



**Universität für Bodenkultur Wien**  
Department für Wald- und Boden-  
wissenschaften

# **Solare Hackgutrocknung mit Luftkollektoren**

## **Diplomarbeit**

Erstellt von:

Eva Bossert

Betreuerteam:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Karl Stampfer

Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Gernot Erber

Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
Institut für Forsttechnik

Wien, November 2016

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>6</b>
1.1 Problemstellung .....	6
1.2 Zielsetzung.....	7
<b>2. STAND DES WISSENS</b> .....	<b>8</b>
2.1 Definitionen.....	8
2.1.1 Wassergehalt.....	8
2.1.2 Holzfeuchte.....	8
2.1.3 Rohdichte .....	9
2.1.4 Darrdichte .....	9
2.1.5 Schüttdichte .....	9
2.1.6 Festmeter.....	9
2.1.7 Raummeter .....	10
2.1.8 Schüttraummeter .....	10
2.1.9 Atro-Tonne.....	10
2.1.10 Lutro-Tonne .....	10
2.1.11 Heizwert.....	10
2.1.12 Brennwert .....	11
2.1.13 Energiegehalt.....	11
2.1.14 Trocknungsgefälle .....	12
2.1.15 Hackschnitzel.....	12
2.2 Bindung von Wasser im Holz .....	13
2.2.1 Wasseraufnahme und -abgabe von Holz.....	14
2.2.2 Trocknungsvermögen von Luft .....	15
2.2.3 Strömungswiderstand .....	16
2.2.4 Belüftungsmenge und Luftführung.....	17
2.3 Risiken bei der Lagerung von Hackschnitzeln .....	18
2.4 Solare Trocknung und -systeme .....	19
2.5 Natürliche Trocknungsverfahren .....	20
2.5.1 Konvektion und Selbsterwärmung .....	20
2.5.2 Trocknung durch gesteuerte Mikrobiologie .....	21

2.6 Technische Trocknungsverfahren .....	21
2.6.1 Belüftungskühlung .....	21
2.6.2 Belüftungstrocknung .....	21
2.6.3 Warmlufttrocknung.....	21
2.6.4 Heißlufttrocknung.....	22
<b>3. MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>23</b>
3.1 Die solare Trocknung nach CONA.....	23
3.2 Ergebnisse „Solare Trocknung - Strategie 2020, Zwischenbericht" .....	26
3.3 Datenerhebung .....	27
3.3.1 Erhebungskonzept.....	27
3.4 Datenaufbereitung und -auswertung.....	28
<b>4. ERGEBNISSE.....</b>	<b>30</b>
4.1 Die Betriebe allgemein .....	30
4.2 Betriebshintergrund und Wirtschaftsart .....	30
4.3 Anlagenausstattung .....	32
4.4 Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung .....	32
4.5 Materialherkunft und Klassifizierung .....	33
4.6 Anfangs- und Endwassergehalt des Hackgutes.....	34
4.7 Trocknungsleistung .....	35
4.8 Auslastung der Anlage und Trocknungsdauer .....	35
4.9 Stromverbrauch .....	36
4.10 Manipulationsaufwand und -mittel.....	36
4.11 Kosten Materialzukauf.....	38
4.12 Heizungsausstattung.....	38
4.13 Materialinput und Wärmemengenoutput .....	38
<b>5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>	<b>40</b>
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>46</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>49</b>
<b>8. ANHANG.....</b>	<b>53</b>
8.1 Abbildungsverzeichnis .....	53
8.2 Tabellenverzeichnis .....	54
8.3 Erhebungsbogen - Solare Hackguttrocknung .....	55

## ABSTRACT

If fuel wood is stored in the form of chips, high moisture content entails degradation, health and self-ignition risks. Thus efficient methods for drying wood chips are vital. The present study evaluated the productivity of a solar drying system for wood chips developed by CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschafts mbH. This system consists of solar-air collector panels, mounted on a roof, where air is heated up and then blown through wet wood chips, which are placed on sloping, perforated gratings inside the drying box.

Thirty drying plants, 12 in Bavaria and 18 in Upper Austria, were part of the survey. Installed panel ranged from 24 to 348 m<sup>2</sup>, drying box volume from 40 to 200 m<sup>3</sup> loose and the yearly drying capacity from 300 to 5.000 m<sup>3</sup> loose.

Dry chips are mainly produced for owner's consumption and sale. In average, 17 m<sup>3</sup> loose can be dried per m<sup>2</sup> of installed solar panel and year, resulting in an average final moisture content of 15 %. During the season of spring through autumn drying one lot of chips takes 1.5 to 3 weeks. It is possible to dry 21 lots per year. Manipulation takes about 2 hours per lot, resulting in costs of €0.50-2.00 per loose cubic meter. For ventilation, in average 3.9 kWh electric power are required per m<sup>3</sup> loose, which is equivalent to costs of €1.00 per m<sup>3</sup> loose. From one m<sup>3</sup> loose of dry chips in average 0.7 MWh of heat can be produced, while 1.6 m<sup>3</sup> loose of dry chips are consumed per produced MWh.

In conclusion, this drying method proved to be very eco-efficient. Dry chips entail energy and fuel savings, improved storability, reduced degradation and fungal contamination and reduce the self-ignition risk to a minimum.

Keywords: wood chips, solar drying, fuel wood, wood fuel preparation

## KURZFASSUNG

Mit steigendem Wassergehalt sinken sowohl die Qualität als auch der Energiegehalt von Hackschnitzeln. In Zusammenarbeit mit der Firma CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschafts mbH sollte deren patentiertes solares Hackguttrocknungssystem mit Luftkollektoren untersucht werden. Luft wird über dachintegrierte Solarkollektoren angewärmt und durch einen Belüftungsboden in das in einer Trocknungsbox gelagerte feuchte Hackgut eingeblasen, um ihm Wasser zu entziehen.

Ziel dieser Arbeit war es, herauszufinden, welche Trockenleistung in welcher Trocknungsdauer erreicht werden kann, welcher Manipulationsaufwand dahintersteht und wie der energetische und ökonomische Mehrwert aussieht.

Insgesamt wurden 30 (12 in Bayern und 18 in Oberösterreich) hauptsächlich bäuerliche Betriebe besucht. Diese waren mit einer Kollektorfläche von 24-348 m<sup>2</sup>, einer Boxengröße von 40-200 Schüttraummeter [Srm] ausgestattet und hatten eine Jahrestrocknungskapazität von 300-5000 Srm.

Pro m<sup>2</sup> installierte Kollektorfläche können 17 Srm pro Jahr auf einen Wassergehalt von etwa 15 % getrocknet werden. Es kann ganzjährig getrocknet werden, wobei aber der Zeitraum Frühjahr bis Herbst mit einer Trocknungsdauer von 1,5-3 Wochen pro Charge am günstigsten ist. Etwa 21 Chargen können pro Jahr und Betrieb getrocknet werden. Der Manipulationsaufwand beträgt etwa 2 Stunden pro Charge, die Manipulationskosten €0,50-2,00 pro Srm. Der durchschnittliche Stromverbrauch der Anlage liegt bei 3,9 Kilowattstunden [kWh] pro Srm, die Stromkosten bei €1,00 pro Srm. Durchschnittlich müssen 1,6 Srm trockenes Hackgut pro Megawattstunde [MWh] verfeuert werden. Vice versa ergibt dann ein Srm 0,7 MWh.

Durch die Trocknung des Hackgutes ist es möglich, die Lagerfähigkeit zu verbessern und Trockenmasseverluste während der Lagerung zu reduzieren. Darüber hinaus sinkt auch das Risiko der Schimmelpilzbildung und Selbstentzündung. Die energiesparende und effiziente Arbeitsweise ermöglicht es, die Qualität von Hackgut deutlich zu verbessern.

Schlagwörter: Hackschnitzel, solare Trocknung, Energieholz, Energieholzaufbereitung

## **VORWORT**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Personen, Bekannten und Freunden bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Diplomarbeit behilflich waren und mit Rat und Tat zur Seite standen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Karl Stampfer und Herrn Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Gernot Erber, die mich bei der Beantwortung jeglicher Fragen unterstützten, stets ein offenes Ohr und Lösungsvorschläge für auftretende Probleme hatten und viel Geduld bewiesen. Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Forsttechnik herzlich bedanken, die mir eine große Hilfe waren und deren Ansätze mir oft eine alternative Betrachtungsweise ermöglichten.

Mein weiterer Dank gilt der Firma CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschaft mbH sowie den an der Untersuchung teilnehmenden Anlagenbetreibern. Diese Zusammenarbeit und Mitwirkung machte diese Diplomarbeit erst möglich.

Ich danke Familie Endisch für ihre Anregungen, ihre kritische Hinterfragung, ihre Diskussionsbereitschaft sowie moralische Unterstützung während der Arbeit und darüber hinaus.

Mein größter Dank gebührt meiner Familie. Sie ermöglichte mir nicht nur dieses Studium, sondern war und ist mir stets meine Stütze, mein Halt, mein Fels in der Brandung meines Lebens.

In liebevollem Gedenken an meinen Vater, Alexander Bossert.

# 1. EINLEITUNG

## 1.1 Problemstellung

Im Jahr 2014 lag der Endenergieverbrauch des Landes Österreich bei 1334 Petajoule [PJ], aufgeteilt nach den Energieträgern Erdöl (37 %), erneuerbare Energien (32 %), Erdgas (20 %), Kohle (9 %) und brennbare Abfälle (2 %). Die erneuerbaren Energien (30 % entsprechen 400 PJ) setzen sich aus 56 % Bioenergie, 37 % Wasserkraft und 7 % sonstigen Erneuerbaren (Wind, Solarthermie, Photovoltaik, Geothermie und Wärmepumpen) zusammen. Die Bioenergie (224 PJ) wird großteils aus Hackschnitzel, Sägenebenprodukten, Rinde (36 %), aus Brennholz (22 %), Ablauge (13 %) sowie sonstigen Biogenen (12 %; Tiermehl, Klärschlamm oder Stroh) erzeugt. Kleinere Anteile entfallen auf flüssige Biogene (4 %), Pellets und Holzbriketts (6 %), gasförmige Biogene (5 %) und biogene Abfälle (1 %). Um diese Menge an Bioenergie zur Verfügung zu stellen sowie aufgrund des inländischen Biomassepotentials, wird dafür hauptsächlich feste Biomasse verfeuert.

So wurden im Jahr 2014 24 Millionen [Mio] Festmeter [fm] des Gesamtholzaufkommens und -einschlags von Österreich energetisch verwendet (ÖSTERREICHISCHER BIOMASSEVERBAND, 2016). Laut Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2014) lag dieser Anteil im Jahr 2012 noch bei 25,2 Mio. fm. Diese Veränderung ist vor allem daran festzumachen, dass der Ölpreis gesunken, die letzten Winter deutlich milder ausgefallen sowie die Biomassepreise gestiegen sind (BIERMAYR, 2015).

Es ist anzunehmen, dass sich der momentan abnehmende Trend wieder in die entgegengesetzte Richtung entwickelt, da Erdöl zu den endlichen Ressourcen gehört und zunehmend eine Substitution dieser durch regenerative Energieträger erfolgt und erfolgen muss. So sollten jetzt bereits Voraussetzungen dafür geschaffen werden, vor allem die festen Biobrennstoffe für die energetische Nutzung optimal aufzubereiten, dass heutige und zukünftige Betreiber von Biomassefeuerungen mit dem kleinstmöglichen Input den größtmöglichen (Wärme-)Output erzielen können. Somit könnte ein schonender Umgang mit den erneuerbaren Energien gewährleistet werden.

Hackschnitzel gehören zur festen Biomasse und werden aus holzartiger Biomasse wie zum Beispiel Durchforstungs- oder Waldrestholz hergestellt. Die Zerkleinerung des Holzes, das Hacken, findet hauptsächlich im Sommer statt, da im Winter der Arbeitsaufwand sowohl witterungs- als auch erschließungsbedingt höher ist. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass das Holz nicht sofort weiterverarbeitet, sondern während der Sommermonate als Rundholz oder Schlagabraum gelagert wird. In dieser Zeit setzt die natürliche Trocknung des Holzes ein, die den Wassergehalt von 50 % auf 30 % und sogar auf bis zu 20 % senken kann. Da aber erst in Herbst und Winter ein Bedarf nach diesem Material entsteht, kommt es zum einen zur Wiederbefeuchtung und zum anderen führt ein Wassergehalt über 20 % zu biologischen Aktivitäten im Holz. Diese fördern das Pilzwachstum sowie den Trockenmasseverlust und reduzieren somit den Energiegehalt deutlich.

Auch stellt die verminderte Lagerfähigkeit durch einen zu hohen Wassergehalt vor allem in milden Wintern ein Problem dar (ERBER et al., 2015 und ERBER et al., 2012 und ROUTA et al., 2015).

Von Vorteil wäre eine Trocknungsmethode, die unabhängig von Umwelteinflüssen, das Holz dauerhaft lagerfähig macht und damit das Risiko der Wiederbefeuchtung, des Trockenmasse- und Energiegehaltsverlustes gering hält. Desweiteren sollte dieses Verfahren eine kurze Trocknungsdauer haben, um in Bedarfszeiten schneller und auf Marktentwicklungen reaktionsfähiger zu sein (ERIKSSON, 2011 und FOREST RESEARCH, 2011).

Eine Möglichkeit ist die Nutzung technischer Trocknungsmethoden. Diese sind aber mit einem erheblichen Energie-, Kosten- und Ausstattungsaufwand verbunden, sofern keine bestehende Abwärme dafür verwendet werden kann. Eine andere Möglichkeit ist die solare Trocknung. Diese hat sich bereits vor mehr als 20 Jahren als umweltverträgliche und nachhaltige Methode herausgestellt. Für zeitgemäße Anlagen sind aber keine aktuellen Erkenntnisse in Bezug auf Trocknungsleistung, Trocknungsdauer, (Kosten-)Aufwand sowie Energieverbrauch vorhanden.

Das Projekt „Solare Trocknung - Strategie 2020“ hatte zum Ziel, einen Teil dieser Wissenslücke zu schließen. Dazu wurde ein bereits auf dem Markt etabliertes System für solare Trocknung der CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschaft mbH untersucht. Basierend auf einer im Februar 2015 beendeten Voruntersuchung („Konzeptphase“), soll diese Arbeit die in der Voruntersuchung gewonnen Erkenntnisse verifizieren und eine solide Grundlage für die Beurteilung des Trocknungssystems schaffen.

## 1.2 Zielsetzung

Aufgrund der o.g. Problemstellung sollen im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel des CONA-Trocknungssystems folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche Trocknungsleistungen erzielen die zeitgemäßen solaren Trocknungsanlagen und wie viel Energie verbrauchen sie dabei?
2. Wie hoch ist der Aufwand für die Manipulation des Trocknungsgutes?
3. Wie wirkt sich das getrocknete Hackgut auf die Leistung der damit betriebenen Kessel aus?
4. Inwieweit unterscheiden sich die Ergebnisse der breiteren Erhebung von jenen der Konzeptphase und was könnten die Gründe dafür sein?



## 2. STAND DES WISSENS

### 2.1 Definitionen

#### 2.1.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt [w] ist der Gehalt an Wasser, der sich unter definierten Bedingungen aus dem Brennstoff entfernen lässt. Der Wassergehalt wird in Prozent [%] angegeben (KALTSCHMITT et al., 2009).

$$w = \frac{\text{Wassermasse im Brennstoff } m_w}{\text{Trockenmasse im Brennstoff } m_b + \text{Wassermasse im Brennstoff } m_w} \times 100$$

oder

$$w = \frac{u \times 100}{u + 100}$$

#### 2.1.2 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte [u] ist der Anteil des im Brennstoff gebundenen Wassers, bezogen auf die Trockenmasse des Brennstoffes. Die Holzfeuchte wird in Prozent [%] angegeben (KALTSCHMITT et al., 2009).

$$u = \frac{\text{Wassermasse im Brennstoff } m_w}{\text{Trockenmasse im Brennstoff } m_b} \times 100$$

oder

$$u = \frac{w \times 100}{w - 100}$$

Tabelle 1: Verhältnis Werte Holzfeuchte zu Werte Wassergehalt (nach BIOMASSEVERBAND OÖ, o.J.)

Holzfeuchte in %	Wassergehalt in %	Holzfeuchte in %	Wassergehalt in %
0,0	0,0	85,0	46,0
5,0	4,8	90,0	47,4
10,0	9,1	95,0	48,7
15,0	13,0	100,0	50,0
20,0	16,7	105,0	51,2
25,0	20,0	110,0	52,4
30,0	23,1	115,0	53,5
35,0	25,9	120,0	54,6
40,0	28,8	125,0	55,6
45,0	31,0	130,0	56,5
50,0	33,3	135,0	57,5
55,0	35,5	140,0	58,3
60,0	37,5	145,0	59,2
65,0	39,4	150,0	60,0
70,0	41,2	170,0	63,0
75,0	42,9	200,0	66,7
80,0	44,4		

### 2.1.3 Rohdichte

Als Rohdichte bezeichnet man die eigentliche Materialdichte eines Brennstoffes, ohne Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Teilchen (KALTSCHMITT et al., 2009).

### 2.1.4 Darrdichte

Die Darrdichte eines Brennstoffes ist als Rohdichte im absolut trockenen Zustand definiert (KALTSCHMITT et al., 2009). Sie gibt Aufschluss über das Gewicht je Volumeneinheit im absolut trockenen Zustand (WITTKOPF, 2005).

### 2.1.5 Schüttdichte

Die Schüttdichte ergibt sich aus dem Quotient der Masse des in einen Behälter eingefüllten Brennstoffes und dem Volumen dieses Behälters. Darüber hinaus werden die Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen nicht vom Volumen abgezogen (KALTSCHMITT et al., 2009).

### 2.1.6 Festmeter

Der Festmeter [fm] ist die Maßeinheit für einen Kubikmeter feste Holzmasse (BRUSCHE, 1983).

Tabelle 2: Umrechnungsfaktoren für Raummaße bezogen auf die unterschiedlichen Grundsorimente (nach HAHN et al., 2014).

Rundholz in Festmeter (fm)	Schichtholz in Ster oder Raummeter (rm)	Hackschnitzel in Schüttraummeter (SRM)
1 fm	1,4 rm	2,5 Srm
0,7 fm	1 rm	1,8 Srm
0,4 fm	0,5 rm	1 Srm

### 2.1.7 Raummeter

Der Raummeter [rm] ist die Maßeinheit für geschichtete Holzteile, die unter Einschluss der Luftzwischenräume ein Gesamtvolumen von einem Kubikmeter füllen (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2009).

### 2.1.8 Schüttraummeter

Der Schüttraummeter [Srm] ist die Maßeinheit für einen Raummeter geschüttete Holzteile, wie zum Beispiel Hackgut (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2009).

### 2.1.9 Atro-Tonne

Eine Atro-Tonne [t-atro] ist die Maßeinheit für die Masse von einer Tonne absolut trockenem Holz (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2009).

### 2.1.10 Lutro-Tonne

Eine Lutro-Tonne [t-lutro] ist die Maßeinheit für die Masse von einer Tonne Holz mit dem jeweiligen Wassergehalt (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2009).

### 2.1.11 Heizwert

Der (untere) Heizwert [ $H_u$ ] eines Brennstoffes ist die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffes freigesetzt wird. Die Kondensations- bzw. Verdampfungswärme des Wasserdampfes, der im Abgas vorhanden ist, wird dabei nicht berücksichtigt. Die SI-Einheit des Heizwertes ist Joule [J] (KALTSCHMITT et al., 2009).

$$H_u = \frac{H_{u,wf}(100 - w) - 2,443w}{100}$$

$H_{u,w}$ : Heizwert in MJ/kg bei einem Wassergehalt von  $w$

$H_{u,wf}$ : Heizwert der wasserfreien Substanz in MJ/kg

2,443: Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25°C

**Tabelle 3: Richtwerte für Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt der Holzbrennstoffe (nach VOGT et al., 2010).**

Wassergehalt in %	Heizwert in kWh/kg
0	5,1
8	4,6
15	4,2
20	3,9
30	3,4

**Tabelle 4: Richtwerte für Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt eines Schüttraummeters Hackgut (Trockenmassegewicht 180 kg) (nach HELIN, 2005).**

Wassergehalt in %	Heizwert in kWh/Srm
10	940
20	920
30	890
40	850
50	800

### 2.1.12 Brennwert

Als Brennwert [ $H_o$ ] bezeichnet man die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffes freigesetzt wird. Im Unterschied zum Heizwert, wird hier die Kondensationswärme des Wasserdampfes, der sich bei der Verbrennung bildet, berücksichtigt und nutzbar gemacht. Die SI-Einheit des Brennwertes ist ebenfalls Joule [J] (KALTSCHMITT et al., 2009).

$$H_{o,w} = \frac{H_{o,wf} (100 - w)}{100}$$

$H_{o,w}$ : Brennwert in MJ/kg bei einem Wassergehalt von  $w$

$H_{o,wf}$ : Brennwert der wasserfreien Substanz in MJ/kg

### 2.1.13 Energiegehalt

Der Energiegehalt ist laut ÖNORM EN ISO 16559 die Energiemenge je Masse- oder Volumeneinheit, die bei vollständiger Verbrennung freigesetzt wird (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2014). Im Bezug auf das Holzgewicht ist der Energiegehalt von der Holzart und dem Wassergehalt, im Bezug auf das Holzvolumen von der Holzdicke, dem Wassergehalt sowie dem Packungsfaktor abhängig. Letzterer wird wiederum von der Dimension der Hackschnitzel und der Einlagerungs- bzw. Beladungsmethode beeinflusst. Entscheidet man sich für den Energiegehalt je Masseinheit, so erhält man bei einem Wassergehalt von 0 % einen durchschnittlichen Wert von 5,03 kWh/kg bzw. 1050 kWh/Srm für Laubhölzer und 5,38 kWh/kg bzw. 700 kWh/Srm für Nadelhölzer (VERSCHEURE, 1998).

**Tabelle 5: Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt von Nadel- und Laubholz (nach HAHN et al., 2014).**

Wassergehalt in %	Heizwert Nadelholz in kWh/kg	Heizwert Laubholz in kWh/kg
0	5,2	5,0
15	4,3	4,2
20	4,0	3,9
30	3,4	3,3
40	2,9	2,7
50	2,3	2,2

**Tabelle 6: Heizwerte bei unterschiedlichen Wassergehalten verschiedener Baumarten (nach HAHN et al., 2014).**

Wassergehalt in %	Heizwert Fichte in kWh/Srm	Heizwert Kiefer in kWh/Srm	Heizwert Buche in kWh/Srm	Heizwert Eiche in kWh/Srm	Heizwert Pappel in kWh/Srm
0	788	896	1116	1142	706
15	770	876	1090	1115	689
20	762	866	1077	1102	681
30	745	847	1052	1077	666
50	685	779	964	987	610

### 2.1.14 Trocknungsgefälle

Das Trocknungsgefälle [TG] ist als Maß für die Geschwindigkeit der Holz Trocknung definiert.

$$TG = \frac{u}{u_{gl}}$$

$u_{gl}$ : Gleichgewichtsfeuchte (ø 17%)

Je schneller bzw. je größer das Trocknungsgefälle, umso anfälliger ist das Trocknungsgut für spannungsbedingte Trocknungsfehler wie Risse oder Verschalungen (WAGENFÜHR et al., 2008).

### 2.1.15 Hackschnitzel

Holz hackschnitzel sind laut ÖNORM EN ISO 16559 Teil des forstlichen Brennstoffs. Dieser wird nach einem mechanischen Verfahren direkt aus holzartiger Biomasse wie z.B. Waldholz oder Kurzumtriebsplantagen hergestellt. Es gilt zu beachten, dass das Rohmaterial vorher nicht anderweitig verwendet wurde (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2014). Desweiteren gehört laut DIN EN ISO 17225-1 Biomasse von Bäumen (z.B. Vollbäume mit und ohne Wurzeln, Stammholz), Büschen und Gebüsch, Waldrestholz oder Durchforstungsrückständen, Stümpfen, Wurzeln, Rinde, chemisch unbehandeltes Industrie-Restholz mit oder ohne Rinde und Gebrauchtholz mit oder ohne Rinde sowie definierte oder undefinierte Mischungen daraus zur holzartigen Biomasse (DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2014). Holz hackschnitzel aus chemisch unbehandeltem Industrie-Restholz fällt als Nebenprodukt (z.B. Kappholz, Schwarten, Spreißel, Sägespäne) der Holzverarbeitenden Industrien an (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2014). In ÖNORM ISO EN 17225-4 erfolgt eine Klassifizierung von Holz hackschnitzeln für eine nicht industrielle Verwendung. Die typische Partikelgröße der Holz hackgutstücke ist im Bereich zwischen 5-100(150) mm festgelegt. Hergestellt werden diese üblicherweise durch eine mechanische Behandlung (Hacken) der o.g. holzartigen Biomasse mit scharfen Werkzeugen wie Messern (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2014). Die ÖNORM C 4005 stellt eine vereinfachte Klassifizierung der o.g. ÖNORM dar. Denn es wird kein Material aus chemisch unbehandeltem Industrie-Restholz und Gebrauchtholz sowie einer definierten oder undefinierten Mischung aus o.g. holzartiger Biomasse zur Herstellung von Holz hackgut und (grobem) Schredderholz verwendet.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Handelsformen besteht darin, dass Hackgut als maschinell mit scharfen Werkzeugen zerschnittenes Holz mit oder ohne Rinde verstanden wird (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2016). Schredderholz hingegen gilt als maschinell zerkleinertes Holz, bestehend aus Stücken unterschiedlicher Größe und Gestalt, ebenfalls mit oder ohne Rinde, hergestellt mit stumpfen Werkzeugen (z.B. Walzen, Hämmern, Schlegeln) (AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE, 2014).

Desweiteren ist Holzhackgut in Fein-, Mittel- und Grobhackgut unterteilt, da die Größenklassen jeweils Einfluss auf Fließ-, Riesel-, Transport- sowie Lagereigenschaften des Brennstoffs haben (FOCKE et al., 2014).

## 2.2 Bindung von Wasser im Holz

Da Holz ein kapillarporöses System ist, kann sich Wasser sowohl in den Makro- als auch in den Mikroporen der Zellwände einlagern. Man unterscheidet dabei drei Grenzzustände:

1. Der darrtrockene Zustand des Holzes. Indiz hierfür ist, dass kein Wasser mehr im Holz vorhanden ist und die Holzfeuchte somit bei 0 % liegt.
2. Das fasergesättigte Zustand des Holzes. Hierbei ist das gesamte Mikroporensystem maximal mit Wasser angefüllt. Die Holzfeuchte liegt, je nach Holzart, zwischen 28 % und 32 %.
3. Der wassergesättigte Zustand. Dabei ist nicht nur das Mikro-, sondern auch das Makroporensystem maximal angefüllt mit Wasser. Die Holzfeuchte liegt, je nach Dichte des Holzes, zwischen 770 % [sic] und 31 %.

Zudem unterscheidet man zwei Bindungsarten von Wasser in Holz. Gebundenes Wasser wird durch Sorption (chemisch, physikalisch, kapillar) bis hin zum fasergesättigten Zustand aufgenommen. Darüber hinaus aufgenommenes Wasser wird als freies Wasser bezeichnet (WAGENFÜHR et al., 2008). Die Bindungsintensität der unterschiedlichen Bindungskräfte, die das Wasser im organischen Material (wie Biomasse oder Holz) festhalten, nimmt von der Kapillarsorption über die Elektro-/Physisorption bis hin zur Chemisorption stetig zu und muss dann durch die Trocknung überwunden werden (KALTSCHMITT et al., 2009). Das bedeutet, dass mit sinkendem Wassergehalt und steigenden Bindungskräften immer mehr Energie für den Trocknungsprozess aufgewendet werden muss, um dem Holz weiteres Wasser zu entziehen. Somit hat die Bindungsintensität bedeutenden Einfluss auf den Trocknungsfortschritt und den Trocknungsaufwand (GOLSER et al., 2005).


Bindung	Wassergehalt in %	Merkmale	Zunahme der Bindungsintensität
Kapillarsorption und Adhäsion	> 25	freies, ungebundenes Wasser in den Zellhöhlräumen und Gefäßen; gebundenes Wasser in den Holzfasern	
Fasersättigungspunkt	19-25	Wasser in den Holzfasern (Zellwänden) gebunden; Schwinden des Holzes beginnt bei Wasserentzug	
Kapillarsorption	13-25	Wasser kolloidal gebunden; Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte	
Elektro-/Physisorption	5,7-13	Wasser an der Mizelle durch elektrische Kräfte (Van-der-Waals-Kräfte) gebunden	
Chemisorption	0-5,7	Molekulare Anziehungskräfte (Anlagerung von Wassermolekülen an die hydrophilen Gruppen, wie Hydroxyl-, Carboxyl-, Carbonylgruppen)	

Abbildung 1: Arten der Wasserbindung im Holz (nach BRUSCHE, 1983).

### 2.2.1 Wasseraufnahme und -abgabe von Holz

Holz ist hygroskopisch. Das heißt, es nimmt Wasser aus der Luft mittels Adsorption auf und gibt es durch Desorption wieder an diese ab. Dies ist bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % möglich, da dann der faser gesättigte Zustand erreicht ist (WAGENFÜHR et al., 2008).

Jeder Kombination von Temperatur und relativer Luftfeuchte ist eine spezifische Holzfeuchte zugeordnet, die sich zwischen den Holzarten unterscheidet (NIEMZ, 2006).

Sinkt die relative Luftfeuchtigkeit, spricht man von Desorption. Unterhalb des Fasersättigungspunktes ist der sogenannte Hysterese-Effekt zu beobachten, wie Abbildung 2 zeigt. Dieser bedeutet, dass bereits trockenes Holz unter denselben Bedingungen Feuchtigkeit langsamer aufnimmt, als es sie abgegeben hat (WAGENFÜHR et al., 2008). Das heißt, trockenes Holz leistet einer Wiederbefeuchtung Widerstand, was wiederum von Interesse für die Trocknung und Lagerung von Energieholz ist (GOLSER et al., 2005).

Ebenfalls unterhalb des Fasersättigungspunktes erfolgt der Feuchtetransport mittels Diffusion, oberhalb des Fasersättigungspunktes mit Hilfe der Kapillarphysik. Anders gesagt, das Holz nimmt flüssiges Wasser durch Kapillarkräfte auf (WAGENFÜHR et al., 2008).

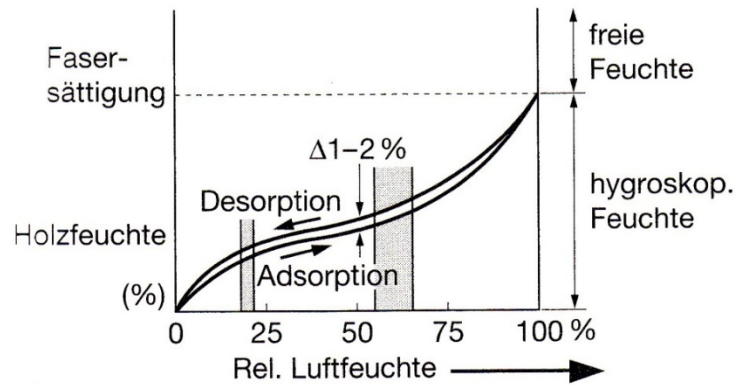


Abbildung 2: Hysterese-Effekt (NIEMZ, 2006).

### 2.2.2 Trocknungsvermögen von Luft

Bei der Trocknung durch Konvektion wird das Trocknungsmedium (z. B. Luft, Abgas, Dampf) durch oder auch über das Trocknungsgut hinweg geleitet. Dabei ist dessen Wasseraufnahmefähigkeit entscheidend. Je wärmer und trockener Luft ist, desto mehr Wasser(dampf) kann sie aufnehmen. Sobald also Luft das feuchte Gut durchströmt, strebt diese einen Gleichgewichtszustand an. Die Belüftung wird solange fortgesetzt, bis sich keine weiteren Veränderungen in der Luftfeuchte oder im Wassergehalt des Gutes mehr ergeben, diese konstant sind. Der Wassergehalt, der erreicht werden kann, ist von der Herstellung eines Gleichgewichtszustandes am Ende eines Trocknungsvorganges sowie von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Trocknungstemperatur abhängig (KALTSCHMITT et al., 2009). Abbildung 3 zeigt die Änderung der Gleichgewichtsfeuchte bei einer Änderung der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft bei konstanter Temperatur.

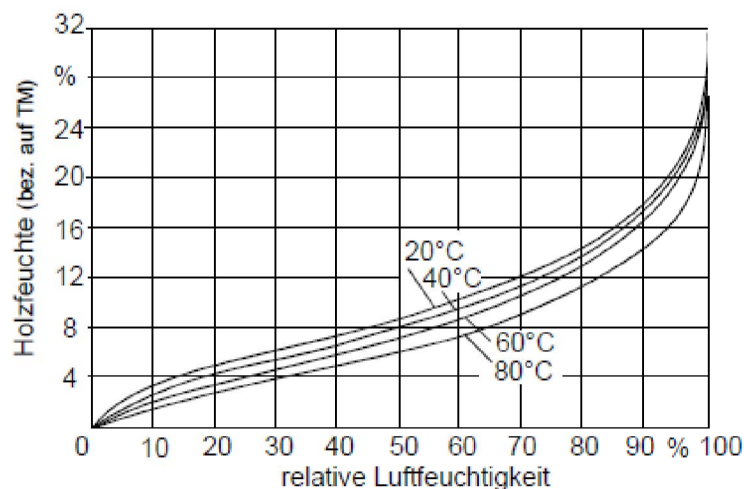


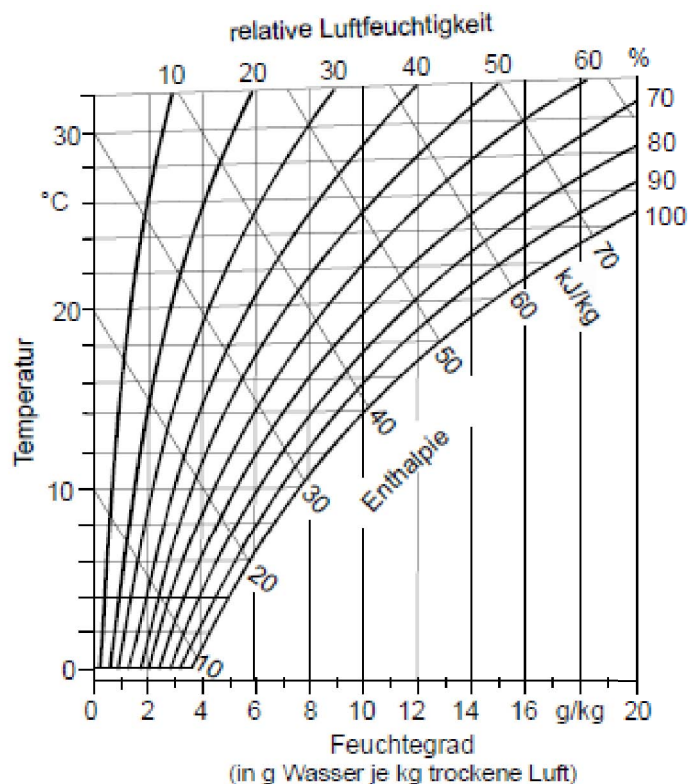
Abbildung 3: Gleichgewichtsfeuchte von Holz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft bei konstanter Temperatur (KALTSCHMITT et al., 2009).

Die relative Luftfeuchtigkeit gibt an, wie viel Prozent des maximal möglichen Wasserdampfgehaltes in der Luft bei einer bestimmten Temperatur beinhalten sind. Daraus folgt, dass in 1 m<sup>3</sup> Luft bei einer Lufttemperatur von 0°C maximal 4,8 g Wasser, bei 10°C maximal 9,4 g und bei 20°C maximal 17,3 g Wasser enthalten sind.

Wenn also die Temperatur der Luft steigt, dann sinkt die relative Luftfeuchtigkeit und es kann mehr Wasserdampf aufgenommen werden. Wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % erreicht, ist keine Wasseraufnahme aus der Luft zu keiner Temperatur mehr möglich.



Bilden der maximale und der aktuelle Wassergehalt eine Differenz, so nennt man dies Sättigungsdefizit. Das Sättigungsdefizit wird kleiner, je weiter man die Luft herunter kühlt, bis diese mit Wasser gesättigt ist. Bei einer weiteren Abkühlung kann die Luft den Wasserdampf nicht mehr halten und es kommt zur Taubildung bzw. Kondensation (GOLSER et al., 2008).



**Abbildung 4:** h-x-Diagramm nach Mollier zeigt die Abhängigkeiten von Temperatur, Wassergehalt, relativer Luftfeuchtigkeit, Energiegehalt der Luft zur Bestimmung der Wasseraufnahme der Trocknungsluft (KALTSCHMITT et al., 2009).

„Die Trocknung kann ganz allgemein auch als thermischer Trennprozess aufgefasst werden, bei dem einem Feststoff (Holz) eine Flüssigkeit (Wasser) entzogen wird.“ (WAGENFÜHR et al., 2008). Das bedeutet also, dass bei der Holz Trocknung dem Holz Feuchte entzogen wird, indem diese in Dampf umgewandelt und abgeführt wird. Ziel ist es, den Feuchtigkeitsgehalt im Holz soweit zu verringern, dass dieses für eine weitere Nutzung wie Transport, Lagerung oder Weiterverarbeitung optimal zur Verfügung steht (WAGENFÜHR et al., 2008).

### 2.2.3 Strömungswiderstand

Daneben wird die Trocknung auch vom Strömungswiderstand des zu trocknenden Materials beeinflusst. Dieser hängt wiederum von der Durchströmungslänge bzw. Schichthöhe, der Strömungsgeschwindigkeit und der Art des Trocknungsgutes unter Berücksichtigung der Faktoren Holzart, Wassergehalt, Fraktionsgröße, Schüttdichte, Oberflächenbeschaffenheit ab (FOCKE et al., 2014). Die Körnung des Gutes hat hierbei den größten Einfluss auf den Strömungswiderstand. Das bedeutet, dass grobes Material bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit mit weniger Widerstand von der Trocknungsluft durchströmt werden kann, als feines. Somit lässt sich mehr Wasserdampf aus dem Trocknungsgut abtransportieren (GOLSER et al., 2005).

Bei Schütthöhen von Schüttgütern unter zwei Metern kann näherungsweise ein linearer Zusammenhang zwischen der Durchströmungslänge und dem Strömungswiderstand angenommen werden. Dieser wird dann meist bezogen auf einen Meter Schichthöhe angegeben (KALTSCHMITT et al., 2009). Ebenfalls dient der Strömungswiderstand als Entscheidungskriterium für ein geeignetes Gebläse, dessen Auslegung und Leistung, je nach Wahl des Trocknungsverfahrens (FOCKE et al., 2014).

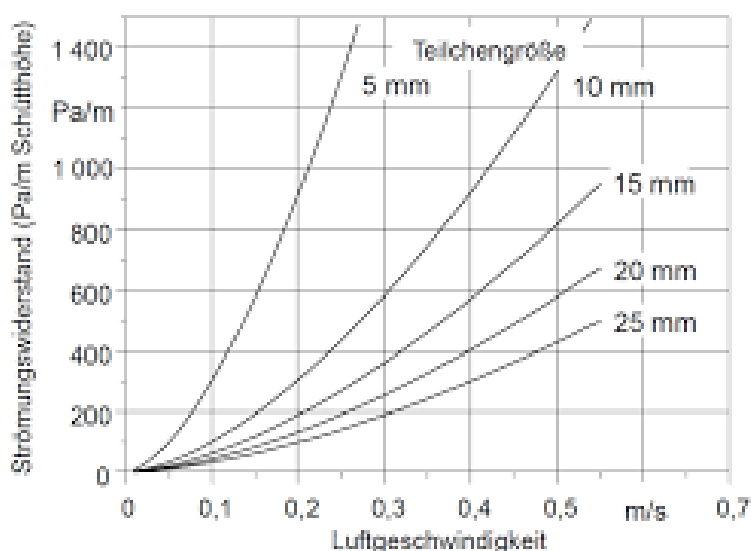


Abbildung 5: Spezifischer Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen in Abhängigkeit der Luft- bzw. Strömungsgeschwindigkeit (FOCKE et al., 2014).

## 2.2.4 Belüftungsmenge und Luftführung

Der Strömungswiderstand beeinflusst wiederum, neben den Faktoren der geplanten Trocknungsdauer, der Trocknungsgutmenge und der Belüftungsintensität, die Wahl der Belüftungsmenge sowie Luftführung bei technischen Trocknungsverfahren. Natürliche Verfahren im Freiland unterliegen weitestgehend den mikroklimatischen Bedingungen, die Standortwahl ist hier entscheidend. Um die Aufgabe einer gleichmäßigen und schnellen Trocknung erfüllen zu können, ist eine ausreichend starke und gleichmäßige Luftbewegung durch das Trocknungsgut von Nöten. Dabei sollte beachtet werden, dass die Oberfläche des Schüttgutes möglichst eingeebnet ist sowie keine Verdichtung vorliegt, damit der Strömungswiderstand gering gehalten werden kann (GOLSER et al., 2005). Weingartmann (1991) zeigt folgende Maßnahmen einer günstigeren Luftführung bei der Trocknung auf:

**Ganzflächiger Flachrost:** Dieser Rost besteht entweder aus Latten, Baustahl, Lochblech oder Betonelementen und ist mit einer luftdichten Umwandung versehen. Die Höhe beträgt 40 bis 50 Zentimeter über dem Boden und der Lufteintritt erfolgt von einer Ecke aus. Eine Befahrbarkeit des Rostes ist jedoch ohne Verstärkungsmaßnahmen nicht möglich.

**Unterflurkanäle:** Dieser Rost ist im Gegensatz zum Flachrost befahrbar. Es liegt jedoch eine Verjüngung der Kanäle in Strömungsrichtung vor, die die Luftführung verschlechtert sowie durch den Abstand der Kanäle die Mindestschütthöhe festlegt (Abstand = Mindestschütthöhe).

Oberflurkanäle: Es werden Lochblechkanäle mit halbkreis- oder trapezförmigem Querschnitt auf dem Boden ausgelegt. Dieses System ist sowohl kostengünstiger als auch flexibler in der Handhabung sowie angepasster an die Nutzungsbedingungen.

Zentraler Dreieckskanal: Bei diesem System wird ein einziger zentraler Kanal mit einer Querschnittsfläche von einem halben bis einem Quadratmeter auf dem Boden verlegt. Dieser kann aus Latten überzogen mit Maschendraht gefertigt werden und ist daher besonders kostengünstig und flexibel.

### 2.3 Risiken bei der Lagerung von Hackschnitzeln

Verwendet werden Hackschnitzel zum einen für die Energiegewinnung und zum anderen in der Papier- und Zellstoffindustrie sowie zur Herstellung von Holzwerkstoffen in der Faser- und Spanplattenindustrie. Eine weitere Verwendungsmöglichkeit ist als Mulch, Humus und Kultursubstrat (BRUSCHE, 1983).

Bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln kann es zu Substanzverlust, Selbstentzündung, Pilzwachstum und Pilzsporenbildung sowie zu Wiederbefeuchtung kommen.

Ist das Hackgut beim Einlagern noch feucht, so kann die Respiration noch lebender Parenchymzellen zu einer Selbsterhitzung führen. Ab 40°C wird die weitere Wärmeentwicklung durch den Metabolismus von Pilzen und Bakterien ermöglicht. Dabei überleben Pilze Temperaturen bis zu 60°C, Bakterien Temperaturen bis zu 80°C. Die Temperatur kann in weiterer Folge sogar auf über 100°C ansteigen, was dann in einer Selbstentzündung resultieren kann (KALTSCHMITT et al., 2009). Schwelbrände sind die Folge.

Pilzwachstum ist schon ab einem Wassergehalt von über 20 % möglich, wobei zwischen 30 % und 50 % Wassergehalt, bei Temperaturen zwischen 20°C und 35°C und einem pH-Wert im Bereich von 4,5 bis 5,5 das Optimum liegt. Es ist zwischen Moder- und Braunfäulepilzen sowie Weißfäulepilzen zu unterscheiden. Erstere zersetzen hauptsächlich die Cellulose und Hemicellulose im Holz, während letztere auch das Lignin angreifen. Eine deutliche Reduktion des Heizwertes ist die Folge. Die Sporenbildung stellt für den Menschen eine Gesundheitsgefährdung dar. Bei der Manipulation des Hackgutes können diese in die Atemluft gelangen und so Erkrankungen auslösen (KALTSCHMITT et al., 2009).

Bei der Lagerung von Holzhackgut kann es aber auch durch Bildung von Mikroorganismen zu einem Abbauprozess organischer Masse kommen (KALTSCHMITT et al., 2009). Trockenmasse geht verloren und damit thermisch nutzbare Energie. Dadurch ergibt sich ein höherer Anteil an anorganischen Verbindungen und somit ein höherer Aschegehalt bei der Verbrennung (GOLSER et al., 2005). Bei frischem Hackgut ist ein Substanzabbau von bis zu 3 % pro Monat möglich. Eine Abdeckung des Holzhackgutes führt, neben der Vermeidung der Wiederbefeuchtung, zu einer Reduzierung des Abbaus. Um die Verluste bei der Lagerung von Hackgut möglichst gering zu halten, sollten die Bedingungen für eine hohe biologische Aktivität möglichst ungünstig gestaltet werden (KALTSCHMITT et al., 2009). Eine Option dafür ist die Trocknung.

## 2.4 Solare Trocknung und -systeme

Grundsätzlich lassen sich drei Methoden zur Anwendung der solaren Trocknung unterscheiden:

Die einfachste Methode ist die Trocknung unter der freien Sonne. Dabei trifft die Solarstrahlung auf das zu trocknende Material, wodurch sich dessen Temperatur an der Oberfläche sowie im Inneren erhöht. Vorbeiströmende Luft nimmt die Feuchtigkeit aus der Luft an der Materialoberfläche mit, während durch den Temperaturanstieg im Materialinneren Wasser weiter verdampft und nach außen diffundiert (AKARSLAN, 2002). Ein Beispiel dafür ist die Bodentrocknung. Das Hackgut wird, wenn ausreichend Platz vorhanden ist, in geringer Schütthöhe auf dem Boden ausgebracht. Dabei kann bei ausreichender Sonneneinwirkung eine Abtrocknung auf 20 % Wassergehalt innerhalb eines Tages erreicht werden (KALTSCHMITT et al., 2009).

Bei der direkten Methode fällt die solare Strahlung durch eine lichtdurchlässige Abdeckung hindurch auf das Trocknungsgut, wodurch sich dieses erwärmt. Da das Trocknungsgut nicht luftdicht abgedeckt ist, tritt Luft von außen bzw. unten ein und wird ebenfalls erwärmt. Diese Luft steigt auf und nimmt im Vorbeistreichen am Trocknungsgut Feuchte auf. Die feuchte Luft entweicht über Entlüftungsöffnungen nach draußen. Es besteht jedoch die Gefahr der Kondensation an der Abdeckung, was den Trocknungsvorgang stören kann (AKARSLAN, 2002).

„Solartrocknung ist die Konvektionstrocknung von Holz unter der Verwendung von Wärme aus Sonnenkollektoren (Sonnenenergiesammlern)“ (TRÜBSWETTER, 2009).

Bei der indirekten Methode trifft die solare Strahlung nicht direkt auf das Trocknungsgut, sondern erwärmt die Luft separat. Diese durchströmt dann das zu trocknende Material und nimmt die Feuchtigkeit aus dem Trocknungsgut mit sich (AKARSLAN, 2002). Ein Beispiel hierfür sind Kollektoren mit transparenter Abdeckung. Diese verringert den Verlust an Trocknungsluftmenge durch Wärmeabstrahlung sowie Konvektion. Das Prinzip dahinter ist, dass die Luft zwischen einer lichtdurchlässigen Abdeckung und einer schwarz eingefärbten Absorberfläche hindurch gesaugt und erwärmt wird. Bei Kollektoren mit freiliegendem Absorber dient die Dachhaut als Absorberfläche. Hier wird die Luft zwischen der Rückseite dieser und einer Verschalung abgesaugt. Eine weitere Variante ist die Dachraumabsaugung, bei der die Trocknungsluft aus einem nach unten verschalten und abgeschlossenen Dachraum entnommen wird. Die simpelste Möglichkeit ist die Nutzung der von einem Gebäude passiv gesammelten und gespeicherten Wärmeenergie in Form von Raumluft (WEINGARTMANN, 1991).

Darüber hinaus lassen sich Trocknungssysteme hinsichtlich ihrer Luftbewegungsart unterscheiden. Bei aktiven Systemen wird die Luftbewegung technisch erzeugt (Gebläse oder Ventilatoren), während bei passiven Systemen die natürliche Auftriebskraft bzw. Konvektion von warmer Luft genutzt wird (AKARSLAN, 2002).

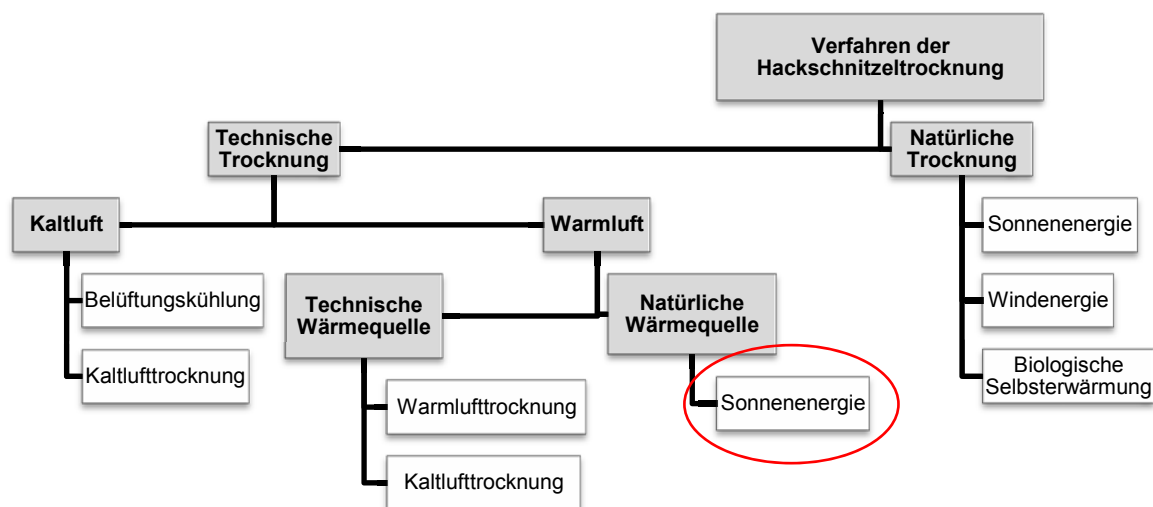


Abbildung 6: Verfügbare Systeme für die Hackschnitzeltrocknung mit besonderem Augenmerk auf die Verfahren unter der Verwendung von Sonnenenergie (nach BÄRWOLFF et al., 2012).

## 2.5 Natürliche Trocknungsverfahren

### 2.5.1 Konvektion und Selbsterwärmung

Natürliche Konvektion bedeutet, dass die Trocknungsluft das Schüttgut aufgrund von Druck- und Dichteunterschieden (Auftriebsströmung) durch- bzw. überströmt. Letztere kommen durch Temperatur- und Feuchtedifferenzen zustande (WEINGARTMANN, 1991). Grundsätzlich wird Hackgut in Haufen gelagert. Es kommt dabei zu einer natürlichen Konvektion durch Selbsterwärmung. Diese wird durch den Abbau organischer Substanz ausgelöst und führt zu einem nach oben gerichteten Konvektionsstrom. Feuchte Luft wird abtransportiert und trockene Luft kann nachströmen. Die feuchte Luft kühlt ab und es kann vor allem in den Randbereichen zu einer Kondensation kommen, was wiederum in einer Schimmelpilzbildung resultieren kann. Weitere Folgen sind Substanzabbau (über 25 % möglich) sowie gesundheitliche Risiken durch Sporenbildung (FOCKE et al., 2014). Einen größeren Erfolg bringt die natürliche Konvektionstrocknung mit sich, wenn sie in freistehenden, überdachten Lagerbehältern, sogenannte Harpfen, erfolgt. Auch die Gefahr der Schimmelpilzbildung ist hier geringer. Die Harpfen besitzen luftdurchlässige Seitenwände und fördern damit die Durchlüftung des Hackgutes. Die Wahl des Standortes fällt eher auf windige als sonnige Lagen, um eine Konvektionsströmung durch Winddruck zu begünstigen. Die Trocknungsdauer einer Füllung liegt zwischen vier bis sechs Monaten (GOLSER et al., 2005).

### **2.5.2 Trocknung durch gesteuerte Mikrobiologie**

Das Hackgut befindet sich in einem Trocknungssilo, an dessen Ober- und Unterseite Ventilatoren angebracht sind. Das Trocknungsgut wird mit einem speziellen Stoff beimpft, um eine günstige Mikroflora zu entwickeln und einer Verpilzung entgegen zu wirken. Es folgt eine Erwärmung des Materials. Vor allem Parenchymzellen und Membrane der Hoftüpfel werden durch wärmeliebende Bakterien abgebaut. Dies führt zu einer Reduzierung des Strömungswiderstandes und zu einer besseren Trocknung. Frisches Hackgut kann in einem Zeitraum von zwei Wochen auf einen Wassergehalt von 15-20 % getrocknet werden. Jedoch sind Trockenmasseverluste von etwa 15 % zu erwarten. Diese Methode fand bisher nur einmal Anwendung (GOLSER et al., 2005).

## **2.6 Technische Trocknungsverfahren**

### **2.6.1 Belüftungskühlung**

Das Hackgut wird überdacht in Haufen gelagert. Das Prinzip der Konvektion und Selbsterwärmung greift hier ebenfalls. Mit Hilfe einer Zwangsbelüftung wird in Intervallen kalte Außenluft eingeblasen (KALTSCHMITT et al., 2009). Diese verdrängt die feuchte Luft im Lager und kühlt das Trocknungsgut wieder ab. Diese Methode arbeitet langsam, aber stetig. Eine Trocknungsleistung eines Wassergehaltes von unter 20 % ist jedoch nicht möglich. Noch dazu ist mit einem gewissen Substanzverlust sowie einer Gefährdung durch Schimmelpilzbildung zu rechnen (GOLSER et al., 2005).

### **2.6.2 Belüftungstrocknung**

Die Belüftungstrocknung erfolgt nach ähnlichem Prinzip wie die Belüftungskühlung. Vor allem in den Sommermonaten wird warme oder gering technisch vorgewärmte Außenluft (um fünf Kelvin [K]) kontinuierlich in das Trocknungsgut eingeblasen (FOCKE et al., 2014). Durch den ständigen Betrieb ist der Energieaufwand für das Gebläse höher, die realisierbaren Endwassergehalte aber niedriger als bei der Belüftungskühlung. Dennoch muss auch bei dieser Methode mit Substanzverlusten gerechnet werden (GOLSER et al., 2005).

### **2.6.3 Warmlufttrocknung**

Bei der Warmlufttrocknung wird ebenfalls vorgewärmte Luft (20 bis 100 K) mittels Gebläse durch das Trocknungsgut gedrückt (KALTSCHMITT et al., 2009). Da die Luft durch ein spezielles Heizsystem oder durch Abwärmenutzung angewärmt wird, steht diese kontinuierlich und unabhängig von klimatischen Bedingungen der Trocknung zur Verfügung. So ist es möglich, einen Wassergehalt unter 20 % zu erreichen. Diese Methode verkürzt zudem die Trocknungszeit und verringert den Substanzabbau sowie die Sporenbildung (GOLSER et al., 2005).

#### **2.6.4 Heißlufttrocknung**

Findet die Trocknung von Biomasse (vor allem Pelletierung) in Trommel- bzw. Drehrohtrocknern in einem Temperaturbereich von 300-600°C statt, spricht man von Heißlufttrocknung. Dieses Verfahren benötigt eine Direktbeheizung und schafft so Trocknungszeiten von fünf bis zehn Minuten (KALTSCHMITT et al., 2009).

### 3. MATERIAL UND METHODEN

#### 3.1 Die solare Trocknung nach CONA

Das patentierte CONA-System ist nach folgendem Prinzip aufgebaut (Abbildung 11). Luft wird im dachintegrierten und verglasten Solarluftkollektor (Größe circa 2,0 m<sup>2</sup> pro Einheit, mehrere Einheiten modulartig kombinierbar) mit Hilfe von Solarstrahlung erwärmt (1).



**Abbildung 7: Dach mit integrierten und verglasten Solarluftkollektoren, im besten Falle nach Süden ausgerichtet.**

Das Dach sollte im Optimalfall gen Süden ausgerichtet sein. Eine geringfügige Abweichung nach Westen ist möglich, da so die nachmittägliche Einstrahlung genutzt werden kann. Die erwärmte Luft wird dann mittels energiesparender Ventilatoren (Leistung von 0,2 bis 0,4 kW, je nach Anlagengröße) zu einer Mischbox transportiert (2).





**Abbildung 8:** Transport der erwärmten Luft durch isolierte Luftschächte (links) bis zur Mischbox. Dort erfolgt die Vermischung mit der Außenluft und das Einblasen mit Hilfe der Ventilatoren (rechts) in die Trocknungsbox.

In dieser wird die erwärmte Luft mit zusätzlicher Umgebungsluft vermischt, um das Luftvolumen zu vergrößern und die Temperatur der Luft von 60°C bis 70°C auf 40°C abzusenken (3). Der Transport der erwärmten Luft erfolgt durch isolierte Luftschächte, um Transportverluste zu vermeiden. So kann der Bedarf an Warmluft auf niedrigem Niveau gehalten werden. Diese wird abschließend durch das feuchte Hackgut geführt (4).



**Abbildung 9:** Trocknungsbox mit ganzflächigem Belüftungsboden, angefüllt mit Hackschnitzeln.

Das Hackgut liegt auf einem ganzflächigen Belüftungsboden, der im natürlichen Schüttwinkel des Trocknungsgutes angebracht und kiemenartig perforiert ist. Ein weiterer Ventilator (Leistung von 0,6 kW bis 1,2 kW) bläst die warme Luft mit erhöhtem Druck durch den Rost (5).



**Abbildung 10: Kiemenartig perforierter Schrägrost, installiert in einer Trocknungsbox im natürlichen Schüttwinkel.**

Die Bauart des Belüftungsbodens ermöglicht es, mit wenig Druck beim Durchblasen der Luft durch das Trocknungsgut auszukommen. Darüber hinaus erleichtert die schräge Anordnung die erforderlichen Manipulations- und Wendearbeiten. Der Rost besteht aus modulartig kombinierbaren Paneelen mit einer Höhe von 3,0 m und einer Breite von 0,5 bis 1,0 m. Pro Laufmeter Rostbreite können acht Schüttraummeter Hackgut aufgebracht werden. Neben der Schrägbauweise ist auch eine Flachrostvariante zur flächigen Befahrung erhältlich. Die Dimension der Anlage richtet sich nach der jährlich angestrebten Menge an trockenem Hackgut. Die Trocknungsbox muss mindestens 4,5 m hoch und 5,5 bis 6,0 m tief sein, wobei eine Breite von bis zu 12,0 m realisiert werden kann. Abhängig von der Größe der Trocknungsbox wird eine Kollektorfläche zwischen 24,0 m<sup>2</sup> und 192,0 m<sup>2</sup> benötigt.

CONA gibt an, dass die Trocknung einer Charge von 50,0 % auf unter 20,0 % Wassergehalt im Sommer ein bis zwei Wochen sowie im Frühjahr und Herbst drei bis maximal sechs Wochen in Anspruch nimmt. Bei einem Stromverbrauch von lediglich 2,0 kWh bis 4,0 kWh pro Schüttraummeter soll ein Energiegewinn von 150,0 kWh bis 200,0 kWh pro Schüttraummeter erzielt werden (CONA, 2016).

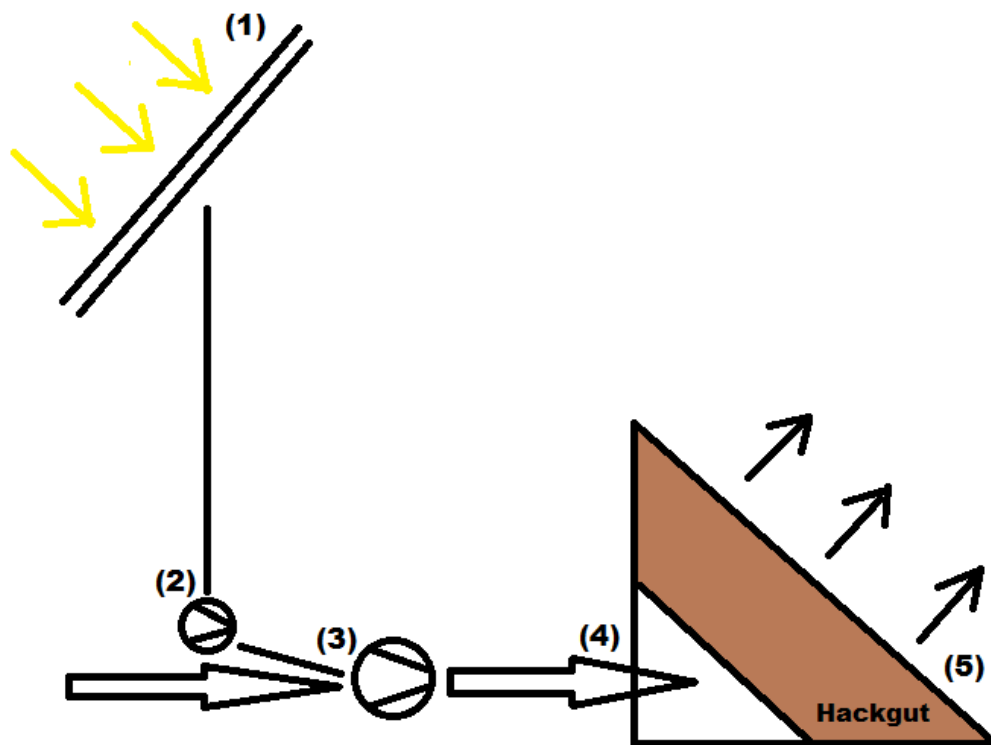


Abbildung 11: Schematische und schrittweise Darstellung des Prinzips der solaren Hackguttrocknung nach dem CONA-System.

### 3.2 Ergebnisse „Solare Trocknung - Strategie 2020, Zwischenbericht“

Die Auswertung der Resultate der Konzeptphase ergab, dass eine Holz Trocknung unter Verwendung von Solarenergie und dem CONA-Luftkollektorsystem äußerst effizient ist. Die Jahrestrocknungsleistungen der beiden untersuchten Anlagen schwankten zwischen 26 Srm/m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 28 Srm/m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Abhängig von der Jahreszeit lag die Trocknungsdauer bei 1-4 Wochen pro gefüllter Box. In jedem Fall konnte ein Endwassergehalt von 15 % erreicht werden. Der Stromverbrauch der beiden Trocknungsanlagen lag mit 3-5 kWh/Srm und 1,6-2 kWh/Srm im Bereich der Herstellerangabe von 2-4 kWh/Srm. Das untersuchte solare System weist also einen verhältnismäßig niedrigen Energieverbrauch pro Schütt-raummeter auf. Dies zeigte sich darin, dass die Verwendung getrockneter Hack-schnitzel eine deutliche Erhöhung der erzeugten Wärmemenge mit sich brachte. Allein eine Verdoppelung des Anteils an solargetrocknetem Hackgut, ließ die erzeugte Wärmemenge der Heizung eines Betriebes von 0,7 MWh/Srm auf 0,8-0,9 MWh/Srm und sogar 1,1 MWh/Srm ansteigen. Auch war es möglich, mit solargetrocknetem Nadelholzhackgut den gleichen Energiegehalt zu erreichen, wie von (hallengetrocknetem) Laubholzhackgut, da Laubholz von Natur aus einen höheren Energiegehalt hat, als Nadelholz. Ein weiterer Effekt der Trocknung war, dass die Belastung mit Sporenbildung von Schimmelpilzen eingedämmt werden konnte.

Die Trocknung führte darüber hinaus zu einem erheblich verbesserten Rieselverhalten des Hackgutes und verminderte auch das Vereisen der Hackschnitzel bei Frost. Lediglich die erhöhte Staubentwicklung wurde bemängelt (ERBER et al., 2015).

### 3.3 Datenerhebung

#### 3.3.1 Erhebungskonzept

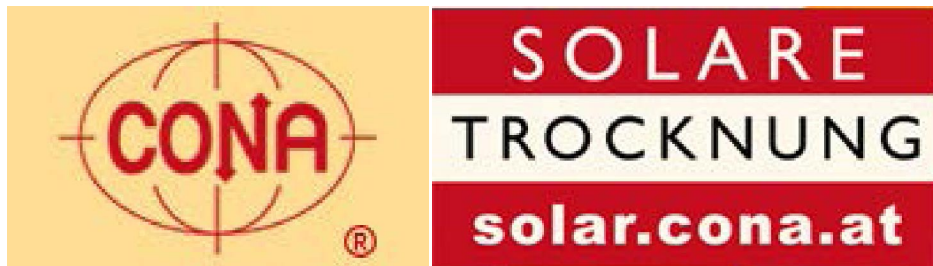


Abbildung 12: CONA Firmenlogo (CONA, 2016).

Vor der eigentlichen Erhebung wurde in Kooperation und Absprache mit der CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschaft mbH (CONA) und in Anlehnung an die in der bereits abgeschlossenen Konzeptphase erhobenen Parameter ein Fragebogen (siehe Anhang 8.3) entworfen.

Insgesamt sollten 30 Betreiber von solaren Hackguttrocknungen nach dem CONA-Prinzip besucht und zu ihren Anlagen befragt werden. Bei der Auswahl der Betriebe wurde darauf geachtet, ein möglichst breites Spektrum an Anlagendimensionen, angefangen von der Kollektorfläche über die Trocknungsboxgröße bis hin zu Jahreskapazität abzudecken. Natürlich mussten die Anlagenbetreiber mit der Befragung und Besichtigung ihrer Anlage einverstanden sein. Folgende Parameter wurden abgefragt:

- Betriebshintergrund und Wirtschaftsart
- Anlagenausstattung
- Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung
- Materialherkunft und Klassifizierung
- Anfangs- und Endwassergehalt des Hackgutes
- Trocknungsleistung
- Auslastung der Anlage und Trocknungsdauer
- Stromverbrauch
- Manipulationsaufwand und -mittel
- Kosten Materialzukauf
- Heizungsausstattung
- Materialinput und Wärmemengenoutput
- Verbesserungspotential und Kundenwünsche

Nach telefonischer Kontaktaufnahme und Terminvereinbarung mit den Betreibern wurden die Anlagen im Zeitraum vom 18.08.2015 bis 10.09.2015 besucht.

### **3.4 Datenaufbereitung und -auswertung**

Die aufgenommenen Daten wurden, getrennt nach Parametern, in Microsoft Excel dokumentiert.

In einem ersten Schritt wurden alle Parameter deskriptiv beschrieben und grafisch dargestellt. Der deskriptiven Darstellung wurden auch von den Anlagenbetreibern bereitgestellte und für die Ergebnisbetrachtung relevante Zusatzinformationen beige-fügt.

Die unterschiedlichen Materialflüsse und ihre Häufigkeit wurden in einem Flussdiagramm dargestellt. Dieses beschreibt, woher das Rohmaterial kommt, wo und durch wen es geerntet und verarbeitet wird, wie es transportiert und gelagert wird und wie häufig dies bei der Erhebung der Fall war. Dabei ist zu beachten, dass hier, abhängig vom Arbeitsschritt, eine unterschiedliche Anzahl an Möglichkeiten (z.B. wird bei einem Betreiber das Material aus einer Quelle auf drei Arten geerntet, aber nur auf zwei Arten transportiert) auftreten kann. Das heißt, dass sich die Materialflusspfade immer wieder teilen und vereinigen können. Daher gibt die Grafik immer nur die relative Häufigkeit der Möglichkeiten und den Anteil an den jeweils vorangegangenen Schritten an.

Die mittlere Trocknungsdauer wurde nach Jahreszeiten getrennt ausgewertet und dargestellt. Bei der Auslastung wurde unterstellt, dass der Betrieb der Anlage in Frühjahr, Sommer und Herbst einer Auslastung von 100,0 % entspricht und eine Nutzung der Anlage im Winter eine Mehrauslastung um 33,3 % ausmacht. Die Trocknungsleistung und der Stromverbrauch von Frühjahr-Sommer-Herbst-betriebenen Anlagen wurde mit jenem von auch im Winter betriebenen verglichen.

Darüber hinaus wurden die Manipulationskosten kalkuliert. Diese setzten sich aus den Stundensätzen für die jeweiligen Maschinen und den Kosten für eine die Maschine bedienende Arbeitskraft zusammen. Im Falle, dass einem Betrieb mehr als ein Manipulationsmittel zur Verfügung stand, wurden diese zu gleichen Teilen gewichtet. Die durchschnittlichen Manipulationskosten pro Charge sowie pro Schütt-raummeter errechneten sich durch Division der Kosten des Manipulationsaufwandes und der Chargenleistung durch die Trocknungsleistung der Betriebe pro Jahr.

Der Materialinput und der Wärmemengenoutput einiger Heizungsanlagen konnte anhand von Aufzeichnungen der Anlagenbetreiber erhoben werden. Die Angaben zum Material selbst beinhalteten das Verhältnis von Laubholz zu Nadelholz, den Anteil an getrockneten Hackschnitzeln sowie den jährlichen Verbrauch der Heizungsanlagen.

Mittels der dazugehörigen Wärmemengen ließ sich der Wärmeoutput pro Schütt-raummeter und der Materialinput pro Megawattstunde für die angegebenen Kessel sowie die jeweiligen Durchschnittswerte ermitteln.

## 4. ERGEBNISSE

### 4.1 Die Betriebe allgemein

Die 30 zusammen mit CONA ausgewählten Betriebe liegen sowohl in Bayern (12), als auch in Oberösterreich (18) (Abbildung 13). Dort ist die Dichte der solaren Hackgutrocknungsanlagen derzeit am höchsten und somit konnten aussagekräftigere Ergebnisse aufgrund der Lage sowie ähnlicher klimatischer Verhältnisse erzielt werden.

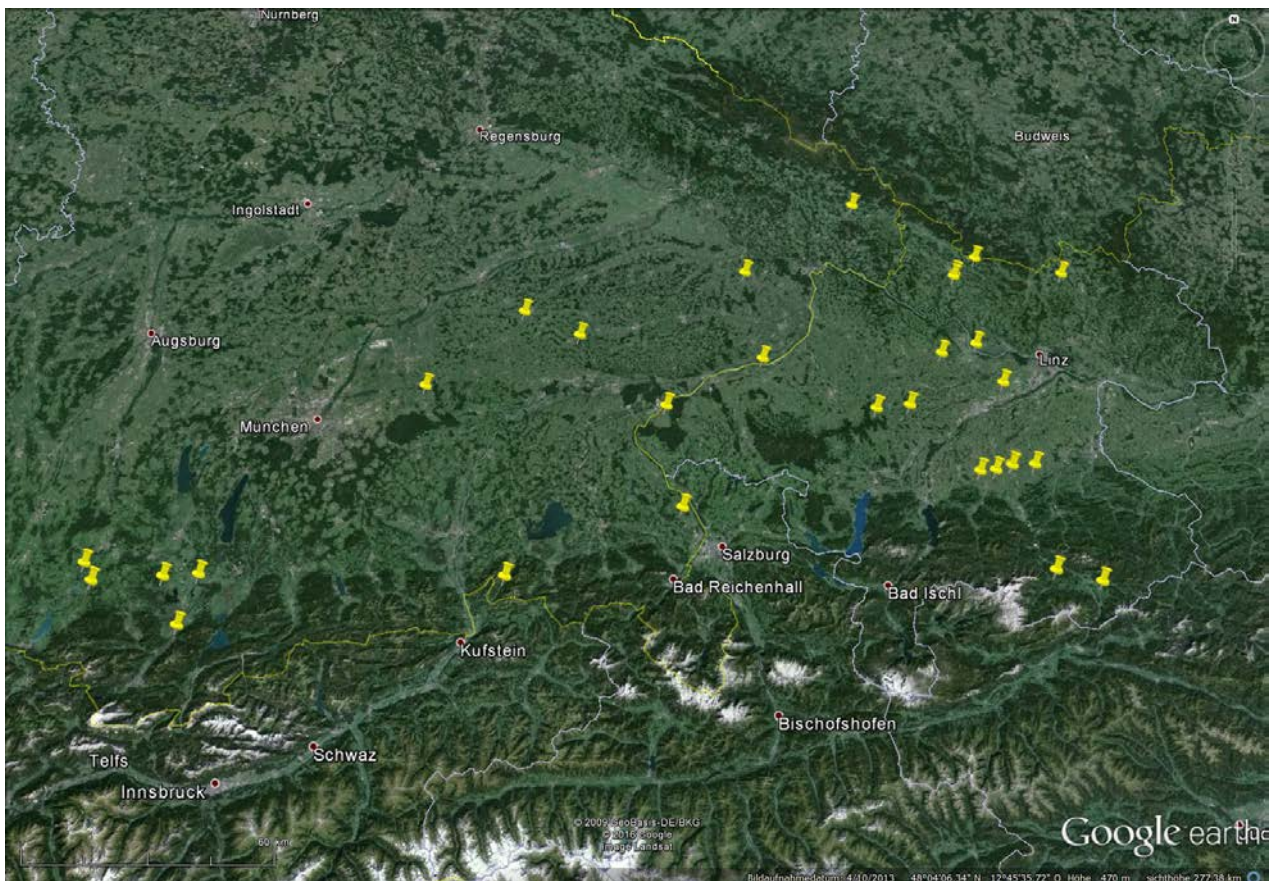


Abbildung 13: Übersicht über die Lage der Betriebe in Bayern und Oberösterreich (GOOGLE MAPS, o. J.)

### 4.2 Betriebshintergrund und Wirtschaftsart

Der Großteil der 30 untersuchten und befragten Betriebe wird bäuerlich geführt (60,0 %). Der Rest sind Anlagen, die in Verbindung mit einer Gewerbeart (26,7 %; z.B. Forstbetriebe oder Sägewerke) oder sowohl bäuerlich als auch gewerblich (13,3 %) betrieben werden. Bäuerliche Kooperation, also eine Anlage im Besitz mehrerer bäuerlicher Eigentümer, lag bei keinem der Betriebe vor.

## Betriebs hintergrund

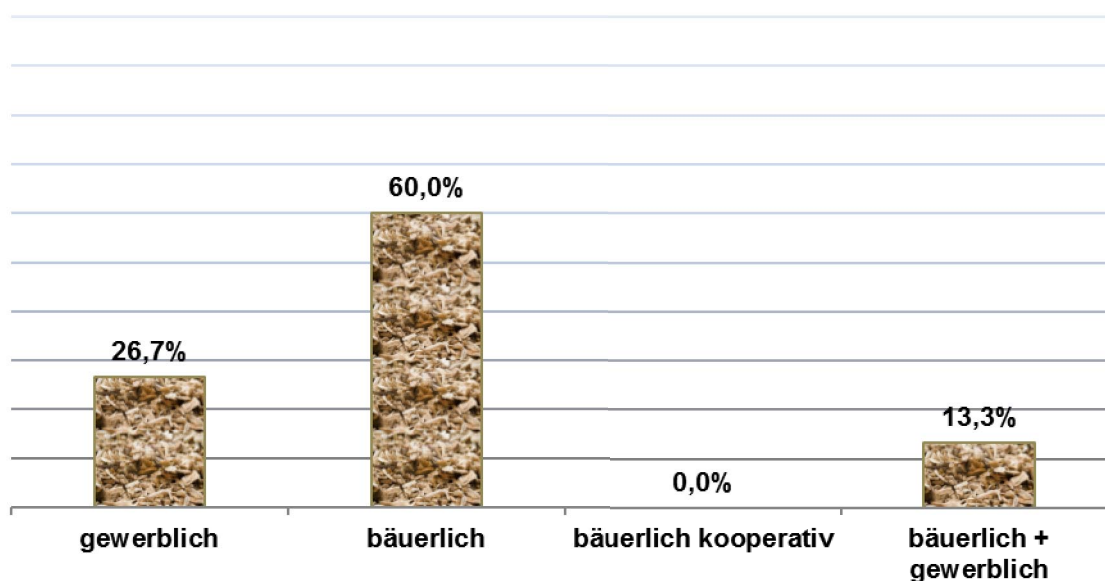


Abbildung 14: Der Betriebs hintergrund der untersuchten Anlagen ist mehrheitlich rein bäuerlich. Rein gewerbliche oder gemischte Betriebsformen waren seltener.

## Wirtschaftsart

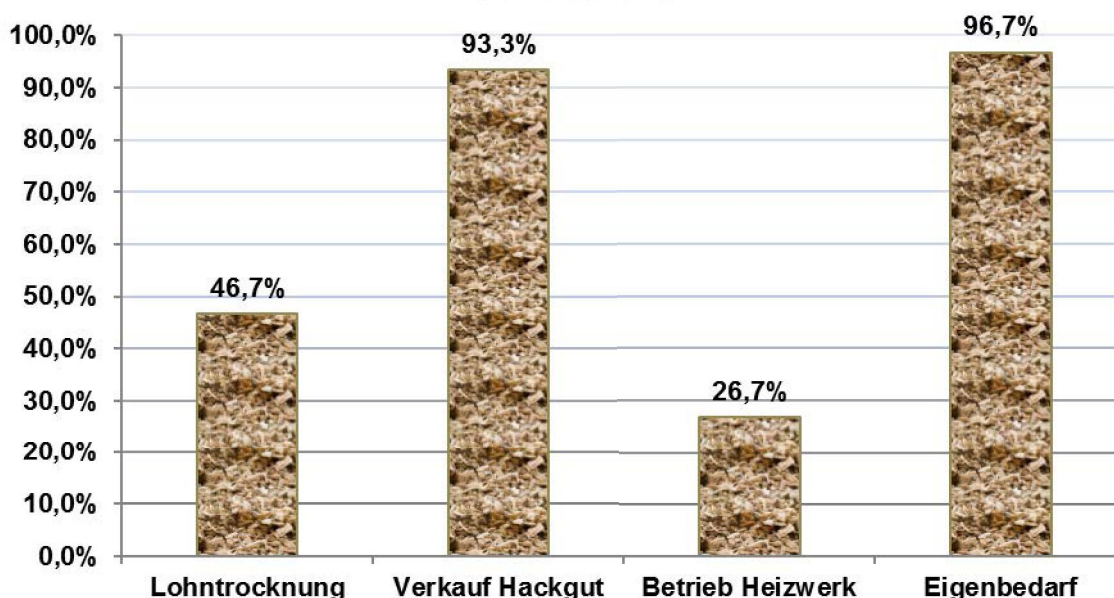


Abbildung 15: Nutzung fast aller Anlagen zur Deckung des Eigenbedarfs sowie zum Verkauf des getrockneten Hackgutes. Ebenfalls Verwendung für Lohn trocknung von circa der Hälfte und Betrieb eines oder mehrerer Heizwerke von rund einem Drittel der Betriebe.

Die meisten Betreiber nutzten die Anlagen für die Deckung des Eigenbedarfs (96,7 %) sowie für die Produktion von trockenem Hackgut für den Verkauf (93,3 %). Fast die Hälfte (46,7 %) bot Lohn trocknung für andere Betriebe an. Eine Besonderheit stellte der Betrieb Nr. 8 dar. Dieser nützte die Trocknungsanlage hauptsächlich für Lohn trocknung und Hackgutverkauf, da im Betrieb selbst keine Hackgutheizung vorhanden war und somit der Eigenbedarf entfiel. Rund ein Viertel der Anlagenbesitzer betrieb zusätzlich ein oder mehrere (Nahwärme-)Heizwerke.



### 4.3 Anlagenausstattung

Etwa 47 Prozent der Anlagen verfügten über eine und zu 53 Prozent über zwei Trocknungsboxen. Das Fassungsvermögen der Trocknungsboxen der untersuchten Betriebe lag zwischen 35,0 Srm (Minimum) und 120,0 Srm (Maximum) und im Mittel bei rund 70,0 Srm für eine Box. Die verbauten Kollektorflächen hatten eine Größe von 24,0 m<sup>2</sup> (Minimum) bis zu 192,0 m<sup>2</sup> (Maximum) und lagen im Mittel bei rund 72,0 m<sup>2</sup> pro Box.

### 4.4 Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung

Alle Betreiber wurden bei der Aufnahme der Daten für den Erhebungsbogen gebeten, den jeweiligen Weg des Materials vom Herkunftsort über die Trocknung bis hin zur Heizung zu skizzieren. Teilweise wurden mehrere Optionen für den Materialfluss genannt, was in die Auswertung mit einbezogen wurde (Abbildung 16).

Anhand eines Beispiels soll die Interpretation der Grafik veranschaulicht werden: Das Rohmaterial, das zu trockenem Hackgut verarbeitet werden soll, stammt zu 51,9 % aus dem eigenen Betrieb. Die Ernte dieses Rohmaterials aus dem eigenen Betrieb findet zu 42,6 % in Eigenregie und zu 8,2 % durch einen Unternehmer statt. Diese ergeben zusammen jedoch nicht die 51,9 % Materialherkunft „Betrieb“. Es bedeutet vielmehr, dass 42,6 % und 8,2 % von 100,0 % der Erntefälle in Eigenregie und durch einen Unternehmer erfolgen. Die Graphik ist also immer rückwärtsgewandt zu lesen. Dieser Umstand ergab sich daraus, dass alle möglichen Optionen pro Prozessschritt in die Darstellung mit einbezogen werden mussten.

Allgemein lässt sich aus dem Ergebnis herauslesen, dass das Rohmaterial größtenteils aus dem eigenen Betrieb stammte. Da es sich, wie oben bereits angegeben, hauptsächlich um bäuerliche Betriebe handelte, wurde die Ernte auch primär in Eigenregie durchgeführt. Die weitere Verarbeitung, das Hacken, erfolgte dann aber mehrheitlich durch einen spezialisierten Dienstleister. Der Lagerplatz diente dabei am häufigsten als Hackort, gefolgt von der Forststraße und dann erst bei der Trocknungsanlage selbst. Der Transport zur Trocknung fand wiederum überwiegend in Eigenregie und mittels landwirtschaftlicher Maschinen statt.

Nach dem Trocknungsvorgang wurde das Hackgut ausnahmslos in Hallen gelagert, um im letzten Schritt, abermals in Eigenregie und mittels landwirtschaftlicher Maschinen, zur Heizungsanlage transportiert zu werden.

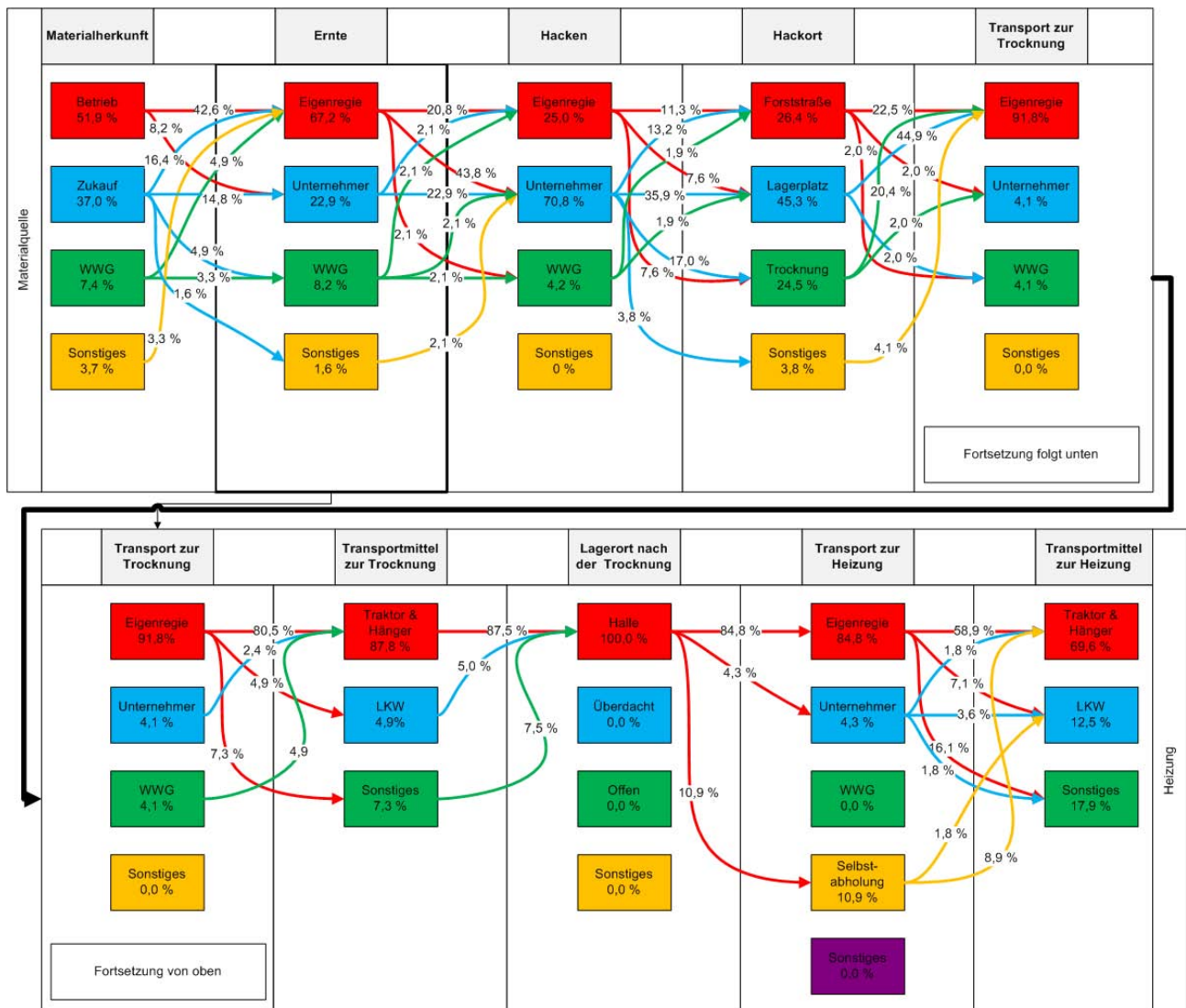


Abbildung 16: Skizze Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung.

### 4.5 Materialherkunft und Klassifizierung

Neben dem Materialfluss wurde die Herkunft und Zusammensetzung gesondert erhoben. Aus den Daten ging hervor, dass gut die Hälfte (50,8 %) des gesamten Rohmaterials aus dem eigenen Betrieb stammte, 41,8 % wurden zugekauft. Waldwirtschaftsgemeinschaften (WWGs; 6,2 %) und sonstige Quellen (1,3 %) wurden seltener zur Materialbeschaffung herangezogen. Den Rohstoff für das Hackgut bildete zu gut der Hälfte (49,1 %) Waldrestholz. Die weiteren Anteile entfielen hauptsächlich auf Stammholz (17,6 %) und Sägenebenprodukte, wie Kappholz, Schwarten, Rinde und Spreißel (12,3 %). Von geringerer Bedeutung waren sonstiges Material (9,8 %), Vollbäume (7,4 %) und Stümpfe (3,8 %). Nadelholz machte den Großteil (58,2 %) der Gesamtmenge aus. Der reine Laubholzanteil betrug nur 14,0 %, Mischungen aus Laub- und Nadelholz beliefen sich auf 27,8 % des gesamten Hackgutes.

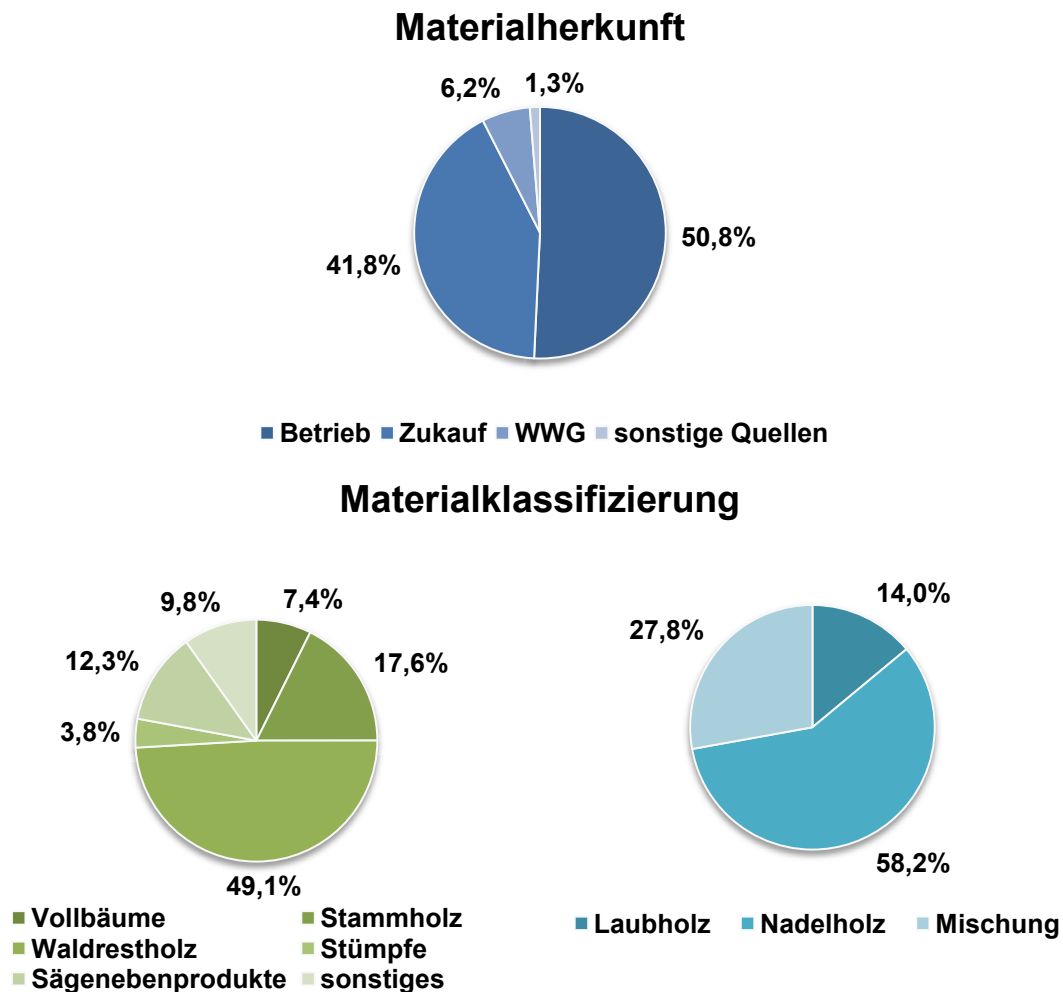


Abbildung 17: Das Rohmaterial stammt größtenteils aus dem eigenen Betrieb bzw. aus Zukäufen (oben). Am häufigsten wurde Waldrestholz für die Herstellung von Hackschnitzeln verwendet (unten links). Diese bestanden meistens aus reinem Nadelholz oder einer Mischung aus Laub- und Nadelholz (unten rechts).

#### 4.6 Anfangs- und Endwassergehalt des Hackgutes

Es wurde unterschieden, ob das Rohmaterial vor der Weiterverarbeitung einer Vortrocknung, also einer kurzzeitigen Lagerung im Freien zur Reduzierung des Wassergehaltes, unterzogen wurde oder nicht. In 60 % der Fälle fand eine Vortrocknung statt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das vorgetrocknete Material signifikant ( $p = 0,03$ ) trockener ( $44,3 \% \pm 4,0 \%$ ) war als das nicht vorgetrocknete Material ( $48,4 \% \pm 4,9 \%$ ). Nach dem Trocknungsvorgang war kein ( $p = 0,73$ ) signifikanter Unterschied zwischen den Behandlungsvarianten mehr zu beobachten. Bei vorhandener Vortrocknung lag der Wassergehalt nach der solaren Trocknung bei  $15,2 \% \pm 3,6 \%$  und ohne Vortrocknung bei  $14,8 \% \pm 3,3 \%$ .

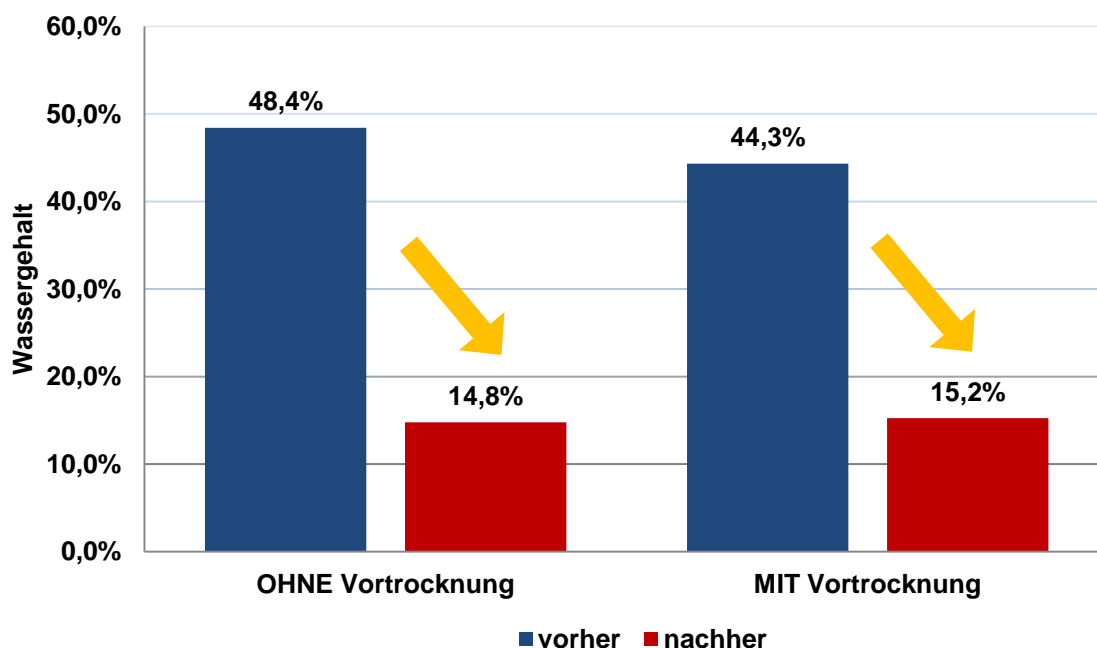


Abbildung 18: Der Anfangswassergehalt von vorgetrocknetem und nicht vorgetrocknetem Material unterschied sich signifikant. Nach der solaren Trocknung war kein Unterschied mehr feststellbar.

#### 4.7 Trocknungsleistung

Insgesamt wurden in den 30 Betrieben 44000,0 Srm Hackschnitzel pro Jahr getrocknet. Das Minimum pro Betrieb lag bei 300,0 Srm und das Maximum bei 5000,0 Srm pro Jahr. Der Jahresmittelwert pro Betrieb lag bei knapp 1500,0 Srm. Pro Quadratmeter installierte Kollektorfläche konnten im Mittel 14,1 Srm (Minimum 5,2 Srm, Maximum 20,8 Srm) Hackschnitzel getrocknet werden. Diese Werte hängen natürlich von der Nutzungsintensität und Auslastung der Anlagen sowie von abiotischen Umweltfaktoren ab. Trägt man dem Umstand, dass ein Großteil der Anlagen im Winter nicht betrieben wird, Rechnung, ergibt sich eine mittlere Trockenleistung von 17,0 Srm (Minimum 6,9 Srm, Maximum 26,0 Srm) pro m<sup>2</sup> installierte Kollektorfläche. Im Durchschnitt war die Trockenleistung der winterbetriebenen Anlagen (15,1 ± 4,2 Srm pro m<sup>2</sup>) geringer als bei jenen ohne Winterbetrieb (18,1 ± 4,8 Srm pro m<sup>2</sup>). Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant.

#### 4.8 Auslastung der Anlage und Trocknungsdauer

Wie oben angesprochen, war nur ein Teil der Anlagen auch im Winter in Betrieb. Dies wirkt sich ebenfalls auf die Trocknungsdauer einer Charge aus, da diese von der Jahreszeit abhängt. Im Sommer (1,5 Wochen) trocknet das Hackgut etwa doppelt so schnell wie im Frühjahr (3,0 Wochen) und im Herbst (3,1 Wochen). Im Winter (5,6 Wochen) dauert die Hackguttrocknung fast doppelt so lange (Tabelle 7). Nur gut ein Drittel der Betreiber nutzte die Anlage während dieser Jahreszeit. Einige der restlichen Betreiber verwendete sie während dieser Zeit als Lager für trockene Hackschnitzel oder als Stellplatz für landwirtschaftliche Maschinen.

Aufgrund der Anlagenkapazitäten und der jährlich getrockneten Gesamtmenge ist eine theoretische Auslastung von etwa 21 Chargen pro Jahr pro Betrieb möglich (Minimum 5,5 Chargen pro Jahr, Maximum 50,0 Chargen pro Jahr). Somit ergibt sich über alle Betriebe eine momentane Auslastung von 71,1 %.

**Tabelle 7: Auslastung der Anlage sowie Trocknungsdauer für eine Charge aufgeteilt nach Jahreszeiten.**

Jahreszeit	Anteil Nutzung	Trocknungsdauer
Frühjahr	100,00 %	3,00 ± 1,34
Sommer	100,00 %	1,45 ± 0,66
Herbst	100,00 %	3,12 ± 1,21
Winter	36,67 %	5,64 ± 3,83

## 4.9 Stromverbrauch

Im Rahmen der Studie sollten die Betriebe nicht nur Angaben zu der getrockneten Menge Hackgut, sondern auch zum Stromverbrauch ihrer Anlage machen. Zwei Dritteln der Anlagenbetreiber konnten Daten dazu beitragen, wobei angemerkt werden muss, dass nicht bei allen eine strikte Abgrenzung des Stromverbrauchs ihrer Trocknungsanlage mittels eigenem Stromzähler erfolgte. Anhand der Daten wurde ein Durchschnittswert von 3,9 kWh/Srm ± 1,8 kWh/Srm ermittelt. Bei einem angenommenen Strompreis von €0,21 (in Österreich; STATISTIK AUSTRIA, 2016) bis €0,29 (in Deutschland; STATISTISCHES BUNDESAMT, 2016), liegen die Stromkosten im Mittel bei €0,83 (in Österreich) bis €1,14 (in Deutschland) pro Schüttraummeter getrocknetes Hackgut. Betriebe, deren Anlagen auch im Winter in Betrieb waren, wiesen keinen statistisch höheren Stromverbrauch auf.

## 4.10 Manipulationsaufwand und -mittel

Die Manipulation des Hackgutes besteht aus Ein- und Auslagern sowie Belüften und/oder Wenden der Hackschnitzel. Zumeist wird dies in den Betrieben mit Hilfe landwirtschaftlicher Maschinen durchgeführt. Das Hackgut wird entweder direkt in die Trockenbox gehackt oder vom Hänger davor gekippt. Danach verteilen meist ein Teleskoplader (56,7 %) oder ein Traktor mit Frontlader (40,0 %) die Hackschnitzel in der Box. Der Rest der Betriebe verwendete für diese Tätigkeit andere Maschinen (13,3 %), wie z.B. einen Hub-/Gabelstapler oder kombinierten die zur Verfügung stehenden Gerätschaften. Für das Einlagern wurde im Durchschnitt eine Zeit von 0,7 h, für das Auslagern 0,9 h und für das mehrmalige zwischenzeitliche Belüften oder Wenden 0,4 h benötigt. Insgesamt wendeten die Anlagenbetreiber im Mittel 2,0 Stunden für die Manipulation einer Charge Hackgut auf.



**Abbildung 19:** Die am häufigsten verwendeten Manipulationsmittel für das Hackgut sind Teleskopklader (oben) und Traktoren mit Frontladern (unten links). Weniger oft kommen Hub-/Gabelstapler (unten rechts) zum Einsatz. Für das Einlagern, Belüften und/oder Wenden sowie Auslagern ist ein Zeitaufwand von knapp zwei Stunden pro Charge anzusetzen

Geht man von der Verwendung eines durchschnittlichen Allradtraktors mit einer Leistung von 88 PS/65 kW mit Frontlader und Erdschaufel aus, ergeben sich Kosten von €38,63 pro Stunde. Bei einem Teleskopklader mit einer Leistung von 82 PS/60 kW und einer Reichweite bis zu neun Metern liegen die Kosten dafür bei €51,61 pro Stunde. Für die Kosten der anderen Maschinen werden jene für einen Hub-/Gabelstapler (€35,31 pro Stunde) mit einer Hubleistung von 3,5 t herangezogen (ÖKL - ÖSTERREICHISCHES KURATORIUM FÜR LANDTECHNIK UND LANDENTWICKLUNG, 2016). Hinzu kommen noch Kosten von €15,00 pro Stunde für die bedienende Arbeitskraft (MASCHINENRING, o.J.). Die durchschnittliche Manipulationskosten lagen bei €1,86 pro Srm (Minimum €0,21 pro Srm, Maximum €5,85 pro Srm). Dieser Schwankungsbereich wurde von den stark variierenden Angaben der Betriebe zu den Manipulationszeiten bedingt. Diese lagen zwischen 0,4 h und 10,9 h pro 100 Schüttraummeter manipuliertem Hackgut. Darüber hinaus spielte auch die Geräteausstattung sowie die Betriebsgröße eine Rolle

#### 4.11 Kosten Materialzukauf

Die Kosten für einen Materialzukauf beliefen sich im Mittel auf rund € 16,00 pro Srm. Der Minimalwert lag bei € 9,00 pro Srm, der Maximalwert bei € 25,00 pro Srm.

#### 4.12 Heizungsausstattung

Die 30 Betriebe konnten Angaben zu insgesamt 55 von ihnen betriebenen oder belieferten Heizungsanlagen machen (Tabelle 8). 20 der 55 Kessel (36,4 %) waren mit einem Wärmemengenzähler ausgestattet, und bei zehn Kesseln (18,2 %) konnte die Art der Verrechnung angegeben werden. Es wurde unterschieden, ob eine Verrechnung nach Material (sechs von zehn Kessel) oder nach Wärmemenge (vier von zehn Kessel) erfolgte. Eigens erwähnt werden muss als Besonderheit der verwendete Holzvergaser der Marke Spanner mit einer Leistung von 30 kW elektrisch und 64 kW thermisch des Betriebes Nr. 2.

**Tabelle 8: Verwendete Kesselmarken, ihre Häufigkeit und Leistung.**

Kesselhersteller	Anzahl	Leistung
ETA Heiztechnik GmbH	4	35-140 kW
Fröling	8	25-250 kW
Gilles	1	200 kW
Guntamatic	4	50-200 kW
Hargassner	15	35-200 kW
HDG Bavaria	1	40 kW
Heizomat	3	60-400 kW
Köb	3	540-2000 kW
KWB	2	50-60 kW
Lindner&Sommerauer	10	40-150 kW
Spanner (Holzvergaser)	1	64 kW
Thermostrom	1	42,50 kW
Viessmann	2	1000 kW

#### 4.13 Materialinput und Wärmemengenoutput

Einigen Anlagenbetreibern war es möglich, Zusatzangaben zum Materialbedarf pro Jahr, dem Verhältnis von Laub- zu Nadelholz im Hackgut, dem Anteil an (solar) getrockneten Hackschnitzeln zur Gesamtmenge sowie zur erzeugten Wärmemenge zu machen. Diese Kennzahlen lagen mit Ausnahme der Wärmemenge für insgesamt 60 „Kesseljahre“ vor. Der mittlere Materialbedarf pro Kessel lag bei 236,1 Srm pro Jahr. Fast alle Heizungsanlagen (95,9 %) wurden mit getrocknetem Hackgut betrieben, das zu etwa 59,0 % aus Nadelholz bestand.

Lediglich für 13 „Kesseljahre“ waren Aufzeichnungen über die erzeugte Wärmemenge vorhanden. Das Verhältnis von Laub- zu Nadelholz in der verfeuerten Gesamtmenge war zwar mehrheitlich ausgeglichen, im konkreten Fall lag es aber bei 34,5 % Laubholz und 65,6 % Nadelholz.

Nur in einem Betrieb wurde ausschließlich Nadelholzhackgut für die Heizung verwendet. Während der 13 „Kesseljahre“ wurden durchschnittlich 255,5 Srm pro Kesseljahr verbraucht.

Der spezifische Materialverbrauch lag im Mittel bei  $1,6 \pm 0,7$  Srm/MWh. Damit konnte eine Wärmemenge von  $0,7 \pm 0,2$  MWh/Srm erzeugt werden. Aufzeichnungen über den Betrieb eines Kessels über einen längeren Zeitraum sind von besonderem Interesse. Dies war in den Betrieben 21 und 22 der Fall. Der spezifische Materialverbrauch schwankte in Kessel 3 in Betrieb 21 zwischen  $1,1$  Srm/MWh und  $1,7$  Srm/MWh. In Kessel 1 in Betrieb 22 lag dieser konstant bei  $1,5$  Srm/MWh. Bei einem Großteil der verbliebenen Kessel bewegte sich der Verbrauch innerhalb eines engen Bereichs zwischen  $1,1 - 1,5$  Srm/MWh.

**Tabelle 9: Materialinputs und Wärmemengenoutputs der betrachteten Heizungsanlagen.**

Betrieb	Kessel	Jahr	Verhältnis Laubholz-Nadelholz [%]	getrocknete Hack-schnitzel	Verbrauch/Jahr [Srm]	Wärmemenge/Jahr [MWh]	Wärmeausbeute [MWh/Srm]	Materialverbrauch [Srm/MWh]
6	1	2014/2015	20:80	100	50,0	37,5	0,8	1,3
9	4		50:50	100	230,0	210,0	0,9	1,1
12	1	2014/2015	50:50	100	210,0	111,2	0,5	1,9
13	1		20:80	100	125,0	93,8	0,8	1,3
21	3	2012/2013	50:50	100	175,0	158,0	0,9	1,1
21	3	2013/2014	50:50	100	220,0	150,0	0,7	1,5
21	3	2014/2015	50:50	100	236,0	137,0	0,6	1,7
21	5	2014/2015	50:50	100	95,0	26,0	0,3	3,7
22	1	2012/2013	70:30	100	220,0	148,0	0,7	1,5
22	1	2013/2014	70:30	100	240,0	164,0	0,7	1,5
22	1	2014/2015	70:30	100	220,0	148,0	0,7	1,5
26	1&2		0:100	100	1200,0	780,0	0,7	1,5
28	1		50:50	100	100,0	80,0	0,8	1,3
Mittelwert					255,5	172,6	$0,7 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,7$



## 5. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Trocknungsverfahren die auf Solarenergie basieren, werden schon seit langer Zeit für die Holz Trocknung verwendet. In den letzten Jahren wird auch Hackgut vermehrt solar getrocknet. Dabei ist es von Vorteil, wenn das Hackgut wettergeschützt getrocknet werden kann, um eine Wiederbefeuchtung und einen erhöhten Substanzverlust zu vermeiden. Eine der momentan fortschrittlichsten und effizientesten Methoden ist das Nutzen eines Luftkollektorsystems mit stromsparenden Ventilatoren nach dem patentierten CONA-System.

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Leistung und den Betrieb von solaren Trocknungsanlagen nach dem CONA-Prinzip in insgesamt 30 Betrieben in Bayern und Oberösterreich. Besonderes Interesse galt der Trocknungsleistung, -dauer und dem Energieverbrauch der Anlage. Ebenso wurden der Manipulationsaufwand und die erzeugte Wärmemenge analysiert. Im Anschluss daran wurden die neuen Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Konzeptphase verglichen.

Die Mehrzahl der Anlagen war in landwirtschaftlichen Betrieben zu finden. An der durchschnittlichen Anlagenausstattung, dazu gehört die Anzahl der Trocknungsboxen, das Fassungsvermögen einer Box sowie die verbaute Kollektorfläche, ließ sich jedoch nicht unterscheiden, ob diese rein bäuerlich oder gewerblich genutzt wurde, wohl aber an der getrockneten Menge an Hackschnitzeln pro Jahr (Mittelwert bäuerlich: 1465,9 Srm/Jahr; Mittelwert gewerblich: 1854,2 Srm/Jahr). Dennoch lagen auch bei einzelnen bäuerlich betriebenen Trocknungsanlagen Jahresmengen über 2000,0 Srm vor.

Fast alle Anlagenbetreiber verwendeten die Hackgutttrocknung sowohl zur Deckung des Eigenbedarfs an getrocknetem Hackgut als auch zum Verkauf an Dritte. Gut die Hälfte der Betreiber trockneten Hackschnitzel auf Lohnbasis und gut ein Viertel betrieb zusätzlich ein oder mehrere (Nahwärme-)Heizwerke. Somit ziehen nicht nur die solaren Trocknungsanlagenbetreiber selbst einen Vorteil aus der Nutzung dieser Technologie, sondern es wird ein weit größeres Umfeld direkt und indirekt Profitierender mit eingeschlossen.

Rund die Hälfte des gesamten Rohmaterials stammte bei bäuerlich und bei gewerblich betriebenen Anlagen aus dem eigenen Betrieb. Dabei konnte es sich zum einen um Material aus dem eigenen Wald wie z.B. Waldrestholz, Stammholz und zum anderen um Sägenebenprodukte wie z.B. Kappholz, Schwarten, Rinde handeln. Die andere Hälfte des verwendeten Rohmaterials setzte sich zum Großteil aus Materialzukaufen zusammen. Der Kostenpunkt lag dabei im Mittel bei € 16,00 pro Srm. Den Rest bildete Material aus Waldwirtschaftsgemeinschaften sowie sonstigen Quellen. Waldrestholz machte knapp 50 % der Rohmaterialmenge aus, während sich die Sortimente Stammholz, Sägenebenprodukte, sonstiges Material, Vollbäume und Stümpfe auf die zweite Hälfte verteilten.

Etwa 60 % der Menge bestand dabei aus Nadelholz. Die verbleibende Menge setzte sich mehrheitlich aus einer Mischung aus Laub- und Nadelholz zusammen und zu einem geringen Anteil aus reinem Laubholz.

In 60 % der Fälle fand eine Vortrocknung des Rohmaterials vor der Weiterverarbeitung über einen Zeitraum von mehr als einem Monat statt. Dieses war signifikant trockener als Material, das frisch gehackt und daraufhin sofort eingelagert wurde.

Unabhängig jedoch vom Ausgangswassergehalt konnte mit diesem Trocknungssystem ein Endwassergehalt von etwa 15 % standardmäßig erreicht werden. Dieser entspricht auch dem durchschnittlich erreichten Wassergehalt der Konzeptphase. Dadurch reduzieren sich nachweislich die Risiken einer Selbstentzündung und Wiederbefeuchtung sowie die Gesundheitsgefährdungen durch Schimmelpilzbildung auf ein Minimum und stellen zudem die Lagerfähigkeit des getrockneten Hackgutes sicher, denn dies wurde ausnahmslos in allen Betrieben in Hallen gelagert. Desweiteren werden so die Substanzverluste und folglich auch die thermischen Verluste gering gehalten.

Natürliche Trocknungsverfahren durch Konvektion und Selbsterwärmung können weder solche Endwassergehalte, noch eine derartige Reduzierung der Risiken und Gesundheitsgefährdungen erzielen. Auch technische Trocknungsverfahren wie die Belüftungskühlung oder Belüftungstrocknung trocknen das Material nicht unter 20 % und dämmen die Gefährdung der Schimmelpilzbildung sowie der Substanzverluste nicht im vergleichbaren Rahmen ein wie das solare Trocknungssystem. Ähnliche Trocknungserfolge lassen sich mit diesen Methoden nur unter besonders vorteilhaften Bedingungen erreichen (GOLSER et al., 2005).

Die Trocknungsdauer einer Charge unterschied sich je nach Jahreszeit. Um von einem Wassergehalt von 50 % auf 15 % zu gelangen, benötigte eine Charge Hackgut im Sommer im Durchschnitt 1,5 Wochen, im Frühjahr und Herbst etwa 3,0 bis 3,1 Wochen und im Winter 5,6 Wochen. Eine optimale Trocknung erfolgte demnach im Zeitraum von Februar/März bis Oktober/November. Die breitere Untersuchung konnte somit die Ergebnisse der Konzeptphase bestätigen. In dieser wurde eine durchschnittliche Trocknungsdauer von ein bis vier Wochen pro Charge in Abhängigkeit von der Jahreszeit ermittelt (ERBER et al., 2015). Nur rund ein Drittel der Betreiber nutzten die solare Trocknungsanlage auch über die Wintermonate.

Ergo werden mit dem Trocknungssystem nach CONA nicht nur günstigere Endwassergehalte, sondern diese auch in einem kürzeren Zeitraum, als es bei der natürlichen Trocknung durch Konvektion und Selbsterwärmung der Fall ist, erreicht. Im direkten Vergleich reduziert sich dieser von vier bis sechs Monaten auf maximal sechs Wochen (GOLSER et al., 2005). Einzig die Heißlufttrocknung schafft Trocknungszeiten von fünf bis zehn Minuten mittels einer Direktbeheizung in einem Temperaturbereich von 300-600°C. Diese Art von Trocknung findet vor allem bei der Pelletierung Anwendung. Sie benötigt zum einen viel Energie, um so hohe Temperaturen zu erreichen und zum anderen eine extra Anlagenausstattung mit Trommel- bzw. Drehrohrtrocknern (KALTSCHMITT et al., 2009).

Dieses Trocknungsverfahren ist nicht nur technisch und energetisch aufwendiger, es verursacht auch höhere Kosten als das solare Trocknungssystem.

Die Warmlufttrocknung kann am ehesten mit der solaren Trocknung verglichen werden, sowohl aufgrund des Trocknungsprinzips (sollte kein zusätzliches Heizsystem installiert sein), als auch hinsichtlich des zu realisierenden Endwassergehaltes und der Unabhängigkeit von klimatischen Bedingungen (GOLSER et al., 2005).

Die Trocknungsleistung erreichte, mit Rücksicht auf nicht winterbetriebene Anlagen, einen Durchschnittswert von 17,0 Srm pro m<sup>2</sup> installierte Kollektorfläche. Eine Unterscheidung zwischen bäuerlichen und gewerblichen Betrieben war diesbezüglich ebenfalls möglich. Im Gegensatz zur getrockneten Menge Hackschnitzel pro Jahr lag die Trocknungsleistung bei Anlagen mit bäuerlichem Betriebshintergrund bei 17,7 Srm/m<sup>2</sup> und bei solchen mit gewerblichem Betriebshintergrund bei 15,8 Srm/m<sup>2</sup>. Zusätzlich unterlagen die Leistungen der Betriebe teilweise enormen Schwankungen von einem Minimum von 6,9 Srm pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche bis zu einem Maximum von 26,0 Srm pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Die untersuchte Anlagen der Konzeptphase erreichten sogar Werte von 26-28 Srm pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche. Es handelte sich bei diesen um äußerst produktive Betriebe, deren Leistungsfähigkeit auch auf die kurze Trocknungsdauer zurück zu führen ist (ERBER et al., 2015).

Der Schwankungsbereich lässt sich darüber hinaus aus den Nutzungsgewohnheiten erklären. So wurden Trocknungsanlagen zum Beispiel sowohl für die Hackschnitzel-, als auch für die Heutrocknung verwendet. Es zeigte sich weiter, dass die Trocknung von qualitativ minderwertigerem Material wie Rinde oder Sägespäne schwieriger ist und deutlich länger dauert.

Oft war auch kein Interesse an einer höheren Jahresmenge und besseren Auslastung vorhanden, selbst wenn die Anlage noch Potential gehabt hätte. Zudem führten die milden Winter der letzten Jahre zu einer geringeren Nachfrage, wodurch eine maximale Auslastung der Anlagen nicht von Nöten war. Aber andererseits begünstigten Kalamitäten wie Windwurf oder Schneebruch eine Mehrauslastung der Anlage. In vielen Fällen werden die Trocknungsboxen im Winter als Lager oder Stellplatz für landwirtschaftliche Maschinen genutzt. Desweiteren ersparen sich einige der Betreiber die Nutzungskosten der Anlage aufgrund der zu dieser Jahreszeit vorherrschenden schlechten Witterungsbedingungen, was eine längere Trocknungsdauer zur Folge hätte. Dies zeigt, dass auch dieses Trocknungssystem zu einem gewissen Teil von dem örtlich vorherrschenden Klima sowie abiotischen Umweltfaktoren abhängig ist. Ein feuchter kühler Sommer kann die Trocknungszeit ebenso verlängern, wie ein warmer trockener Herbst sie verkürzen kann.

Der durchschnittliche Stromverbrauch der solaren Trocknungsanlage lag mit 3,9 kWh/Srm in der oberen Hälfte des vom Hersteller angegebenen Bereichs (2,0 - 4,0 kWh/Srm), wobei die Werte ein Spektrum von minimal 1,5 kWh/Srm bis maximal 8,0 kWh/Srm abdeckten. Eine zusätzliche Nutzung der Anlage im Winter weist auf keinen statistisch höheren Stromverbrauch hin.

Der Stromverbrauch der untersuchten Betriebe der Konzeptphase lag mit 1,6-5 kWh/Srm ebenfalls im oberen Bereich der Herstellerangaben (ERBER et al, 2015) und bestätigt damit die Erkenntnisse der breiteren Untersuchung.

Die Tatsache, dass sich im Einzelfall höhere Werte für den Stromverbrauch ergaben, lag daran, dass teilweise kein separater Stromzähler für die solare Trocknungsanlage installiert wurde oder vorhanden war und auch kein Interesse seitens der Betreiber an einer gesonderten Zählung bestand. Somit konnte keine strikte Trennung von anderen, im selben Stromkreis befindlichen Verbrauchern vorgenommen werden.

Insgesamt ergaben sich für die Trocknung eines Schüttraumeters Hackgut Stromkosten von rund € 1,00. Die solare Trocknung nach CONA stellt sich im Vergleich zu anderen technischen Trocknungsverfahren als äußerst sparsam und effizient heraus. Vor allem gegenüber der Heißlufttrocknung, die in einem Temperaturbereich von 300-600°C arbeitet (KALTSCHMITT et al., 2009) sowie anderen Systemen ohne künstliche Lufterwärmung (10,3 kWh/Srm) oder Lufterhitzung mittels Luftkollektoren (8,0 kWh/Srm) zeigt sie sich energiesparend (HELIN, 2005).

Während der Trocknung muss das Material mehrmals manipuliert werden. Die Manipulation teilt sich in drei Phasen auf: Einlagern, Belüften und/oder Wenden und Auslagern. Die Phase des Belüftens und/oder Wendens kann wiederholt werden. Für diese Tätigkeit wurden zumeist Teleskoplader oder Traktoren mit Frontladern verwendet. Durchschnittlich lag der Zeitaufwand bei 2,0 Stunden pro Charge, wobei etwa die Hälfte der Zeit für das Auslagern aufgewendet wurde. Den geringsten Zeitaufwand beanspruchte das Belüften und/oder Wenden für sich. Die Manipulationskosten lagen im Mittel bei € 1,86 pro Srm. Der Einsatz eines Teleskopladers verursachte die meisten Kosten, Traktoren mit Frontladern und Hub-Gabelstapler hielten sich in etwa die Waage.

In einer „Berechnung der Wirtschaftlichkeit solarer Trocknungsanlagen“ des Biomasseverbands OÖ (2014) wurden solare Trocknungsanlagen der Firma CONA einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen. Die Netto-Investitionskosten belaufen sich bei einer Anlage mit einer Jahrestrocknungsleistung von 1850 Srm auf € 47850,00 (in diesem Preis ist der Bau eines Gebäudes zur Installation der Anlage enthalten). Abzüglich einer Fördersumme von € 9570,00 hat die effektive Investition einen Wert von € 38280,00. Das heißt, dass mit Investitionskosten von € 26,00 pro Schüttraumeter Trocknungskapazität zu rechnen ist. Der Stromverbrauch wurde mit 3,1 kWh/Srm und € 0,61 pro Srm angenommen. Die Stromkosten können nur mit den mittleren Kosten für den Stromverbrauch von Österreich (€ 0,83 pro Srm) verglichen werden, da angenommen werden kann, dass in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lediglich Anlagen aus Oberösterreich untersucht wurden. Der Preisunterschied resultiert vermutlich daher, dass mit Durchschnittswerten verschiedener Jahre gerechnet wurde. Aber auch diese Anlage liegt im oberen Bereich der Herstellerangaben des Stromverbrauchs und unterstützt die Ergebnisse sowohl der Konzeptphase als auch der breiteren Studie.

Der Biomasseverband OÖ (2014) geht in seiner Berechnung von einem Arbeitsaufwand von 0,04 h pro Srm aus.

Die Manipulationskosten pro Stunde inklusive des Einsatzes eines Laders liegen bei € 60,00. Damit belaufen sich die Kosten des Arbeitsaufwandes auf € 2,10 pro Schüttraummeter. Diese Werte können durchaus den Ergebnissen der vorliegenden Studie gegenübergestellt werden. Darin beträgt der Arbeitsaufwand pro Schüttraummeter im Mittel 0,03 h, die Kosten für den Einsatz eines Teleskopladlers belaufen sich auf etwa € 50,00 pro Stunde und die durchschnittlichen Manipulationskosten liegen bei € 1,86 pro Srm.

Geht man von einer Nutzungsdauer der solaren Trocknungsanlage von 20 Jahren aus, hat sich diese, der Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Folge, nach elf Jahren amortisiert (BIOMASSEVERBAND OÖ, 2014).

Im Mittel wurde pro Schüttraummeter  $0,7 \pm 0,2$  MWh Wärmemenge erzeugt und durchschnittlich  $1,6 \pm 0,7$  Srm/MWh Material verbraucht. Bei höheren Laubholzanteilen konnten Wärmemengen von über 0,9 MWh/Srm erzeugt werden. Dies entspricht auch den Heizwerten verschiedener Baumarten aus Tabelle 6 bei einem Wassergehalt von 15 % (HAHN et al., 2014). Die Heizungsanlagen wurden fast ausnahmslos mit getrocknetem Hackgut betrieben, das zu etwa 60 % aus Nadelholz bestand. Der mittlere Materialbedarf pro Kessel belief sich auf 236,1 Srm pro Jahr.

Es gilt zu berücksichtigen, dass bei den Betreibern eines Nahwärmenetzes die Wärmemengenzähler normalerweise beim Abnehmer installiert sind und daher Leitungsverluste auftreten. Daraus kann eine gewisse Unschärfe, was die im Kessel erzeugte und beim Abnehmer ankommende Wärmemenge betrifft, resultieren. Wären diese direkt am Kessel installiert, könnten genauere Rückschlüsse zum Verhältnis von Material-Input und Wärme-Output gezogen werden. Auch wäre es von Vorteil gewesen, wenn mehr Betriebe einen Wärmemengenzähler installiert hätten, um somit konkretere Werte zu Materialverbrauch und Wärmemenge angeben zu können. Allem Anschein nach besteht in den meisten Fällen kein tieferes Interesse an detaillierteren Aufzeichnungen über den Energie- oder Materialverbrauch sowie die Leistung und das Heizverhalten der Anlagen. In der Konzeptphase konnte ebenfalls eine Wärmemenge von 0,8-0,9 MWh/Srm und sogar 1,1 MWh/Srm (Verfeuerung vorrangig von Laubholzhackgut) ermittelt werden (ERBER et al., 2015). Im Allgemeinen belegen diese Werte die Leistungsangabe der breiteren Studie. Die dennoch niedrigere Wärmeausbeute lässt sich durch einen geringeren Laubholzanteil, teilweise qualitativ schlechteres Material und höheren Endwassergehalt sowie einen niedrigeren Wirkungsgrad der Kessel erklären.

Der Kessel der Heizung spielt aufgrund seines Wirkungsgrades ebenso eine wichtige Rolle im Verhältnis Material-Input zu Wärme-Output wie das Heizverhalten. Das beruht auf der Sensitivität des Behaglichkeitsempfindens, der Materialgüte, dem Mischungsverhältnis von Laub- zu Nadelholz sowie dem Feuchtegehalt. Es gilt immer noch, je trockener das Hackgut, desto höher der Energiegehalt. Dennoch ist weder ein baujahr- noch ein herstellerabhängiger Trend der Heizungen auszumachen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Kunden mit ihren Trocknungsanlagen, dem erzeugten Produkt sowie den Erträgen aus den Heizungsanlagen oder (Nahwärme-)Heizwerken zufrieden sind.

Insgesamt kann dies so interpretiert werden, dass seitens der Betreiber wenig Motivation besteht, das System weiter zu verbessern, da es aus ihrer Sicht schon optimale Ergebnisse liefert.

Dies sollte allerdings nicht zu einem Stillstand verleiten, sondern in den heutigen schnelllebigen Zeiten, vor allem im Bereich der Technik, motivieren, sich weiter zu entwickeln und Potentiale auszuschöpfen.

Die Angaben aller Anlagenbetreiber erfolgten nach bestem Wissen und Gewissen sowie in allen Fällen frei- und bereitwillig. Nichtsdestotrotz ist mit einer gewissen Unsicherheit und Unschärfe der Angaben zu rechnen. Im Allgemeinen kann aber davon ausgegangen werden, dass die erhobenen Parameter in ihren Größenordnungen belastbare Ergebnisse darstellen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es, dass CONA-Trocknungssystem anhand seiner Trocknungsleistung, des Energieverbrauchs, des benötigten Manipulationsaufwandes des Trocknungsgutes sowie der Auswirkungen des getrockneten Hackgutes auf die damit betriebenen Heizungsanlagen zu beurteilen. Dazu wurde ein Erhebungsbogen erstellt und 30 Betreiber von solaren Hackguttrocknungen nach dem CONA-Prinzip in Bayern und Oberösterreich zu ihren Anlagen befragt, die Daten aufgenommen und ausgewertet.

Die durchschnittliche Anlagenausstattung der untersuchten Betriebe liegt bei einer verbauten Kollektorfläche von 72 m<sup>2</sup> sowie einem Fassungsvermögen von 70 Srm pro Trocknungsbox. Über die Hälfte der Anlagen verfügen über zwei Trocknungsboxen.

Rund 60 % der Trocknungsanlagen werden bäuerlich geführt und gut ein Viertel steht in Verbindung mit einer Gewerbeat. Dabei nutzen die meisten Betreiber die Anlagen für die Deckung des Eigenbedarfs sowie für die Produktion von trockenem Hackgut für den Verkauf. Gut die Hälfte bietet zudem Lohn Trocknung für andere Betriebe an und etwa ein Viertel betreibt zusätzlich mindestens ein (Nahwärme-)Heizwerk.

Das Rohmaterial für die Trocknungsanlagen stammte zur Hälfte aus dem eigenen Betrieb, der Rest des Bedarfs wurde hauptsächlich über Zukäufe gedeckt. Der Großteil des Rohmaterials bestand aus Waldrestholz, die verbleibende Menge deckten überwiegend die Sortimente Stammholz und Sägenebenprodukte ab. Fast zwei Drittel des gesamten Rohmaterials setzte sich aus Nadelholz zusammen und gut ein Viertel machte eine Mischung aus Laub- und Nadelholz aus.

Im Rahmen der Studie wurde auch unterschieden, ob das Rohmaterial vor der Weiterverarbeitung einer Vortrocknung unterzogen wurde oder nicht. In 60 % der Betriebe fand eine Vortrocknung statt. Dadurch konnte nachgewiesen werden, dass vorge trocknetes Material signifikant trockener ist als ohne Vortrocknung. Nach dem eigentlichen Trocknungsvorgang war kein signifikanter Unterschied mehr zu beobachten.

Die Trocknungsleistung eines Betriebes lag im Mittel bei 1500 Srm pro Jahr. Unter Berücksichtigung, dass die Mehrheit der Anlagen während der Wintermonate nicht in Betrieb war, ergab sich eine mittlere Trocknungsleistung von 17,0 Srm pro m<sup>2</sup> installierte Kollektorfläche. Dennoch unterlag diese einem hohen Schwankungsbereich (6,9-26,0 Srm/m<sup>2</sup>) aufgrund unterschiedlicher Nutzungsintensität, Anlagenauslastung sowie abiotischen Umweltfaktoren.

Letzteres hat im Rahmen der Jahreszeiten ebenfalls einen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Im Sommer (1,5 Wochen) trocknet das Hackgut doppelt so schnell wie im Frühjahr (3,0 Wochen) und im Herbst (3,1 Wochen). Dafür benötigt die Hackguttrocknung im Winter (5,6 Wochen) fast das Doppelte an Zeit. Nur gut ein Drittel der Betreiber nutzte die Anlage während dieser Jahreszeit.

Einige andere verwendeten sie als zusätzliches Hackschnitzzellager oder als Stellplatz für landwirtschaftliche Maschinen. Aus der Anlagenkapazität und der jährlich getrockneten Gesamtmenge ergibt sich eine theoretische Auslastung von 21 Chargen pro Jahr pro Betrieb.

Der Anlagenbetreiber hat mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 3,9 kWh/Srm zu rechnen und liegt damit im oberen Bereich der Herstellerangaben. Dabei weisen Trocknungsanlagen, die auch im Winter genutzt werden, keinen statistisch höheren Stromverbrauch auf.

Für die Manipulation des Hackgutes, die sich zumeist in drei Phasen aufteilt (Einlagern - Belüften/Wenden - Auslagern) war ein durchschnittlicher Zeitaufwand von 2,0 h anzusetzen. Hauptsächlich wurden Teleskoplader oder Traktoren mit Frontladern zum Manipulieren des Materials eingesetzt. Die Manipulationskosten beliefen sich im Mittel auf € 1,86 pro Srm.

Der mittlere Materialbedarf der von den Anlagenbetreibern betriebenen oder belieferten Heizungsanlagen lag bei 236,1 Srm pro Jahr pro Kessel. Dieses Material setzte sich fast ausschließlich aus getrocknetem Hackgut zusammen, das über die Hälfte aus Nadelholz bestand. Etwa ein Drittel der Heizungsanlagen war mit einem Wärmemengenzähler ausgestattet, sodass mittels dieser Daten, Rückschlüsse auf den Materialverbrauch und die Wärmemenge gezogen werden konnten. Der spezifische Materialverbrauch lag im Mittel bei 1,6 Srm/MWh und damit konnte eine Wärmemenge von durchschnittlich 0,7 MWh/Srm erzeugt werden. Geht man von einem Wassergehalt von 15 % sowie einer Mischung von Laub- und Nadelholz aus, so entspricht die produzierte Wärmemenge im Allgemeinen den Angaben der Literatur.

Eingangs wurde nach einer umweltverträglichen und nachhaltigen Trocknungsmethode verlangt, die unabhängig von Umwelteinflüssen, die Lagerfähigkeit des Hackgutes erhöht und das Risiko der Wiederbefeuchtung sowie des Trockenmasse- und Energiegehaltsverlustes senkt. Das System war bereits gefunden, die solare Trocknung. Diese ist mit dem Luftkollektorsystem mit stromsparenden Ventilatoren nach dem patentierten CONA-Prinzip eine der momentan fortschrittlichsten und effizientesten Methoden und die Erkenntnisse der vorliegenden Studie verhelfen nun zu einem aktuellen Stand des Wissens.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Trocknungsleistung dieses Systems nicht nur die maximal erzielbare Jahresmenge an getrockneten Hackschnitzeln ist. Vielmehr hat es auch zum (ökologischen) Vorteil, in Zeiten des sich abzeichnenden Klimawandels, mit einer kostenlosen und täglich verfügbaren Energiequelle den Nutzen anderer Ressourcen zu steigern. Trocknung mit Solarenergie macht Hackgut dauerhaft lagerfähig, vermindert die Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilzbildung, reduziert den Substanzverlust und erhöht den Heizwert pro Schüttraummeter. Das geringe Risiko der Wiederbefeuchtung stellt selbst bei Frost eine gleichbleibende Rieselfähigkeit sicher. Es kann ganzjährig getrocknet werden.



Die Witterungsbedingungen beeinflussen hauptsächlich die Trocknungsdauer des Systems.

Daneben ist der Energiebedarf heutiger solarer Trocknungsverfahren, im Gegensatz zu den zuletzt in der Literatur beschriebenen Verfahren, deutlich niedriger.

Die solare Hackguttrocknung nach dem CONA-System ist sowohl leistungsfähig als auch energie- und emissionssparend. Im Zuge einer fortschreitenden Erderwärmung sollte dieses System in der Gesellschaft mehr Präsenz und Anwendung finden.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

AKARSLAN, F. (2012): Solar-Energy Drying Systems. Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems. Department of Textile Engineering, Engineering and Architectural Faculty. Süleyman Demirel University. Isparta. Turkey. 3-5, 7 S.

AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE (2016): ÖNORM C 4005. Holzhackgut und Schredderholz für die energetische Verwertung in Anlagen mit einer Nenn-Wärmeleistung über 500kW. Anforderungen und Prüfbestimmungen. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut. Wien. 3-4 S.

AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE (2014): ÖNORM EN ISO 16559. Feste Biobrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut. Wien. 13, 16, 22, 25, 34, 38, 41-42 S.

AUSTRIAN STANDARDS INSTITUTE (2014): ÖNORM ISO EN 17225-4. Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 4: Klassifizierung von Holzhackschnitzeln. Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut. Wien. 6 S.

BÄRWOLFF, M., HERING T. (2012): Fremdenergiefreie Trocknungsvarianten für Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Trocknungsversuch mit 4 Varianten im Rahmen des Projektes AgroForstEnergie. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Dornburg. 3 S.

BIERMAYR, P. (2015): Erneuerbare Energien in Zahlen 2015. Die Entwicklung erneuerbarer Energien in Österreich Datenbasis 2014. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien. 30-31 S.

BIOMASSEVERBAND OÖ (o.J.): Infoblatt: Hackguttrocknung. Biomasseverband OÖ. Linz. 2 S.

BIOMASSEVERBAND OÖ (2014): Wirtschaftlichkeit solarer Trocknungsanlagen. Biomasseverband OÖ. Linz. 2-3 S.

BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz. Bergung, Lagerung und Trocknung. KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH. Münster-Hiltrup. 91 S.

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2009): Empfohlene Umrechnungsfaktoren für Energieholzsortimente bei Holz- bzw. Energiebilanzberechnungen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien. 3 S.

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2014): Holzströme in Österreich. Datengrundlage 2012. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien. 9-10 S.

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17225-1:2014. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin. 11, 16 S.

ERBER, G., KANZIAN, C., STAMPFER, K. (2015): Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. Scandinavian Journal of Forest Research. Vol. 31. Nr. 3. 294 S.

ERBER, G., KANZIAN C., STAMPFER K. (2012): Predicting Moisture Content in a Pine Logwood Pile for Energy Purposes. *Silva Fennica* 46(4). 556, 565 S.

ERBER, G., STAMPFER, K: (2015): Solare Trocknung - Strategie 2020. Zwischenbericht. Universität für Bodenkultur Wien. Department für Wald- und Bodenwissenschaften. Institut für Forsttechnik. Wien. 18-20 S.

ERIKSSON, A. (2011): Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. SLU, Swedish University of Agricultural Sciences. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences. Department of Energy and Technology. Uppsala. 1 S.

FOCKE, J., SCHLÖR, N., RENNER, A. (2014): InnoDry. Innovatives Verfahren zur Veredelung von Sägenebenprodukten zur Verbesserung der regionalen Absatzmöglichkeit und Versorgungssicherheit von Nah- und Fernwärmenetzen. Endbericht für das FuE Projekt. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg. 18, 27, 30-32, 35 S.

FOREST RESEARCH (2011): Woodchip Drying. Project Report. Forestry Commission Scotland. 7 S.

GOLSER, M., HADER F., PICHLER W. (2005): Energieholztrocknung. Endbericht. *Holzforschung Austria*. Wien. 15, 17, 19, 21, 35, 70-71, 75-78 S.

HAHN, J., SCHARDT, M., SCHULMEYER, F., MERGLER, F. (2014): Merkblatt 12 - Der Energieinhalt von Holz. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Freising. 2-3 S.

HELIN, M. (2005): Wood as a fuel & drying of wood chips. North Karelia Polytechnic. Joensuu. Finland. 5, 14 S.

KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 286-290, 315-318, 321, 323, 325-326, 348, 356, 368, 372-373 S.

MASCHINENRING (o.J.): Maschinenring Klagenfurt Agrarpreisliste 2015/2016. Maschinenring Klagenfurt. 34 S.

NIEMZ, P. (2006): Holzphysik. Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. III-5 S.

ÖSTERREICHISCHER BIOMASSEVERBAND (2016): Basisdaten 2016. Bioenergie. Österreichischer Biomasseverband. Wien. 18-19, 48-49 S.

ROUTA, J., KOLSTRÖM, M., ROUTSALAINEN, J., SIKANEN, L. (2015): Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by constant weight monitoring. *International Journal of Forest Engineering* 26. 71-72, 80-82 S.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. 48 S.

TRÜBSWETTER T. (2009): Holztrocknung. Verfahren zur Trocknung von Schnittholz – Planung von Trocknungsanlagen. Fachbuchverlag Leipzig. Carl Hanser Verlag München. 101 S.

VERSCHEURE, P. (1998): Energiegehalt von Hackschnitzeln. Überblick und Anleitung zur Bestimmung. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Abteilung Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung. Freiburg i. Br. 2-6, 14 S.

VOGT, R., FEHRENBACH, H. (2010): Vergleichende ökologische Bewertung der technischen Trocknung von Holzhackschnitzeln. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. 8 S.

WAGENFÜHR, A., SCHOLZ, F. (2008): Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München. 77-80; 432 S.

WEINGARTMANN, H. (1991): Hackguttrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik. Wien. 17, 32-33, 68-70 S.

WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Technische Universität München. 22 S.

## 7.1 Internetquellen:

CONA. Solare Trocknung. Hackschnitzeltrocknung. Verfügbar in: <http://www.cona.at/index.php?id=hackguttrocknung&L=0>. [Abfrage am 24.05.2016]

GOOGLE MAPS. Verfügbar in: <https://www.google.at/maps/@48.2254007,12.8524381,161512m/data=!3m1!1e3>. [Abfrage am 15.08.2015]

ÖKL - ÖSTERREICHISCHES KURATORIUM FÜR LANDTECHNIK UND LANDENTWICKLUNG. ÖKL-Richtwerte. Richtwerte online. Gruppe 01: Traktoren und Zubehör. Verfügbar in: <http://oekl.at/richtwerte-online/?a=Gruppe%2001:%20Traktoren%20und%20Zubeh%C3%B6r%20&b=2>. [Abfrage am 10.05.2016]

STATISTIK AUSTRIA. Energie, Umwelt. Energie. Preise, Steuern. Jahresdurchschnittspreise und -steuern 2014 für die wichtigsten Energieträger. Verfügbar in: [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/preise\\_steuern/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/preise_steuern/index.html). [Abfrage am 10.05.2016]

## 8. ANHANG

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arten der Wasserbindung im Holz (nach BRUSCHE, 1983).....	14
Abbildung 2: Hysterese-Effekt (NIEMZ, 2006).....	15
Abbildung 3: Gleichgewichtsfeuchte von Holz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft bei konstanter Temperatur (KALTSCHMITT et al., 2009). ....	15
Abbildung 4: h-x-Diagramm nach Mollier zeigt die Abhängigkeiten von Temperatur, Wassergehalt, relativer Luftfeuchtigkeit, Energiegehalt der Luft zur Bestimmung der Wasseraufnahme der Trocknungsluft (KALTSCHMITT et al., 2009). ....	16
Abbildung 5: Spezifischer Strömungswiderstand verschiedener Hackgutfraktionen in Abhängigkeit der Luft- bzw. Strömungsgeschwindigkeit (FOCKE et al., 2014). ....	17
Abbildung 6: Verfügbare Systeme für die Hackschnitzeltrocknung mit besonderem Augenmerk auf die Verfahren unter der Verwendung von Sonnenenergie (nach BÄRWOLFF et al., 2012). ....	20
Abbildung 7: Dach mit integrierten und verglasten Solarluftkollektoren, im besten Falle nach Süden ausgerichtet.....	23
Abbildung 8: Transport der erwärmten Luft durch isolierte Luftschächte (links) bis zur Mischbox. Dort erfolgt die Vermischung mit der Außenluft und das Einblasen mit Hilfe der Ventilatoren (rechts) in die Trocknungsbox. ....	24
Abbildung 9: Trocknungsbox mit ganzflächigem Belüftungsboden, angefüllt mit Hackschnitzeln. ....	24
Abbildung 10: Kiemenartig perforierter Schrägrost, installiert in einer Trocknungsbox im natürlichen Schüttwinkel.....	25
Abbildung 11: Schematische und schrittweise Darstellung des Prinzips der solaren Hackguttrocknung nach dem CONA-System. ....	26
Abbildung 12: CONA Firmenlogo (CONA, 2016).....	27
Abbildung 13: Übersicht über die Lage der Betriebe in Bayern und Oberösterreich (GOOGLE MAPS, o. J.) ....	30
Abbildung 14: Der Betriebshintergrund der untersuchten Anlagen ist mehrheitlich rein bäuerlich. Rein gewerbliche oder gemischte Betriebsformen waren seltener. ....	31
Abbildung 15: Nutzung fast aller Anlagen zur Deckung des Eigenbedarfs sowie zum Verkauf des getrockneten Hackgutes. Ebenfalls Verwendung für Lohntrocknung von circa der Hälfte und Betrieb eines oder mehrerer Heizwerke von rund einem Drittel der Betriebe. ....	31
Abbildung 16: Skizze Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung.....	33

Abbildung 17: Das Rohmaterial stammt größtenteils aus dem eigenen Betrieb bzw. aus Zukäufen (oben). Am häufigsten wurde Waldrestholz für die Herstellung von Hackschnitzeln verwendet (unten links). Diese bestanden meistens aus reinem Nadelholz oder einer Mischung aus Laub- und Nadelholz (unten rechts).....	34
Abbildung 18: Der Anfangswassergehalt von vorgetrocknetem und nicht vorgetrocknetem Material unterschied sich signifikant. Nach der solaren Trocknung war kein Unterschied mehr feststellbar. ....	35
Abbildung 19: Die am häufigsten verwendeten Manipulationsmittel für das Hackgut sind Teleskoplader (oben) und Traktoren mit Frontladern (unten links). Weniger oft kommen Hub-/Gabelstapler (unten rechts) zum Einsatz. Für das Einlagern, Belüften und/oder Wenden sowie Auslagern ist ein Zeitaufwand von knapp zwei Stunden pro Charge anzusetzen.....	37

## 8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verhältnis Werte Holzfeuchte zu Werte Wassergehalt (nach BIOMASSEVERBAND OÖ, o.J.).....	9
Tabelle 2: Umrechnungsfaktoren für Raummaße bezogen auf die unterschiedlichen Grundsortimente (nach HAHN et al., 2014).....	9
Tabelle 3: Richtwerte für Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt der Holzbrennstoffe (nach VOGT et al., 2010). ....	10
Tabelle 4: Richtwerte für Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt eines Schüttraumeters Hackgut (Trockenmassegewicht 180 kg) (nach HELIN, 2005). ....	11
Tabelle 5: Heizwerte bei unterschiedlichem Wassergehalt von Nadel- und Laubholz (nach HAHN et al., 2014). ....	11
Tabelle 6: Heizwerte bei unterschiedlichen Wassergehalten verschiedener Baumarten (nach HAHN et al., 2014).....	12
Tabelle 7: Auslastung der Anlage sowie Trocknungsdauer für eine Charge aufgeteilt nach Jahreszeiten. ....	36
Tabelle 8: Verwendete Kesselmarken, ihre Häufigkeit und Leistung.....	38
Tabelle 9: Materialinputs und Wärmemengenoutputs der betrachteten Heizungsanlagen. ....	39

### 8.3 Erhebungsbogen - Solare Hackguttrocknung

#### Betrieb - Allgemeines

<b>Name</b>		<b>Lfd. Nr.</b>	
<b>Adresse</b>			
<b>Betriebshintergrund</b>	<input type="checkbox"/> gewerblich <input type="checkbox"/> bäuerlich Einzelbetrieb <input type="checkbox"/> bäuerlich kooperativ <input type="checkbox"/> _____		
<b>Wirtschaftsart</b>	<input type="checkbox"/> Lohnrocknung <input type="checkbox"/> Verkauf Hackgut <input type="checkbox"/> Betrieb Heizwerk <input type="checkbox"/> _____		
<b>Anzahl Trocknungsboxen [n]</b>			
<b>Kollektorfläche gesamt [m<sup>2</sup>]</b>			

#### Anlagenausstattung

	<b>Box A</b>	<b>Box B</b>	<b>Box C</b>
<b>Baujahr [JJJJ]</b>			
<b>Kollektorfläche [m<sup>2</sup>]</b>			
<b>Fassungsvermögen [Srm/m<sup>3</sup>]</b>			



## Materialfluss Wald-Trocknung-Heizung

Bei mehreren Wegen ist der am häufigsten vorkommende zu dokumentieren!

Materialherkunft	Ernte	Hacken	Hackort	Transport zur Trocknung	Transportmittel	Lager	Transport zur Heizung	Transportmittel
Betrieb	Eigenregie	Eigenregie	Forststraße	Eigenregie	Traktor Hänger +	Halle	Eigenregie	Traktor Hänger +
Zukauf	Unternehmer	Unternehmer	Lagerplatz	Unternehmer	LKW	Überdacht	Unternehmer	LKW
WWG*	WWG*	WWG*	Trocknung	WWG*	Sonstiges	Offen	WWG*	Sonstiges
Sonstiges	Sonstiges	Sonstiges	Sonstiges	Sonstiges		Sonstiges	Selbstabholung Kunde	
							Sonstiges	

\* WWG (Waldwirtschaftsgemeinschaft) wird synonym für jede Form der bäuerlichen Kooperation (Nachbarschaftshilfe, Genossenschaft) verwendet

## Material und Hackguttrocknung

<b>Materialklassifizierung</b> 1. Stelle (1=Vollbäume, 2=Stammholz, 3=Waldrestholz, 4=Stümpfe) 2. Stelle (1=Laubholz, 2=Nadelholz, 3=Mischung) 3. Stelle (Anteil an Gesamtmenge nach 1. Stelle)		
<b>Natürliche Vortrocknung länger als 1 Monat</b>		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
<b>Wassergehalt beim Hacken [%] (<math>\emptyset</math>-Wert)</b>		
<b>Wassergehalt nach der Trocknung [%] (<math>\emptyset</math>-Wert)</b>		
<b>Getrocknete Menge pro Jahr [Srm/a]</b>		
<b>Betrieb der Anlage nach Jahreszeiten</b>		F    S    H    W <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Trocknungsdauer pro Charge (Wochen)</b>	<b>Frühjahr</b>	<input type="text"/>
	<b>Herbst</b>	<input type="text"/>
	<b>Sommer</b>	<input type="text"/>
	<b>Winter</b>	<input type="text"/>
<b>Stromverbrauch pro Jahr [kWh/a]</b>		
<b>Manipulationsmittel</b> 1=Traktor mit Frontlader, 2=Lader, 3=Sonstiges		
<b>Manipulationsaufwand pro Charge [h]</b>		<b>Ein- und Auslagern</b> <input type="text"/>
		<b>Belüften/Wenden</b> <input type="text"/>
Falls keine Trennung möglich: <b>Manipulationsaufwand gesamt pro Charge [h]</b>		
<b>Materialherkunft [Anteil %]</b>		<b>Eigener Betrieb</b> <input type="text"/>
		<b>Zukauf, WWG, etc.</b> <input type="text"/>
<b>Materialkosten Zukauf [€/Fm bzw. €/Srm]</b>		

**Anmerkungen****Heizungsausstattung (fakultativ; eigene Heizung, betriebene und versorgte Heizungen)**

	Kessel A	Kessel B	Kessel C
<b>Zuordnung Kessel</b>	<input type="checkbox"/> eigener K. <input type="checkbox"/> betriebener K. <input type="checkbox"/> Kunden-K.	<input type="checkbox"/> eigener K. <input type="checkbox"/> betriebener K. <input type="checkbox"/> Kunden-K.	<input type="checkbox"/> eigener K. <input type="checkbox"/> betriebener K. <input type="checkbox"/> Kunden-K.
<b>Kesselmarke und Kesseltyp</b>			
<b>Baujahr [JJJJ]</b>			
<b>Leistung [kW]</b>			
<b>Wärmemengenzähler</b>	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
<b>Erfahrungsgemäß für getrocknete Hackschnitzel sehr gut geeignete Kessel (eigene und Kunden):</b>			
<b>Anmerkungen</b>			

Weitere Kessel		Leistung (kW)
astebo GmbH		
Biotech Energietechnik GmbH		
Walter Bösch KG		
Robert Bosch AG – Bosch Thermo- technik		
Anton Eder Ges.m.b.H.		
Elco Austria GmbH		
ETA Heiztechnik GmbH		
Fröling Heizkessel- und Behälter- bau Ges.m.b.H.		
Guntamatic Heiztechnik GmbH		
Hargassner GmbH		
Herz Energietechnik GmbH		
Hoval Gesellschaft mbH		
KWB – Kraft und Wärme aus Bio- masse GmbH		
Lindner & Sommerauer Heizanlagenbau		
ÖkoFen Forschungs- und Entwick- lungsgesellschaft m.b.H.		
Olymp – OEM Werke GmbH		
Saunier Duval		
SenerTec		
SHT Heiztechnik aus Salzburg GmbH		
TGV – Technische Geräte Vertriebs GmbH		
Vaillant Group Austria GmbH		
Viessmann Ges.m.b.H.		
Windhager Zentralheizung GmbH		
Wolf Klima- und Heiztechnik GmbH		
Sonstige		

<b>Kessel A</b>					
<b>Jahr</b>	20__	20__	20__	20__	20__
<b>Materialbedarf [Srm]</b>					
<b>LH zu NH [% zu %]</b>					
<b>Getrocknetes Hackgut [%]</b>					
<b>Wärmemenge [MWh]</b>					
<b>Kessel B</b>					
<b>Jahr</b>	20__	20__	20__	20__	20__
<b>Materialbedarf [Srm]</b>					
<b>LH zu NH [% zu %]</b>					
<b>Getrocknetes Hackgut [%]</b>					
<b>Wärmemenge [MWh]</b>					
<b>Kessel C</b>					
<b>Jahr</b>	20__	20__	20__	20__	20__
<b>Materialbedarf [Srm]</b>					
<b>LH zu NH [% zu %]</b>					
<b>Getrocknetes Hackgut [%]</b>					
<b>Wärmemenge [MWh]</b>					

## Offene Fragen zu Verbesserungspotential und Kundenwünschen

<b>Ist Ihre Anlage voll ausgelastet und denken Sie an Erweiterung?</b>		
<b>Kommt für Sie die Verwendung von Trocknungsanlagen nach diesem Prinzip auch für andere Güter (Heu, Getreide, Früchte usw.) in Betracht?</b>		
<b>Haben Sie Interesse an Schnittholz- oder Brennholztrocknung?</b>		
<b>Bei Großanlagen (Sägewerke): Interesse an Hackschnitzelverkauf + Erweiterung Pelletrocknung/-verkauf?</b>		
<b>Neue Steuerung – was halten Sie von diesen Funktionen?</b>	<b>+</b>	<b>-</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intuitive Steuerung über Touchdisplay</li> <li>• Visualisierung des Trocknungsvorgangs</li> <li>• Individuelle Programmierung Lüfter/Kollektor (Schwellenwerte, Laufzeit)</li> <li>• Chargendokumentation (Kunde, Material, Stromverbrauch, Trocknungsdauer etc.)</li> </ul>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Weitere Verbesserungsvorschläge/Wünsche/Vorzüge/Änderungswünsche des Kunden?</b>		
<b>Kommen immer wieder Interessenten/Besucher/Exkursionen zur Anlage? Ist eine Schautafel zur Erläuterung des Prinzips gewünscht?</b>		
<b>Ist ein Zusammenschluss von weiteren Interessenten/Bauern/Nachbarn in der Umgebung zukünftig geplant?</b>		

