einerseits konnte der Kaminfeger die Anlagenbetreiber dazu bringen, die Holzschnitzel in kleinen Anlagen nicht mehr frisch gehackt in die Silos einzubringen, sondern das Holz entweder vor dem Hacken eine gewisse Zeit lang vorzutrocknen oder aber nach dem Hacken die Schnitzel etwas „ausgären“ zu lassen. Andererseits hat der lokale Hackunternehmer einen neuen Hacker angeschafft, welcher qualitativ hochwertige Holzschnitzel herzustellen vermag. Bei grösseren Feuerungsanlagen waren die Probleme eher konzeptioneller Art in Form von überdimensionierten Wärmeerzeugern und fehlenden Speichern. Bei grösseren Anlagen wird der Fein- und Gutanteil als nicht sehr problematisch betrachtet [34].

Im Kanton Obwalden betreut die Firma Kaminfeger-Plus GmbH insgesamt rund 90 Schnitzelheizungen. Hauptprobleme mit der Schnitzelqualität treten vor allem bei kleineren Anlagen < 200 kW Leistung mit dem Feinanteil und dem Wassergehalt auf. Diese kleinen Schnitzelfeuerungen sind aufgrund der kleinen Rostflächen und Brennräume nicht in der Lage Holzschnitzel mit höherem Wassergehalt zu verbrennen, respektive erreichen ihre Leistung nicht. Dadurch resultieren deutlich höhere Emissionswerte über den Grenzwerten, wenn zu schlechte Schnitzelqualitäten eingesetzt werden. Für diese Feuerungen müssen bessere Schnitzelqualitäten eingesetzt werden, damit der Betrieb reibungslos und emissionsarm funktioniert. Der Geschäftsführer ist der Meinung, dass vor allem auf der Brennstoffseite Verbesserungen erreicht werden müssen, damit die Kleinanlagen

< 200 kW gut betrieben werden. Auf der Feuerungsseite sieht er kaum Möglichkeiten, da ansonsten die Geräte aufgrund der grösseren Rostflächen und Ausbrandzonen grösser werden müssten und damit für die Betreiber nicht mehr interessant wären (höherer Preis und Platzverhältnisse) [88].

Die IPE (Interessengemeinschaft professioneller Energieholzversorger) führte in den letzten Jahren mehrere Fachtagungen zum Thema «Qualitätsverbesserung von Holzschnitzeln» durch [51, 68]. Dabei hat sich, ebenso wie anlässlich der verschiedenen Ausbildungskurse im Rahmen des Aktionsplans Holz des BAFU 2009 – 2011 gezeigt, dass in der Praxis sehr viel Know-how und Erfahrungen vorhanden sind, dass dieses Wissen jedoch bisher nicht systematisch gesammelt wurde und deshalb nicht zur Verfügung steht. Im Gegensatz zu früher sind heute ganz neue Bauherren (z.B. Contractoren) am Markt tätig, welche über keinen «hölzigen Background» verfügen und deshalb umso mehr darauf angewiesen sind, von den früher gemachten Erfahrungen zu profitieren. Andererseits treten auch auf der Brennstoffseite ständig neue Schnitzelproduzenten auf den Markt, welchen der Zugang zu den bisherigen Erfahrungen und zum Know-how ermöglicht werden sollte.

Mit den überarbeiteten und an die neuen europäischen Normen EN ISO 17225-1:2014 und EN ISO 17225-4:2013 angepassten Brennstoffklassifizierungen von QM Holzheizwerke (FAQ 36 [7]) stehen in Zukunft ausgezeichnete Grundlagen für ein differenziertes Abstimmen zwischen Feuerungssystem und Brennstoffsortiment zur Verfügung. Nun gilt es, auch den Schnitzelproduzenten Instrumente zur Verfügung zu stellen, die es ihnen ermöglichen, die erforderlichen Brennstoffqualitäten zu erreichen.

Die Brennstoffqualität ist also ein Schlüsselfaktor. Dementsprechend liegt die übergeordnete Zielsetzung des vorliegenden Projektes darin, dass sich die Anlagen und Geräte mit der ihnen zugeordneten Brennstoffqualität emissions- und wartungsarm betreiben lassen.

Bei grösseren Anlagen erfolgt die Zuordnung des richtigen Brennstoffs zum entsprechenden Feuerungssystem in der Regel individuell und gemäss den Vorgaben von QM Holzheizwerke [6, 7]. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt deshalb bei kleinen Unterschub- und Rostfeuerungen von weniger als 200 kW Leistung (Seriengeräte).

Das Ziel sowohl dieses Vorprojektes als auch des folgenden Projektes besteht darin, bei den Produzenten von Holzschnitzeln das Qualitätsbewusstsein zu steigern und ihnen einfache Möglichkeiten aufzuzeigen, wie sich die Brennstoffqualität verbessern und damit ein wartungs- und emissionsarmer Betrieb der Anlagen und Geräte erreichen lässt.

2 Methodische Bemerkungen

Die Zielsetzung, die Qualität der Holzschnitzel so zu verbessern, dass ein emissions- und wartungsarmer Betrieb der Anlagen und Geräte möglich ist, soll im Rahmen dieses Vorprojektes wie folgt erreicht werden:

1. Beschaffung Grundlagen

Es erfolgt eine breite Beschaffung aller verfügbarer Unterlagen, Berichte und Studien zum Thema.

2. Auswertung der Grundlagen

Es erfolgt eine Auswertung der vorhandenen Unterlagen bezüglich ihrer Aktualität und ihrer spezifischen Themenrelevanz. Im Rahmen dieser Auswertung wird auch definiert, welche Informationen zusätzlich zu beschaffen sind.

3. Zusammentragen von Praxiserfahrungen

Mittels Besuchen und Befragungen vor Ort soll zusätzliches Know-how bei erfahrenen Akteuren der Branche (Schnitzelproduzenten, Produzenten von Geräten zur Schnitzelherstellung, Anlagenbetreiber, Feuerungshersteller etc.) zusammengetragen werden.

4. Formulierung Projekt

Es wird ein Projekt für die Erarbeitung von Grundlagen und Instrumenten formuliert mit Massnahmen, Kosten, Zeitplan und Umsetzungsvorschlägen.

Fachlich unterstützt wurde die Arbeit durch eine Begleitgruppe, welcher folgende Fachleute angehörten:

Daniel Binggeli, BFE

Claudio Caccia, AELSI

Richard Golay, Energie-bois Suisse

Andres Jenni, ardens GmbH

Lea Jost, Holzenergie Schweiz

Adrian Lauber, Verenum

Philippe Raetz, BV Ressources

Werner Riegger, BAFU

Claire-Lise Suter, BAFU

3 Allgemeine Hinweise zur Schnitzelqualität

Gemäss [7, ergänzt] sind folgende 7 Parameter für die Qualität von Holzschnitzeln entscheidend:

1. F: Feingutanteil < 3,15 mm in Massenprozent (m-%) im Anlieferungszustand
2. M: Wassergehalt in Massenprozenten (m-%) im Anlieferungszustand
3. P: Partikelgrösse [mm] mit Hauptanteil in Massenprozent (m-%) im Anlieferungszustand
4. A: Aschegehalt mit Fremdanteil in Massenprozent (m-%) auf wasserfreier Bezugsbasis
5. N: Stickstoffgehalt in Massenprozent (m-%) auf wasserfreier Bezugsbasis
6. Fremdstoffanteil (Sand, Erde, Steine, Metalle, Plastik etc.) in Massenprozent (m-%) auf wasserfreier Bezugsbasis
7. Energieinhalt bezüglich $H_{u\text{ feucht}}$ (kWh/Srm), Schwankungsbereich

Praxiserfahrungen [26, 45, 68, 74,] zeigen, dass die beiden Parameter «Feingutanteil» und «Wassergehalt» am bedeutendsten für die Qualität der Holzschnitzel und damit für einen emissions- und wartungsarmen Betrieb der Anlagen und Geräte sind. Ein erhöhter Feingutanteil führt dabei besonders bei Kleinf Feuerungen (Unterschub-, Festrostfeuerungen mit kleiner Ausbrandzone) unweigerlich zu schlechterer Verbrennungsqualität und dürfte insgesamt der wichtigste qualitätsbildende Faktor sein. Am grössten ist der Einfluss dann, wenn die beiden Parameter «Feingutanteil» und «Wassergehalt» gleichzeitig erhöht anzutreffen sind. Dieser Umstand führte zur Entwicklung von Qualitätsholzschnitzeln bzw. Qualischnitzeln® [51], welche in Deutschland auch als «sitro-Schnitzel» (ausgesiebt und getrocknet) bezeichnet werden [57]. Dieser Brennstoff zeichnet sich aus durch:

- Wenig bzw. kein Feingutanteil F ($F < 5\%$)
- Wenige bzw. keine Überlängen gemäss Partikelgrösse P
- Hoher Hauptanteil gemäss Partikelgrösse P (Hauptanteil > 95%)
- Kein Nadel- und Blattanteil
- Geringer Rindenanteil
- Keine Fremdanteile und Störstoffe
- Herstellung aus entrindetem Stammholz (Industrieholz-Qualitäten, hochwertiges Energierundholz)
- Tiefer Wassergehalt $M < 20\%$
- Scharfe, saubere Kanten der Holzschnitzel weisen auf guten Hackprozess hin
- Geringer Aschegehalt $A < 1\%$
- Geringer Stickstoffgehalt $N < 0,5\%$

- Bei Einsatz von Hartholzschnitzeln aus den Baumarten Buche, Eiche, Ahorn, Esche usw. resultiert ein hoher Energieinhalt von 950 – 1'000 kWh/Srm



Abbildung 1: Qualischnitzel[®].



Für die Produktion solcher Holzschnitzel nach EN ISO 17225-4 gelten folgende Empfehlungen [79]:

Parameter	Empfehlung
Rohmaterial	Energierundholz
Trocknung	vorgetrocknet im Polter oder technische Trocknung
Mineralboden	Eintrag vermeiden
Schneideaggregat	kein unmittelbarer Einfluss
Messerschärfe	scharfe Messer
Auswurfssystem	evtl. Vorteile bei Förderbändereinsatz
Siebkorb	grobe Siebkörbe (> 80 x 80 mm) vermeiden
Hackerschnecke	geringe Schnittweite: 20 – 30 mm
Einzug	abzustimmen auf Drehzahl des Schneideaggregats
Maschinenführer	Hoher Erfahrungsgrad, regelmässige Schulung

Tabelle 1: Empfehlungen für die Produktion qualitativ hochwertiger Holzschnitzel nach EN ISO 17225-4.

Die wichtigsten Vorteile der Nutzung von qualitativ hochwertigen Holzschnitzeln werden wie folgt beschrieben [31, 51, 57, 68, 79]:

- Höhere Energiedichte und somit geringeres Lager- und Silovolumen nötig
- Staubfreie Lieferung, Umschlag und Logistik der Holzschnitzeln
- Lassen sich wie Pellets ins Schnitzzellager einpumpen
- Geeignet für Trockenschnitzelfeuerungen, kleine Schnitzelfeuerungen mit Unterschubfeuerung
- Effiziente Verbrennung mit hoher Verbrennungsqualität wie mit Pellets,
- Ermöglichen einen weitgehend störungsfreien und emissionsarmen Betrieb der Schnitzelfeuerung (bei korrekter Einstellung der Feuerung)
- Dadurch Längere Nutzungsdauer der Feuerungs- und Fördertechnik
- Deutlich weniger Wartungs- und Reinigungsaufwand und höhere Betriebssicherheit
- Geringe Aschemenge und somit geringe Entsorgungskosten für die Holzasche
- Bessere Lagerfähigkeit der Qualitätsholzschnitzeln, da kein biologischer Abbauprozess des Holzes
- Keine Schimmelpilz- und Geruchbildung bei der Schnitzzellagerung und somit keine Gesundheitsgefährdung
- Kein Substanz- und Energieverlust der Holzschnitzeln bei der Lagerung
- Besserer Teillastbetrieb der Feuerung möglich, z.B. für Sommerbetrieb
- Geeignet für störungsarmen Betrieb bei Holzgas-BHKWs mit hohen Anforderungen an den Brennstoff (Trockenschnitzeln $M < 20\%$) und bei Mehrkesselanlagen (mehrere kleine Schnitzelfeuerungen mit hohen Brennstoffanforderungen)

4 Anforderungen der Feuerungssysteme

4.1 Feingutanteil

4.1.1 Schnitzelsilo und Schnitzellagerhalle

Ein hoher Feingutanteil führt zu schlechter Flieseigenschaft der Holzschnitzel und zu vermehrter Brückenbildung im Silo bzw. in der Lagerhalle. Die Holzschnitzelmischung wird zähflüssiger und verdichtet sich wesentlich schneller. Es entstehen Zonen von höherer Dichte und stärkerem Widerstand gegenüber Lufteintritt, bis kaum mehr Luft durch die Schnitzel strömen kann. Wasser bleibt länger in der Mischung enthalten und kann kaum ausdampfen. Fremdwasser wird schneller aufgesaugt («Schwammwirkung») und verbleibt in den Schnitzeln. Kondenswasser, welches aus anderen, lockereren Zonen im Schnitzellager ausdampft, kondensiert an der Stelle mit hohem Feingutanteil aus und wird aufgesogen. Dadurch wird die Trocknung der Holzschnitzel verunmöglicht. Fäulnis und Schimmelpilzbildung setzen ein und breiten sich aus. Die Folgen sind verstärkte Geruchsbildung und eine höhere Gesundheitsbelastung. Das Befahren der Holzschnitzel oder hohe Füllstände des Schnitzelsilos führen zu einer zusätzlichen Verdichtung und sogar Verhärtung der Schnitzel. Durch besonders starke biologische Aktivität im Schnitzelhaufen kann es zu einer starken Selbsterwärmung bis hin zur Selbstentzündung mit entsprechendem Brandrisiko kommen [22]. Durch Verdichtung kommt es zur Brücken- und Wandbildungen, so dass die Holzschnitzel im Silo nicht mehr nachrutschen können und die Fördersysteme leer laufen. Im Winter gefrieren die Schnitzel schneller und bilden Blöcke, was einerseits die Bildung von Brücken beschleunigt, andererseits zu Rückstau auf den Fallschutzgittern führt [26, 45, 51, 68, 79].

4.1.2 Austragungs- und Transportanlagen

Ein erhöhter Feingutanteil erhöht den Reibungswiderstand zwischen dem eingelagerten Brennstoff und dem Siloboden, was die Belastung der **Schubböden-Mitnehmer** erhöht. Dadurch nimmt deren Förderleistung allmählich ab bzw. der Arbeitsdruck am Hydraulikaggregat steigt an, bis die Reibungskraft zu gross wird, was zur Überlastung und zum Bruch von Schubboden-Elementen oder dem Schubboden-Längsprofil führen kann. Die Überlastung wird begünstigt durch das Überfahren der Schubböden mit Radlader (zusätzliche Verdichtung des Brennstoffes) und zu hohem Brennstoffgewicht auf dem Schubboden [45].

Bei **Knickarm- oder Federkernaustragungen** bleibt der kompakte, nicht fließfähig eingelagerte Brennstoff als senkrechte Wand stehen und kann vom Knickarmende oder vom Federkern nicht abgetragen werden. Die Problematik, verursacht durch zu hohem Feingutanteil, wird verstärkt, wenn der Brennstoff zusätzlich noch feucht ist oder sich erst im Silo abgetrocknet hat. Die Austragung kann nicht mehr den maximalen Austragungsradius erfassen, da die Knickarme sich nicht Ausfahren können. Nur noch der Brennstoff einer stark reduzierten Kreisfläche in der Mitte wird ausgetragen. Durch den hohen Feingutanteil bildet sich in der Mitte ein Hohlzylinder mit beinahe senkrechten Seitenwänden. Die Holzschnitzel rieseln nicht mehr von der Aussenwand zur Mitte

hinein. Bei Federkernaustragungen kann es aufgrund der Überlastung bis zum vollständigen Stillstand des Austragungssystems kommen.

Ein hoher Feingutanteil, verbunden mit einem hohen Wassergehalt, verhindert das Nachrutschen der Holzschnitzel und kann in **Fallschächten und Übergangszonen** zu Brückenbildungen und im Winter zum Gefrieren führen. Daraus resultiert Leerlauf oder eine ungleichmässige Belegung der Transportsysteme mit den entsprechenden Betriebsstörungen. Brückenbildungen können ebenfalls durch zu viele Grobanteile (Überlängen) in der Holzschnitzelmischung entstehen. Die Überlängen verkeilen sich, führen zu einer schlechten Fließfähigkeit und verhindern das Nachfliessen von Schnitzelmaterial.

In den **Querförderschnecken** kann ein hoher Feingutanteil – in Kombination mit einer ungünstigen Geometrie der Förderschnecke – zur Verdichtung und zum Zusammenpressen von feinem Schnitzel-Material führen (z.B. vor dem Durchgang durch die Silowand oder bei der Übergangsstelle zwischen Querförder- und Steilförderschnecke), bis es zu Störungen durch Überlastung kommt [26, 45, 51, 68, 79].

4.1.3 Feuerung

Holzfeuerungsssysteme benötigen für eine gute Ausbrandqualität, das heisst für einen Abbrand ohne Lochbrand im Brennstoffbett, ein gleichmässiges Eindringen der Primär-Verbrennungsluft in das stabile Brennstoffbett mit gleichmässiger Brennstoffbetthöhe so dass eine konstante, regelmässige Luftverteilung im Brennstoff gewährleistet ist. Eine ungleichmässige Korngrößenverteilung durch hohen Feingutanteil (Hauptursache) und Überlängen (Nebenursache) führen zu einem unregelmässigen Widerstand für die Primärluft im Brennstoffbett. Der Verbrennungsluft verteilt sich unregelmässig, so dass Zonen mit Luftüberschuss und Zonen mit Luftmangel entstehen.

Luftüberschuss im Brennstoffbett entsteht dort, wo örtlich erhöhte Geschwindigkeiten der Verbrennungsluft vorhanden sind. Wenn lokal Zonen mit hohem Luftüberschuss ($\lambda > 1$) entstehen, führen zu hohe Temperaturen zu „hotspots“, welche zu Lochbrand mit Aufwirbelung von Glutpartikeln und damit einhergehend einer grösseren Verschmutzung in der Brennkammer führen. Erhöhter Luftüberschuss führt zu erhöhten Staubpartikel-Emissionen durch die höheren Luftgeschwindigkeiten im Brennstoffbett. Die hohen örtlichen Temperaturen können zum schnelleren Abtragen der Ausmauerung der Feuerung und zum Abbrennen der Roststäbe führen. Die hohen Temperaturen im Rostbereich führen zum Schmelzen der Asche und somit zur vermehrten Schlackenbildung.

Luftmangel entsteht in Bereichen mit hohem Feingutanteil, der zu erhöhtem Luftwiderstand führt. In diesen Bereichen fehlen Zwischenräume, in welche die Primärluft eindringen kann. Es kommt zu einem Verbrennungsluftmangel, so dass die Schnitzel nicht mehr vollständig ausbrennen können. Als Folge dieses unvollständigen Abbrands bleiben unverbrannte Teile zurück. Die inhomogene Gasmischung über dem Brennstoffbett führt zu schlechter Verbrennungsqualität wie hohe CO-Emissionen. Es kann zu unerwünschter Rauchentwicklung mit Geruchsbelästigung in der

Nachbarschaft kommen. Zusätzlich können sich eventuell der Wirkungsgrad der Feuerung und die Verbrennungsleistung reduzieren.

Ein hoher Feingutanteil kann zu Verstopfungen der Primärlufteinblasquerschnitte führen, was die Luftverteilung in das Brennstoffbett zusätzlich verschlechtert.

Ein hoher Feingutanteil kann zu deutlich **höheren Unterhaltskosten** wegen des häufigeren Ersatzes von Rostelementen und Feuerraumausmauerungen durch die örtlich hohen Temperaturen im Bereich des Lochbrandes führen. Zudem kann sich der Reinigungsaufwand durch vermehrte Reinigung der Kesselzüge und durch Ablagerung von Glutpartikeln erhöhen. Erhöhte Kosten für die Behebung von Störungen bei den Fördersystemen sind eine weitere mögliche Folge von zu hohem Feingutanteil.

Kleine Unterschub- und Rostfeuerungen (Seriengeräte) bis 200 kW Leistung mit vergleichsweise wenigen kleinen Primärlufteinblasquerschnitten auf dem Rost und in der kleinen Retorte ertragen Feingut besonders schlecht, da sie schneller verstopfen und dadurch keine regelmässige Durchströmung mit Primärluft mehr möglich ist. Deshalb ist für diese Feuerungstypen ein sehr tiefer Feingutanteil von F05, d.h. Feingutanteil $F < 5\%$ festzulegen [26, 45, 51, 68, 79, 88].

4.2 Wassergehalt

4.2.1 Schnitzelsilo und Schnitzellagerhalle

Ein hoher Wassergehalt im Schnitzelsilo oder in der Lagerhalle führt, vor allem in Kombination mit einem hohen Feingutanteil, zu verstärktem Substanzverlust, Schimmelpilzbildung und Fäulnis (vgl. Kapitel 4.1.1 und 5.1) [26, 45, 51, 68, 79].

4.2.2 Austragungs- und Transportanlagen

Ein hoher Wassergehalt, verbunden mit einem hohen Feingutanteil, verstärkt die Probleme der Brückenbildung und führt zu Verstopfungen und Überlastung der Austragungs- und Transportanlagen (vgl. Kapitel 4.2.2) [26, 45, 51, 68, 79].

4.2.3 Feuerung

Kleine Unterschub- und Rostfeuerungen (Seriengeräte) bis 200 kW sind nicht geeignet für höhere Wassergehalte. Sie benötigen trockenen Brennstoff. Üblicherweise wird M35 vorgegeben, das heisst der maximale Wassergehalt beträgt 35%. Empfehlenswert ist aber ein Wassergehalt von $M < 30\%$!

Diese Feuerungstypen weisen eine zu kurze Verweilzeit für feuchten Brennstoff in der ungekühlten Nachbrennkammer auf. Für feuchte, nasse Holzschnitzel sind längere Verweilzeiten des Brenn-

stoffes auf dem Rost nötig, bis der Wasserdampf aus dem Brennstoff ausgedampft ist. Im Weiteren ist für eine hohe Verbrennungsqualität eine lange ungekühlte Nachbrennkammer notwendig. Diese Forderungen erfüllen Unterschubfeuerungen ab 200 kW mit zusätzlicher ungekühlter Nachbrennkammer oder Rostfeuerungen (Gegenstromfeuerungen) mit langer nachgeschalteter ungekühlter Nachbrennkammer.

Im Teillastbetrieb (Sommer und Übergangszeit) und bei längeren instationären Phasen mit geringerer Auslastung der Feuerung ist die Verwendung von Trockenschnitzeln mit Wassergehalt $M < 35\%$ («Sommerschnitzel») auch bei grösseren Feuerungen zu empfehlen, da bei Verwendung von feuchtem oder nassem Brennstoff die erforderlichen hohen Verbrennungstemperaturen für eine hohe Ausbrandqualität durch den zu stark auskühlten Brennraum nicht mehr erreicht werden können. Dies führt zu einer schlechten Verbrennungsqualität.

Probleme beim Anzünden des Brennmaterials können auch durch wiederbefeuchtete Holzschnitzel auftreten. Durch die Feuchtigkeitsaufnahme im Aussenbereich der Holzschnitzel bildet sich eine Wasserschicht, welche die Zündung verhindert, bis der Wasserdampf an der Aussenschicht auskondensiert ist. Das führt zu einer starken Verzögerung des Anzündvorgangs bzw. des Abbrandverhaltens.

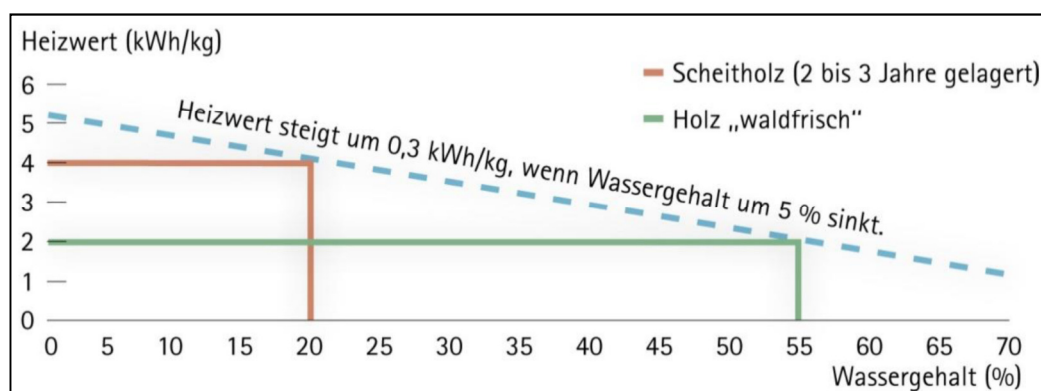


Abbildung 2: Heizwert (kWh/kg) in Funktion des Wassergehalts [12].

Der Energieinhalt («Heizwert») der Schnitzel sinkt um rund 0,3 kWh/kg pro 5% Wassergehaltszunahme. Bei einem Wassergehalt von $M > 60\%$ ist der Energieinhalt so tief, dass die Schnitzel kaum noch brennen. Frische Pappel- und Weidenschnitzel sowie Holz aus Kurzumtriebsplantagen weisen derart viel Interzellulärwasser in den Vakuolen auf, so dass sie nicht mehr brennen. Es wird deshalb empfohlen, solche Brennstoffsortimente mit Holzschnitzeln anderen Baumarten (Fichte, Tanne, Buche) und mit einem Anteil von höchstens 25% zu durchmischen [26, 45, 51, 68, 79].

Je höher der Wassergehalt umso höher wird die Minimalleistung, auf welche sich der Holzkessel ohne Probleme heruntermodulieren lässt.

4.3 Grobanteil

Ein zu hoher Grobanteil («Überlängen») wirkt sich hauptsächlich bei den Austragungs- und Transportanlagen aus. Er bewirkt eine verminderte Fliessfähigkeit der Schnitzel und leistet damit in den Lagerräumen der Brückenbildung Vorschub. Grobanteile können beim Schubboden sowie in Fallschächten, Übergabestellen und Transportschnecken zu Verklemmungen und damit zu Störungen führen. Zudem können sie Störungen durch Betätigung von Lichtschranken auslösen [45, 51, 68].

4.4 Aschegehalt

Ein hoher Aschegehalt im Brennstoff kann zu einem grösseren Ascheanfall und Schlackenbildung im Feuerraum und damit zu höheren Reinigungs- und Entsorgungskosten führen (Kosten für Absaugung und Deponierung). Ein hoher Aschegehalt kann zudem vor allem bei Seriengeräten zu vermehrter Ablagerung in den Rauchgaszügen der Kessel und damit ebenfalls zu höheren Reinigungskosten bzw. zu Wirkungsgradverlusten führen [45].

4.5 Stickstoffgehalt

Ein zu hoher Stickstoffgehalt im Brennstoff führt direkt zu höheren Stickoxidemissionen im Betrieb der Anlage. Möglicherweise lassen sich die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung LRV nicht bzw. nur mittels Primärmassnahmen (Luftstufung, Brennstoffstufung und Abgasrezirkulation) oder Sekundärmassnahmen (katalytische oder nicht-katalytische Entstickung) einhalten [32, 41, 47].

4.6 Fremdstoffanteil

Fremdstoffe wie Steine, Erde, Sand, Plastik, Metallteile in den Schnitzeln sind zunächst einmal für den Hacker ein Problem, da sie die Messer beschädigen. Sie können aber auch zu grösseren Störungen und Beschädigungen an den Transport- und Austragungsanlagen und vor allem auch an den Entaschungseinrichtungen führen. In der Feuerung selber bewirkt ein erhöhter Fremdstoffanteil grosse Verschlackungsprobleme mit sich. Zudem kann sich die Lebensdauer der Ausmauerung, der Gewölbe und der Roststäbe in der Brennkammer verkürzen [45, 68].



Abbildung 3: Sehr schlechte Schnitzelqualität mit hohem Feingutanteil, hohem Wassergehalt, hohem Nadel- und Rindenanteil und zerfransten Holzschnitzeln. Der Zersetzungsprozess hat bereits eingesetzt, und Fäulnis tritt auf.

5 Einflussfaktoren

5.1 Feingutanteil

Ein zu hoher Feingutanteil kann aus folgenden Gründen entstehen:

- Hoher Anteil Schlagabraum [28] mit hohem Rinden-, Laub- und Nadelanteil [31, 68].
- Tiefer Wassergehalt und langer Abbauprozesse des vorgetrockneten Energieholzes durch zu lange Lagerdauer des Energieholzpolters oder ungeeigneter Lagerplatz.
- Ungeeigneter Hackertyp [79]: Grössere Trommelhacker mit Siebeinsätzen erreichen bei gleicher Messerschärfe üblicherweise bessere Schnitzelqualitäten als kleinere Scheibenhacker. Es bestehen aber Hackertyp spezifische Unterschiede (siehe oben) [31, 79].
- Messer des Hackers sind unscharf oder werden zu wenig nachgeschärft [31, 35, 79].
- Zu lange Lagerdauer der feuchten Holzschnitzel in der Lagerhalle/auf dem Lagerplatz kann zu Zersetzungsprozessen der Holzstruktur mit Einsetzen von Kompostierung und Humusbildung führen [15, 22].
- Zu lange Lagerdauer von Laubholz – insbesondere Buchenholz, aber auch Hainbuche, Ahorn und Birke – kann zum Ersticken des Holzes führen. Dabei bilden noch lebende Holzzellen sogenannte Thyllen (Ausstülpungen von Parenchymzellen) und Kernstoffe zur Abdichtung von Gefässen und somit zum Schutz vor Pilzinfektionen. Durch den Luftabschluss zersetzt sich das Holz schneller und wird brüchig.
- Grösse des Siebeinsatzes beim Hacken [79] oder Art und Weise der Siebung bei der Qualitätsschnitzelproduktion [31, 79]. Siehe auch unter Sieben vor oder nach dem Hacken.

5.2 Wassergehalt

Ein zu hoher Wassergehalt kann folgende Ursachen haben:

- Hoher Anteil Schlagabraum mit viel Nadel-, Blatt- und Rindenbiomasse, die bei Regen und Schneefall vermehrt Wasser aufsaugt [68]
- Hoher Feingutanteil F, dadurch vermehrtes Aufsaugen von Wasser
- zu kurze oder zu lange Lagerdauer des Energieholzes im Wald
- Hacken während Schlechtwetterperioden (Wiederbefeuchtung)
- Hacken von schneebedeckten Poltern, vor allem bei Nassschnee
- Wiederbefeuchtung der Holzschnitzel durch Regen im Freien / unter dem Vlies, durch Sickerwasser-Eindringung in die Lagerhalle oder Kondensatbildung im Schnitzelsilo / unter dem Vlies [45]

- Wiederbefeuchtung von ungedeckten Energieholz-Poltern nach Schlechtwetterperioden und Schneebedeckung

5.3 Grobanteil

Ein zu hoher Grobanteil kann folgende Ursachen haben:

- Schlechter Hackprozess mit unscharfen Messern
- Verwendung von Schreddern anstatt von Hackern

5.4 Aschegehalt

Hauptursache für einen hohen Aschegehalt ist ein hoher Anteil Blatt-, Nadel-, Rinden- und Grünanteil in den Holzschnitzeln. Solche Brennstoffe fallen insbesondere bei der Nutzung von Holz aus Schlagabräumen und Landschaftspflege an [68].

5.5 Stickstoffgehalt

Hauptursache für einen hohen Stickstoffgehalt in den Schnitzeln ist ein hoher Anteil an Blättern, Nadeln, Rinde und unverholztem Grünmaterial, wie er bei den Holzsortimenten Schlagabraum und Landschaftsholz anzutreffen ist [47]. Laubholz weist – aufgrund der chemischen Zusammensetzung der etwas komplexeren Holzstruktur als bei Nadelholz – bei ähnlichen Holzschnitzelqualitäten tendenziell deutlich höhere Stickstoffgehalte auf als Nadelholz.

5.6 Fremdstoffanteil

Ein zu hoher Fremdstoffanteil kann folgende Ursachen haben:

- Verunreinigung des Hackholzes durch Mineralboden (Erde, Humus, Steine)
- Verunreinigungen des Hackholzes durch Sand und Steine (Schwemmholz)
- Abfallablagerungen und vergessene Metallteile im Energieholzpolter

5.7 Maschinenbedingte Einflussfaktoren

Der Einfluss der für die Schnitzelproduktion eingesetzten Maschinen auf die Qualität der Holzschnitzel lässt sich folgendermassen zusammenfassen [79]:

Parameter	Einfluss auf die Qualität der Holzschnitzel
Maschinentyp	Hacker erzeugen scharfkantige Schnitzel, Schredder erzeugen faseriges, gebrochenes Schredderholz.
Schneidaggregat	Trommel-, Scheiben- und Schneckenhacker nutzen unterschiedliche Schneidetechniken.
Messerschärfe	Scharfe Messer erzeugen scharfkantige Schnitzel, stumpfe Messer erzeugen Schnitzel mit hohem Feinanteil und unscharfen Kanten.
Drehzahl	Erhöhung der Drehzahl des Schneideaggregats erhöht die Anzahl Schnitte je Meter eingezogenes Holz.
Einzugsgeschwindigkeit	Erhöhung der Einzugsgeschwindigkeit verringert die Anzahl Schnitte je Meter eingezogenes Holz.
Siebkorböffnung	Prallsiebe dienen zur Nachzerkleinerung der Schnitzel und beeinflussen die durchschnittliche Grösse der Schnitzel sowie den Feingutanteil und den Grobanteil.
Trommelbauweise	Schneideaggregate (Trommelkörper) kann durchlässig für Holzschnitzel sein. In offenen Trommeln kommt es mitunter zu einer weiteren Zerkleinerung des Brennstoffs durch Prallzerkleinerung im Innenraum der Trommel.
Messeranordnung	Durchgehende Messer sorgen für gleichmässige Holzschnitzel mit weniger Ausbrüchen als versetzt angeordnete Messer.
Schnittlänge	Vergrösserung der Öffnungsweite zwischen Messer und Gegen-schneide erhöht die Partikelgrösse.
Auswurfsystem	Auswurfssysteme mit hoher Fördergeschwindigkeit (z.B. Fördergebläse mit Wurf-schaufeln) erhöhen den Feingutanteil durch zusätzliche Prallzerkleinerung der Holzschnitzel.

Tabelle 2: Maschinenbedingte Einflussfaktoren auf die Qualität der Holzschnitzel.

6 Substanzverlust bei natürlicher Trocknung

Dass bei der natürlichen Schnitzeltrocknung nicht nur – wie gewünscht – der Wassergehalt des Holzes sinkt, sondern auch – wie nicht gewünscht – Holzsubstanz verloren geht, ist hinlänglich bekannt. Ursache für diesen Substanz- und damit auch Energieverlust sind physikalische, chemische und vor allem (mikro)biologische Abbauprozesse, welche innerhalb eines bestimmten Wassergehaltsfensters stattfinden. Feuchte Holzschnitzel werden von holzerzetzenden Pilzen und Bakterien besiedelt. Hohe Fein-, Rinden- und Grünanteile begünstigen zusätzlich deren Aktivität [15, 17]. Kreimes beziffert den Substanzverlust oberhalb eines Wassergehalts von 30% auf 2 bis 6% pro Monat [59, 61]. [17] erwähnt einen Substanzverlust von 30% pro Jahr. [15] beziffert den Substanzverlust für waldfrisch eingelagerte Holzschnitzel mit 2 bis 4% etwas niedriger und schlägt als Gegenmassnahme eine möglichst schnelle Trocknung auf einen Wassergehalt von weniger als 30% sowie eine Verminderung des den Substanzabbau fördernden Fein- und Grünanteils vor. Gemäss [22] soll aus wirtschaftlichen Gründen von einer Langzeitlagerung (mehr als 3 Monate) problematischer Holzschnitzelqualitäten abgesehen werden. Gemäss Ahrens [2] sind die holzabbauenden Aktivitäten der Pilz bei einem Wassergehalt von 30 und 50% und einer Temperatur von 0 bis 20°C am stärksten. Moser [70] erwähnt einen Wassergehalt von 20 bis 25% als geeignet für die Lagerung. Die Lagerung von gehacktem Holz ist mit einem grösseren Substanzabbau verbunden als die Lagerung von Holz in ungehacktem Zustand. Bei feinen, frischen Holzschnitzeln mit hoher Dichte und wenig Zwischenräumen ist der Substanzabbau beträchtlich höher als bei vorge-trockneten Schnitzeln. Eine Abdeckung der Holzschnitzel trägt zu einer deutlichen Reduktion des Substanzabbaus bei. Anstatt 20 bis 30% pro Jahr (ungeddeckte Holzschnitzel) verlieren abgedeckte Holzschnitzel nur noch 3 bis 5% an Substanz (vgl. Tabelle 3). Aus diesen Zahlen lässt sich leicht die Empfehlung ableiten, Holzschnitzel vor dem Einlagern vorzutrocknen und vom Feinanteil

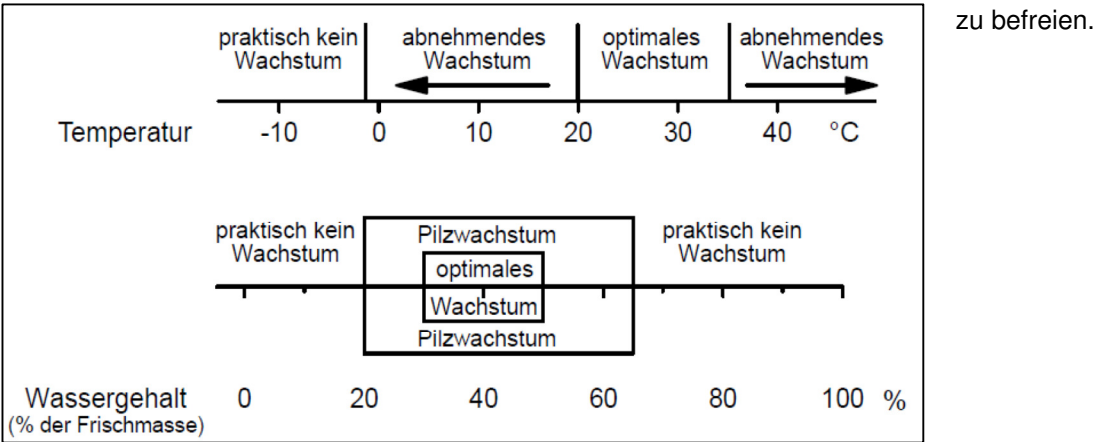


Abbildung 4: Optimale Temperatur- und Wassergehaltsfenster für Holz abbauende Pilzaktivitäten [2].

O

b Unterschiede beim Substanzverlust von Hart- und Weichholz vorhanden sind und wie gross der Einfluss des Feingutanteils auf den Substanzverlust ist, ist zurzeit noch nicht bekannt. Die bisherigen Untersuchungen haben sich auf den Substanzverlust beim Weichholz spezialisiert [8, 15, 17].

[37] untersuchen zurzeit den Substanzverlust mit dem Einfluss der Holzschnitzelqualität beim Weichholz (vorwiegend Fichtenholz).

Zusammenfassend präsentieren sich die Angaben aus der Literatur zum Substanzverlust bei verschiedenen Lagerungsarten und Sortimenten von Holzschnitzeln wie folgt [2, ergänzt]:

Material, Lagerart	Verlust [% Trockenmasse pro Jahr]
Feine Waldholzschnitzel, frisch, offenes Lager im Freien	20
Feine Waldholzschnitzel, getrocknet, abgedeckt	2
Grobe Waldholzschnitzel, frisch, abgedeckt	3
Ganzbäume, frisch, offenes Lager im Freien	6
Holzschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen, unter Dach	
Holzschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen, unter Vlies	
Holzschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen, im Dom-Verfahren	

Tabelle 3: Substanzverluste bei verschiedenen Lagerarten für Weichholz-Holzschnitzel und Ganzbäume [2].

Ganzbäume aus Kurzumtriebsplantagen, im Freien	
--	--

Bärwolff und Hering [8] haben verschiedene Varianten für die Trocknung von Holzschnitzeln untersucht und gelangten zu interessanten Ergebnissen. Untersucht wurden:

- a) «Vlies»: Haufwerk von Holzschnitzeln unter einem luftdurchlässigen Vlies.
- b) «Dom»: Haufwerk von Holzschnitzeln unter undurchlässiger Folie mit Lüftungsschächten und Abluftdomen.
- c) «Dach»: Haufwerk von Holzschnitzeln unter Dach (nach drei Seiten offen)
- d) «Ganzbaum»: ungedeckte Ganzbäume im Polter

Die wichtigsten Ergebnisse bezüglich der Entwicklung des Wassergehalts und der Masse lassen

s
i
Abbildung 5: Von Bärwolff und Hering auf Substanzverlust untersuchte Holzsortimente und Lagerarten [8].

ch wie folgt zusammenfassen:

Variante	Masse Versuchsbeginn [t]	Wassergehalt Versuchsbeginn [%]	Masse Versuchsende [t]	Wassergehalt Versuchsende [%]
a)	b)			

Abbildung 4: Entwicklung von Wassergehalt und Masse [8].



Vlies	68.12	55.6	52.94	46.5
Dom	77.64	55.3	46.48	36.8
Dach	14.40	55.3	7.78	28.3
Ganzbaum	18.76	55.6	11.84	33.7

Die Eingangsmassen waren unterschiedlich gross, und die Trocknungszeit war auf 6 Monate begrenzt (Februar bis August 2011). Die Trocknung unter dem Vlies führte innerhalb von 6 Monaten nicht zur Erreichung des für die Lagerung erforderlichen Wassergehalts von 30%. Der geringe Substanzabbau liegt am für die Aktivität der holzzersetzenden Pilze sehr hohen Wassergehalt. Deshalb ist bei einer weiteren Trocknung mit höherem Masseverlust zu rechnen.

Bei der Variante „Dom“ war die Trocknung bereits nach 4 Monaten abgeschlossen. Der «Zielwert» von 30% Wassergehalt wurde wegen der Bildung einer markanten Kondensationszone unter der undurchlässigen Folie nicht erreicht. Mit 15.4% war der Masseverlust sehr hoch.

Das Haufwerk der 14 t Holzschnitzel unter Dach erzielte das beste Resultat der Lagerung im gehackten Zustand. Der Wassergehalt erreichte einen Wert von 28.3%, bei einem Substanzverlust von 13.3%. Wie bei den anderen Verfahren, hätte auch hier eine gelegentliche Umsetzung des Schnitzelhaufens den Trocknungsverlauf beschleunigt.

Das beste Resultat erzielte die Lagerung von Ganzbäumen. Der Restwassergehalt betrug noch 33.7%, und es ging lediglich 5.5% an Substanz verloren.

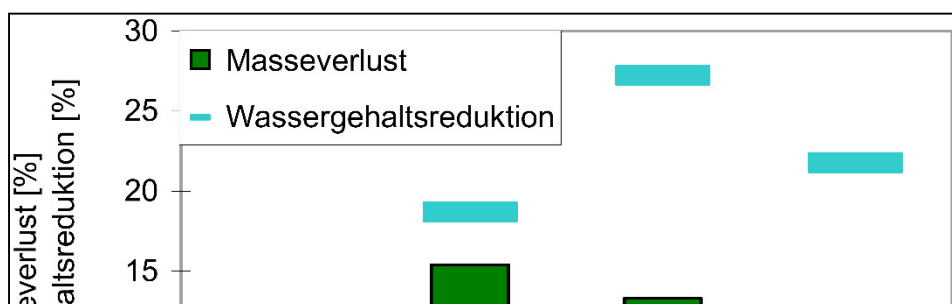


Abbildung 6: Masseverlust und Wassergehaltsreduktion der untersuchten Varianten im Vergleich [8].



Zur Überprüfung der Veränderung des Energieinhalts durch die

Schnitzeltrocknung mit Berücksichtigung des gleichzeitig einsetzenden Substanzverlusts wurde ein einfaches Berechnungstool erstellt. Dieses geht von einem linearen Substanzabbau aus. Die

Eingabe von verschiedenen Schnitzelqualitäten mit unterschiedlich hohen monatlichen Abbauwerten lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Lagerung von Holzschnitzeln und die damit verbundene Trocknung erhöhen in erster Linie die Versorgungssicherheit und die Qualität des Brennstoffs. Wird von einem geringen Substanzverlust von 1.5% pro Monat und einer Lagerdauer von 3 Monaten ausgegangen, resultiert bei der Lagerung von **Holzschnitzeln guter Qualität** und bezogen auf die gesamte Lagermenge praktisch keine Erhöhung des Energieinhalts.
- Bei **Holzschnitzeln schlechter Qualität**, wie sie in der Praxis oft zu finden sind, führt eine Lagerung mit dem einhergehenden Substanzverlust unter dem Strich sogar zu einer deutlichen Abnahme des Energieinhalts.
- Der Energieinhalt pro Gewichtseinheit nimmt durch die Trocknung zwar deutlich zu, gleichzeitig reduziert sich aber aufgrund des Substanzabbaus das Gesamtgewicht der getrockneten Holzschnitzel dermassen, dass der Energieinhalt der gesamten ursprünglichen Menge nach dem Trocknen kaum bis gar nicht höher liegt als vor dem Trocknen.
- Hingegen lohnt es sich deshalb, Holzschnitzel zu trocknen, weil sich dadurch das Transportgewicht deutlich reduzieren lässt.

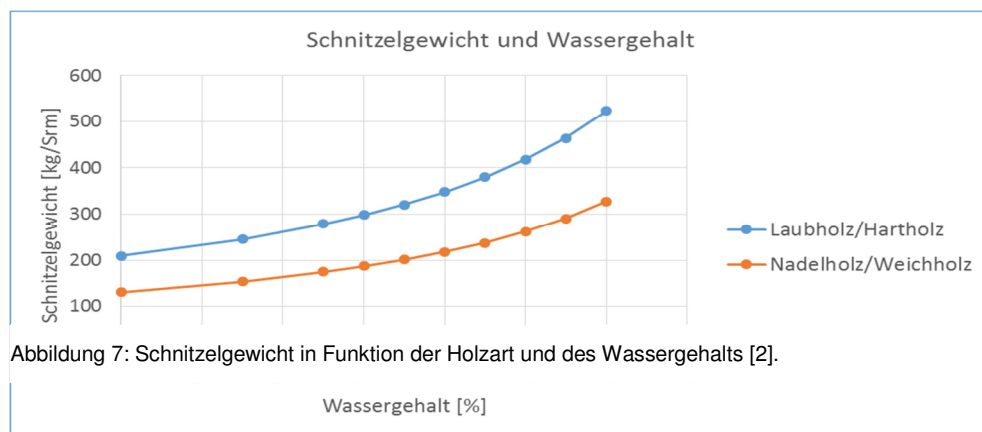


Abbildung 7: Schnitzelgewicht in Funktion der Holzart und des Wassergehalts [2].

Tabelle 5 zeigt die Veränderung des Energieinhalts durch Lagerung und natürliche Trocknung unter Berücksichtigung des Substanzverlustes für drei verschiedene Schnitzelqualitäten:

Beschreibung	Einheit	Gute	Mittlere	Schlechte
--------------	---------	------	----------	-----------

		Schnitzelqualität	Schnitzelqualität	Schnitzelqualität
Frischgewicht	[kg]	10'000	10'000	10'000
Spezifischer Substanzverlust	[% pro Monat]	1.5	3	4
Lagerdauer	[Anzahl Monate]	3	3	5
Substanzverlust total	[%]	4.5	9	20
Anteil Hartholz	[%]	80	70	30
Anteil Weichholz	[%]	20	30	70
Wassergehalt vor Trocknung	[%]	40	45	50
Wassergehalt nach Trocknung	[%]	25	30	30
Energieinhalt vor Trocknung	[kWh]	27'880	25'183	22'975
Energieinhalt nach Trocknung	[kWh]	27'924	24'242	19'934
Veränderung Energieinhalt	[%]	+ 0.16	- 3.74	- 13.24

Tabelle 5: Veränderung des Energieinhalts durch Lagerung und natürliche Trocknung. Berechnungsbeispiele.

7 Lagerung von Holzschnitzeln

7.1 Allgemeine Grundsätze

Die Lagerung von Holzschnitzeln erfolgt im Wesentlichen nicht zur Erhöhung des Energieinhalts, sondern aus folgenden Gründen:

- **Logistische Gründe**

Bei eingeschränkter Winterzugänglichkeit des Waldes bzw. der Rundholz-Lagerplätze müssen die Holzschnitzel früher gehackt werden, als sie in den Heizungen benötigt werden.

- **Phytosanitäre Gründe**

Zur Vermeidung von Kalamitäten und Krankheiten am verbleibenden Bestand (Borkenkäfer, Eschenwelke, Ulmensplintkäfer etc.) muss das Energieholz rasch gehackt werden.

- **Markttechnische Gründe**

Um gewisse Marktvorteile auszunützen, werden die Holzschnitzel vorzeitig aufbereitet.

- **Qualitative Gründe**

Die vorhandenen Holzfeuerungen benötigen Holzschnitzel mit tieferem Wassergehalt.

Die wichtigsten Probleme, Risiken und Massnahmen bezüglich der Lagerung von Holzschnitzeln lassen sich folgendermassen zusammenfassen [15]:

Risiko	Probleme	Massnahmen
Verlustrisiko	Substanzverlust 2 – 4% pro Monat bei waldfrisch eingelagerten Holzschnitzeln	vorgetrocknetes Hackholz verwenden schnelle Trocknung der Holzschnitzel auf < W30 anstreben auf geringen Feingut- und Grünanteil achten
Gesundheitsrisiko	Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilzsporen	
Qualitätsrisiko	Wiederbefeuchtung der Holzschnitzel bzw. Umverteilung des Wassergehalts durch Niederschlag (Regen) und/oder Kondenswasser in der Schüttungskrone	auf geringen Feingutanteil achten Holzschnitzel allgemein luftig und trocken lagern bevorzugt unter Dach lagern bei Lagerung im Freien mit Vlies abdecken
Technisches Risiko	Holzschnitzel gefrieren bei Frost zu Klumpen, Fremdkörper (z.B. Steine) Ursachen: gefrierendes Kondenswasser und verunreinigtes Hackholz	auf möglichst geringe Verunreinigung des Hackholzes achten
Brandrisiko	Selbstentzündung durch Erwärmung der Schüttung durch Aktivität von Mikroorganismen und durch chemisch-physikalische Prozesse	auf geringen Feingut- und Grünanteil achten möglichst trockene Holzschnitzel einlagern Holzschnitzelhaufen nicht befahren (Verdichtung fördert die Erwärmung) maximale Schütthöhe 4 m
Umweltrisiko	Geruchsbelästigung und austretendes Sickerwasser	trockene und luftige Lagerung bei der Wahl des Standortes Hauptwindrichtung beachten Holzschnitzel nicht unmittelbar an Gewässern lagern

Tabelle 6: Probleme, Risiken und Massnahmen bei der Lagerung von Holzschnitzeln.

Mit der Lagerung von Holzschnitzeln werden fast immer auch eine Trocknung und damit eine Qualitätsverbesserung angestrebt. Bei der natürlichen Konvektionstrocknung gelangen ausschliesslich natürliche Energiequellen wie die Sonne, der Wind oder die Energie aus der Selbsterwärmung der Holzschnitzel zum Einsatz. Das Prinzip ist einfach. Die Luft im Holzschnitzelhaufen erwärmt sich, steigt auf und transportiert dabei die enthaltende Feuchtigkeit ab. Durch den entstehenden Unterdruck fliesst von unten frische Aussenluft nach. Dieser natürliche Luftstrom führt innerhalb weniger Monate zur Trocknung der Holzschnitzel. Abluftsysteme können die Trocknung beschleunigen.

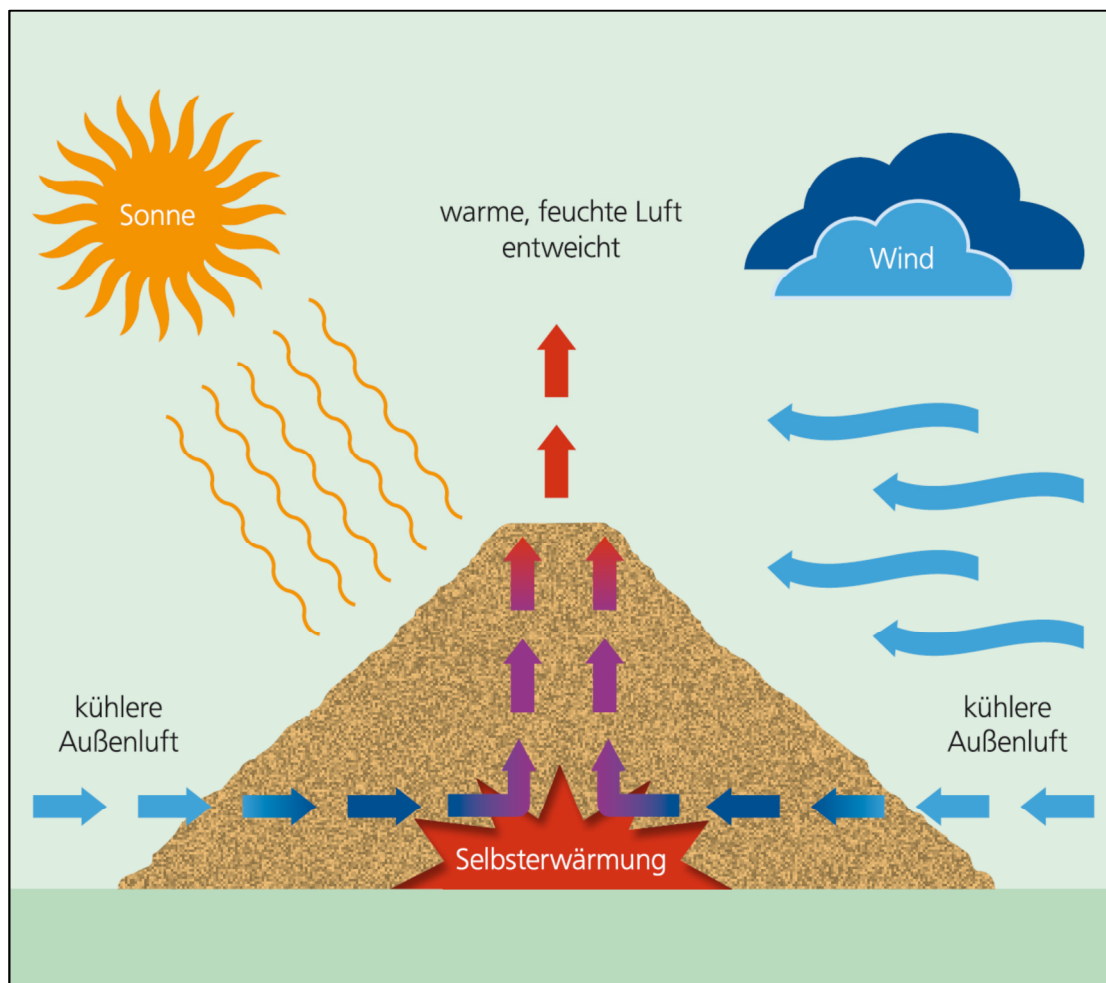


Abbildung 8: Prinzip der natürlichen Konvektionstrocknung [15].

Holzschnitzel lassen sich grundsätzlich entweder im Freien oder abgedeckt (unter Dach, unter Vlies) lagern. Die Lagerung im Freien eignet sich besonders für grobe Holzschnitzel. Kleinere Mengen können als Spitzkegel aufgeschüttet werden, bei grösseren Mengen sind satteldachförmige Mieten sinnvoller. Auch wenn bei ungedeckten Holzschnitzellagern im Freien das Niederschlagswasser in der Regel nicht weiter als einen halben Meter in den Schnitzelhaufen einzudringen vermag, begünstigen regelmässige Niederschläge die Bildung einer feuchten Aussenschicht sowie eine Verpilzung und damit höhere Substanzverluste in der Schüttungskrone. Deshalb empfiehlt sich die Abdeckung von Holzschnitzelhaufen im Freien mit diffusionsoffenen Vliesen. Wichtig dabei ist die Einhaltung eines ausreichenden Neigungswinkels. In niederschlagsreichen Gebieten ist von der Lagerung von Holzschnitzeln im Freien gänzlich abzuraten [15, 16, 17].

Aus der Praxis lassen sich nachfolgende Hinweise und Empfehlungen für eine sachgerechte und zielführende Lagerung von Holzschnitzeln zusammenfassen [10, 15, 16, 17, 20, 30, 68, 74].

- Für eine Lagerung sollte nach Möglichkeit nur trockenes bzw. vorgetrocknetes Holz mit einem sehr geringen Feingut-, Grün- und Rindenanteil verwendet werden.
- Scharfe bzw. gut gewartete Schneidevorrichtungen auf den Hackern gewährleisten eine grobe und damit für die Lagerung günstige Struktur der Holzschnitzel.
- Eine Wiederbefeuchtung der Holzschnitzel nach einmal erfolgter Trocknung ist zu vermeiden.

7.2 Lagerung im Freien

- Die Höhe des Schnitzelhaufens beträgt maximal 4 bis 5 m. Bei grösseren Höhen können die Schnitzel im Zentrum des Haufens nicht mehr austrocknen.
- In der verfügbaren Literatur wird zumeist von einem Befahren der Schnitzelhaufen abgeraten, weil dies zu einer Verdichtung führt, welche das Brandrisiko und die Substanzabbaurate erhöht. Die Verwendung von Teleskopladern macht das Befahren der Schnitzelhaufen überflüssig. Amstutz hingegen hat gegenteilige Erfahrungen gemacht. Seiner Ansicht nach wirkt sich das Befahren der Schnitzelhaufen nicht allzu negativ aus, sofern die Schnitzelqualität nicht schon sehr schlecht ist [4].
- Holzschnitzellager sind wegen der Schimmelpilzbildung von Arbeits- und Wohnräumen zu trennen.
- Ein optimaler Lagerplatz ist eben, sonnig, windexponiert und trocken.
- Der Untergrund muss wegen der späteren Verladearbeiten befestigt sein. Die Deckschicht sollte gewalzt sein, und es dürfen keine groben Schottersteine aufliegen. Besonders geeignet sind ehemalige militärische oder gewerbliche Nutzungen.
- Beim Abtransport der Schnitzel ist eine dünne Schicht von Schnitzeln am Boden zu belassen. Das verhindert die Mitnahme von Kies und Verunreinigungen.
- Bei der Lagerung von Holzschnitzeln sind Mulden unbedingt zu vermeiden, da sich dort Wasser ansammelt und nicht oberflächlich abfließen kann.
- Die Holzschnitzel sollten dachprofilartig aufgeschüttet werden. Kegelmieten sind zu vermeiden. Optimal sind möglichst steile und lang gezogene Mieten. Die Schütthöhe sollte 5 m nicht überschreiten, um einerseits die Gefahr einer Selbstzündung zu minimieren und andererseits um sich die Option einer späteren Abdeckung mit Spezialvlies offen zu halten.



Abbildung 9: Ideales Freilager von Holzschnitzeln [15].

- Optimal ist es, Freiluft-Längsmieten vollständig abzudecken. Dabei kommen ausschliesslich wiederverwendbare Spezialvliese zum Einsatz, die wasserabweisen (nicht wasserdicht), aber dennoch dampfdurchlässig sind (Membranprinzip) [20].
- Die Vliese sind zu spannen, damit keine Mulden entstehen, in denen sich das Wasser stauen kann. Zudem sind sie mit Rundhölzern oder Sandsäcken zu beschweren. Sandsäcke haben sich am meisten bewährt, da sie die Vliese am wenigsten verletzen.
- Die Kosten der Vliese betragen bei einem Vliesgewicht von 120 g/m^2 etwa Fr. 1.20 pro m^2 . Vliese von 200 g/m^2 weisen eine höhere Reissfestigkeit auf. Die Abmessungen einer Rolle sind $9.8 \times 12.5 \text{ m}$. Die Haltbarkeit liegt bei etwa 5 Jahren [20].
- In Windrichtung sind die Vliese zu überlappen.

Abbildung 10: Vliese und Windrichtung [16].

- Freiluftlager von Holzschnitzeln sollten nur auf überhöhten, befestigten Plätzen angelegt und mit einem luftdurchlässigen Vlies abgedeckt werden. Freiluftlager machen nur dann Sinn, wenn sie im Frühjahr mit frischen Holzschnitzeln mit wenig Feinanteil angelegt werden und in grösseren Teilmengen abgebaut werden können.
- Auch in auf einem befestigten Untergrund im Frühsommer angelegten, ungedeckten Freiluftlagern lassen sich niedrige Wassergehalte erzielen. Allerdings nur im Innern. Die Niederschläge dringen in der Regel nicht weiter als 50 cm in den Schnitzelhaufen hinein. Spätestens an den Abbruchstellen der Lagerentnahmen treten die Niederschläge aber auch weiter ins Innere hinein. Idealerweise sollten Freiluftlager mit Folien abgedeckt werden, welche für Wasser abweisend, für Luft und Feuchtigkeit hingegen atmungsaktiv sind.
- Im April gehackte und im Freiland unter einem Vlies gelagerte Pappelschnitzel von 51% Wassergehalt wiesen Mitte November des gleichen Jahres noch einen Wassergehalt von 26% auf. In dem zu Kontrollzwecken angelegten nicht abgedeckten Schnitzelhaufen betrug der Wassergehalt im November hingegen 70% [20].

7.3 Holzschnitzel-Lagerhallen

- Ideal für Schnitzellagerhallen ist eine Grundkonstruktion mit Metall-Ständerbauweise und einem Schrägdach. Dieses verhindert, dass sich Luftmassen stauen können.
- Bei Lagerhallen ist die Reihenfolge der Einlagerung auch bei der Auslagerung (Nutzung) zu beachten, indem ältere Lagerbestände zuerst verbraucht werden sollten.
- Wird das Holz in Lagerhallen gelagert, sind diese luftig und hoch zu bauen. Wichtig ist ein horizontaler Abstand zwischen Schnitzelhaufen und Dach von mindestens 2 m. Nur so vermag die Feuchtigkeit zu entweichen, und es entstehen keine Kondensationszonen.
- Lagerhallen sind idealerweise auf der windabgewandten Längsseite offen.
- Die Lagerdauer ist so kurz wie möglich zu bemessen (3 Monate).
- Ritter [74] hat in seiner Arbeit verschiedene Schnitzellagerhallen besucht und Wassergehaltsmessungen durchgeführt. Den mit Abstand tiefsten Wert hat er am 19. März 2009 auf dem Buchserberg an der Westseite des St. Galler Rheintals auf ca. 550 m.ü.M. mit 15.9% gemessen. Die Messung erfolgte nach einer Woche intensiven Föhnwetters. In der Halle wurden ausschliesslich Fichtenholzschnitzel ohne Nadeln gelagert. Alle anderen gemessenen Wassergehalte lagen über 20%. Auch Kurt Kym berichtet, dass er mit Umlagern und Aussieben des Feinanteils in Diegten BL Wassergehalte von weniger als 20% erreicht [63]. Die Amstutz Holzenergie AG in Emmen erreicht mit umgelagerten Schnitzeln ohne Feinanteil Wassergehalte von < 25% [44].
- Holzschnitzellager sollten so angelegt werden, dass sie nicht umgeschichtet werden müssen. Richtig angelegte Lager mit tiefem Feingutanteil regeln ihr Innenklima selbstständig.

- Lagerhallen sollten eine gute passive Durchlüftung aufweisen und in Gebieten mit wenig Nebel liegen.
- Der ideale Zeitpunkt für das Einlagern von Holzschnitzeln in Lagerhallen ist der Frühsommer (Mai/Juni). In dieser Jahreszeit erfolgt eine rasche Erwärmung des Schnitzelhaufens, welche aber nur kurze Zeit (ca. 3 Wochen) andauert. Bedingung ist, dass das gehackte Holz frisch ist, das heisst im Vorwinter geschlagen wurde, und dass die Feuchtigkeit durch einen möglichst grossen Luftstrom abgeführt werden kann. Ideal sind durchlässige Wände der Lagerhalle [74].
- In Kapitel 4.3 wurde vom Versuch von Bärwolff und Hering in Dornburg berichtet [8]. Dabei wurden die Schnitzel im Februar in die auf drei Seiten offene Lagerhalle eingebracht und wiesen ohne Umlagerung am Ende der sechsmonatigen Versuchsperiode im August einen Wassergehalt von 28.3% auf.
- Bei später im Jahr eingelagerten Schnitzeln ist darauf zu achten, dass eine Vortrocknung in ungehacktem Zustand erfolgen konnte. Solches Holz wird jedoch idealerweise direkt nach dem Hacken zu den Verbrauchern geführt.
- Später im Jahr eingelagerte Schnitzel aus feucht gepoltertem Holz weisen keine ideale Trocknung mehr auf. Einerseits sind die Stämme bereits stärker mit Mikroben und Pilzen kontaminiert, andererseits kommt es zu keiner mikrobefreien Erwärmung mehr. Wassergehalte von weniger als 30% sind in diesem Fall nur noch schwierig und mit grösserem baulichem Aufwand zu erreichen.
- Später im Jahr angesetzte Lager aus Frischholz haben den Nachteil des hohen Laub- und Nadelanteils. Grün eingelagerte Nadeln und Laub führen unweigerlich zu einer starken Pilz- und Mikrobekonzentration und sollen für die Lagerung vermieden werden. Deshalb sollte auch Landschaftsholz vor dem Hacken ein paar Wochen liegen können.
- Ein Holzschnitzellager sollte eine Grundfläche von mindestens 1'000 m² und eine Lagerkapazität von mindestens 2'000 Srm aufweisen.
- Vor der Lagerhalle ist genügend Platz für den Umschlag vorzusehen.
- Sinnvollerweise werden Lagerhallen in einzelne Boxen unterteilt, um die Schnitzel nach Qualität bzw. Einlagerungszeitpunkt zu trennen [15].
- Zu einem geeigneten Schnitzellager gehört eine ebene Wendemöglichkeit für die LKWs mit Sattelauflegern bzw. die Lage an einer Ringstrasse.
- Wegen des Schneeräumungsaufwands im Winter sollte die Entfernung zum öffentlichen Strassennetz so kurz wie möglich sein.

- Die erforderliche Lagerdauer von Holzschnitzeln unter Dach liegt zwischen 3 und 6 Monaten und hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab:
 - Zeitpunkt der Einlagerung
 - Feinanteil
 - Umlagerung der Schnitzel
 - Standort und Bauweise der Lagerhalle
- In früheren Fassungen ihres Merkblattes 11 «Hackschnitzel richtig lagern!» empfahl die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft eine maximale Lagerdauer von nur 3 Monaten. In der aktuellen Fassung findet sich diese Empfehlung nicht mehr [15].

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt, welche Wassergehalte bei verschiedenen Lagerhallen und Energieholzpoltern erreicht werden:

Ort	Beschreibung	Gemessene Wassergehalte [%]
St. Urban BE	Halle, 900 m ³ , gut durchlüftet, genügend Dachabstand	30.5 – 34.5
Safenwil AG	Halle, 800 m ³ , Wände mit Folien abgedichtet, geschlossenes Giebeldach, schlechte Trocknungsbedingungen	29.5 – 34.9
Sempach-Station LU	Halle, 4'500 m ³ , sehr gut durchlüftet, ausreichender Dachabstand	20.4 – 24.8
Affoltern a.A. ZH	Halle, 800 m ³ , Wände stark abgedichtet, schlechte Durchlüftung	25.7
Kleinandelfingen ZH	Halle und Aussenlager, 5'000 m ³ , drei Viertel davon als Aussenlager mit Vlies abgedeckt, Halle gut durchlüftet	24.5 – 28.2
Rikon ZH	Halle, 3'000 m ³ , waldfrische Schnitzel eingelagert, mässig durchlüftet, Wasserdruck vom Boden her	33.4 – 38.7
Buchserberg SG	Halle, 400 m ³ , gut durchlüftet, sehr windig (Föhn)	15.9 – 18.1
Mauren FL	Halle, 350 m ³ , Poltervortrocknung	27.8 – 33.1
Nesslau SG	Halle, 300 m ³ , gut durchlüftet, offene Front	17.7 – 22.7
Wittenwil TG	Halle, 700 m ³ , gut durchlüftet, Poltervortrocknung	17.1
Felben-Wellhausen TG	Halle, 2'100 m ³ , gut durchlüftet, grosser Dachabstand	30.0 – 31.3
Wilen b. Neunforn TG	Halle, 800 m ³ , Anlieferung waldfrisch	37.6
Glarus GL	Halle, 3'000 m ³ , mässig durchlüftet, Muldenlage	28.5 + 33.3
Vuistemens-en-Ogoz FR	Polter, gut durchlüftet, bodentrocken und besonnt, Messung in Silo	28.5 + 31.9
Cazis GR	Energierundholzpolter, bodentrocken, besonnt, kreuzweise geschichtet, Messung nach 2 Tagen im Silo, heisser Sommer 2015	20.0 – 25.8

Tabelle 7: Wassergehalte der Holzschnitzel in Lagerhallen und in Silos nach Polterlagerung [46, 65, 66, 67, 69, 74].

8 Vortrocknung in ungehacktem Zustand

In Kapitel 4.3 und 4.4 wurde gezeigt, dass die Trocknung von Holzschnitzeln durch Lagerung aufwändig ist. Umso mehr erstaunt es, dass die Vortrocknung des Holzes in ungehacktem Zustand in den allermeisten verfügbaren Berichten und Unterlagen kaum behandelt wird. Im TFZ-Bericht 40 «Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel» [79], dem aktuellsten und umfangreichsten Bericht zum Thema, wird die Vortrocknung in ungehacktem Zustand lediglich mit dem Hinweis abgehandelt, dass es bei Lagerdauer von mindestens einem Sommer zu deutlich reduzierten Wassergehalten von ca. 30% kommen kann.

Elber [27] hat wichtige Versuche zur Vortrocknung des Energieholzes in ungehacktem Zustand (Energierundholz) durchgeführt, deren Resultate sich folgendermassen zusammenfassen lassen:

- Die Austrocknung erfolgt hauptsächlich über die Stirnseiten der Stämme. Deshalb empfiehlt es sich, das Rundholz in möglichst kurzen Abschnitten zu lagern.
- Je dünner das Rundholz ist, desto schneller trocknet es.
- Eine vollständige oder auch nur teilweise Entrindung beschleunigt die Trocknung.
- Die Rundholzpolter müssen auf einer trockenen Unterlage errichtet werden und über ausreichende Bodenfreiheit verfügen. Empfohlen werden Derbholzpolter auf vorgelegten Querhölzern [74].
- Überjährige Polter sind zu vermeiden.
- Das A und O der Vortrocknung in ungehacktem Zustand ist die topographische Lage des Polters. Muldenlagen sind sehr ungünstig. Mit Vorteil werden die Polter auf gut windexponierten Kuppen- und Kretenlagen errichtet.
- Die Lagerung im Bestand mit Ästen bringt kaum Vorteile.
- Der Schlagzeitpunkt ist von untergeordneter Bedeutung. Polter können während des ganzen Jahres angelegt werden.
- Die Trocknung ist während der Sommersaison am effizientesten.
- Die Besonnung der Polter ist grundsätzlich ein Vorteil.
- Wichtiger als die Besonnung ist der Untergrund der Polter. Ist dieser steinig und wasserdurchlässig, ist sein Einfluss grösser als derjenige der Besonnung. Äusserst ungünstig sind schwere, zu Staunässe neigende Böden.



Abbildung 11: Polter mit ungünstigem Untergrund.

- Bei Nadelholz wird die Veränderung des Wassergehalts stark durch die Regen- oder Schneemenge beeinflusst («Schwammeeffekt»). Deshalb ist es empfehlenswert, das Nadelholz erst gegen Ende einer längeren Regenperiode aufzupoltern. Beim Nadelholz sollte eine Wiederbefeuchtung vermieden werden.
- Nadelholz (Fichte) erreicht ihren minimalen Wassergehalt bereits nach 3 bis 5 Monaten Lagerdauer. Dann sollte der Polter gehackt oder abgedeckt werden, da sonst der Wassergehalt durch Wiederbefeuchtung schnell wieder ansteigt, was verhindert werden sollte.

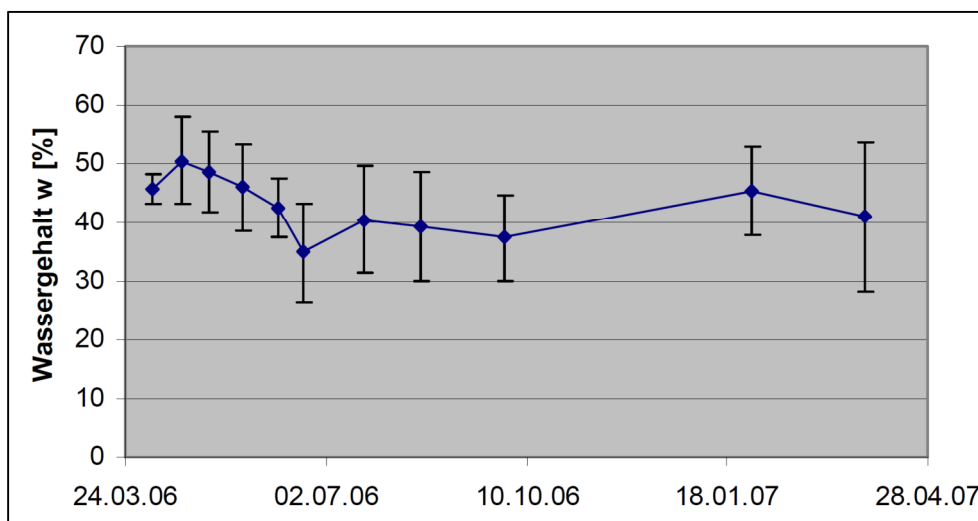


Abbildung 12: Trocknungsverlauf Fichte in ungehacktem Zustand [27].

- Laubholz (Buche) zeigt einen anderen Trocknungsverlauf und erreicht den minimalen Wassergehalt erst nach 8 bis 9 Monaten, bleibt dann aber mehr oder weniger konstant. Beim Laubenergiegrundholz ist die Wiederbefeuchtung weniger problematisch als beim Nadelholz. Auf eine Abdeckung kann meist verzichtet werden, ausser der Anteil Kronen- und Astmaterial ist sehr hoch.

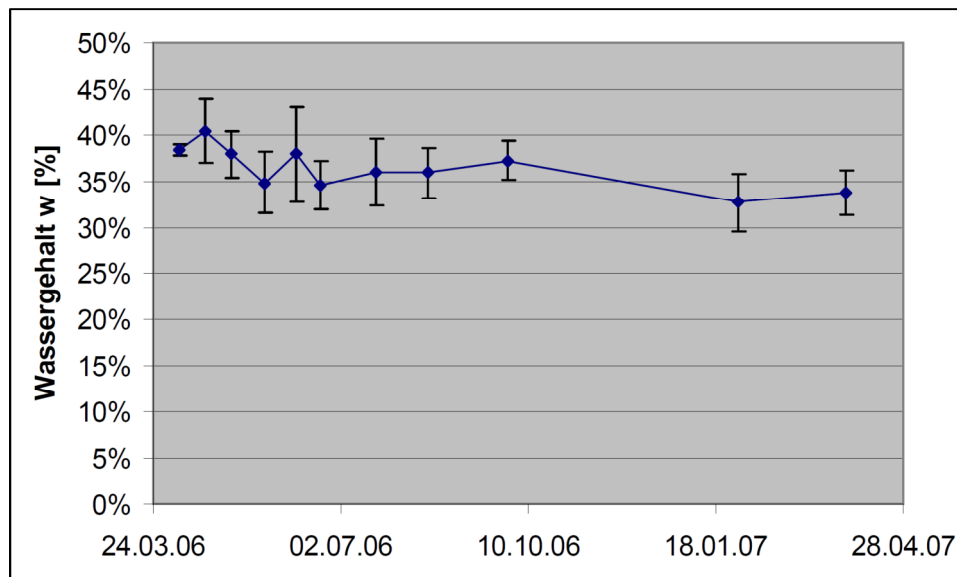


Abbildung 13: Trocknungsverlauf Buche in ungehacktem Zustand [27].

- Die Lagerdauer von Buche hängt eng mit der Problematik des Erstickens und/oder des Weissfäulebefalls zusammen. Die diesbezüglichen Ansichten der Praktiker divergieren allerdings stark.
- Ebenfalls keine einheitliche «Lehrmeinung» besteht in Bezug auf der Frage, ob das Rundholz zur Vortrocknung besser normal oder kreuzweise geschichtet werden soll. Elber [27] konnte keine signifikanten Unterschiede feststellen, Lüscher [64] hingegen berichtet von positiven Erfahrungen mit der kreuzweisen Schichtung des Rundholzes.
- Eine positive Auswirkung auf die Trocknungsleistung hat sich ergeben, wenn die Rundholzpolter ausserhalb des Waldes angelegt werden, da dort der Windeinfluss oft höher ist [64].
- Ebenfalls empfehlenswert ist es, separate Polter mit Energiegrundholz und Waldrestholz anzulegen [55, 64], wenn unterschiedliche Heizungen beliefert werden (z.B. kleinere Untersub- und grosse Vorschubrostfeuerungen). Dadurch kann die Logistik vereinfacht werden und die Wertschöpfung durch Aushaltung verschiedener Holzschnitzelqualitäten maximiert werden.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die Trocknung des Holzes in ungehacktem Zustand wesentlich kostengünstiger und einfacher ist als die Trocknung in gehacktem Zustand in einer Lagerhalle.

9 Abdecken von Energieholz in ungehacktem Zustand

Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass das Abdecken von grösseren Energieholzpoltern mit einer wasserdichten Spezialfolie auf Papierbasis die Trocknung positiv beeinflusst und das Holz insbesondere vor einer Wiederbefeuchtung durch Regen und Schnee zu schützen vermag. Folien sind beispielsweise in Rollen von 4 und 6 m Breite erhältlich [4, 10, 40]. Wichtig ist es, die Folie frühzeitig, das heisst je nach Witterung bis Ende Juni oder Ende Juli, einzusetzen. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass die Holzpolter gut durchlüftet und besonnt sind, und dass sie auf trockenem, durchlässigem Untergrund zu liegen kommen. Allzu dichtes Ast-, Laub- und Nadelmaterial verhindert eine schnelle Trocknung.

Die Abdeckfolie wird mit einem grossen, am Kran des Rückefahrzeugs angebrachten Bügel abgerollt. Die Folie sollte etwa der Breite des Polters entsprechen und an beiden Enden und über dem Polter mit Rundlingen oder Sandsäcken beschwert werden. Beim Hacken kann die Papierfolie problemlos mitgehackt werden, wobei auf eine gute Durchmischung zwischen Holz und Folie zu achten ist. Der Einsatz der Papierfolie lohnt sich vor allem als Schutz vor Wiederbefeuchtung im Herbst und Winter für durchmischte Energieholzqualitäten mit höherem Nadelholzanteil, mit Anteilen an Ästen, Kronenmaterial, Durchforstungsholz und bei einer längeren Lagerdauer bis zur Heizperiode.



Abbildung 14: Abrollen der Abdeckfolie [4].

10 Technische Schnitzeltrocknung

10.1 Vorbemerkungen

Unter Dach beträgt die Trocknungsdauer von Holzschnitzeln bis unterhalb von 30 % Wassergehalt bis zu sechs Monate. Angesichts dieser langen Dauer und des grossen Platzbedarfs ist es naheliegend, dass auch die technische Schnitzeltrocknung unter Verwendung von Fremdenergie zur Anwendung gelangt.

Grundsätzlich geht es bei der Holz Trocknung darum, Wärme in das Holz und Wasser aus dem Holz zu bringen. Die Erwärmung beschleunigt die Verdampfung, da warme Luft mehr Wasser transportieren kann. Das verdampfte Wasser wird von der Umgebungsluft aufgenommen. Der Trocknungseffekt ist umso grösser, je grösser die Geschwindigkeit und die Temperatur des durchströmenden Luftstromes und je kleiner die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft sind [31].

Für eine optimale technische – aber auch natürliche – Trocknung der Holzschnitzel ist besonders bei grösseren Schütthöhen ein sehr geringer Feingutanteil von entscheidender Bedeutung. Ansonsten können nämlich „Feuchtigkeitsnester“ mit hohem Feingutanteil im Hackschnitzelhaufen die Trocknungswirkung stark vermindern oder sogar gänzlich verhindern (siehe dazu auch Kapitel 4.1.1).

Aus der grossen Auswahl verfügbarer Trocknungssystemen und –technologien für Holzschnitzel werden die folgenden näher beschrieben:

- Bandtrockner
- Trommeltrockner
- Containertrockner

10.2 Bandtrockner

Der Niedertemperatur-Bandtrockner ist ein hocheffizientes Verfahren zur Trocknung von Sägespanen, Holzschnitzeln, Rinde, Hobelspänen und anderer Biomasse mit niederkalorischer Wärme von üblicherweise 60 bis 90 °C. Geringe Emissionen sowie ein hochwertiges Endprodukt, bei niedrigen Verbrauchswerten sind die markanten Vorzüge der Bandtrocknertechnik. Ein weiterer Vorteil aufgrund der geringen Schütthöhe der Holzschnitzel auf dem Trocknungsband ist die Möglichkeit, auch Holzschnitzel mit höherem Feingutanteil effizient zu trocknen.

Die zu trocknende, feuchte Substanz wird dem Trockner kontinuierlich zugeführt. Über zwei Förderschnecken wird das Feuchtgut zunächst gleichmässig über die Bandbreite verteilt und eingebnet. Die geeignete Schütthöhe ist variabel einstellbar und kann damit optimal auf die jeweiligen Erfordernisse schnell und einfach angepasst werden. Nach der Verteilung wird das Produkt durch den Bandvorschub in den Trocknungsbereich eingefahren. Innerhalb des Trocknertunnels wird die Produktschüttung von der erzeugten Warmluft durchströmt.

Die Warmluft wird mittels Wärmetauscher aus dem zur Verfügung stehenden Wärmemedium erzeugt. Während die Warmluft die Gutschicht durchströmt, wird die Feuchtigkeit konvektiv abgetrocknet und auf den Luftstrom übertragen. Dieser kühlt durch die Feuchtigkeitsaufnahme ab.

Die Abreinigung des Trocknungsbandes erfolgt durch eine kontinuierliche Trockenreinigung sowie eine diskontinuierliche Nassreinigung. Die Trockenreinigung erfolgt durch eine Bandabbläsung, welche abgabeseitig das perforierte Trocknungsband von feinen Staubpartikeln befreit. Die Reinigungsreste werden dem Abgabegut zugeführt. Für die weitergehende Reinigung des Bandes gelangt eine Hochdrucknassreinigung zum Einsatz.

10.3 Trommeltrockner

Trommeltrockner eignen sich zum Trocknen von Gütern, die aufgrund ihrer Feuchte und Struktur eine längere Verweildauer in der Trocknungsanlage benötigen. Beispielsweise werden Rübenschnitzel und Sägespäne üblicherweise in Trommeltrocknern getrocknet. Trommeltrockner bestehen aus einer rotierenden Trommel, die von heisser Luft durchströmt wird. Das Trocknungsgut wird im Gleichstrom mit dem Heissgas durch die Trommel geleitet. Je nach Trockengut und Beheizungsart sind die Trommeln mit unterschiedlichen Einbauten bestückt. Der Materialtransport durch die Trommel erfolgt durch eine kombinierte mechanisch-pneumatische Forderung. Über Ausfallgehäuse oder Zyklone wird das Trockengut nach der Trocknung abgeschieden. Trommeltrockner lassen sich direkt mit Heissgas beheizen. Die Beheizung kann auch indirekt über Wasserdampf erfolgen. Trommeltrockner weisen einen breiten Regelbereich der Trocknungsgastemperatur von 150 bis 1'000 °C. auf. Ein Nachteil von Trommeltrocknern ist die hohe Staubentwicklung während des Trocknungsprozesses. Bei der Umwälzung des Trocknungsgutes kommt es durch mechanischen Abrieb zu zusätzlicher Entstehung von Feinmaterial und dadurch Materialverlust. Das sehr feine Material (Staub oder hoher Feingutanteil) wird dann vom Luftstrom nach aussen transportiert, was zu erheblichen Feinstaubemissionen führen kann, sofern keine entsprechenden Filter installiert sind. Bei der Filterung entstehen zudem oftmals Probleme durch „Anbackungen“ von Filterstäuben aufgrund des hohen Feuchtigkeit- und Staubgehaltes.

Trommeltrockner eignen sich deshalb vorwiegend für die Trocknung von bereits vor dem Trocknungsvorgang ausgesiebten Holzschnitzeln.

10.4 Containertrockner

Das Prinzip des Containertrockners besteht darin, dass das Trocknungsgut in einem Container ruht und von unten mit heisser Luft durchströmt wird. Containertrockner eignen sich für eine chargenweise Trocknung unterschiedlichster Güter bei langen Trocknungszeiten. Die Temperatur in den Containertrocknern lässt sich über die Trocknungsdauer durch veränderbare Temperatur- oder Zeitkurven optimal anpassen. Die Beschickung der Trockner erfolgt manuell oder vollautomatisch. Containertrockner sind universell einsetzbar und finden in den verschiedensten Branchen

Anwendung. Bei der Containertrocknung ist aufgrund der grossen Schütthöhe besonders auf einen geringen Feingutanteil zu achten (siehe Kapitel 10.1 Vorbemerkungen). Für die Trocknung von Holzschnitzeln hat sich der sogenannte Kastentrockner bewährt. Diesen gibt es in zwei Ausführungsvarianten.

Im **stationären** Kastentrockner wird das zu trocknende Hackgut in einen von unten belüfteten Holzkasten geschüttet und getrocknet. Ist der Trocknungsvorgang abgeschlossen, wird ein weiterer Kasten befüllt, der dann ebenso belüftet wird. Aus dem Kasten mit dem bereits getrockneten Material kann in der Zwischenzeit bereits das Material entnommen werden

Im **mobilen** Kastentrockner wird das Hackgut in Metall-Containern gelagert, die einen doppelten Boden aufweisen, über den die Luft einströmen kann. Container um Container wird an das System mit Warmluft angeschlossen und getrocknet.

Wichtig bei beiden Varianten ist eine entsprechende Überdachung. Diese kann auch dazu verwendet werden, zusätzliche warme Luft zu gewinnen. Unter dem Dach wird eine Holzverschalung eingezogen, sodass ein Hohlraum entsteht. Die Sonne erwärmt durch das Dach hindurch die Luft in diesem Hohlraum, die dann abgesaugt und zum Trocknen eingesetzt werden kann. Mit dieser Methode kann prinzipiell jeder beliebige Wassergehalt erreicht werden. Die Faktoren Zeit, Lufttemperatur, Schütthöhe und Strömungsgeschwindigkeit spielen dabei eine entscheidende Rolle.



Abbildung 15: Containertrocknung mit Abwärme aus einer Biogasanlage [70].

10.5 Wirtschaftliche Aspekte

Um eine Menge von 10 Tonnen bzw. 25 Srm Holzschnitzeln (60% Weichholz, 40% Hartholz) von 50% auf 20% Wassergehalt herunterzutrocknen, ist unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Trocknungsanlage eine Wärmemenge von rund 9'000 kWh bzw. 360 kWh pro Srm erforder-

lich. Bei einem Wärmepreis von 5 Rp./kWh verteuert das die Holzschnitzel um Fr. 18.- pro Srm [25, 31].

Die wirtschaftliche Machbarkeit der technischen Holzschnitzeltrocknung hängt deshalb insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- Verfügbarkeit von sehr günstiger Abwärme, beispielsweise von landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Kehrlichtverbrennungsanlagen, Klärschlamm-trocknungsanlagen oder Blockheizkraftwerken.
- Existenz eines genügend grossen Absatzmarktes für die Qualitätsschnitzel. [31] ist von einer Mindestmenge von 20'000 Tonnen Feuchtmasse pro Jahr ausgegangen.
- Der Aufwand für Anlieferung, Umschlag und Abtransport muss klein sein. Das bedingt einfache Logistikkonzepte und kurze Transportdistanzen

In Oberaach TG produziert die Firma Roth Holzschnitzel GmbH Qualischnitzel[®], indem sie Abwärme aus der Klärschlamm-trocknungsanlage der Landi Aachtal für den Betrieb eines Bandtrockners nutzt. Die Kosten für die Trocknung und Aussiebung liegen etwa bei Fr. 7.- bis Fr. 10.- pro Srm, was etwa 1.0 bis 1.5 Rp./kWh Energieinhalt entspricht. Interessant wird die Veredelung erst ab einer bestimmten Menge. Deshalb produziert die Firma auch Qualischnitzel[®] für andere Schnitzelhersteller [76].

Die Firma Regi Holz GmbH im Energieholzzentrum Pfannenstiel (Gemeinde Oetwil am See) bringt ihre Holzschnitzel zur 500 Meter entfernten Biogasanlage der Firma Grimm AG, trocknet sie dort in Containern während 4 bis 5 Tagen mit Abwärme aus dem Blockheizkraftwerk auf einen Wassergehalt von 25% herunter, führt sie zurück in die Lagerhalle im Energieholzzentrum und siebt sie mit einem Rüttelsieb aus. Die Kosten für die Veredelung betragen Fr. 13.- pro Srm. Wirtschaftlich interessant ist wird das Verfahren dadurch, dass sich der ausgesiebte Feingutanteil zu guten Preisen an lokale Gärtnereien verkaufen lässt, welche ihn als Streu- und Mulchmaterial verwenden [33].



Abbildung 16: Ausgesiebtetes Feingut aus der Produktion von Qualischnitzeln® in Oberaach TG.

11 Aussiebung von Feingutanteil

11.1 Rüttelsieb

Beim Rüttelsieb kommen Gitter zum Einsatz, die unterschiedliche Maschenweiten aufweisen. Je nach Wahl der Weite kann gröberes oder feineres Material ausgesiebt werden. Je nach Wahl der Anzahl der Siebe, durch die das Material nacheinander (vom gröberen zum feineren) gelassen wird, können mit Rüttelsieben beliebig viele Fraktionen ausgesiebt werden.



Abbildung 17: Rüttelsieb der Verora GmbH/NEAG im Wies in Neuheim ZG.

11.2 Trommelsieb

Trommelsiebe werden sehr häufig bei Kompostieranlagen zum Aussieben des Erdmaterials eingesetzt. Das zu siebende Material wird durch einen rotierenden Siebzylinder gelassen. Material, das feiner als die Maschenweite des Siebes ist, wird ausgesiebt, das gröbere Material passiert den Zylinder und fällt nach vollständiger Passage des Zylinders am anderen Ende wieder heraus. Mit dem Trommelsieb lassen sich also zwei Fraktionen erzeugen.

11.3 Sternsieb

Eine für das Aussieben von Holzschnitzeln besonders gut geeignete Technologie ist jene des Sternsiebs. Rotierende, sternförmige Elemente aus Metall oder Kunststoff gewährleisten ein Aussieben verschiedener Durchmesser und Längen. Mit der Sternsieb-Technologie lassen sich sowohl zwei als auch drei Fraktionen erzeugen. Eine sehr hohe Leistungsfähigkeit mit einem grossen Umsatz pro Zeiteinheit kennzeichnet diese Technologie.

11.4 Zeitpunkt des Siebens

Das Aussieben des Feingutanteils kann entweder vor oder nach dem Trocknen erfolgen. Bei Siebung vor der Trocknung ist die zu trocknende Menge geringer und der Durchsatz an verkäuflichen Qualitätsschnitzeln steigt. Bei der Siebung nach der Trocknung «kleben» die feinen Teile weniger an den Holzschnitzeln, sodass die Siebung einfacher ist. Je trockener die Holzschnitzel sind, desto mehr Feingutanteil wird beim Aussieben abgeschieden werden können. Ein Vorteil der Aussiebung vor dem Trocknen besteht darin, dass die Staubentwicklung kleiner ist [1]. Zudem lässt sich bei einer geringeren Korngrössenverteilung der Trocknungsprozess besser steuern. Gewisse Hersteller von Qualischnitzeln® sieben die Holzschnitzel sowohl vor als auch nach dem Trocknen aus [76].

Zeitpunkt Aussiebung	Vorteile	Nachteile
Vor dem Trocknen	• Geringere Menge für Trocknung • Schnellere Trocknung • Erhöhter Durchsatz an verkäuflichen Qualitätsschnitzeln • Verminderte Staubentwicklung • Bessere Steuerung des Trocknungsprozesses	• Anteil Feingut bleibt an den Holzschnitzeln kleben
Nach dem Trocknen	• Feingutanteil bleibt weniger an den Holzschnitzeln kleben • Grössere Menge Feingut kann	• Grössere Staubentwicklung durch trockenen Feingutanteil • Grössere Menge für Trocknung

Tabelle 8: Vor- und Nachteile verschiedener Aussiebungszeitpunkte.

	ausgesiebt werden	• Längere Trocknungszeit • Schlechtere Trocknungsergebnisse wegen Feingutanteil
Vor und nach dem Trocknen	• Optimale Holzschnitzelqualität • Maximale Aussiebung Feingutanteil	• Höhere Kosten

12 Logistik als Qualitätsfaktor

Die Zusammenarbeit von kleineren Schnitzelproduzenten zu Betreibergemeinschaften kann nicht nur zu einer Professionalisierung und Effizienzsteigerung der Holzschnitzellogistik führen, indem sich die Kosten für kapitalintensive Maschinen teilen, die Maschinen besser auslasten und lange Stand- und Wartezeiten vermeiden lassen [14, 35].

Die Bündelung von kleineren Energieholzmengen zu grösseren Einheiten und die sorgfältige Planung der Holzschnitzellogistik vermögen auch die Qualität der Holzschnitzel positiv zu beeinflussen und leisten damit einen wertvollen Beitrag an einen emissions- und wartungsarmen Betrieb der Anlagen und Geräte. Im professionellen Einsatz sind mittlerweile fast ausnahmslos schwere Trommelhacker anzutreffen, die per Kran und Ketteneinzug beschickt werden. Die am Schlepper angehängten oder auf LKW aufgebauten Maschinen vermögen Stammquerschnitten von bis zu 60 cm zu hacken. Die Hackerleistung ist in erster Linie abhängig vom Ausgangsmaterial. Aufgearbeitetes, starkes Stammholz bringt deutlich mehr Leistung als lockeres Strauchwerk. Unter guten Bedingungen erreichen gängige Grosshacker eine Leistung von bis zu 80 Srm pro Stunde [35].

Holzeinschlag plus Rücken und das Hacken müssen unbedingt entkoppelt werden. Denn der Hacker ist mit Abstand die teuerste Maschine im System. Im Schnitt kostet das Hacken in Deutschland zwischen 2.5 und 5 Euro pro Srm, in der Schweiz kann mit dem doppelten Preis gerechnet werden. Deshalb sind möglichst grosse Polter erforderlich, damit der Hacker nicht so oft umsetzen muss. Die Polterplätze müssen sauber und gross genug sein. Auch der beste Hacker macht aus schlechtem Ausgangsmaterial keinen hochwertigen Brennstoff, und auf dem Polterplatz brauchen Hacker und Transportfahrzeuge genug Bewegungsfreiheit [35].

Im Fürstentum Liechtenstein lässt sich mit dem «Holzkreislauf Liechtenstein» beispielhaft zeigen, wie sich eine durchdachte Energieholzlogistik auf die Qualität der Holzschnitzel und damit auch der Anlagen auswirkt [55]. Der «Holzkreislauf Liechtenstein» wurde vor rund 10 Jahren zur Belieferung von 16 kleineren automatischen Holzfeuerungen und des 2014 eingeweihten Holzheizwerks Balzers mit dem Ziel gegründet, eine überbetriebliche Lösung für die Versorgung dieser Anlagen mit dem richtigen Brennstoff zu finden. Die gesamte jährliche Brennstoffmenge beträgt etwa 35'000 Srm und verteilt sich je hälftig auf das HHW Balzers und die anderen 16 Anlagen. «Holzkreislauf Liechtenstein» organisiert die Energieholzlogistik, das Hacken, den Transport und die Administration und Organisation. Die Revierförster stellen die Energieholzpolter im Winter/Frühling

bereit. Energierundholz und Kronenmaterial werden getrennt gepoltert und in ungehacktem Zustand getrocknet. Beim Kronenmaterial wird Astholz mit Rinde, Nadeln und Blättern unter 10 cm Durchmesser abgezopft und im Wald belassen, um das Nährstoffgleichgewicht des Waldbodens zu fördern. Gleichzeitig lassen sich dadurch die Aufrüstungskosten tiefer halten als wenn viel Astmaterial bereitgestellt würde. Das gepolterte Kronenmaterial weist somit eine relativ gute Qualität auf. Es wird darauf geachtet, dass genügend grosse Energieholzpolter auf Lagerplätzen gebildet werden, wo die Zufahrt für den Transporteur gut möglich ist.

Die Energieholzpolter werden einen Sommer lang getrocknet und während der Heizperiode nach und nach gehackt. Der Holzkreislauf organisiert den Hacker zu Beginn der Heizperiode zuerst in den höheren Lagen. Nach und nach wird an den tiefer gelegenen Lagerplätzen gehackt, bis im Hochwinter nur noch die Energieholzlagerplätze im Tal verbleiben. Durch diese überbetriebliche Organisation ist es möglich, die Nutzung von höher gelegenen Lagerplätzen zu optimieren und die entsprechenden Forstbetriebe optimal miteinzubeziehen. Bei jedem Hackeinsatz werden einige Container mit Holzschnitzeln gefüllt und als Puffer eingesetzt für den Fall eines unerwartet hohen Bedarfs. Durch das überbetriebliche Zusammenlegen des Hackens lassen sich bessere Preise für das Hacken erzielen und der Hackunternehmer ist besser ausgelastet. Gearbeitet wird mit nur einem einzigen Unternehmen aus dem Fürstentum. Zudem wird die Koordination der Hackereinsätze wesentlich vereinfacht, da das Hackunternehmen jede Woche oder jede zweite Woche einen Grossauftrag für das Hacken von grösseren Energieholzpoltern erhält und nicht viele kleine Aufträge verarbeiten muss.

Die besseren Energieholzqualitäten, welche aus den Energierundholzpoltern stammen, gehen in die kleineren Holzfeuerungen. Nach einem Sommer Trocknung weisen diese Energieholzpolter Wassergehalte von ungefähr 30 bis 35% auf und können für die Belieferung von Trockenschnitzelheizungen eingesetzt werden. Beim Hacken mit dem grossen Trommelhacker, den der Unternehmer einsetzt, können verschiedenen Siebgrössen verwendet werden, so dass kaum bis keine Probleme mit Überlängen auftreten. Beim Einsatz von Kronenmaterial sind hingegen immer wieder Überlängen durch die Siebe gegangen, so dass mit diesem Material kein befriedigender Betrieb der kleinen Heizungen erreicht werden konnte.

Das Kronenmaterial, welches separat gepoltert wird, kommt bei grösseren Heizungen und vor allem beim HHW Balzers zum Einsatz. Durch die Aufteilung in Energierundholz und Kronenmaterial, welche organisatorisch ziemlich einfach funktioniert und nach anfänglich erhöhtem Koordinationsbedarf mittlerweile sehr gut funktioniert, kann die Wertschöpfung aus dem Energieholz maximiert werden. Die Förster erhalten für Energierundholzschnitzel bessere Preise und sind somit motiviert, die entsprechende Sortierung durchzuführen.

Dieses System der Aufteilung in die zwei Sortimente Energierundholz einerseits, Kronenmaterial und Schlagabraum andererseits funktioniert nur deshalb so gut, weil die Nachfrage nach schlechteren Schnitzelqualitäten mit dem HHW Balzers genügend gross geworden ist. Es ist für die Sortierung in zwei unterschiedliche Energieholzqualitäten entscheidend, dass genügend Absatzmöglichkeiten für schlechtere Qualitäten vorhanden sind.

In den Monaten Juni bis August besichtigt der Geschäftsführer des «Holzkreislaufs Liechtenstein» zusammen mit den Revierförstern alle Energieholzpolter, schätzt sie ein und nimmt sie in die Polterverwaltungssoftware Polver auf. Dadurch ist gewährleistet, dass die Unterteilung in Energierundholz und Kronenmaterial auch gut funktioniert.

Jedes Polter wird eingeteilt in:

- Energierundholz oder Kronenmaterial
- Anteil Laubholz und Nadelholz (in 10 %-Schritten)
- Volumen des Polters

Im Einzelfall mussten zu Beginn des Verfahrens einzelne Polter mit zu viel Kronenmaterial im Energierundholz deklassiert werden. Durch den Wertverlust ist der Förster motiviert, das Verfahren zu optimieren. Mit dieser Holzschnitzel-Logistikkette und Organisation kann man sich - bis auf den Containereinsatz - die Holzschnitzellagerung und entsprechende Lagerhallen sparen. Die besten Energieholzqualitäten wie z.B. Buchenstammholz werden weiterhin für die Stückholzproduktion eingesetzt und als Energieholz lang oder aufbereitet verkauft.

Die Koordination des Holzkreislaufes benötigt nach anfänglicher Einarbeitungszeit, nachdem das neue System eingeführt wurde, relativ wenig Aufwand. Zudem werden die Forstbetriebe und der Hackunternehmer von ihrem Organisations- und Administrationsaufwand zu einem grossen Teil entlastet [55].

Abbildung 18: Vergleich des für den jeweils gleichen Energieinhalt erforderlichen Transportvolumens für verschiedene Formen von Energieholz [39].

13 Nutzung von Schlagabraum

Schlagabraum ist Ast- und Kronenmaterial, sowie Durchforstungsrestholz aus Holzschlägen und lässt sich keiner höherwertigen Nutzung etwa als Industrie- oder Stammholz zuführen. Auch das verbleibende Rindenmaterial, die Stümpfe und Wurzelteller nach einem Holzschlag werden zum Schlagabraum gezählt [3, 28]. Schlagabraum enthält im Vergleich zu Stammholz wesentlich mehr Nährstoffelemente pro kg Trockensubstanz. Vor allem in den Nadeln und Blättern ist der Nährstoffgehalt deutlich erhöht. Aber auch Astholz mit Rinde und Rinde selbst enthalten mehr Nährstoffe als Stammholz. Bei der Nutzung von Schlagabraum ist deshalb dem Nährstoffentzug durch Abführen der Biomasse besondere Beachtung zu schenken. Je nach Standortsituation und Nährstoffbedingungen muss das Belassen eines Anteiles des Schlagabraums im Bestand in Betracht gezogen werden, so z. B. bei nährstoffarmen oder sehr flachgründigen Böden oder bei Böden mit besonderem Nährstoffhaushalt. Der hohe Anteil an Nadeln und Rinde im Schlagabraum ist verantwortlich dafür, dass Holzschnitzel aus Schlagabraum einen deutlich höheren Feingutanteil, einen höheren Blatt- und Nadelanteil sowie einen höheren Aschegehalt aufweisen als Holzschnitzel aus Energierundholz. Aus Schlagabraum lassen sich deutlich schlechtere Holzschnitzelqualitäten als aus Energierundholz erzeugen [7]. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass der Aschegehalt rund achtmal höher ist als bei der Verwendung von Energierundholz [35]. Zusätzlich führen Holzschnitzel aus Schlagabraum aufgrund des höheren Feinanteils tendenziell eher zu Verdichtungen mit schlechterer Trocknung, Gefrierung im Winter und erhöhter Schimmelpilzbildung mit erhöhter Gefahr der Selbstentzündung bei der Holzschnitzellagerung [15, 22]. Hohe Anteile von Schlagabraum an der gesamten Holzschnitzelmenge können nur in Anlagen eingesetzt und verbrannt werden, die darauf ausgelegt sind (z.B. Vorschubrostfeuerungen mit stabilen Fördersystemen [7]). Nach Möglichkeit sollten Holzschnitzel aus Schlagabraum direkt zum Heizwerk geliefert werden (direkte Bereitstellungskette mit geringsten Kosten). Eine Zwischenlagerung empfiehlt sich nur bei Mischungen mit Holzschnitzeln besserer Qualität. Schlagabraum sollte wenn möglich in gehackter Form und nur über kurze Distanzen lose transportiert werden [39]. Das Bündeln von Schlagabraum mit anschliessendem Transport der Bündel ist vergleichsweise teurer als Hacken an der Waldstrasse und kann nur bei sehr hoher Auslastung des Bündler-Aggregates (Forwarder-Bündler) in Betracht gezogen werden, was in der Schweiz und in Mitteleuropa kaum gegeben ist [3, 79].

	Nadeln	Astholz mit Rinde	Rinde	Schaftholz ohne Rinde
Biomasse	9%	14%	3%	74%
Nährstoffelemente	36%	18%	10%	36%

Tabelle 9: Anteile an Biomasse und Nährstoffelementen verschiedener Teile des Baums [28].

14 Emissionsmessungen

Mit ausgesiebten und auf ca. Wassergehalt 25% heruntergetrockneten Holzschnitzeln wurden auf einem Holzschnitzelkessel Rieben SL 150 T folgende **Staub**-Emissionswerte (bei einem Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung LRV von 50 mg/m³) gemessen. Die Anlage verfügt über keinen Partikelabscheider:

Bei 35% Last:

1. Messung: 37 ± 6 mg/m³
2. Messung: 29 ± 5 mg/m³

Bei 75% Last:

1. Messung: 24 ± 4 mg/m³
2. Messung: 25 ± 4 mg/m³

Die Firma Jenni Energietechnik AG garantiert für den Kessel KWB Multifire 2 MF2 D ("Raupenbrenner", Leistung 120 kW) die Einhaltung des Feststoffgrenzwertes der LRV auch ohne Partikelabscheider. Als Anforderung an den Brennstoff wird ein Wassergehalt von maximal 35 % angegeben. Bezüglich Feinanteil gibt die Firma keine Vorgaben an.

Ein mit Qualitätsholzschnitzeln betriebener Holzschnitzelkessel KWB TDS 300 ohne Partikelabscheider erreichte bei der Feststoff-Emissionsmessung folgende Emissionswerte (bei einem Grenzwert der LRV von 50 mg/m³):

Bei 100% Last:

1. Messung: 31 ± 5 mg/m³
2. Messung: 28 ± 4 mg/m³
3. Messung: 30 ± 4 mg/m³

Diese Beispiele zeigen auf, dass es durch Einsatz von Qualitätsholzschnitzeln möglich sein kann, **ohne Partikelabscheider** den Staubgrenzwert der LRV von 50 mg/m³ für Schnitzelfeuerungen bis 500 kW zu erfüllen. Zur Bestätigung dieser Tendenz benötigt es aber Auswertungen weiterer Emissionsmessungen von Anlagen mit Qualitätsholzschnitzel-Einsatz und/oder ein Messprojekt zum Emissionsverhalten von Kleinschnitzelfeuerungen (Seriengeräten) bei Einsatz verschiedener Holzschnitzel-Qualitäten.

15 Qualitätskontrolle

Ein zentraler Punkt der Optimierung der Holzschnitzelqualität ist die Qualitätskontrolle. Auch die besten Normen und Vorgaben für den Einsatz der optimalen Holzschnitzelqualität in der passenden Feuerung bringen wenig, wenn kein griffiges Instrument zur Überprüfung der Qualität vorhanden ist. [58] erwähnt, dass 85 % aller Fehler bei der Analyse von Holzschnitzeln auf unsachgemässe Probenahmen zurückzuführen sind, und fordert für eine Repräsentativität, dass „jedes Stück Holz die Gelegenheit gehabt haben muss, ausgewählt zu werden“. Der daraus abgeleitete Verfahrensvorschlag für die praktische und schnelle Einschätzung der Holzschnitzelqualität für den Betreiber im Heizwerk ist sicherlich zu aufwändig und zu teuer. Die Anwendung der Qualitätskontrolle gemäss Holzschnitzelnormierung empfiehlt sich dementsprechend vor allem für Grossmengen von zertifizierten Qualitätsholzschnitzeln und zur Überprüfung bei Streit- und Klagefällen. Zurzeit fehlt eine einfache Qualitätsanalyse zu einem vernünftigen Preis, deren Aussagekraft auch bei Klage- und Streitfällen gilt und die für regelmässige Qualitätskontrollen der Holzschnitzelqualität mittlerer bis grösserer Holzfeuerungen zum Einsatz kommen könnte, wo z.B. Lieferverträge zu Qualitätssicherungs-Zwecken regelmässig überprüft werden könnten.

Eine mögliche Variante für die Forschung mit Verbrennungsversuchen ist in [79, 83] in Form der Bildanalyse für die Korngrössenverteilung der Holzschnitzel beschrieben. Diese Methode ist genauer als die Bestimmung mittels Rüttelsieb, wo jeweils ein beträchtlicher Anteil grösserer und länglicher Holzstücke durch das Sieb fällt, die grösser sind als die entsprechende Sieblochgrösse. Die hohen Investitionskosten rechtfertigen eine Anschaffung des Gerätes aber nur bei hoher Auslastung, z.B. für Forschungszwecke, da bloss für Klagefälle und Qualitätskontrollen kaum genügend Bedarf vorhanden ist.

Bei der Bildanalyse kann nebst der Grössenverteilung der Holzschnitzel in Form einer Verteilkurve auch der Kornformfaktor der Holzschnitzel (z.B. lang und dünn oder rund) und somit die Schärfe der Kanten bestimmt werden.

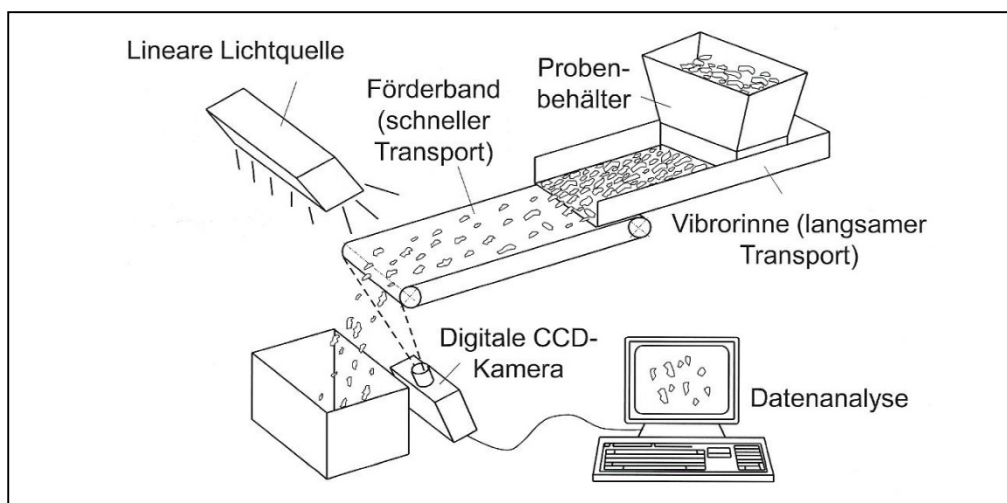


Abbildung 19: Funktionsprinzip der Bildanalyse [79].

Mit einem einfachen Verfahren zur Bestimmung des Feingutanteils und Wassergehaltes – den beiden wichtigsten qualitätsbildenden Faktoren – könnte den Betreibern und Schnitzelproduzenten wesentlich geholfen werden, um mit wenig Aufwand die Holzschnitzelqualität einzuschätzen. Mögliche Kriterien für eine Sichtkontrolle der Holzschnitzel-Qualität sind:

1. Wassergehalt:

- Hand wird nass, Feinanteil bleibt an Hand kleben > feucht
- Kondensationsbildung im Plastikbeutel > sehr feucht
- Feinanteil rieselt, staubt > trocken
- Geruch moderig, feucht > feucht
- Geruch faul, nach Humus > sehr feucht

2. Feingutanteil:

- Siebung Lochsieb mit 3,15 mm Lochdurchmesser
- Mit Holzschnitzeln gefüllter Zylinder schütteln, so dass Feingutanteil unten anfällt
- Hand schmutzig, Feinanteil bleibt kleben > hoher Feinanteil
- Hand bleibt sauber, trocken > geringer Feinanteil
- Verwendung Küchensieb zur Schnellkontrolle > Abschätzung Feinanteil

3. Überlängen/Grobanteil:

- Massstab zum Abmessen mitnehmen
- Zufällig nach Überlängen im Holzschnitzelhaufen suchen und messen
- Sammeln/Überblick über maximale Längen, Anteil Überlängen

4. Fremdanteile:

- Zufällige Kontrolle/Sichtung von Fremdanteilen im Holzschnitzelhaufen
- Fremdanteile dürfen/sollten kaum vorkommen
- Sammeln der Fremdanteile zur Kontrolle/Übersicht

5. Pilzwachstum:

- Weisse Schichten von Schimmelpilzwachstum sichtbar?
- Moderiger, fauler Geruch im Holzschnitzelhaufen?
- Bildung von dichten, abnehmbaren Schichten/Matten mit Pilzmyzel
- Humusbildung und Zersetzung sichtbar? Dunkelbraune Bereiche mit Feinmaterial
- Schleimpilzbildung feststellbar? Schleimige, schlabberige Masse, dunkel oder durchsichtig

6. Kanten der Holzschnitzel:

- Scharfkantige Schnitzel mit klaren, geraden Kanten
> guter Hackprozess mit scharfen Messern
- Zerrissene, zerfranste Schnitzel oder gebrochene Holzteile mit unklaren Kanten /ohne feststellbare Kanten
> schlechter Hackprozess mit unscharfen Messern oder Schredder

7. Weitere Kriterien:

- Ordnung in der Schnitzellagerhalle im Schnitzelsilo: Möglichkeiten der Verunreinigung, Platzverhältnisse, Lagerung weiterer Güter usw.
- Bodentrockener Lagerplatz, genügend Platz für Umschlag und Lieferung der Holzschnitzel

16 Vorschlag Klassifizierung Holzschnitzel

Aufgrund der vorangegangenen Ausführungen und auf der Basis von EN ISO 17225-1 und 17225-4 wird folgender Vorschlag einer Klassifizierung der Holzschnitzel im Hinblick auf einen emissions- und wartungsarmen Betrieb der Anlagen und Geräte gemacht:

	Qualitätsholzschnitzel	Trockenschnitzel	Waldschnitzel vorgetrocknet 100 % ERH	Waldschnitzel Mischung frisch 50 % ERH 50 % Waldrestholz	Waldschnitzel 100 % Waldrestholz	Holzschnitzel aus Landschaftspflege	Rindenschnitzel
Beschreibung	aus Energierundholz, getrocknet und ausge- siebt	aus Energierundholz und wenig Waldrestholz	aus Energierundholz, vorgetrocknet in ungehack- tem Zustand	aus Energierundholz und Waldrestholz, nicht oder kaum vorgetrocknet	aus Waldrestholz, nicht vorgetrocknet	Schnittmaterial von Sträuchern und Astmate- rial, hoher Nadel- und Blattanteil	Rinde geschreddert oder gehackt
Wassergehalt	M20, 15 – 20 %	M30, 15 – 30 %	M50, 30 – 50 %	M50, 30 – 50 %	M55+, 30 – 60 %	M55+, 30 – 60 %	M65+, 30 – 65+ %
Bezeichnung	getrocknet	trocken	feucht	feucht	nass	nass	nass
Lagerfähigkeit	sehr gut	sehr gut	begrenzt	begrenzt	schlecht	schlecht	schlecht
Stückigkeit	P16S: Qualitätsschnit- zel fein P31S: Qualitätsschnit- zel grob	P31S	P31S	P31, P45	P31, P45, P63	P45, P63	P45, P63
Feingutanteil < 3.15 mm *inkl. Nadel und Laubanteile	ausgesiebt F05; < 5 %	ausgesiebt F05; < 5 % oder F10; < 10 %	F10; < 10 %	F25*; < 25 %	F25*; < 25 %	F25*; < 25 %	F5; < 5 %
Aschegehalt mit Fremdanteil	< 1 %	< 3 %	< 3 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Energieinhalt [kWh/Srm]	HH: 950 – 1'100 WH: 650 – 750	HH: 900 – 1'050 WH: 600 – 700	HH: 800 – 1'000 WH: 500 – 700	HH: 700 – 900 WH: 450 – 600	HH: 600 – 800 WH: 400 – 550	HH: 600 – 800 WH: 400 – 550	350 – 600
Feuerungssystem	Kleinfeuerungen, Standardgeräte, Unter- schub- und Festrost- feuerungen	Unterschub- und Vor- schubrostfeuerungen	Unterschub- und Vorschub- rostfeuerungen	Vorschubrostfeuerungen	Vorschubrostfeuerungen	Vorschubrostfeuerungen	Vorschubrostfeuerungen
Leistungsbereich	20 – 200 kW	> 200 kW	> 200 kW	> 200 kW für P31 > 1000 kW für P45	> 200 kW für P31 > 1000 kW für P45 > 3000 kW für P63	> 1000 kW für P45 > 3000 kW für P63	> 1000 kW für P45 > 3000 kW für P63
Begriffe	Energierundholz ERH gezielt aus Stammholz hergestelltes Sortiment und kein Koppel- oder Nebenprodukt der Holzernte oder der Waldpflege, entastet und entwipfelt Waldrestholz Kronen, Ganzbäume ab 7 cm Brusthöhendurchmesser, Schlagabraum, Äste						

Tabelle 10: Vorschlag Klassifizierung Holzschnitzel (HH = Harthölzer, WH = Weichhölzer).

17 Offene Fragen

Die obigen Ausführungen haben gezeigt, dass zu verschiedenen Themen zwar ausreichendes Wissen vorhanden ist, dass aber auch gewisse Fragen noch offen bleiben. Die nachfolgende Tabelle zeigt, wo und in welcher Form noch Handlungsbedarf besteht:

Handlungsbedarfsebene	Problem/Fragen	Lösungsansätze	Aufwand [Arbeitstage]
Grundlagen	Substanzverlust Substanzverlust nach Baumarten (Hartholz/Weichholz)	- Übernahme von Resultaten von zurzeit laufenden Untersuchungen zum Thema wie z.B. Hofmann und Mendel [86] für Nadelholz (Weichholz) - Zusätzliche Literaturrecherche und Expertenbefragungen - Projekt Untersuchung Substanzverlust bei Hartholz	3
	Erstickung (v.a. Buche) - Wirkungsweise - Quantitatives Ausmass - Kritische Lagerdauer und -formen	- Praxis- und Expertenbefragungen - Literaturrecherche	3
Betrieb	Emissionsverhalten Konkreter Zusammenhang zwischen Schnitzelqualität und Emissionswerten, Einfluss der «Emissionswartung»	- Auswertungen Emissionsmessungen bestehender Anlagen - Übernahme von Resultaten von zurzeit laufenden Untersuchungen zum Thema wie z.B. Thudium (Abschluss November 2016 [81]) oder Volgmann (Abschluss Juli 2016 [84]) - Projekt Emissionsverhalten Seriengeräte bei Einsatz verschiedener Holzschnitzel-Qualitäten (Hochschule Luzern, Technik & Architektur Horw, Prof. Nussbaumer)	8
	Wartung und Unterhalt Konkreter Zusammenhang zwischen Schnitzelqualität und Aufwand für Wartung und Unterhalt unter Berücksichtigung des Feuerungssystems	- Auswertung von Betriebsdaten bestehender Anlagen - Untersuchungen Thudium [81] - Umfrage bei Anlagenbetreibern	5
	Austragung und Transport Konkrete Anforderungen verschiedener Schnitzelqualitäten an die Austragungs- und Transportsystem der Anlagen	- Umfrage bei Anlagenbetreibern - Befragungen von Herstellern und Installateuren	4
	Bauliche Massnahmen Bauliche Massnahmen für einen emissions- und wartungsarmen Betrieb, z.B. Schnitzelsumpf, Durchlassöffnung zwischen Silo und Querförderkanal	- Praxiserhebungen - Befragungen von Herstellern, Planern und Installateuren	3
Controlling	Qualitätskontrolle Etablierung einer zentralen Prüfstelle	- Übernahme Methodik nach [58] - Projektskizze QS Support Holzfeuerungen (BAFU)	(BAFU)

Tabelle 11: Übersicht über die verschiedenen Handlungsbedarfsebenen mit den wichtigsten offenen Fragen und dem geschätzten Aufwand für deren Beantwortung.

18 Quellenverzeichnis

- [1] Abächerli, F., Geschäftsführer Verora GmbH: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Neuheim Wies vom 26. August 2015.
- [2] Ahrens, F.: Qualitätssicherung bei der Hackschnitzeltrocknung. Präsentation 3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V. 15. November 2012.
- [3] Amman, M.: Anfall und energetische Nutzung von Schlagabraum aus der Wald- und Landwirtschaft im Kanton Schwyz. Amt für Umweltschutz, Kanton Schwyz. 9. Mai 2008.
- [4] Amstutz, A., Amstutz Holzenergie AG: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch vom 9. Juli 2015.
- [5] Amstutz Holzenergie AG: Holzhackschnitzelsortiment. Emmen, undatiert.
- [6] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Planungshandbuch QM Holzheizwerke. 2. leicht überarbeitete Auflage, C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing. 2008.
- [7] Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: FAQ 36: Neue Klassifizierung von Holzbrennstoffen und Partikelgrößen basierend auf der EN ISO 17225-1: 2014 und der EN ISO 17225-4:2013. Sommer 2015.
- [8] Bärwolff, M., Hering, T.: Fremdenergiefreie Trocknungsvarianten für Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2011.
- [9] Baumgartner, D., Baumgartner & Sohn AG: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Lindau vom 28. Juli 2015.
- [10] Baumgartner, H., Baumgarnter & Sohn AG: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Lindau vom 28. Juli 2015.
- [11] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. 2. Auflage, Freising. 2000.
- [12] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Hackschnitzel-Trocknungsversuch Waldhausen. Versuchsbericht, Freising. 2004.
- [13] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Der Energieinhalt von Holz. LWF Merkblatt 12, Freising. Dezember 2011.
- [14] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. LWF Merkblatt 10, Freising. Mai 2012.
- [15] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF: Hackschnitzel richtig lagern! LWF Merkblatt 11, Freising. Dezember 2014.
- [16] Bayerische Staatsforsten AöR: Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitzeln. Regensburg. Undatiert.
- [17] Biomasseverband Oberösterreich: Infoblatt: Hackguttrocknung. Undatiert.

- [18] Bont, L.: Kundenorientierte Optimierung der Sortiments-Aushaltung bei der Holzernte unter besonderer Berücksichtigung des Energieholzes. Diplomarbeit. ETH Zürich, Professur für Forstliches Ingenieurwesen, Zürich. 28. Februar 2005.
- [19] Brühlmeier, H. (Durena AG): Holzschnitzeltrocknung Regi Holz. Machbarkeitsstudie. Regi Holz GmbH, Oetwil am See. 2009.
- [20] Burger, F.: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft/Firma Polyfelt AG. Hackschnitzel-Trocknungsversuch Wadlhausen. 2004.
- [21] Burvall, J. et al.: Probenahme und Probeteilung von festen Biomassebrennstoffen. Präsentation PHYDADES. undatiert.
- [22] C.A.R.M.E.N: Richtiges Lagern von Holzhackschnitzeln für Heizwerke: Vermeidung von Bränden durch Selbstentzündung. Merkblatt 01/07. C.A.R.M.E.N e.V., Straubing, 2007.
- [23] C.A.R.M.E.N: Trocknung von Energieholz und Getreide mit Biogas-Wärme. C.A.R.M.E.N e.V., Straubing, März 2014.
- [24] Comité Interprofessionnel du Bois Energie (CIBE): Classification professionnelle des combustibles bois déchiquetés. März 2011.
- [25] Durena AG: Machbarkeitsstudie Holzschnitzeltrocknung Regi Holz. Lenzburg. 2009.
- [26] Eckert, T., AEW Energie AG: mündliche Mitteilung anlässlich Telefonbesprechung vom 15. September 2015.
- [27] Elber, U. (Vision Engineering GmbH): Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, Bern. 18. November 2007.
- [28] Flury, S.: Bericht: Anfall und Verwendung von Schlagabraum in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen, 8. Februar 2013.
- [29] Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA): Energiegehalt von Hackschnitzeln – Überblick und Anleitung zur Bestimmung. Versuchsbericht 1998 / 14, Freiburg. 1998.
- [30] Francescato, V., Antonini, E.: Legna e cippato, produzione, requisiti qualitativi e compravendita. AIEL. Legnaoro. 2009.
- [31] Geo Partner AG/Energie & Holz GmbH: Herstellung von Qualitätsschnitzeln durch Hackguttrocknung und Absieben von Feinanteil. ZürichHolz AG, Wetzikon. Oktober 2011.
- [32] Good, J. et al.: NOx-Minderung durch selektive katalytische und nicht-katalytische Reduktion (SCR und SNCR) bei Holzfeuerungen. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Programm Biomasse. August 1999.
- [33] Gujer, M.: Regi Holz GmbH: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Oetwil am See. 9. Juli 2015
- [34] Haller, Y., Haller Feuerungs- und Haustechnik GmbH: Mündliche Mitteilung vom 23. Oktober 2015.

- [35] Höner, G.: Hackschnitzel: Harte Hölzer heizen besser. In: top agrar 7/2006, Münster. 2006.
- [36] Hofer, P. et al.: Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald. Auswertung von Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung. Umwelt-Wissen Nr. 1116, Bundesamt für Umwelt, Bern. 2011.
- [37] Hofmann, N., Mendel, Th.: Qualitätsveränderungen bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln. In: 15. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie. 1./2. Oktober 2015. Augsburg.
- [38] Holzenergie Schweiz: Merkblatt Abrechnung über Wärmezähler
- [39] Holzenergie Schweiz: Rationelle Hackschnitzelbereitstellung im Forstbetrieb. Publikation Nr. 409 – 2013/11 – 2000. 2013.
- [40] Holzenergie Schweiz: Bulletin Nr. 55 – Oktober 2014. Qualität von Holzbrennstoffen. Zürich, Oktober 2014.
- [41] Ingenieurgesellschaft Bühler – IEU – Verenum: Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Forschungsprogramm Biomasse. August 1996.
- [42] Jeisy, M. et al.: Der Kanton Uri arbeitet mit einem neuen Konzept: Treibgut günstiger und ökologischer verwertet. In: Umwelt Perspektiven 2/14, Flawil. 2014.
- [43] Jenal, H.: Holzfeuerungskontrolle <70 kW. Lagerung und Beurteilung des Holzbrennstoffs. Präsentation am AWEL/VZF-Weiterbildungstag 2010. 25./26. Oktober 2010.
- [44] Jenni, A., Ardens GmbH.: Mitteilung vom 13. Juli 2015.
- [45] Jenni, A., Ardens GmbH: mündliche Mitteilung anlässlich Besprechung vom 22. September 2015.
- [46] Jost, L.: Stratégie d'approvisionnement en bois-énergie pour le district de la Sarine. Etat de Fribourg. Service des forêts de de la faune, 1er arrondissement. 2013.
- [47] Kaltschmitt M. et al.: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg, 2001. Abbildung 9.14
- [48] Keel, A.: Amélioration de la commercialisation des plaquettes forestières dans les Districts fribourgeois de la Sarine et de la Glâne. Energie & bois/Claude Limat. Zürich/Prez-vers-Noréaz. 23 janvier 2011.
- [49] Keel, A.: Valorisation et extension de la halle de stockage de plaquettes forestières de Châtillon (Commune d'Hauterive). Proposition à l'attention du Comité de la Corporation forestière du Bas-Gibloux. Energie & bois/Claude Limat. Zürich/Prez-vers-Noréaz. 4 février 2012.
- [50] Keel, A.: Qualität Holzschnitzel Keel Holzhackservice, 8525 Wilen b. Neunforn. Bericht, Interessensgemeinschaft professioneller Holzenergieversorger (IPE), Zürich. 13. Juli 2014.
- [51] Keel, A.: Mit teuren Qualischnitzeln® heizt man nicht teurer. IPE Interessensgemeinschaft professioneller Energieholzversorger. In: Wald und Holz 11/14, Solothurn. 2014.
- [52] Keel, A.: Die Holzfeuerung im urbanen Umfeld: Trockener Brennstoff, eine rentable Lösung. In: Tagungsband 8. Tagung Holzenergie Biel vom 16. Februar 2015.

- [53] Keel, A., Lutz, G., Energie & Holz GmbH: Analyse Aus- und Weiterbildung «Wärme aus Holz». Bundesamt für Energie, Bern. 31. Mai 2015.
- [54] Koch, A.: Wirtschaftlicher Betrieb einer Holzhackschnitzel-Feuerungsanlage (HHSFA) in Verbindung mit zwei Gaskesseln. Diplomarbeit, Giessen. 1994
- [55] Kofler, S., Förster Forstgemeinschaft Gamprin-Ruggell-Schellenberg und Koordinator Energieholz Holzkreislauf Liechtenstein: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Gamprin-Bendern vom 17. August 2015.
- [56] Kost + Partner AG: Emissionsmessung Schnitzelheizung Hegglin Menzingen. 10. Januar 2014.
- [57] Krämer, G., Hess D.: Neue Brennstoffbezeichnung informiert über Qualität. In: Holz-Zentralblatt, Nummer 45, Leinfelden Echterdingen. 7. November 2014.
- [58] Krämer, G., Institut für Brennholztechnik IBT-Krämer: IBT-Richtlinie „Definierte Hackschnitzel“. Spezifizierung, Prüfung und Deklaration von Hackschnitzeln für stoffliche und energetische Zwecke. 20. August 2015.
- [59] Kreimes, H.: Den Wald „verdoppeln“ – Heizwerterhöhung durch Hackschnitzel-Trocknung. Präsentation CARMEN-Kongress „Alternative Rohstoffe für Bioenergie“, Stand 13. November 2008
- [60] Kreimes, H., Lachenmayr, G.: Energietechnik für die Holzindustrie. Eigenverlag Prof. Lachenmayr, Hochschule Rosenheim, Weyarn. 2009.
- [61] Kreimes, H. Hochschule Rosenheim: „Mehr“ Energie-Biomasse durch Hackschnitzel-Trocknung. In: Tagungsband der 6. Tagung Holzenergie Biel vom 16. Februar 2011.
- [62] Kühmaier, M.: Optimierung der Waldhackgutbereitstellung auf regionaler Basis. Referat am 8. Internationalen Seminar für die Holz- und Forstindustrie. 2007.
- [63] Kym, K.: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Diegten vom 16. Oktober 2012.
- [64] Lüscher, Ch., Forstbetrieb Glarus Mitte: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch vom 19. August 2015.
- [65] Lutz, G.: Bestimmung Wassergehalt und Stückigkeit Hackschnitzelprobe Vuisternens-en-Ogoz, Nr.1: Primarschule. Bericht, Holzenergie Schweiz, Zürich. 29. Oktober 2013.
- [66] Lutz, G.: Bestimmung Wassergehalt und Stückigkeit Hackschnitzelprobe Vuisternens-en-Ogoz, Nr.2: Forstbetrieb. Bericht, Holzenergie Schweiz, Zürich. 29. Oktober 2013.
- [67] Lutz, G.: Bestimmung Wassergehalt Hackschnitzelprobe Keel Holzhackservice. Bericht, Holzenergie Schweiz, Zürich. 23. Juni 2014.
- [68] Lutz, G.: Schnitzelqualität als Erfolgsfaktor. Präsentation Fachtagung IPE 2014, Egnach. 7. November 2014.
- [69] Lutz, G.: Bestimmung Wassergehalt Hackschnitzelprobe Forstbetrieb Glarus. Bericht, Holzenergie Schweiz, Zürich. 2. Dezember 2014.

- [70] Moser, B., ZM-Technik für Holz AG: Schnitzelaufbereitung und Trocknung: Beispiele aus Sägereien und Biogasanlagen. In: Tagungsband der 8. Tagung Holzenergie Biel vom 16. Februar 2015.
- [71] Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft (Verbundgesellschaft): Rationalisierung der Bereitstellung von Waldhackgut. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien. 1997.
- [72] Prankl, H., Weingartmann, H.: Forschungsbericht Hackguttrocknung Wippenham. BLT, Wieselburg. 1994.
- [73] Primas, A. et al.: Schweizerische Holzenergiestatistik. Erhebung für das Jahr 2013, Basler & Hofmann AG, Holzenergie Schweiz, Bundesamt für Energie. Bern. 2014.
- [74] Ritter, A.: Verbesserung des Heizwertes durch Optimierung der Bereitstellung von Holzschnitzeln. Semesterarbeit. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil. 2009.
- [75] Ritter, A.: Verbesserung des Heizwertes durch Optimierung der Nutzungsverfahren von Holzschnitzeln. Bachelorarbeit. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil. 2010.
- [76] Roth, U., Roth Holzsnitzel GmbH: mündliche Mitteilung anlässlich Besuch Oberaach vom 19. Juli 2015.
- [77] Staab, J.: Erneuerbare Energien in Kommunen. Energiegenossenschaften gründen, führen und beraten. Springer Fachmedien, Wiesbaden. 2. Auflage, 2013.
- [78] Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4. TFZ-Merkblatt 14BKU002. Stand Juli 2014.
- [79] Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel. Straubing und Freising-Weihenstephan. April 2015.
- [80] Terlecki-Brunnhuber, M.: Trocknung von Hackschnitzeln mittels Abwärme. ÖKL, Wien. 1997.
- [81] Thudium, T.P., Bundesverband BioEnergie e.V. BBE: Brennstoffqualifizierung und Qualitätsmanagement in der Hackschnitzelproduktion. In: 15. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie. 1./2. Oktober 2015. Augsburg.
- [82] Verora GmbH: Projekt: Grüngut für Energie, Klimafarming und Pflegesubstrate nutzen. Betrieb einer Pyreg-Anlage mit Wärmenutzung zur Biomassetrocknung. Präsentation, undatiert.
- [83] Vock, W., Jenni, A.: QS-Support Holzfeuerungen. Schlussbericht 2014 (Stand Juli 2014). BFE, BAFU, UWE-LU, AWEL-ZH, AFU-SG, AFU-SO, AFU-Ur, UGZ-Stadt Zürich, Holzfeuerungen Schweiz SFIH. 2014.
- [84] Volgmann, M., Deutsches Pelletinstitut GmbH DEPI: Wärme mit Zukunft. In: 15. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie. 1./2. Oktober 2015. Augsburg.
- [85] Wald und Holz: So läuft es bei den Grossen. In Wald und Holz: 10/13, Solothurn, 2013.

- [86] Waldwirtschaft Schweiz (WVS) et al.: Schweizer Brenn- und Energieholz-Markt. Energieholzpreise 2014/2015. WVS, Solothurn. 2014.
- [87] Weingartmann, H.: Hackguttrocknung. ÖKL, Wien. 1991.
- [88] Wieland, J., Kaminfeger-Plus GmbH: Mündliche Mitteilung vom 27. Oktober 2015.
- [89] Zelinski, V., Loewen, A. (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst HAWK, Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen): Qualität von Holzhackschnitzeln – Analytik/Klassifikation/Normierung. Präsentation Mitgliederversammlung Arbeitskreis Energieholz, Schwarmstedt. 2. Februar 2008.